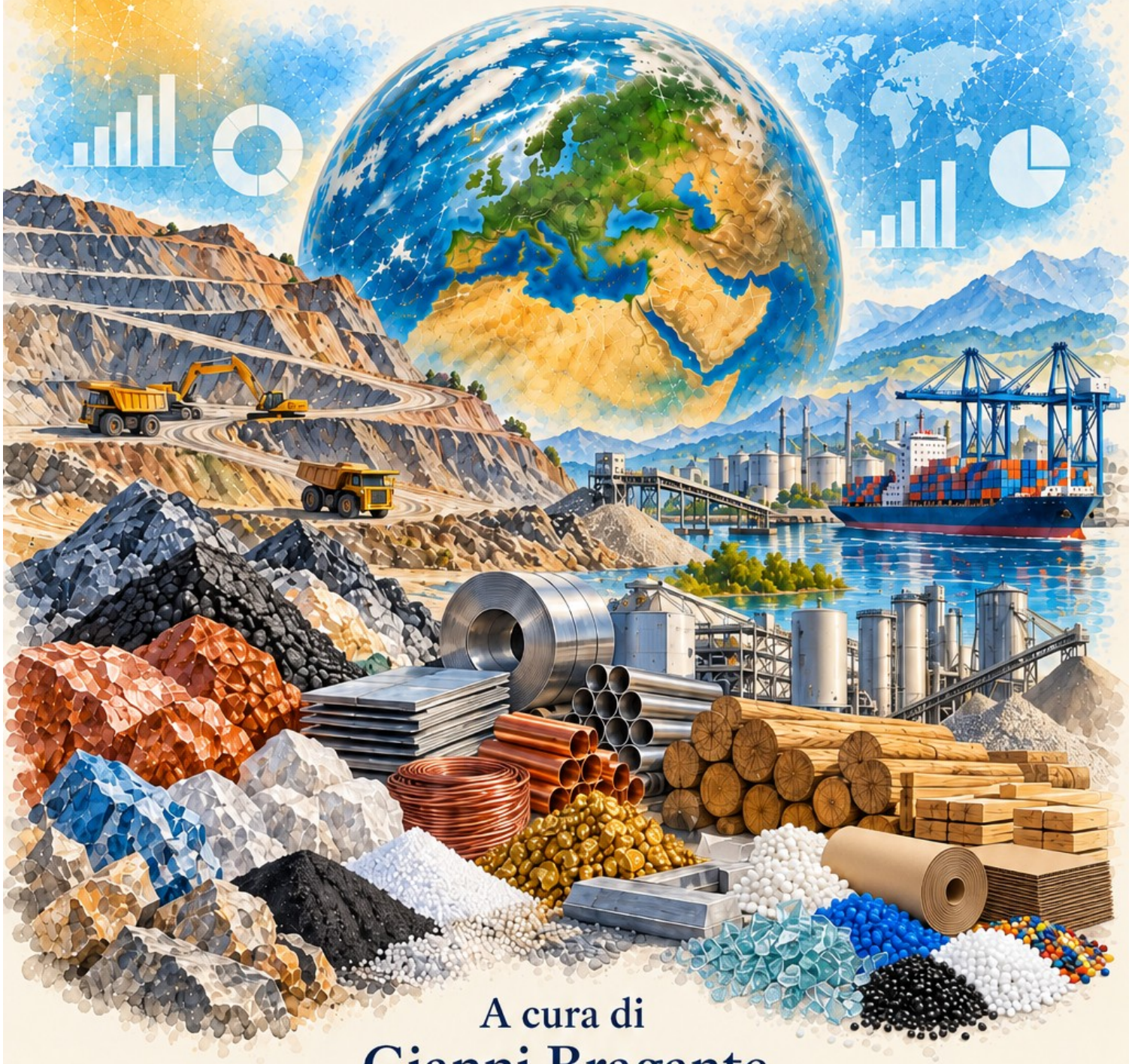
Grandi Numeri, Grandi Impatti

VOLUME 3

MATERIE PRIME



A cura di
Gianni Bragante

Grandi Numeri, Grandi Impatti

Volume 3: Materie prime

A cura di Gianni Bragante

Edizione: 7 ottobre 2026, ore 19:12

© 2026 Gianni Bragante

gngi.it

Licenza

Quest'opera è distribuita con licenza **Creative Commons Attribuzione – NonCommerciale – NonOpereDerivate 4.0 Internazionale (CC BY-NC-ND 4.0).**

È consentito copiare e redistribuire liberamente l'opera, con qualsiasi mezzo e formato, a condizione che:

- sia attribuita correttamente a **Gianni Bragante**;
- non venga utilizzata per scopi commerciali;
- l'opera venga redistribuita nella sua forma originale, senza modifiche o adattamenti.

La licenza non implica che l'autore approvi o sostenga chi redistribuisce l'opera o l'uso che ne viene fatto.

Testo completo e condizioni della licenza:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

Indice

01.01 Prefazione....1

01.02 Metodologia: come vengono costruiti i contenuti....4

Un progetto editoriale assistito dall'intelligenza artificiale....4

Il ruolo del curatore....5

Come nasce un capitolo....5

Definizione del perimetro....5

Un dossier prima della bozza....5

La verifica prima della scrittura....6

La stesura....7

Controlli, revisione indipendente e lettura autoriale....7

Le fonti e ciò che dimostrano....8

I principali limiti....9

Come leggere il progetto....9

01.03 Costi ed economia: la cifra non è ancora il significato....10

La stessa moneta, numeri diversi....10

Prezzo, costo e spesa....10

Fatturato, valore aggiunto e utile....10

Investimento, manutenzione e costo evitato....11

L'economia non è soltanto denaro....11

Produzione, capacità e attività....11

Risorse mobilitate e filiere....11

Occupazione diretta, indiretta e indotta....11

Il tempo cambia il numero....12

Flussi e consistenze....12

Nominale e reale....12

Una tantum o ogni anno....12

Dalla cifra alla scala....12

Un milione di euro....13

Un miliardo di euro....13

Cento miliardi e mille miliardi....13

L'Italia come punto di riferimento....13

Chi paga, chi riceve, chi rischia....14
Cinque domande prima di interpretare una cifra....14
Che cosa misura?....14
Di quale periodo parla?....14
Qual è il perimetro?....14
Con che cosa viene confrontata?....14
Chi è coinvolto?....15
La cifra diventa una storia....15
Fonti e riferimenti....15
01.04 Ambiente e clima: ciò che emettiamo, consumiamo e trasformiamo....16
Clima e qualità dell'aria: due problemi collegati, ma diversi....16
La CO_2 e il grande accumulo....16
Che cos'è e da dove viene....16
Perché conta la somma nel tempo....17
Una tonnellata non ha un indirizzo....17
CO_2, carbonio e CO_2 equivalente....17
Gli altri gas serra....17
Metano....17
Protossido di azoto e gas fluorurati....18
Gli inquinanti che respiriamo....18
Particolato: PM10 e PM2,5....18
Ossidi di azoto....18
Anidride solforosa....18
Ozono: utile in alto, dannoso vicino al suolo....19
Ammoniaca, composti organici volatili e monossido di carbonio....19
L'ambiente non è soltanto atmosfera....19
Energia e materie prime....19
Acqua: prelievo, consumo e qualità....20
Territorio e suolo....20
Ecosistemi e biodiversità....20
Rifiuti e circolarità....20
Misurare senza perdere il perimetro....21
Emissioni e concentrazioni....21
Territoriale o incorporato nei consumi....21
Totale o intensità....21

I confini del ciclo di vita....21
L'Italia come paesaggio di numeri....22
Il riferimento climatico principale....22
Fonti e riferimenti....23
01.05 Salute, persone e società: quando i numeri diventano persone....25
Persone, eventi e popolazioni....25
Una persona non è una prestazione....25
Il denominatore racconta la domanda....25
Incidenza e prevalenza....26
La media può nascondere il mondo....26
Salute: non tutti gli esiti hanno lo stesso peso....26
Rischio assoluto e rischio relativo....26
Durata, gravità e anni di vita....26
Associazione non significa causa....27
Lavoro: oltre il numero degli occupati....27
Povertà, accesso e capacità reale....27
Condizioni di vita e comunità....28
L'Italia come punto di riferimento umano....28
Chi beneficia e chi sopporta il costo....29
Dietro ogni totale....29
Fonti e riferimenti....29
04.01 – Panoramica del settore....31
L'economia ha un peso....31
Non tutte le tonnellate raccontano la stessa storia....32
Una stessa materia vive su mappe diverse....33
La materia invisibile: frontiere fisiche e impronta materiale....33
Il prezzo racconta solo una parte....34
Il materiale secondario arriva dopo....35
Una mappa per leggere il sistema....36
Fonti e riferimenti....36
04.02 – Italia....38
La materia estratta....38
La geografia del sottosuolo....39
La trasformazione non rivela l'origine....40

Che cosa significa autonomia materiale....42
Fonti e riferimenti....43
04.03 – Europa....44
La base materiale europea....44
Dove comincia la dipendenza....45
La materia oltre la frontiera....46
Un impianto, più origini....46
Le strozzature cambiano con la fase....47
Il contributo della materia recuperata....48
Fonti e riferimenti....49
04.04 – Il mondo....50
La materia mondiale ha forme diverse....50
La bauxite tra riserve e trasformazione....51
Il rame aggiunge la mappa dell'uso....52
Un corridoio visto dalla dogana....53
Dalla frontiera alla domanda finale....54
Più mappe per leggere lo stesso sistema....54
Fonti e riferimenti....55
04.05 – Dalla risorsa al materiale....56
Conoscere una risorsa....56
Il tempo prima della prima consegna....58
Che cosa entra nel bilancio....60
Separare significa distribuire la materia....63
Il luogo di produzione conta....65
Quando il materiale diventa un prodotto commerciabile....68
Il materiale che ritorna....69
La misura che serve....71
Fonti e riferimenti....71
04.06 – Sabbia, ghiaia e pietra....73
Il deposito utile ha una geografia precisa....73
Dal materiale grezzo alle pezzature....75
Quando il nome «sabbia» nasconde un'altra materia prima....77
Nella pietra ornamentale conta ciò che resta intero....78
Anche un deposito marino deve diventare un prodotto....80

Il costo del viaggio ridisegna l'offerta....81
Il territorio resta dentro ogni tonnellata....83
Fonti e riferimenti....84
04.07 – Calcare, argilla, gesso e cemento....87
La roccia non è ancora la ricetta....87
Nel forno la materia cambia identità....89
Il clinker diventa una famiglia di cementi....91
I passaggi industriali possono trovarsi in luoghi diversi....94
Quattro interventi, quattro bersagli....96
Il legante è il risultato di una filiera....98
Fonti e riferimenti....98
04.08 – Vetro.... 100
La ricetta precede la fusione....100
Dentro la massa fusa....102
La forma decide quali difetti contano....103
Quale rottame può tornare nel forno....105
Il forno lega energia e tempo....107
Una geografia fatta di prodotti e impianti....109
Fonti e riferimenti....110
04.09 – Sale....112
Il salgemma si estrae come roccia....112
La salamoia può restare liquida....113
La salina usa superficie e stagioni....115
La specifica decide quale sale si può vendere....117
Quantità e valore cambiano con la forma....118
Acqua ed energia seguono il processo....121
La consegna utile....122
Fonti e riferimenti....123
04.10 – Fosfati, potassa e fertilizzanti....125
Tre nutrienti con funzioni diverse....125
Due risorse minerali seguono strade differenti....126
Dal fosfato all'acido....127
Prodotti semplici, composti e miscele....129
La filiera può attraversare più frontiere....130

Riserve e produzione disegnano mappe diverse....131
La potassa e l'equivalente K_2O....132
La dipendenza europea cambia con la materia....133
Dal prodotto al contenuto nutritivo....135
La disponibilità è una catena....136
Fonti e riferimenti....137
04.11 – Ferro e acciaio....139
Il ferro nella roccia....139
Preparare la carica....140
La via dell'altoforno....141
Riduzione diretta e forno elettrico....143
Il limite della qualità del rottame....144
Dall'acciaio liquido alla forma....145
Dove si estrae, dove si produce....146
Costi fisici e cambiamento industriale....148
Fonti e riferimenti....150
04.12 – Bauxite e alluminio....152
La roccia e il tenore....152
L'allumina e il residuo....153
Il metallo nella cella....155
Dal metallo liquido alla forma vendibile....156
La seconda vita del metallo....158
Tre mappe per una filiera....159
La scala europea e il caso italiano....160
Il costo delle trasformazioni....162
Fonti e riferimenti....164
04.13 – Rame....167
Il rame nella roccia....167
Concentrare prima di fondere....168
Dal concentrato all'anodo....169
Due strade verso il catodo....171
Rottame e prime forme commerciali....172
Le geografie della filiera mondiale....174
Europa e Italia nella catena....175

Il costo delle trasformazioni....177
Fonti e riferimenti....178
04.14 – Piombo, zinco e stagno....181
Tre metalli nella roccia....181
Separare prima di raffinare....182
Il piombo dalla galena al metallo....183
Lo zinco: arrostire, sciogliere, depositare....185
Lo stagno: cassiterite e fusione....186
La seconda vita dei tre metalli....188
Miniere, raffinerie e scambi su mappe diverse....189
Prezzi, investimenti e vincoli futuri....191
Fonti e riferimenti....193
04.15 – Litio, nichel e cobalto....195
Tre metalli sotto la stessa etichetta....195
Il litio dall'acquifero e dalla roccia....196
Il nichel sceglie la via nella roccia....198
Il cobalto dipende da un'altra filiera....199
La forma commerciale determina il mercato....201
Quando il materiale ritorna....202
Tre mappe mondiali e il vuoto europeo....203
I colli di bottiglia si spostano....205
Fonti e riferimenti....207
04.16 – Terre rare....209
Una famiglia, molti mercati....209
Il giacimento decide la rotta....210
Aprire il minerale....211
Separare elementi quasi simili....213
Il prodotto acquistato non è terra rara generica....214
La materia che ritorna....216
Le mappe della miniera e della separazione....217
Europa e Italia: progetti, non tonnellate già prodotte....218
Dove si sposta il collo di bottiglia....220
Fonti e riferimenti....221
04.17 – Metalli per leghe e applicazioni speciali....223

Una proprietà richiede una forma precisa....223
Il vincolo del forno....224
Il vincolo del coprodotto....226
Il vincolo della trasformazione chimica....228
Il vincolo della specifica e il bivio dei mercati....229
La dipendenza cambia lungo la catena....231
Fonti e riferimenti....234
04.18 – Oro, argento e metalli del gruppo del platino....237
Quando pochi grammi devono uscire dalla roccia....237
Quando l'estrazione segue un altro metallo....240
Separare elementi vicini, distinguere geografie lontane....242
Il metallo che ritorna....244
La forma che si può acquistare....246
Fonti e riferimenti....247
04.19 – Grafite, silicio e materiali ad alta purezza....250
La selezione comincia nella roccia....250
Il forno trasforma, ma non nello stesso modo....252
La purezza diventa un processo distinto....255
La capacità ha una geografia diversa dalla miniera....257
La forma acquistabile e la posizione italiana....258
Dove nasce la disponibilità....260
Fonti e riferimenti....261
04.20 – Petrolio e gas come materie prime....263
Separare una carica dal petrolio e dal gas....263
La carica decide il portafoglio del forno....265
Quando una molecola dipende da un altro prodotto....267
Il metano fra reagente e combustibile....270
La capacità ha una geografia, la molecola un punto di consegna....271
La materia prima è la molecola consegnabile....274
Fonti e riferimenti....274
04.21 – Elio....276
La concentrazione deve incontrare un flusso....276
La separazione produce una qualità....278
Il freddo diventa infrastruttura....280

Pochi poli e molti punti in cui manca il prodotto....282
L'ultimo anello è trattenere il gas....285
La disponibilità si misura alla consegna....286
Fonti e riferimenti....287
04.22 – La chimica di base....288
Una reazione vincola più mercati....288
Separare una miscela e distribuire più gas....290
Reagente ed energia nella stessa fabbrica....291
Tre acidi e tre provenienze....295
Misurare il prodotto al punto di consegna....297
La sostanza acquistabile....299
Fonti e riferimenti....299
04.23 – Plastiche e resine....301
La continuità prima del reattore....301
Il reattore impone separazioni....303
Il grado si costruisce dopo la reazione....305
Il ritorno deve superare la stessa prova....308
La geografia arriva al punto di consegna....310
Fonti e riferimenti....312
04.24 – Gomma naturale e sintetica....314
Il tempo dell'albero....314
Il lattice deve diventare una partita....316
La sintesi sposta il vincolo....319
La mescola cambia il materiale e il denominatore....321
Il ritorno supera un'altra prova....323
La qualifica del lotto....325
Fonti e riferimenti....327
04.25 – Fibre tecniche e materiali compositi....329
La continuità si costruisce....329
La superficie decide l’incontro....332
La direzione cambia la prestazione....334
Un materiale pronto ha anche un tempo....336
La produzione si misura a un punto preciso....337
Il ritorno cambia il rinforzo....339

Fonti e riferimenti....341
04.26 – Legno e semilavorati....343
Il volume deve diventare un assortimento....343
Il taglio decide la forma e i coprodotti....345
Togliere acqua significa controllare il materiale....347
Ricomporre richiede un'altra specifica....349
La materia recuperata passa dal controllo d'ingresso....352
Il lotto si misura alla consegna....353
Dalla risorsa alla fornitura....355
Fonti e riferimenti....356
04.27 – Cellulosa, carta e cartone....358
Separare le fibre senza perdere la funzione....358
La massa separata deve trovare un circuito....360
Recuperare carta significa rifare una materia prima....362
Costruire il foglio vuol dire governare l'acqua....364
Un circuito chiuso resta un impianto con scambi....366
La qualità rende possibile la consegna....368
La disponibilità è una prestazione verificabile....370
Fonti e riferimenti....370
04.28 – Mercati e prezzi delle materie prime....372
Il prezzo comincia dalla specifica....372
Un riferimento rende confrontabili gli scambi....374
Il metallo contenuto non è il lotto pagato....375
La quotazione deve arrivare alla fabbrica....377
La disponibilità ha una data....379
Il contratto distribuisce il rischio....381
L'offerta risponde con un altro calendario....383
Fonti e riferimenti....385
04.29 – Trasporto e commercio dei materiali....389
Il materiale determina il viaggio....389
Una catena di mezzi e passaggi....391
Il porto deve conservare e far uscire il carico....393
Dalla partita grande al ritmo della fabbrica....394
Che cosa si paga per arrivare....396

Il materiale fermo impegna capitale....398
Quando il percorso si allunga....399
La disponibilità si costruisce lungo la catena....401
Fonti e riferimenti....401
04.30 – Materie prime critiche e dipendenze strategiche....404
Critica per chi, strategica per che cosa....404
Quali materie sono critiche e a che cosa servono....406
La dipendenza cambia lungo la filiera....410
Una miniera non consegna un materiale qualificato....412
Come un'interruzione attraversa la catena....413
Costruire un'alternativa richiede tempo....415
Proteggersi oggi e cambiare domani....417
Obiettivi europei e progetti italiani....419
Fonti e riferimenti....420
04.31 – Materie prime secondarie....423
La quantità cambia lungo il percorso....423
Il forno compra una qualità....425
Il percorso legale e la prestazione sono prove diverse....427
La destinazione prepara il ciclo successivo....429
Il prezzo riguarda la quantità accettata....431
Che cosa dicono i numeri italiani ed europei....433
La sostituzione va dimostrata....434
Fonti e riferimenti....436
04.32 – Sostituzione ed efficienza materiale....438
Il confronto riguarda il servizio....438
La geometria governa scarti e ingombri....440
La durata deve diventare uso....442
Cambiare materiale richiede una prova....444
Il totale dipende anche dalla domanda....445
Un rapporto migliore non racconta tutto....448
Fonti e riferimenti....450
04.33 – Il futuro delle materie prime....452
Più materia e materiali diversi....452
Il divario riguarda l'offerta realizzabile....453

Dalla scoperta alla produzione possono passare molti anni....454
Il capitale finanzia anche il mantenimento degli impianti....456
L'estrazione diretta del litio ha già una produzione industriale....457
Il riciclo riceve materiali da un altro tempo....458
Portovesme fra calendario annunciato e avanzamento del progetto....459
Fonti e riferimenti....461

01.01 Prefazione

Grandi Numeri, Grandi Impatti è un progetto editoriale divulgativo che prova a raccontare il mondo attraverso i numeri.

Ogni giorno sentiamo parlare di miliardi di euro, milioni di tonnellate di anidride carbonica, consumi energetici, produzione alimentare, trasporti, risorse naturali, popolazione e sanità. Sono numeri enormi, difficili da immaginare e ancora più difficili da mettere in relazione tra loro. La precisione con cui vengono riportati non basta, da sola, a renderli comprensibili.

Il salto fra un milione e un miliardo mostra quanto facilmente l'intuizione possa ingannarci. Un milione di secondi dura 11 giorni, 13 ore, 46 minuti e 40 secondi. Un miliardo di secondi dura circa 31 anni e 8 mesi. Le due parole sembrano appartenere alla stessa famiglia dei «numeri molto grandi», ma il miliardo è mille volte il milione.

La difficoltà, però, non scompare trovando un paragone sorprendente. Se un'opera pubblica costa 50 milioni di euro, dividerne il prezzo per il numero degli abitanti o trasformarlo in minuti di spesa nazionale può produrre un calcolo esatto e insieme privo di significato. Contestualizzare significa capire che cosa compone una cifra, come è cambiata nel tempo, quali risorse mobilita, quale risultato produce e chi ne sostiene il costo.

L'obiettivo del progetto è rendere i grandi numeri più comprensibili, inserirli nel loro contesto e usarli per osservare le dimensioni e le conseguenze dei fenomeni che ci circondano. Non è una collezione di record e non cerca un paragone spettacolare per ogni cifra. Prova invece a costruire riferimenti pertinenti: composizione dei totali, rapporti tra risorse e risultati, concentrazioni geografiche, evoluzioni nel tempo e differenze tra ciò che viene annunciato, prodotto e realmente ottenuto.

Ogni argomento viene osservato attraverso tre prospettive principali, utilizzate come punti di riferimento e non come sezioni obbligatorie.

- **Costi ed economia** riguarda quanto costa un fenomeno, quanto vale, quali risorse economiche richiede o muove e quali attività genera.

- **Ambiente e clima** riguarda il consumo di energia e risorse, le emissioni, l'inquinamento, l'uso del territorio e le conseguenze sugli ecosistemi e sul clima.
- **Salute, persone e società** riguarda la salute, il lavoro, la sicurezza, le condizioni di vita e, più in generale, gli effetti sulle persone e sulle comunità.

Non tutti gli argomenti producono effetti rilevanti in tutte e tre le dimensioni. Quando un collegamento è concreto e documentabile viene spiegato; quando non lo è, non viene introdotto per completare artificialmente uno schema. Le prospettive possono inoltre condurre in direzioni diverse: un'attività può generare reddito e servizi essenziali e, nello stesso tempo, consumare risorse o trasferire rischi su lavoratori, comunità e territori.

L'Italia è il punto di riferimento del libro, ma non necessariamente il centro dei fenomeni raccontati. Ogni tema viene osservato nel contesto geografico, economico e materiale che gli appartiene: italiano, europeo, globale oppure concentrato in territori specifici. L'Italia viene poi collocata dentro quel quadro, qualunque sia il ruolo che svolge.

Il progetto utilizza strumenti di intelligenza artificiale come supporto alla ricerca, all'analisi, all'organizzazione delle informazioni e alla stesura dei contenuti. Il mio ruolo è definire il processo e curare editorialmente il risultato. L'intelligenza artificiale rende possibile esplorare una quantità di materiale che sarebbe difficile affrontare individualmente negli stessi tempi, ma può anche produrre errori, omissioni, interpretazioni fragili e testi convincenti soltanto in apparenza.

Per questa ragione la metodologia e i suoi limiti sono descritti apertamente nel capitolo successivo. La trasparenza non elimina i rischi del processo, ma permette a chi legge di sapere come sono stati prodotti i contenuti e di valutarli con la necessaria consapevolezza.

I libri di Grandi Numeri, Grandi Impatti rimarranno gratuiti. Il progetto nasce prima di tutto dal desiderio di capire meglio la scala delle cose che accadono intorno a noi e di condividere il percorso con chi trova utile la stessa domanda.

L'idea di fondo è semplice: partire dai numeri, senza fermarsi ai numeri. Se una cifra da cento milioni o cento miliardi non apparirà più soltanto come una

sequenza di zeri, ma come la misura di risorse, trasformazioni e conseguenze reali, il libro avrà raggiunto il suo obiettivo.

01.02 Metodologia: come vengono costruiti i contenuti

01 · Introduzione

Questo progetto nasce con l'aiuto dell'intelligenza artificiale e non vuole nasconderlo. La metodologia è parte del contenuto perché il modo in cui un testo viene prodotto influenza ciò che il lettore può ragionevolmente aspettarsi da quel testo.

Descrivere il processo non significa certificare il risultato. Significa rendere visibili strumenti, passaggi, responsabilità e limiti, così che ogni lettore possa decidere quale grado di fiducia attribuire alle informazioni e quando sia necessario risalire alle fonti o rivolgersi a uno specialista.

Un progetto editoriale assistito dall'intelligenza artificiale

Gli strumenti di intelligenza artificiale vengono utilizzati per cercare materiale, leggere e confrontare documenti, individuare ordini di grandezza, organizzare le informazioni, preparare bozze e rivedere i testi. Non sono autori autonomi e non sono fonti. Ogni dato deve rimandare a un documento esterno che il lettore possa consultare, e nessuna formulazione diventa affidabile soltanto perché appare chiara e convincente.

Nella prima fase del progetto il percorso era più lineare: ricerca e prima stesura potevano nascere nello stesso passaggio, per essere poi rilette dal curatore e da altri strumenti. Era un metodo utile per superare la pagina bianca e raccogliere rapidamente molto materiale, ma aveva un limite importante. Quando la prosa era già costruita, verificare un numero debole, separare due stime incompatibili o correggere un perimetro sbagliato significava intervenire su una storia che aveva già preso forma. Il testo rischiava così di rendere plausibile un dato prima che quel dato fosse stato esaminato con sufficiente rigore.

Il ruolo del curatore

Il mio ruolo è definire lo scopo del progetto, stabilire le regole editoriali, scegliere gli argomenti e le domande alle quali ogni capitolo deve rispondere. Esamino inoltre le proposte prodotte dagli strumenti, segnalo errori e mancanze, decido quali dati possono essere usati e approvo la versione da pubblicare. L'intelligenza artificiale amplia la capacità di ricerca e confronto; la responsabilità delle scelte resta umana.

Questa è una curatela editoriale, non una validazione specialistica. Non possiedo le competenze necessarie per certificare autonomamente ogni conclusione scientifica, economica, sanitaria, giuridica o tecnica. Il nuovo metodo non elimina questo limite, ma rende più difficile che un'affermazione passi direttamente dalla ricerca alla pagina pubblicata senza che qualcuno si fermi a controllarne fonte, significato, anno, territorio e condizioni d'uso.

Come nasce un capitolo

Definizione del perimetro

Il lavoro comincia prima della ricerca. Vengono definiti il tema, i confini dell'argomento, le domande principali e le sovrapposizioni da evitare con gli altri capitoli. Le tre prospettive del progetto - Costi ed economia, Ambiente e clima, Salute, persone e società - aiutano a cercare gli impatti pertinenti, ma non obbligano a creare tre sezioni né a riempire categorie prive di contenuto significativo. Un perimetro chiaro è il primo controllo di accuratezza: impedisce di accostare numeri che descrivono fenomeni, periodi o popolazioni differenti come se fossero direttamente confrontabili.

Un dossier prima della bozza

La ricerca approfondita viene svolta con OpenClaw, che ha il compito di esplorare le fonti, raccogliere i dati rilevanti e costruire un dossier separato prima che inizi la scrittura. Nel dossier vengono raccolte le possibili direzioni narrative, le fonti effettivamente consultate e i numeri che potrebbero aiutare il lettore a capire la scala del fenomeno. OpenClaw non scrive il capitolo: il suo

compito termina con la produzione del materiale di ricerca strutturato che verrà poi verificato e consolidato da ChatGPT Work.

Il dossier è volutamente preliminare: non deve fingere certezze che ancora non esistono, ma rendere visibili dubbi, conflitti tra fonti, lacune e verifiche ancora necessarie.

Per ogni numero candidato non basta registrare un valore. Occorre capire che cosa misura davvero, a quale anno e territorio si riferisce, quale unità usa, quale popolazione o quantità sta al denominatore e se si tratta di un dato definitivo, provvisorio o stimato. Viene inoltre controllata la freschezza: per ciascuna famiglia di indicatori si cerca il consuntivo più recente e si verifica se esista già un aggiornamento successivo. Un dato più nuovo non è sempre migliore; una stima parziale può essere utile per indicare una tendenza, ma non deve essere presentata come un bilancio annuale consolidato.

Il dossier distingue anche le fonti effettivamente aperte da quelle soltanto individuate. Questa differenza è essenziale. Sapere che un rapporto esiste non equivale ad aver verificato che sostenga davvero la frase che si vorrebbe scrivere. Allo stesso modo, il numero di schede raccolte non coincide automaticamente con il numero di dati distinti e utilizzabili: due schede possono ripetere la stessa stima, oppure descrivere grandezze simili ma non compatibili.

La verifica prima della scrittura

Il passaggio decisivo avviene quando il dossier viene letto integralmente e corretto prima che inizi la stesura. Le ancore quantitative vengono confrontate una per una; si controllano date, definizioni, denominatori, duplicazioni e limiti. I dati fragili o ridondanti vengono esclusi, le alternative incompatibili non vengono sommate e le divergenze tra fonti vengono risolte oppure dichiarate.

Dal dossier consolidato ChatGPT Work prepara una prima proposta di brief narrativo. Non è un semplice indice: definisce la domanda centrale, la risposta che il capitolo deve costruire, la tesi e il percorso causale, la funzione e l'ordine delle sezioni, i dati e gli esempi portanti, le transizioni, le esclusioni e la conclusione attesa. Il suo scopo è stabilire prima della prosa non soltanto che cosa dire, ma anche perché ogni elemento debba comparire e quale comprensione debba lasciare al lettore.

Questa proposta viene quindi discussa con Gemini insieme al dossier consolidato e alle istruzioni specifiche del capitolo. Gemini ne valuta completezza, logica, proporzioni, lacune, sovrapposizioni, uso dei dati e tenuta della conclusione; ChatGPT Work verifica i rilievi, accoglie quelli fondati e rielabora il brief. Il brief narrativo viene quindi messo a punto attraverso questo confronto tra ChatGPT Work e Gemini e, per le scelte rilevanti, concordato con il curatore. Solo quando questa architettura è stata chiarita e fissata si passa alla stesura completa del capitolo.

In questo modo la storia nasce da un insieme di elementi già selezionati e da un'architettura già messa alla prova, anziché costringere la verifica a inseguire una storia scritta troppo presto. È questo il principale vantaggio del metodo: l'accuratezza e la coerenza narrativa vengono costruite nel processo prima che la fluidità della prosa possa nascondere un'incongruenza.

La stesura

Solo dopo il superamento di questo controllo viene scritta la bozza completa. La stesura viene eseguita con ChatGPT Work e deve attenersi al dossier consolidato e al brief narrativo concordato: non può introdurre liberamente nuovi dati, sostituire le fonti approvate o scegliere da sola fra stime alternative. Se emerge una lacuna, deve essere segnalata o trattata con una formulazione prudente, non colmata con un numero plausibile ma non verificato.

Controlli, revisione indipendente e lettura autoriale

La prima revisione avviene in due passaggi distinti. Il controllo narrativo verifica tesi, progressione, transizioni, ritmo, valore didattico e tenuta della conclusione rispetto al brief concordato. Il controllo fattuale verifica fonti, numeri, unità, denominatori, calcoli, date, cautele e coerenza con gli altri capitoli. I problemi individuati vengono corretti prima di sottoporre il testo a una revisione esterna.

A questo punto Gemini riceve soltanto il capitolo e un prompt neutrale, senza il dossier, il brief narrativo o l'elenco dei problemi già discussi. Questo passaggio serve a ottenere una lettura il più possibile indipendente e a cercare contraddizioni, ripetizioni, passaggi poco chiari, tecnicismi non spiegati, parti dispersive e fatti dubbi. Le sue osservazioni non vengono accettate

automaticamente: ogni rilievo fattuale o quantitativo viene ricontrollato e soltanto le correzioni fondate entrano nel testo.

Solo la versione ripulita passa al curatore per la lettura autoriale. Le osservazioni vengono integrate oppure, quando esistono alternative sostanziali, vengono riportate come scelte da decidere. Dopo le modifiche richieste viene ripetuto il controllo fattuale e tecnico. Una nuova revisione di Gemini viene richiesta soltanto quando le modifiche sono estese, cambiano la struttura o lasciano un dubbio specifico; non costituisce un passaggio automatico.

L'ultimo controllo riguarda anche il documento nel suo insieme: coerenza con gli altri capitoli, completezza delle fonti, titoli isolati, salti di pagina, righe fuori margine e leggibilità. La separazione tra ricerca, selezione, progettazione narrativa, scrittura e controlli successivi non costituisce una revisione scientifica indipendente, ma riduce un rischio tipico dei testi generati con l'intelligenza artificiale: scambiare una frase ben costruita per una frase dimostrata.

Le fonti e ciò che dimostrano

Ogni capitolo riporta le fonti effettivamente utilizzate con collegamenti cliccabili. Il collegamento permette di risalire al materiale consultato, ma la sua presenza non prova automaticamente che il testo lo rappresenti correttamente. Per questo il controllo riguarda anche la relazione tra fonte e affermazione: una fonte può essere autentica e autorevole e tuttavia non sostenere la specifica conclusione che le è stata attribuita; può avere un perimetro diverso, riferirsi a un altro anno o richiedere cautele metodologiche non riportate nella sintesi.

Le fonti prodotte da aziende, associazioni o portatori di interesse possono essere necessarie per dati che nessun altro pubblica. Quando possibile, il testo deve dichiararne l’origine e distinguerle da statistiche pubbliche e studi indipendenti. Anche questa distinzione dipende dalla corretta applicazione delle regole durante la ricerca.

I principali limiti

L'intelligenza artificiale può inventare fatti o riferimenti, confondere unità e valute, associare un dato al periodo o al territorio sbagliato, interpretare male una tabella, perdere una condizione essenziale, utilizzare informazioni superate o trasformare una correlazione in un rapporto di causa. Può anche produrre una prosa scorrevole che rende difficile riconoscere questi problemi. Il dossier separato, la selezione preventiva dei dati, il brief narrativo, i controlli fattuali distinti e la revisione indipendente sono stati introdotti proprio per intercettare molti di questi errori prima che diventino parte del racconto.

La quantità di materiale trattato aumenta la copertura ma anche la possibilità che un errore sfugga alle revisioni. Nessun numero di passaggi automatici elimina questo rischio. I contenuti non devono quindi essere considerati una fonte definitiva, una consulenza professionale o un sostituto della letteratura scientifica, delle norme applicabili e del parere di persone competenti.

Come leggere il progetto

Questo libro va letto come un tentativo divulgativo di costruire prospettiva sui grandi numeri. Può offrire domande, collegamenti, ordini di grandezza e punti di partenza per ulteriori approfondimenti. Quando un’informazione è importante per una decisione personale, economica, sanitaria, legale o professionale, è necessario verificarla direttamente nelle fonti aggiornate e, se opportuno, con uno specialista.

Le segnalazioni dei lettori fanno parte del processo di miglioramento. I testi possono essere corretti quando emergono dati nuovi, fonti migliori o interpretazioni più solide. Ogni versione rappresenta una fase del progetto, non una conclusione definitiva.

01.03 Costi ed economia: la cifra non è ancora il significato

01 · Introduzione

Un milione di euro può cambiare la vita di una famiglia, finanziare una piccola infrastruttura o scomparire quasi senza lasciare traccia dentro il bilancio di uno Stato. Il numero è identico; cambiano la scala, il tempo, lo scopo e le persone coinvolte. È da qui che comincia la lettura dei grandi numeri: non dalla domanda «quanto è?», ma da «che cosa rappresenta?».

Nel resto del libro incontreremo fatturati, investimenti, costi sanitari, sussidi, danni, patrimoni e debiti, ma anche produzione, capacità, imprese e occupazione. Alcune grandezze saranno espresse in denaro, altre in unità fisiche o in persone. Nessuna è confrontabile soltanto perché appartiene all'economia: il significato dipende dal fenomeno misurato, dal perimetro e dalla domanda a cui il dato deve rispondere.

La stessa moneta, numeri diversi

Prezzo, costo e spesa

Il prezzo è ciò che viene richiesto o pagato in uno scambio. Il costo è l'insieme delle risorse necessarie per produrre, mantenere o ottenere qualcosa. La spesa è il pagamento sostenuto da una persona, un'impresa o un'amministrazione. Possono coincidere, ma spesso non lo fanno: una prestazione sanitaria gratuita per il paziente ha comunque un costo e genera una spesa pubblica; un prodotto economico alla cassa può trasferire costi sull'ambiente, sui lavoratori o sul futuro.

Fatturato, valore aggiunto e utile

Il fatturato somma le vendite. Non dice quanto rimane all'impresa dopo aver pagato materie prime, energia, lavoro, interessi e imposte. Il valore aggiunto misura invece il valore creato sottraendo i consumi intermedi; l'utile è ciò che resta dopo ulteriori costi e componenti contabili. Presentare il fatturato come

ricchezza netta gonfia il significato di un numero e rende ingannevoli i confronti tra settori.

Investimento, manutenzione e costo evitato

Un investimento acquista una capacità che dovrebbe produrre benefici nel tempo. La manutenzione conserva una capacità esistente. Un costo evitato stima ciò che non sarà necessario pagare se un intervento funziona. Sono tre storie diverse: spendere cento milioni oggi per ridurre danni futuri non equivale a perdere cento milioni, ma nemmeno garantisce automaticamente un risparmio della stessa entità.

L'economia non è soltanto denaro

Produzione, capacità e attività

Un'attività economica può essere descritta dal valore che genera, ma anche da quante unità produce, quante persone serve, quante imprese coinvolge o quale capacità mette a disposizione. La capacità indica ciò che un sistema potrebbe realizzare in determinate condizioni; la produzione osservata mostra ciò che ha realizzato davvero. Confondere le due può trasformare il potenziale in un risultato inesistente.

Risorse mobilitate e filiere

Produrre un bene o un servizio richiede lavoro, capitale, competenze, energia, materie prime, infrastrutture e, in alcuni casi, risorse pubbliche. Seguire una filiera significa osservare dove queste risorse vengono impiegate, dove si forma il valore, chi sostiene i costi e quali attività dipendono dagli scambi. Lo stesso pagamento può però comparire nel fatturato di più imprese lungo la catena: sommare tutte le vendite non equivale a misurare il valore netto creato.

Occupazione diretta, indiretta e indotta

L'occupazione diretta riguarda chi lavora nelle attività osservate; quella indiretta comprende il lavoro nelle imprese fornitrici; quella indotta stima l'attività sostenuta dalla spesa dei redditi generati. Sono perimetri differenti e

spesso derivano da modelli economici. Non devono essere sommati a dati provenienti da metodologie incompatibili, né presentati come posti di lavoro aggiuntivi senza chiarire periodo e scenario di confronto. Il numero degli occupati, inoltre, non descrive da solo salari, durata, stabilità o qualità del lavoro.

Il tempo cambia il numero

Flussi e consistenze

Il PIL, uno stipendio e la spesa sanitaria sono flussi: hanno senso soltanto con un periodo, di solito un anno. Il patrimonio e il debito sono consistenze, o stock: fotografano una quantità in una data. Confrontare debito e PIL può essere utile, ma mette in relazione uno stock con un flusso annuale; non significa che il debito debba essere pagato tutto con il PIL di quell'anno.

Nominale e reale

Cento milioni del 2006 e cento milioni di oggi hanno lo stesso valore nominale, ma non lo stesso potere d'acquisto. Per confrontare anni lontani occorre correggere l'inflazione o dichiarare che si stanno usando prezzi correnti. Anche il tasso di cambio può alterare i confronti internazionali: convertire una valuta in euro non rende automaticamente equivalenti prezzi e capacità di acquisto.

Una tantum o ogni anno

Un miliardo speso una sola volta e un miliardo all'anno sembrano la stessa cifra, ma dopo dieci anni separano uno da dieci miliardi. Ogni numero ricorrente deve portare con sé durata, frequenza e condizioni di cessazione. È uno dei modi più semplici per evitare che una notizia impressionante diventi una conclusione sbagliata.

Dalla cifra alla scala

Mille migliaia formano un milione; mille milioni formano un miliardo; mille miliardi formano 10^{12}, che in inglese è un trillion. Il salto non è soltanto grafico.

Passare da un milione a un miliardo significa moltiplicare per mille: la stessa distanza che c'è fra un euro e mille euro.

Un milione di euro

Per una persona è una somma eccezionale. In Italia equivale a circa 26,8 retribuzioni medie annue lorde dei dipendenti a tempo pieno, usando il dato strutturale ISTAT del 2022. Il confronto è utile soltanto per cogliere la scala individuale: non descrive salari netti, carriere o distribuzione dei redditi.

Un miliardo di euro

Un miliardo contiene mille milioni. Distribuito idealmente tra circa 59 milioni di residenti, vale poco meno di 17 euro a persona; concentrato in un unico progetto può finanziare un'infrastruttura di grande rilievo. La divisione pro capite non dice se la spesa riguardi davvero tutti: serve a mostrare come concentrazione e distribuzione cambino la percezione.

Cento miliardi e mille miliardi

A cento miliardi si entra nella scala dei grandi sistemi nazionali: l'importo è circa il 71% della spesa sanitaria pubblica italiana del 2025. Mille miliardi corrispondono a circa il 44% del PIL italiano dello stesso anno. A queste dimensioni una cifra non descrive quasi mai un solo oggetto: riassume migliaia di decisioni, organizzazioni e pagamenti distribuiti nel tempo.

L'Italia come punto di riferimento

Nel 2025 il PIL italiano a prezzi correnti è stato circa 2.258 miliardi di euro. Il debito delle amministrazioni pubbliche a fine anno era circa 3.095,5 miliardi, pari al 137,1% del PIL. Nel 2024 le prestazioni pensionistiche vigenti ammontavano a circa 364,1 miliardi; nel 2025 la spesa sanitaria pubblica era circa 141,5 miliardi. Questi valori non formano una graduatoria di importanza: sono coordinate che permettono di collocare i numeri incontrati nei capitoli successivi.

Anche le coordinate, però, possono ingannare. Dire che cinque miliardi sono circa lo 0,22% del PIL mostra che l'importo è piccolo rispetto all'intera

economia; non dimostra che sia irrilevante per un ministero, un territorio o un gruppo di cittadini. La scala giusta è quella della domanda che stiamo cercando di risolvere.

Chi paga, chi riceve, chi rischia

Ogni grande flusso economico ha almeno due lati. Un ricavo per qualcuno è una spesa per qualcun altro; un risparmio privato può diventare un costo pubblico, e viceversa. Per questo nel libro seguiremo lungo le filiere denaro, risorse, attività e rischi: chi finanzia l'investimento, chi produce, chi incassa, chi sostiene la manutenzione, chi assorbe le perdite e chi beneficia nel tempo.

Le medie sono utili, ma non distribuiscono davvero nulla. Un reddito medio può crescere mentre molte persone restano ferme; una spesa pro capite può aumentare senza raggiungere uniformemente i territori. Quando la distribuzione è parte del fenomeno, media, mediana, fasce e concentrazione raccontano storie differenti.

Cinque domande prima di interpretare una cifra

Che cosa misura?

Prezzo, fatturato, costo, utile, investimento, patrimonio, produzione, capacità, occupazione o danno stimato non sono sinonimi.

Di quale periodo parla?

Una data, un anno, l'intera durata di un progetto o un impegno ricorrente cambiano radicalmente il totale.

Qual è il perimetro?

Italia, Europa, mondo; settore pubblico, imprese, famiglie; valore lordo o netto.

Con che cosa viene confrontata?

Il denominatore deve rispondere a una domanda reale, non produrre soltanto un'immagine sorprendente.

Chi è coinvolto?

Beneficiari, pagatori e persone esposte al rischio possono essere gruppi diversi.

La cifra diventa una storia

Le grandezze economiche permettono di osservare costi, valore, risorse mobilitate e attività generate, ma non rendono equivalenti fenomeni diversi. Nel resto del libro useremo importi monetari, quantità fisiche e dati sul lavoro o sulla capacità per capire dimensioni, priorità e conseguenze. Una cifra sarà davvero informativa solo quando sapremo che cosa misura, in quanto tempo, per chi e rispetto a quale alternativa.

Fonti e riferimenti

ISTAT — PIL e indebitamento delle amministrazioni pubbliche, 2023-2025
https://www.istat.it/comunicato-stampa/pil-e-indebitamento-delle-ap-anni-2023-2025/

Banca d'Italia — Relazione annuale 2025
https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/relazione-annuale/2025/rel_2025.pdf

Corte dei conti — Relazione 2025 sul Rendiconto generale dello Stato
https://www.corteconti.it/HOME/StampaMedia/ComunicatiStampa/DettaglioComunicati?Id=162f9431-b75b-45e5-9426-9d1db1e78598

INPS — Prestazioni pensionistiche e beneficiari
https://www.inps.it/content/dam/inps-site/it/scorporati/comunicati-stampa/2025/10/Allegati/3913_Cs_Osservatorio-Prestazioni-pensionistiche-e-beneficiari-del-sistema-pensionistico-italiano.pdf

ISTAT — Struttura delle retribuzioni in Italia, 2022
https://www.istat.it/comunicato-stampa/la-struttura-delle-retribuzioni-in-italia-anno-2022/

01.04 Ambiente e clima: ciò che emettiamo, consumiamo e trasformiamo

01 · Introduzione

Da un camino possono uscire sostanze che non vediamo. Alcune restano nell'atmosfera abbastanza a lungo da modificare il clima del pianeta; altre si concentrano vicino alle città e alle industrie, entrano nei polmoni o reagiscono formando nuovi inquinanti. Chiamarle tutte semplicemente «emissioni» nasconde la differenza più importante: non producono lo stesso danno, non agiscono alla stessa scala e non si misurano nello stesso modo.

L'ambiente non ha una sola unità di misura. Tonnellate di gas serra, microgrammi di particolato per metro cubo, ettari di suolo, metri cubi d'acqua, terawattora di energia e tonnellate di rifiuti descrivono pressioni differenti: le emissioni sono soltanto una parte del quadro. Questo capitolo costruisce la grammatica necessaria per non confonderle e per collegare ogni misura al luogo, al tempo e al meccanismo che la rende significativa.

Clima e qualità dell'aria: due problemi collegati, ma diversi

Il cambiamento climatico dipende soprattutto dall'accumulo di gas serra nell'atmosfera. La qualità dell'aria riguarda invece le concentrazioni di sostanze dannose respirate in un luogo e in un periodo. Una tecnologia può ridurre particolato e ossidi di zolfo senza eliminare la CO_2; un intervento climatico può lasciare irrisolto un inquinante locale. Dire soltanto «inquina meno» non basta: occorre specificare quale sostanza e quale effetto.

La CO_2 e il grande accumulo

Che cos'è e da dove viene

L'anidride carbonica è un gas presente naturalmente nell'atmosfera e fondamentale nel ciclo del carbonio. Le attività umane ne aumentano la concentrazione soprattutto bruciando carbone, petrolio e gas, producendo

cemento e modificando l'uso del suolo. La CO_2 assorbe parte della radiazione infrarossa emessa dalla Terra e intensifica l'effetto serra.

Perché conta la somma nel tempo

Per la CO_2 non conta soltanto quanto emettiamo quest'anno, ma quanto abbiamo aggiunto complessivamente all'atmosfera. Una parte permane molto a lungo nel sistema climatico: per questo il riscaldamento dipende in larga misura dalle emissioni cumulative nette. Ridurre il flusso annuale rallenta l'accumulo; raggiungere emissioni nette di CO_2 pari a zero arresta l'ulteriore crescita dovuta a quel gas, senza cancellare automaticamente il riscaldamento già prodotto.

Una tonnellata non ha un indirizzo

La CO_2 si mescola nell'atmosfera: ai fini climatici, una tonnellata emessa a Torino o a Shanghai contribuisce allo stesso problema globale. Il luogo resta però importante per attribuire responsabilità, progettare politiche e distinguere le emissioni prodotte sul territorio da quelle incorporate nei beni importati.

CO_2, carbonio e CO_2 equivalente

Una tonnellata di carbonio non è una tonnellata di CO_2: la seconda comprende anche la massa dell'ossigeno legato al carbonio. La CO_2 equivalente, abbreviata CO_2e, è un'altra cosa ancora: traduce l'effetto climatico di gas differenti in una quantità comparabile di CO_2 secondo un orizzonte temporale e una metodologia. È un'unità contabile del clima, non la descrizione letterale della sostanza uscita da un camino.

Gli altri gas serra

Metano

Il metano proviene, tra le altre fonti, dall'estrazione e distribuzione dei combustibili, dagli allevamenti, dalle risaie e dai rifiuti. Rimane nell'atmosfera meno a lungo della CO_2, ma esercita un effetto riscaldante molto più intenso

per unità di massa nel periodo considerato. Nei capitoli su agricoltura, energia e rifiuti non potrà essere trattato come una nota marginale.

Protossido di azoto e gas fluorurati

Il protossido di azoto è particolarmente legato ai suoli agricoli e all'uso di fertilizzanti. I gas fluorurati sono impiegati in applicazioni industriali e nella refrigerazione; le quantità possono essere minori, ma alcuni hanno un potenziale di riscaldamento molto elevato. Quando il libro userà la CO_2e, dovremo sempre sapere quali gas sono inclusi.

Gli inquinanti che respiriamo

Particolato: PM10 e PM2,5

Il particolato è una miscela di particelle solide e liquide. Le sigle indicano il diametro aerodinamico: PM10 per le particelle fino a 10 micrometri, PM2,5 per quelle più fini. Non tutto viene emesso direttamente; una parte si forma nell'atmosfera da ammoniaca, ossidi di azoto, ossidi di zolfo e altri precursori. La dimensione influenza la capacità di penetrare nell'apparato respiratorio, ma composizione, durata e concentrazione dell'esposizione restano essenziali.

Ossidi di azoto

NO_x è il nome collettivo usato soprattutto per monossido e biossido di azoto prodotti dalle combustioni. Il biossido di azoto è rilevante per la salute; gli NO_x partecipano inoltre alla formazione di ozono troposferico e particolato secondario. Traffico, impianti energetici e processi industriali possono avere profili molto diversi secondo tecnologia e condizioni di funzionamento.

Anidride solforosa

La SO_2 deriva soprattutto dalla combustione di combustibili contenenti zolfo e da alcuni processi industriali. Può irritare l'apparato respiratorio e contribuire alla formazione di particolato e deposizioni acide. La sua riduzione in molti contesti dimostra anche che controllare un inquinante specifico non equivale a risolvere automaticamente il problema climatico.

Ozono: utile in alto, dannoso vicino al suolo

L'ozono stratosferico protegge dalla radiazione ultravioletta. L'ozono troposferico, invece, è un inquinante: non viene normalmente emesso direttamente, ma si forma attraverso reazioni fotochimiche che coinvolgono ossidi di azoto e composti organici volatili in presenza di luce solare. Per questo la relazione tra emissioni dei precursori e concentrazione locale può essere complessa.

Ammoniaca, composti organici volatili e monossido di carbonio

L'ammoniaca è particolarmente importante in agricoltura e contribuisce al particolato secondario. I composti organici volatili partecipano alla chimica dell'ozono e provengono da fonti naturali e antropiche. Il monossido di carbonio nasce dalla combustione incompleta ed è tossico. Nel libro resteranno sullo sfondo, ma verranno richiamati quando determinano una parte significativa dell'impatto.

L'ambiente non è soltanto atmosfera

Energia e materie prime

L'energia è sia una risorsa sia una causa di pressioni ambientali, ma consumo energetico ed emissioni non sono la stessa misura. Occorre distinguere l'energia contenuta nelle fonti, quella consegnata agli utilizzatori e il servizio utile ottenuto, come calore, movimento o illuminazione. Due sistemi possono fornire lo stesso servizio con consumi diversi; un'efficienza migliore per unità può convivere con un consumo totale crescente. Per i materiali contano quantità estratta, trasformata, incorporata nei prodotti, riutilizzata e restituita all'ambiente: tonnellate diverse non sono equivalenti se cambiano scarsità, tossicità, origine o possibilità di recupero.

Acqua: prelievo, consumo e qualità

Prelevare acqua significa rimuoverla da fiumi, laghi o falde; consumarla significa renderne una parte non immediatamente disponibile nello stesso bacino, per evaporazione, incorporazione o trasferimento. Molta acqua prelevata può tornare nell'ambiente, ma in un luogo, momento o stato qualitativo diverso. Un volume annuale non basta: disponibilità locale, stagione, stato della falda, qualità e competizione tra usi determinano l'impatto.

Territorio e suolo

Usare territorio può significare occuparlo temporaneamente, trasformarlo, impermeabilizzarlo o frammentare habitat. Ettari con funzioni ecologiche e produttive differenti non sono intercambiabili. Nel suolo contano anche erosione, sostanza organica, contaminazione, fertilità e capacità di trattenere acqua e carbonio. Per questo una superficie deve essere accompagnata da localizzazione, uso precedente, durata e tipo di trasformazione.

Ecosistemi e biodiversità

Un ecosistema non è soltanto un elenco di specie: comprende relazioni che sostengono impollinazione, formazione del suolo, regolazione dell'acqua, produzione di biomassa e altre funzioni. La biodiversità può essere descritta con specie, popolazioni, habitat, integrità e rischio di estinzione, ma nessun indicatore riassume tutto. Gli effetti sono spesso locali, cumulativi e difficili da invertire; una compensazione in un altro luogo non rende automaticamente equivalenti gli habitat.

Rifiuti e circolarità

Le tonnellate di rifiuti prodotti, raccolti, riciclati, inceneriti o smaltiti misurano passaggi diversi. Una percentuale di riciclo non dice da sola quanta materia vergine è stata evitata, quante volte il materiale potrà essere riutilizzato o quali scarti e consumi sono stati necessari. La gerarchia parte dalla prevenzione: ridurre i materiali e prolungare la vita dei prodotti può contare più del trattamento a fine uso. Anche in un sistema circolare restano perdite, energia consumata e materiali non recuperabili.

Misurare senza perdere il perimetro

Emissioni e concentrazioni

Le emissioni misurano una quantità rilasciata in un intervallo; le concentrazioni descrivono quanto inquinante è presente in un volume d'aria. Molte emissioni non producono una concentrazione uniforme: meteorologia, distanza, altezza della sorgente, reazioni chimiche e conformazione del territorio cambiano l'esposizione.

Territoriale o incorporato nei consumi

L'inventario territoriale attribuisce a un paese ciò che viene emesso entro i suoi confini. L'impronta dei consumi segue invece le emissioni lungo le catene produttive mondiali e le attribuisce alla domanda finale. Nessuno dei due perimetri è universalmente migliore: rispondono a domande differenti e non vanno mescolati nello stesso confronto.

Totale o intensità

Un'impresa può ridurre le emissioni per unità di prodotto e aumentare quelle complessive se produce molto di più. L'intensità descrive l'efficienza; il totale descrive la pressione assoluta. Per valutare l'impatto servono spesso entrambi.

I confini del ciclo di vita

La valutazione del ciclo di vita, abbreviata LCA dall'inglese Life Cycle Assessment, misura gli impatti associati a un prodotto o servizio entro confini dichiarati. Un'analisi gate-to-gate considera una singola fase produttiva; una cradle-to-gate parte dall'estrazione delle materie prime e arriva all'uscita dalla fabbrica; una cradle-to-grave comprende anche distribuzione, uso e fine vita. Cambiare confine può spostare o escludere gran parte dell'impatto. I confronti sono quindi accettabili soltanto quando unità funzionale, geografia, periodo e confini del sistema sono compatibili.

Gli Scope 1, 2 e 3 rispondono a una domanda collegata ma diversa. Nella contabilizzazione delle emissioni di un'organizzazione, lo Scope 1 comprende le

emissioni dirette delle attività controllate, lo Scope 2 quelle associate all'energia acquistata e lo Scope 3 le altre emissioni indirette della catena del valore. Questi perimetri non devono essere confusi con le fasi considerate da una valutazione del ciclo di vita di prodotto.

L'Italia come paesaggio di numeri

Nel 2024 l'Italia ha emesso poco più di 360 milioni di tonnellate di gas serra in CO_2 equivalente, circa il 30% in meno rispetto al 1990. Dividere il totale per la popolazione produce un riferimento di circa 6,1 tonnellate a persona, ma non assegna a ogni cittadino una quota realmente emessa: industria, trasporti, edifici e agricoltura hanno strutture e responsabilità differenti.

L'impronta dei consumi italiani stimata da Eurostat per il 2023 era circa 535 milioni di tonnellate di CO_2e. È più alta dell'inventario territoriale, ma il confronto è orientativo perché anno e metodo differiscono. La distanza racconta soprattutto quanto un'economia sia connessa a catene produttive esterne.

Nello stesso paese, nel 2024 sono stati prodotti circa 29,9 milioni di tonnellate di rifiuti urbani e consumati 311,9 TWh di elettricità; il consumo netto di suolo è stato circa 7.850 ettari. Nel 2022 le perdite delle reti idriche comunali erano il 42,4% dell'acqua immessa. Nessun numero può sostituire gli altri: insieme mostrano che l'impatto ambientale è una costellazione di pressioni, non un punteggio unico.

Anche la qualità dell'aria mostra perché norma e salute non coincidono. Nel 2024 il limite europeo annuale del PM2,5 risultava rispettato nelle stazioni italiane, mentre il 97,7% superava il più severo valore guida dell'OMS. Un limite legale e una raccomandazione sanitaria rispondono a processi diversi e devono essere nominati correttamente.

Il riferimento climatico principale

Nei capitoli successivi la CO_2 — o la CO_2 equivalente quando sono inclusi altri gas serra — sarà il riferimento climatico comune: una grandezza leggibile, confrontabile e spesso disponibile. Non sarà però usata come sinonimo di ambiente. Dove sono rilevanti, verranno considerate anche qualità dell'aria,

energia e materiali, acqua, suolo, biodiversità e rifiuti, con indicatori coerenti con il fenomeno osservato.

La domanda corretta non sarà «quanto inquina?», ma: quale sostanza o risorsa viene emessa, consumata o trasformata; in quale fase e luogo; rispetto a quale quantità o servizio; con quale effetto su clima, salute, territorio o ecosistemi; e lungo quanto tempo?

Quando una concentrazione di particolato, ozono o sostanze tossiche viene tradotta in malattie, decessi, disabilità, anni di vita perduti o costi sanitari, il problema passa dalla misurazione della pressione ambientale alla valutazione degli effetti sulle persone, trattata nel capitolo successivo.

Fonti e riferimenti

Commissione europea, Joint Research Centre — Product Environmental Footprint, metodo basato sulla valutazione del ciclo di vita
https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/product-environmental-footprint-pef_en

Greenhouse Gas Protocol — Corporate Standard e definizioni degli Scope 1, 2 e 3
https://ghgprotocol.org/corporate-standard-frequently-asked-questions

IPCC — Sixth Assessment Report, Synthesis Report
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

OMS — Linee guida globali sulla qualità dell'aria
https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228

ISPRA — Inventario italiano dei gas serra 1990-2024
https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/national-inventory-document-2026-italian-greenhouse-gas-inventory-1990-2024

Eurostat — Greenhouse gas emission footprints
https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Greenhouse_gas_emission_footprints

ISPRA — Rifiuti urbani 2024
https://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2025/rifiuti-urbani-nel-2024

ISPRA-SNPA — Consumo di suolo, edizione 2025
https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/eventi/2025/10/presentazione-rapporto-consumo-di-suolo-dinamiche-territoriali-e-servizi-ecosistemici-edizione-2025

Terna — Consumi elettrici 2024
https://www.terna.it/it/media/comunicati-stampa/dettaglio/consumi-elettrici-2024

ISTAT — Statistiche sull'acqua 2020-2023
https://www.istat.it/comunicato-stampa/le-statistiche-dellistat-sullacqua-anni-2020-2023/

ISPRA — Qualità dell'aria 2024
https://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2025/qualita-dellaria-nel-2024

IEA — Energy End-uses and Efficiency Indicators
https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-end-uses-and-efficiency-indicators

FAO AQUASTAT — Water use methodology
https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use/

IPBES — Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services
https://www.ipbes.net/global-assessment

Unione europea — Direttiva quadro sui rifiuti 2008/98/CE
https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj

01.05 Salute, persone e società: quando i numeri diventano persone

01 · Introduzione

Mille persone possono essere una folla, un piccolo paese o una frazione quasi invisibile della popolazione italiana. Possono essere mille beneficiari diversi oppure cento persone contate dieci volte. Possono avere ricevuto un servizio, subito un danno lieve o perso molti anni di vita. Prima ancora di discutere se un impatto sia grande, dobbiamo sapere chi è stato contato e che cosa gli è accaduto.

L'impatto sociale comprende salute, sicurezza, lavoro, povertà, istruzione, accessibilità e qualità della vita. Non esiste un'unica metrica capace di riassumerlo senza scegliere implicitamente che cosa considerare importante. Il compito del libro non sarà comprimere le persone in un punteggio, ma rendere leggibili scala, distribuzione, durata e gravità degli effetti.

Persone, eventi e popolazioni

Una persona non è una prestazione

Un ospedale può registrare diecimila accessi senza aver curato diecimila persone. Un lavoratore può comparire in più contratti, un passeggero in molti viaggi, una famiglia in diversi trasferimenti pubblici. Quando i dati amministrativi contano eventi, non dobbiamo trasformarli automaticamente in individui.

Il denominatore racconta la domanda

Centomila casi sono molti o pochi? Dipende dalla popolazione esposta. Un tasso per mille, per centomila o per milione consente confronti tra territori di dimensione diversa, ma soltanto se il denominatore rappresenta davvero chi poteva subire l'evento. Dividere ogni cifra per tutti gli abitanti può produrre un numero formalmente corretto e concettualmente inutile.

Incidenza e prevalenza

L'incidenza conta i nuovi eventi in un periodo; la prevalenza misura quante persone vivono con una condizione in un dato momento o intervallo. Una malattia rara ma lunga può avere bassa incidenza e prevalenza significativa. Confondere le due misure altera sia la percezione del rischio sia il fabbisogno di servizi.

La media può nascondere il mondo

Se due persone hanno redditi molto diversi, la loro media può non assomigliare alla vita di nessuna delle due. Lo stesso accade con tempi di attesa, speranza di vita, esposizione all'inquinamento e risultati scolastici. La media descrive il centro aritmetico; mediana, distribuzione e differenze tra gruppi mostrano chi resta lontano da quel centro.

Un miglioramento nazionale può convivere con un peggioramento locale. Un beneficio complessivo può concentrarsi su chi era già avvantaggiato, mentre il costo ricade su chi dispone di meno alternative. Per questo l'impatto sociale richiede sempre almeno due domande: quante persone sono coinvolte e come sono distribuiti benefici, rischi e possibilità di scelta.

Salute: non tutti gli esiti hanno lo stesso peso

Rischio assoluto e rischio relativo

Un rischio che raddoppia sembra enorme, ma il suo significato cambia se passa da uno a due casi per milione oppure da cento a duecento per mille. Il rischio relativo descrive la variazione proporzionale; quello assoluto mostra quante persone in più potrebbero essere interessate. Quando possibile, il libro presenterà entrambi.

Durata, gravità e anni di vita

Contare i decessi è necessario ma non sufficiente. Un danno può causare disabilità temporanea, una malattia cronica o la perdita di molti anni di vita. Indicatori come gli anni di vita persi per morte prematura e gli anni vissuti in

condizioni di salute ridotta provano a incorporare durata e gravità. La loro somma forma i DALY, dall'inglese *Disability-Adjusted Life Years*: un DALY rappresenta la perdita equivalente di un anno vissuto in piena salute. Sono modelli utili, ma dipendono da ipotesi e non trasformano esperienze diverse in realtà moralmente equivalenti.

Associazione non significa causa

Due fenomeni possono variare insieme perché uno influenza l'altro, perché condividono una causa o per coincidenza. Gli studi osservazionali possono mostrare associazioni robuste, ma attribuire un numero di malattie o morti richiede una metodologia riconosciuta, un confronto plausibile e incertezze dichiarate. Non calcoleremo vittime di una singola impresa con semplici proporzioni.

Lavoro: oltre il numero degli occupati

Creare posti di lavoro può essere un beneficio importante, ma il conteggio non descrive salari, stabilità, orari, sicurezza, competenze, potere contrattuale o possibilità di crescita. Occorre distinguere occupazione diretta, indiretta e indotta ed evitare di sommarle quando derivano da modelli incompatibili. Anche la perdita di un posto ha effetti differenti secondo territorio, età, specializzazione e alternative disponibili.

Povertà, accesso e capacità reale

La disponibilità di un servizio non garantisce che tutti possano usarlo. Prezzo, distanza, tempo, barriere fisiche, competenze linguistiche e digitali possono trasformare un diritto formale in un accesso diseguale. Per cibo, sanità, energia, istruzione e trasporti distingueremo quindi capacità del sistema, copertura nominale, accessibilità economica e utilizzo effettivo.

Anche la povertà cambia con la definizione. La povertà assoluta valuta la possibilità di sostenere un paniere essenziale che varia con composizione familiare e territorio. Nelle statistiche dell'Istituto nazionale di statistica (ISTAT), questa condizione è stimata confrontando la spesa mensile per consumi della famiglia — non il reddito dichiarato — con il valore monetario del paniere essenziale applicabile a quella famiglia. La povertà relativa osserva invece la

posizione rispetto al tenore di vita della società. Sono due lenti complementari, non due stime concorrenti dello stesso oggetto.

Condizioni di vita e comunità

Le condizioni di vita non si esauriscono nel reddito o nell'accesso formale ai servizi. Casa, mobilità, istruzione, sicurezza, tempo disponibile, relazioni e possibilità di partecipare determinano quanto una persona possa tradurre risorse e diritti in vita quotidiana. Anche il lavoro di cura, retribuito o non retribuito, sostiene famiglie e comunità: ignorare chi lo svolge e quanto tempo richiede può far apparire gratuito un costo che è stato soltanto trasferito.

Gli effetti su una comunità non coincidono sempre con la somma degli esiti individuali. La chiusura di un presidio, lo spostamento di residenti o la concentrazione di rumore, traffico e rischio possono modificare reti di assistenza, opportunità e senso di sicurezza in un luogo preciso. Quando questi aspetti sono rilevanti, il libro distinguerà gli effetti temporanei da quelli duraturi e le medie generali dalle conseguenze locali.

L'Italia come punto di riferimento umano

Alla fine del 2024 l'Italia contava circa 58,9 milioni di residenti. Un milione di persone rappresenta quindi circa l'1,7% della popolazione; 5,9 milioni circa un decimo. Questa conversione è utile quando il fenomeno riguarda potenzialmente tutti, ma non sostituisce il denominatore specifico quando sono esposti soltanto lavoratori, minori, anziani o abitanti di un territorio.

Nel 2024 circa 5,7 milioni di persone vivevano in povertà assoluta, il 9,8% della popolazione; tra i minori la quota era il 13,8%. Nello stesso anno gli incidenti stradali hanno causato 3.030 morti e 233.853 feriti, mentre gli omicidi volontari sono stati 327. Mettere questi numeri uno accanto all'altro mostra ordini di grandezza diversi, non rende equivalenti cause, vittime, esposizioni o possibilità di prevenzione.

Nella fotografia consolidata al 30 aprile 2025, l'Istituto nazionale per l'assicurazione contro gli infortuni sul lavoro (INAIL) registrava per il 2024 circa 593 mila denunce di infortunio e 1.202 casi mortali denunciati. Non sono altrettanti infortuni definitivamente riconosciuti né, nel secondo caso, soltanto

decessi avvenuti sul luogo di lavoro: il totale comprende anche eventi in itinere ed è soggetto alle definizioni e alle procedure dell'assicurazione. Anche questo dato ha un perimetro: riguarda le denunce registrate nell'ambito dell'INAIL e non coincide con l'intero universo del lavoro. Restano fuori le attività non comprese nell'assicurazione obbligatoria e possono non emergere gli eventi che non vengono denunciati o rimangono sommersi. Il linguaggio statistico è parte del dato: sostituire «denuncia» con «infortunio accertato» cambierebbe impropriamente il fenomeno.

La speranza di vita alla nascita era 83,4 anni, con una differenza di circa 4,1 anni tra donne e uomini. È una media costruita sui tassi di mortalità osservati, non una previsione individuale né una promessa. Come molte grandi statistiche sociali, acquista valore quando viene scomposta per territorio, condizione economica e altre caratteristiche rilevanti.

Chi beneficia e chi sopporta il costo

Una politica può produrre un beneficio netto e avere comunque perdenti riconoscibili. Un'infrastruttura riduce i tempi per molti ma aumenta rumore e traffico per chi vive vicino; una trasformazione industriale crea nuove competenze e rende obsolete altre; un alimento economico amplia l'accesso ma può trasferire pressioni su lavoratori, salute o ambiente. La neutralità non consiste nel fingere che tutti gli effetti si compensino: consiste nel mostrarne distribuzione e qualità delle prove.

Dietro ogni totale

I grandi numeri sociali hanno una particolarità: ogni unità può essere una persona con una storia irripetibile. Il rispetto per quella complessità non impedisce di misurare; impone di misurare meglio. Nei capitoli successivi useremo i numeri per rendere visibili gli effetti, senza lasciare che il totale cancelli chi li vive.

Fonti e riferimenti

ISTAT — Indicatori demografici 2024
https://www.istat.it/comunicato-stampa/indicatori-demografici-anno-2024/

ISTAT — Povertà in Italia 2024
https://www.istat.it/comunicato-stampa/la-poverta-in-italia-anno-2024/

ISTAT — Vittime di omicidio 2024
https://www.istat.it/comunicato-stampa/le-vittime-di-omicidio-anno-2024/

ISTAT — Incidenti stradali in Italia 2024
https://www.istat.it/comunicato-stampa/incidenti-stradali-in-italia-2024/

INAIL — Relazione annuale 2024
https://www.inail.it/portale/it/inail-comunica/news/notizia.2025.07.news-presentazione-relazione-annuale-inail-2024.html

OMS — Leading causes of DALYs
https://www.who.int/data/gho/data/themes/mortality-and-global-health-estimates/global-health-estimates-leading-causes-of-dalys

IARC-OMS — Definizione di incidenza e popolazione a rischio
https://ci5.aws-csu.iarc.who.int/ci5-xii/about/

ILO — Economia della cura
https://www.ilo.org/it/aree-tematiche/economia-della-cura

ISTAT — Rapporto BES 2024
https://www.istat.it/produzione-editoriale/rapporto-bes-2024-il-benessere-equo-e-sostenibile-in-italia/

ISTAT — Metodologia della povertà assoluta
https://siqual.istat.it/SIQual/visualizza.do?id=8888914&language=IT&refresh=true

04.01 – Panoramica del settore

Ogni edificio, strada, rete elettrica, automobile, telefono o confezione ha una storia materiale che comincia molto prima della fabbrica. Dietro il prodotto finito ci sono rocce, sabbie, legname, salamoie, minerali, idrocarburi e materiali recuperati; ci sono poi impianti che separano, concentrano, raffinano e trasformano queste risorse fino a ottenere forme standardizzate che altre industrie possono acquistare. Le materie prime costituiscono quindi la base fisica dell'economia, anche quando scompaiono alla vista dentro oggetti e infrastrutture.

Questa base non coincide con una semplice lista di elementi chimici. La massa estratta, il valore economico, la difficoltà tecnica e l'importanza strategica raccontano aspetti diversi. Inoltre, il luogo in cui una risorsa viene estratta può essere lontano da quello in cui è raffinata, trasformata e infine consumata. Comprendere il settore significa seguire queste differenze senza confondere la presenza geologica con la disponibilità industriale, né la possibilità teorica di riciclare un materiale con il suo effettivo ritorno sul mercato.

L'economia ha un peso

La crescita economica moderna è stata accompagnata da un'espansione straordinaria dei flussi materiali. Secondo l'International Resource Panel delle Nazioni Unite, l'estrazione globale di risorse è passata da circa 30 miliardi di tonnellate nel 1970 a circa 106 miliardi nel livello riferito al 2019 e presentato nel Global Resources Outlook 2024. La cifra comprende biomassa, combustibili fossili, minerali metallici e minerali non metallici. Non rappresenta il peso dei prodotti acquistati dai consumatori: include anche la materia necessaria a costruire edifici e infrastrutture e quella separata o trasformata prima che un materiale diventi commerciabile.

Espressa per abitante, la quantità media impiegata nel mondo è salita nello stesso periodo da circa 23 a 39 chilogrammi al giorno. Questa media nasconde differenze molto grandi tra paesi e gruppi sociali, ma offre un primo ordine di grandezza: l'economia digitale, i servizi e la conoscenza non hanno eliminato la base materiale. Centri dati, reti di comunicazione, ospedali, scuole e sistemi

finanziari funzionano grazie a edifici, cavi, apparecchiature, energia e ricambi che richiedono flussi continui di materia.

Il dato globale serve a misurare la scala, non a suggerire che tutte le tonnellate siano equivalenti. Una tonnellata di ghiaia, una di rame raffinato e pochi chilogrammi di terre rare hanno prezzi, funzioni, rischi e possibilità di recupero differenti. Per capire il sistema occorre quindi osservare insieme massa, qualità e posizione nella filiera.

Non tutte le tonnellate raccontano la stessa storia

La parte più pesante dell'economia materiale non è costituita dai minerali che dominano il dibattito tecnologico. Nel 2025 il consumo interno di materiali dell'Unione europea era pari a 13,7 tonnellate per abitante e oltre la metà della massa era formata da minerali non metallici: sabbia, ghiaia, pietra, calcare, argilla e altri materiali impiegati soprattutto nelle costruzioni. La biomassa rappresentava circa un quarto, mentre i combustibili fossili restavano sotto un quinto. I minerali metallici costituivano la categoria più piccola in massa.

Il cemento rende visibile questa sproporzione. Lo United States Geological Survey stima che nel 2024 il mondo ne abbia prodotto circa 4 miliardi di tonnellate. È una quantità enorme perché il cemento alimenta calcestruzzo, edifici e infrastrutture; tuttavia il suo valore per tonnellata e la sua geografia commerciale sono diversi da quelli di rame, litio o platino. I materiali pesanti e relativamente economici tendono a essere prodotti vicino ai luoghi d'impiego, perché il trasporto incide molto sul prezzo. Materiali più rari o più raffinati possono invece percorrere catene globali complesse pur muovendo masse minori.

La distinzione tra massa e importanza impedisce due errori opposti. Il primo è credere che il sistema materiale sia composto soprattutto da metalli critici; il secondo è concludere che un materiale di piccola massa sia marginale. Pochi componenti difficili da sostituire possono fermare una produzione molto più grande del loro peso. Al contrario, materiali comuni e abbondanti possono generare pressioni considerevoli proprio perché vengono movimentati in miliardi di tonnellate.

Una stessa materia vive su mappe diverse

La geologia stabilisce dove una risorsa può trovarsi, ma non decide da sola dove si crea il materiale industriale. Un minerale può essere estratto in un paese, concentrato in un altro, raffinato in un terzo e trasformato in componenti altrove. Capitale, energia, acqua, tecnologia, infrastrutture, competenze, norme e accesso ai mercati possono concentrare le fasi intermedie anche quando i giacimenti sono distribuiti.

L'Agenzia internazionale dell'energia mostra questo fenomeno per un paniere di minerali chiave della transizione energetica. Tra il 2020 e il 2024 la quota media dei primi tre paesi nella raffinazione è salita dall'82 all'86 per cento; nello stesso periodo la concentrazione media della produzione mineraria è aumentata dal 73 al 77 per cento. Sono medie riferite a quel paniere, non a tutte le materie prime né a ciascun minerale. Indicano però che il collo di bottiglia può trovarsi dopo la miniera, nella capacità di separare e raffinare il materiale secondo specifiche utilizzabili.

Per questo dipendenza e autosufficienza non possono essere lette soltanto contando le miniere. Un paese può non estrarre un metallo ma disporre di raffinerie e industrie avanzate; può possedere una risorsa geologica ma non avere impianti, energia conveniente o autorizzazioni per utilizzarla. L'Italia rappresenta bene il primo caso: trasforma materiali e produce beni industriali di valore, ma per molte filiere dipende da risorse, concentrati e semilavorati provenienti dall'estero. I capitoli dedicati a Italia, Europa e mondo esamineranno queste geografie senza confondere estrazione, raffinazione e consumo.

La materia invisibile: frontiere fisiche e impronta materiale

Le statistiche dei flussi materiali cambiano a seconda della domanda posta. Il consumo interno di materiali, noto a livello internazionale come DMC, dall'inglese Domestic Material Consumption, somma l'estrazione utilizzata all'interno di un'economia e le importazioni fisiche, sottraendo le esportazioni fisiche. Misura quindi i materiali che entrano direttamente nell'economia

nazionale o europea. Non include però tutta la roccia, la biomassa e l'energia impiegate all'estero per produrre un bene importato.

La material footprint, chiamata da Eurostat consumo di materie prime o RMC, dall'inglese Raw Material Consumption, prova a ricostruire anche questa parte a monte. Converte i prodotti commerciati nelle quantità di materie prime equivalenti estratte nel mondo per soddisfare la domanda finale dei residenti, al netto di quelle associate alle esportazioni. È una contabilità modellata, diversa dal peso fisico osservato alle frontiere: i due indicatori rispondono a domande complementari e non sono due stime concorrenti dello stesso oggetto.

Il confronto deve usare la stessa annualità. Per mettere a confronto DMC e RMC dell'Unione europea e dell'Italia su basi omogenee si usa il 2022. In quell'anno, nell'Unione europea, il DMC era pari a 14,3 tonnellate per abitante e l'RMC a 14,9. In Italia la differenza era più ampia: 8,9 tonnellate per abitante di DMC contro 11,2 di RMC. Ciò non significa che una misura sia corretta e l'altra incompleta; significa che una registra i flussi diretti, mentre l'altra attribuisce al consumo anche l'estrazione incorporata nelle catene estere.

I confini doganali rendono quindi visibile il commercio, ma non tutta la dipendenza materiale. Questa distinzione sarà essenziale quando si confronteranno paesi importatori, economie trasformatrici e grandi produttori: un bene relativamente leggero al confine può richiedere molta materia e molte trasformazioni nei passaggi precedenti.

Il prezzo racconta solo una parte

Il mercato coordina flussi molto diversi attraverso un segnale apparentemente semplice: il prezzo. Per una materia standardizzata, il prezzo riflette qualità, purezza, disponibilità, domanda, energia, impianti, trasporto, scorte e rischio commerciale. Permette a compratori e venditori lontani di confrontare materiali che rispettano specifiche comuni. Non racconta però automaticamente tutto ciò che è accaduto prima della transazione.

Una tonnellata di metallo raffinato non mostra nel proprio peso la quantità di roccia movimentata e scartata nel paese d'origine. Il prezzo può includere il costo dell'elettricità o del combustibile impiegato dalla raffineria, ma non rende necessariamente visibili la pressione su una falda, la perdita di suolo, i residui

accumulati, l'esposizione dei lavoratori o la distribuzione dei benefici nelle comunità locali. Alcuni costi vengono sostenuti dall'impresa, altri dalle persone, dagli ecosistemi o dalle generazioni future; la loro misurazione richiede perimetri differenti.

Nel perimetro del Global Resources Outlook 2024, l'estrazione e la trasformazione delle risorse sono associate a oltre il 60 per cento delle emissioni climalteranti globali. È una stima dell'intero sistema delle risorse, non una quota attribuibile alle sole miniere. Acqua, territorio, lavoro e sicurezza non possono essere ridotti a un'unica percentuale comparabile: variano con il materiale, il processo, il luogo e la qualità della gestione. Nei capitoli specifici questi effetti saranno quindi misurati lungo le singole filiere, evitando somme di indicatori incompatibili.

Il materiale secondario arriva dopo

Un materiale non diventa secondario nel momento in cui un prodotto viene dichiarato riciclabile. Prima deve uscire dall'uso, essere raccolto, separato, trasportato e trattato; il risultato deve raggiungere una purezza e una qualità sufficienti, trovare un acquirente e sostituire davvero una parte dell'input vergine. Tra il potenziale tecnico e il ritorno sul mercato esistono perdite, contaminazioni, costi e differenze di valore.

Il tempo è un vincolo altrettanto importante. Acciaio, rame e alluminio possono restare per decenni immobilizzati nell'uso: costituiscono lo stock di edifici, reti, macchinari e veicoli in funzione. Finché questi beni svolgono la loro funzione, i materiali che contengono non sono disponibili come rottame. Se la domanda cresce rapidamente, anche una raccolta efficiente non può fornire materiale secondario in quantità pari al nuovo fabbisogno: il recupero dipende da ciò che è stato immesso in passato e arriva oggi a fine vita.

La qualità può inoltre cambiare durante l'uso e il trattamento. Leghe mescolate, rivestimenti, additivi e contaminanti rendono difficile tornare allo stesso impiego; in altri casi il materiale recuperato trova un mercato diverso o meno esigente. Dire che un metallo o un polimero è riciclabile non basta quindi a misurare quante volte viene riciclato, con quale resa e per quale destinazione.

La circolarità comprende anche durata, manutenzione, riuso, progettazione per il disassemblaggio, sostituzione ed efficienza materiale. Nessuna di queste leve

elimina da sola l'estrazione primaria, ma insieme possono ridurre il fabbisogno per unità di servizio e limitare le perdite. I capitoli dedicati ai rifiuti seguiranno raccolta e trattamento; questo volume riprenderà il percorso quando il materiale recuperato avrà nuovamente specifiche e mercato da materia prima.

Una mappa per leggere il sistema

Le materie prime possono essere comprese tenendo insieme tre idee. La prima è la scala: l'economia mondiale muove ogni anno decine di miliardi di tonnellate e la massa è dominata da materiali comuni. La seconda è la geografia: estrazione, raffinazione, trasformazione e consumo non coincidono, e la vulnerabilità può concentrarsi in qualsiasi passaggio. La terza è il tempo: i materiali restano a lungo nei beni in uso, ritornano solo in parte e diventano secondari soltanto dopo una nuova qualificazione industriale.

I capitoli successivi useranno questa mappa. Prima seguiranno il percorso dalla risorsa al materiale commerciabile; poi entreranno nelle principali famiglie, dai minerali di massa ai metalli, dalla chimica di base alle plastiche, dal legno alla carta. Infine ricomporranno prezzi, commercio, dipendenze, recupero e sostituzione. L'obiettivo non è trovare una materia prima ideale, ma capire quanta materia serve, dove viene trasformata, quali vincoli la rendono disponibile e quali conseguenze accompagnano il suo percorso.

Fonti e riferimenti

UNEP e International Resource Panel – Global Resources Outlook 2024.

https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/rich-countries-use-six-times-more-resources-generate-10-times

Eurostat – Material flow accounts and resource productivity.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_and_resource_productivity

Eurostat – Raw material consumption, serie SDG 12.2.1.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/sdg_12_21/default/table

Eurostat – Material flow accounts, serie env_ac_mfa.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_mfa/default/table

United States Geological Survey – Mineral Commodity Summaries 2025.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf

Agenzia internazionale dell'energia – Global Critical Minerals Outlook 2025.

https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/executive-summary

04.02 – Italia

Quanta materia prima produce l'Italia e quanta ne deve cercare altrove? Una risposta unica sarebbe fuorviante. Il paese estrae grandi masse di pietra, sabbia e altri minerali per l'edilizia e l'industria; nello stesso tempo trasforma materiali il cui primo passaggio produttivo avviene spesso fuori dai suoi confini. Possedere un giacimento, estrarre una risorsa e consegnare a una fabbrica un materiale con le caratteristiche richieste sono condizioni distinte. Per capire la posizione italiana occorre seguirle in quest'ordine e precisare, ogni volta, quale materiale e quale fase si stanno misurando.

Le statistiche disponibili non formano un bilancio unico di tutte le materie prime. Le cave e le miniere misurano l'estrazione di risorse solide non energetiche, le statistiche industriali misurano i prodotti ottenuti, quelle commerciali registrano gli scambi secondo categorie proprie. Sommare questi numeri conterebbe più volte la stessa materia, via via trasformata. Il quadro che segue usa quindi alcune grandezze fisiche confrontabili e lascia espliciti i passaggi che i dati non permettono di ricostruire.

La materia estratta

Nel 2022, secondo l'Annuario statistico italiano 2025, le cave e le miniere del paese hanno estratto circa 199 milioni di tonnellate di risorse minerali solide non energetiche. Le cave ne hanno forniti 183,3 milioni, oltre nove decimi del totale; alle miniere corrispondevano 15,7 milioni. Questi numeri non comprendono combustibili fossili e non rappresentano la quantità di prodotti finiti fabbricati in Italia. Sono la misura di una fase iniziale, quella in cui materiale naturale viene prelevato dal suolo e avviato alle successive lavorazioni.

L'ampiezza della quota delle cave dice molto sulla base fisica dell'economia italiana. Nella rilevazione del 2022, calcare, marne, gesso e arenaria estratti da cava ammontavano insieme a 82,8 milioni di tonnellate; sabbie e ghiaie ad altri 66,9 milioni. Sono categorie aggregate, non un'unica sostanza né quantità automaticamente destinate a un solo uso. Alimentano filiere nelle quali il peso conta molto: aggregati, leganti e lavorazioni minerali richiedono continuità delle forniture e trasporti di grandi volumi. La loro presenza quotidiana in

edifici e infrastrutture le rende meno visibili di un metallo raro, ma non meno decisive nel bilancio delle masse.

Anche il termine «miniera» richiede attenzione. Le quantità più rilevanti registrate da Istat in quella categoria non sono metalli: 6,2 milioni di tonnellate riguardavano minerali ceramici e industriali, 6,0 milioni marne da cemento. La differenza amministrativa e statistica tra cava e miniera non coincide dunque con l'opposizione intuitiva tra materiale comune e metallo prezioso. E le marne estratte non sono cemento già prodotto: prima della vendita come legante devono attraversare una trasformazione industriale. Confondere risorsa, materiale intermedio e prodotto attribuirebbe alla stessa tonnellata significati diversi lungo la filiera.

Nel 2022 risultavano autorizzati 3.995 siti, dei quali 3.856 cave e 139 miniere. Quelli in produzione erano 2.249: 2.166 cave e 83 miniere. Un'autorizzazione indica la possibilità amministrativa di operare, non prova che il sito abbia estratto materiale nell'anno considerato. Anche contare gli impianti attivi, da solo, dice poco sulla massa: una cava e un'altra possono avere volumi molto diversi. Per leggere il settore servono entrambe le dimensioni, i luoghi in cui si interviene e le quantità che da quei luoghi escono.

La geografia del sottosuolo

Le due mappe, dei siti e delle tonnellate, non si sovrappongono perfettamente. La Lombardia guidava nel 2022 l'estrazione da cava con 27,9 milioni di tonnellate. La Sardegna, con 26 miniere in produzione e circa 3,1 milioni di tonnellate estratte da miniera, rende invece visibile un'altra geografia produttiva. Non avrebbe senso trasformare il confronto in una classifica di «vocazione mineraria»: le categorie di materiale e le dimensioni degli impianti cambiano, mentre la presenza di un sito non misura la disponibilità nazionale di un particolare input industriale. Il confronto mostra che la risposta a «dove si estrae?» dipende anzitutto da ciò che si cerca.

Anche le pressioni sul territorio vanno lette alla scala giusta. Nel 2022 l'intensità media nazionale dell'estrazione delle risorse minerali non energetiche era di circa 659 tonnellate per chilometro quadrato; in Lombardia raggiungeva 1.234. L'indicatore divide la massa estratta per la superficie regionale: offre un confronto territoriale, ma non descrive l'effetto di ogni

singolo sito né la sua distanza da abitazioni, falde o aree sensibili. I materiali pesanti si concentrano in bacini di domanda e reti di trasporto differenti da quelli dei minerali di minor massa. Un totale nazionale nasconde perciò sia le distanze percorse dai materiali sia la distribuzione locale degli interventi.

La geologia aggiunge possibilità, non produzione automatica. Una segnalazione di minerale o un'area coltivata in passato non dimostrano che oggi esista una riserva economicamente utilizzabile: occorrono indagini sulla qualità e sulla consistenza, accesso al giacimento, impianti, autorizzazioni e un mercato. Nel quadro pubblicato nel 2024 dall'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA), l'Italia non estrae attualmente minerali metalliferi critici. Questo fatto non equivale a dire che il sottosuolo sia privo di minerali di interesse, né che ogni materia prima critica sia un metallo. ISPRA segnala estrazioni di materiali non metalliferi inclusi nell'elenco europeo delle materie prime critiche: feldspato, impiegato nell'industria ceramica, e fluorite, utilizzata anche nella metallurgia e nella produzione del vetro. È il materiale specifico, e non l'etichetta generica di «miniera», a chiarire cosa sia effettivamente disponibile.

I siti del passato appartengono alla stessa storia materiale ma pongono una domanda diversa da quella sulla produzione corrente. ISPRA registra 562 siti minerari dismessi o abbandonati con rischio ecologico e sanitario medio o alto. Il numero riguarda luoghi da conoscere e gestire; non è il conteggio di miniere riapribili né una stima di metalli recuperabili. La presenza di residui e gallerie, insieme alla memoria industriale dei territori, impone quindi di distinguere tre piani: ciò che è stato estratto, ciò che si estrae ora e ciò che la geologia potrebbe rendere esplorabile. Solo il secondo entra nelle quantità di produzione annuale appena descritte.

La trasformazione non rivela l'origine

Dopo l'estrazione la geografia cambia. Un impianto può lavorare materiale estratto vicino, materia proveniente da altre regioni, input importati oppure materiale recuperato. Perciò un'elevata produzione manifatturiera non misura, per sottrazione, la quantità di risorsa estratta in Italia. Il caso dell'acciaio rende immediata la distinzione: nel 2024 il paese ha prodotto circa 20 milioni di tonnellate di acciaio grezzo, secondo la World Steel Association. La cifra misura l'acciaio ottenuto nella fase siderurgica, non il minerale di ferro estratto in

Italia, né la provenienza del rottame ferroso, che può essere fuso in un forno elettrico per ottenere nuovo acciaio, o degli altri input usati per produrlo.

La siderurgia combina processi e materie di alimentazione differenti. Leggere la produzione di acciaio come prova di autosufficienza nel minerale confonderebbe il prodotto ottenuto con le materie impiegate; trattarla come prova di una sola origine estera commetterebbe l'errore opposto. Per ricostruire le dipendenze servono quantità fisiche degli input per tipologia, provenienza, qualità e destinazione, oltre alle quantità prodotte. Qui il dato sull'acciaio segnala la capacità italiana di prima trasformazione. Le tecnologie e i bilanci propri della filiera troveranno posto nel capitolo 04.11.

La carta permette di osservare più di un passaggio nella stessa unità di misura. Nelle serie FAOSTAT, banca dati statistica dell'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (FAO), nel 2023 l'Italia ha prodotto circa 148 mila tonnellate di pasta di legno, ne ha importate circa 3,21 milioni ed esportate circa 163 mila. La produzione nazionale di carta e cartone, classificata in una voce successiva della stessa filiera, era di circa 7,50 milioni di tonnellate. Non stiamo sommando pasta e carta: la prima può essere un input della seconda, e proprio per questo la loro addizione ripeterebbe materia già conteggiata in una fase precedente.

Il contrasto tra poca pasta prodotta in Italia, molta pasta importata e un'ampia produzione cartaria descrive una specializzazione nella trasformazione. Non autorizza però a dire che una determinata percentuale di ogni foglio italiano provenga da pasta estera. Le cartiere possono impiegare anche fibre recuperate e altri apporti, mentre importazioni, esportazioni, scorte e rese di lavorazione non sono attribuite da quelle quattro grandezze al singolo prodotto. Le 3,21 milioni di tonnellate importate riguardano la pasta di legno come voce commerciale, non il contenuto estero complessivo di carta e cartone venduti sul mercato nazionale.

La stessa base registra, sempre nel 2023, circa 4,54 milioni di tonnellate di carta e cartone importate e 2,66 milioni esportate. Se alla produzione si sommano le importazioni e si sottraggono le esportazioni si ottiene una disponibilità apparente della voce, circa 9,38 milioni di tonnellate. L'identità è utile per capire che produzione nazionale e disponibilità sul mercato interno non coincidono. Non è una misura dei consumi finali: restano da considerare variazioni delle scorte, impieghi intermedi, differenze di classificazione e il

percorso della fibra fra più lavorazioni. Un calcolo aritmetico corretto può rispondere alla domanda sbagliata se il suo perimetro non è dichiarato.

Anche le statistiche doganali richiedono questa disciplina. Un'importazione di minerale, un semilavorato metallico e un componente già incorporato in una macchina entrano in voci diverse; il loro valore monetario non restituisce automaticamente le tonnellate di materia estratta all'origine. Allo stesso modo, un'esportazione italiana può contenere materia importata e trasformata in Italia. Per una dipendenza fisica credibile occorre seguire materiale per materiale unità comparabili e fasi corrispondenti. Il saldo commerciale totale del paese o una percentuale indistinta di «materie prime importate» cancellerebbero le differenze che il caso della carta rende concrete.

Che cosa significa autonomia materiale

Anche il calendario dei dati conta. L'estrazione descritta qui si riferisce al 2022, gli scambi forestali al 2023 e l'acciaio al 2024: ogni cifra è la fotografia della propria voce in un anno preciso. Accostarle aiuta a riconoscere le funzioni del sistema, non a calcolare una variazione annuale della dipendenza nazionale. Per stabilire se una filiera stia diventando più autonoma occorrerebbe confrontare negli anni la stessa materia, con definizioni e unità stabili, includendo gli input recuperati e i flussi commerciali pertinenti. Senza questa continuità, il cambiamento di un prodotto può essere scambiato per quello dell'intero settore.

L'Italia dispone dunque di una base estrattiva considerevole, dominata da pietre, sabbie e altri minerali di massa. Dispone anche di impianti capaci di fornire materiali industriali a partire da input di provenienza diversa. Per contro, la presenza di un'antica miniera o di una formazione geologica non va iscritta tra le produzioni correnti; la produzione di acciaio o di carta non certifica da sola l'origine nazionale delle materie che li compongono. Sono affermazioni compatibili, perché descrivono punti differenti dello stesso percorso.

La risposta alla domanda iniziale cambia con il materiale e con la fase osservata. Per gli aggregati da cava si può misurare una grande estrazione interna; per la pasta di legno si osserva una forte prevalenza delle importazioni rispetto alla produzione nazionale della medesima voce; per l'acciaio grezzo si

vede la scala della trasformazione, non il bilancio dei suoi input. Una quota generale di autosufficienza mescolerebbe queste situazioni senza spiegare nessuna. Nei capitoli successivi ogni filiera potrà essere letta seguendo il tragitto dalla risorsa alla materia commercializzabile: dove si trova, dove si estrae, dove viene trasformata e quale parte del fabbisogno richiede scambi con l'estero.

Fonti e riferimenti

Istat – Annuario statistico italiano 2025, capitolo 2: dati 2022 su cave e miniere.

https://www.istat.it/storage/ASI/2025/capitoli/C02.pdf

ISPRA – Siti di estrazione di minerali di prima categoria (miniere).

https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/georisorse/siti-di-estrazione-di-minerali-di-prima-categoria-miniere

ISPRA – Materie prime critiche: ecco quali e dove si trovano.

https://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2024/materie-prime-critiche-ecco-quali-e-dove-si-trovano

World Steel Association – World Steel in Figures 2025.

https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf

FAOSTAT – Forestry Production and Trade, dati Italia 2023.

https://bulks-faostat.fao.org/production/Forestry_E_All_Data_(Normalized).zip

04.03 – Europa

Di quali materie prime dispone l'Unione europea e in quali passaggi deve rivolgersi al resto del mondo? La risposta cambia se si osserva la massa estratta, il metallo raffinato o la materia incorporata in un prodotto. Nei suoi ventisette Stati membri l'Unione estrae grandi quantità di risorse e conserva una rete di impianti industriali. Ma la presenza di un impianto non dice da dove provenga tutto ciò che vi entra, così come l'assenza di una miniera non implica l'assenza di una filiera di trasformazione. Per leggere il sistema europeo occorre attraversare queste fasi senza sommarle.

La base materiale europea

Nel 2025 il consumo interno di materiali dell'Unione europea era stimato da Eurostat in 13,7 tonnellate per abitante. L'indicatore somma l'estrazione interna e le importazioni fisiche e sottrae le esportazioni: descrive la materia usata direttamente nell'economia, non tutta quella estratta nel mondo per produrre i beni consumati dagli europei. Oltre metà di questa massa era costituita da minerali non metallici. Rocce, sabbie e altri materiali impiegati soprattutto nelle costruzioni danno quindi il peso maggiore al bilancio fisico; i minerali metallici ne formano la categoria più piccola. La dimensione di una categoria in tonnellate, però, non misura quanto sia facile sostituirla.

Molti minerali non metallici vengono estratti dove si trovano i mercati che li impiegano: trasportare grandi masse di materiale di basso valore unitario su lunghe distanze può essere oneroso. Per i metalli, invece, giacimenti, fasi di raffinazione e industrie utilizzatrici possono trovarsi in Paesi diversi. Il dato aggregato europeo tiene insieme territori con estrazione, lavorazione e consumi differenti. Per questo una grande base estrattiva non autorizza a chiamare l'UE autosufficiente in tutte le materie prime: occorre scegliere il materiale e individuare la fase che interessa.

La differenza si vede anche fra Stati membri. Il consumo diretto per abitante può essere molto più alto in un paese con intensa estrazione o costruzione che in uno con un'economia più orientata ai servizi, senza che la seconda economia rinunci ai materiali contenuti negli acquisti. Popolazione, attività produttive e scambi modificano il valore dell'indicatore. Ordinare i Paesi dal consumo

diretto più basso al più alto non produce quindi una classifica di efficienza: una parte del materiale utilizzato da un paese può essere stata estratta e lavorata da altri. È proprio la distribuzione di queste attività a rendere utile il perimetro UE accanto ai bilanci nazionali.

Dove comincia la dipendenza

Eurostat misura anche la quota delle importazioni nell'input materiale diretto, cioè nella somma di estrazione interna e importazioni fisiche. Nella media dell'ultimo decennio disponibile nell'articolo statistico, questa dipendenza era intorno al 3% per i minerali non metallici e al 51% per i minerali metallici. Il confronto rende visibile una differenza strutturale fra due grandi famiglie. Non significa che ogni cava europea soddisfi il 97% della domanda del suo materiale, né che ciascun metallo sia importato per il 51%. Le quote hanno come denominatore l'input di intere categorie, con qualità e prodotti diversi al loro interno.

L'importazione fisica registra ciò che attraversa il confine esterno dell'Unione. Può essere minerale, concentrato, materiale raffinato o un bene a un diverso stadio di lavorazione; il peso alla frontiera non ricostruisce da solo la roccia movimentata all'origine. I totali commerciali di tutte le merci sono ancora meno adatti a descrivere le sole materie prime industriali, perché la loro massa comprende soprattutto combustibili fossili. Nelle statistiche del 2025, circa mezza tonnellata per abitante delle importazioni apparteneva alla categoria dei minerali metallici: è un riferimento più pertinente, purché non lo si legga come quantità di metallo puro o come bilancio completo dei metalli incorporati nei prodotti finiti.

Nello stesso carico possono viaggiare minerale e materiale già concentrato, con tenori di metallo differenti. Due tonnellate registrate alla dogana non forniscono perciò la stessa quantità di rame o nichel utilizzabile. Per rispondere a una domanda industriale precisa servirebbero unità riferite al contenuto del materiale, qualità commerciale, origine e destinazione della merce. La statistica per grandi categorie permette di identificare dove la dipendenza è elevata; non sostituisce un bilancio di filiera, che deve seguire l'input fino alla forma richiesta dall'impianto utilizzatore.

Un'altra frontiera è quella fra Stati membri. Se un'impresa italiana compra materia da un impianto polacco, l'operazione è un'importazione per l'Italia ma uno scambio interno per il bilancio dell'UE-27. Quel passaggio può rendere più accessibile una capacità produttiva collocata altrove nel mercato unico; non cancella, però, l'eventuale origine esterna di un concentrato arrivato prima nell'impianto polacco. Per valutare la dipendenza dell'Unione nel suo insieme bisogna seguire l'attraversamento della frontiera esterna e, per capire i rischi di una filiera, anche le trasformazioni avvenute dopo.

La materia oltre la frontiera

Le merci che entrano nell'UE hanno già richiesto estrazione e lavorazione. Per ricostruire quella parte meno visibile Eurostat stima l'impronta materiale, detta anche consumo di materie prime: attribuisce alla domanda finale europea le risorse estratte nel mondo per soddisfare consumi e investimenti. Non è una seconda misura del peso registrato alla dogana. La quota di importazioni nell'input diretto conta flussi materiali osservati al confine; l'impronta usa modelli per risalire alle estrazioni necessarie lungo le catene produttive.

Nella stima per il 2023, circa 4,0 miliardi di tonnellate estratte all'interno dell'UE e 2,2 miliardi estratte fuori dall'UE erano attribuite alla domanda finale europea. I valori sono arrotondati e appartengono alla stessa contabilità modellata: non vanno aggiunti alle importazioni fisiche. La distinzione mostra che l'economia europea utilizza risorse di entrambe le origini, anche quando un bene arriva alla frontiera già lavorato e leggero rispetto ai materiali movimentati nelle fasi precedenti. Non permette, da sola, di assegnare l'origine della materia a ogni specifica filiera.

Per passare dalla mappa delle estrazioni alla realtà di un materiale occorre osservare che cosa entra negli impianti e che cosa ne esce. È qui che le categorie statistiche generali lasciano spazio ai bilanci di produzione: un metallo raffinato nell'UE può combinare minerale estratto localmente, concentrati acquistati e rottame.

Un impianto, più origini

Un esempio circoscritto è la società polacca KGHM Polska Miedź. Nel 2023 produsse 592,4 mila tonnellate di rame elettrolitico. Il suo rapporto annuale

attribuisce 385,5 mila tonnellate della produzione a concentrati propri e 206,8 mila a materiali metalliferi acquistati; il piccolo scarto rispetto al totale deriva dall'arrotondamento. Le due quantità sono rame raffinato prodotto, non il peso dei materiali immessi negli impianti. La seconda voce comprende rottame e concentrati importati, senza indicare quanto rame raffinato provenga dall'uno e quanto dagli altri. La produzione è quindi misurata, mentre l'origine completa della materia non si ricava da quella sola cifra.

Si tratta della produzione di una società, non di un totale UE-27 né di un campione rappresentativo della raffinazione europea. Il caso mostra che estrazione propria, trasformazione industriale e acquisto di input possono convivere nella medesima attività.

Le strozzature cambiano con la fase

La stessa distinzione aiuta a leggere le materie prime critiche. Il regolamento europeo del 2024 individua 34 materie prime critiche e, fra queste, 17 strategiche. Sono classificazioni che combinano rilevanza economica e rischio di approvvigionamento o assegnano priorità a particolari filiere; non sono un elenco di materiali assenti dal sottosuolo europeo. Per ciascuna materia occorre chiedere dove avvengano estrazione, lavorazione e fornitura agli utilizzatori. La concentrazione di una fase può creare un vincolo anche quando il minerale esiste in più luoghi.

Le terre rare pesanti offrono un esempio netto, da leggere nella sua data e nella sua definizione. Nella valutazione europea pubblicata nel 2023, riferita prevalentemente al periodo 2016–2020, la Cina figura con il 100% della fornitura mondiale nella fase di lavorazione considerata dallo studio. Una distinta tabella la indica come principale fonte dell'approvvigionamento UE, ancora al 100% per quella fase. Le cifre non descrivono un monopolio delle miniere mondiali e non sono una misura osservata nel 2026. Servono a mostrare che la geografia della trasformazione può essere decisiva quanto quella del giacimento.

Il Critical Raw Materials Act fissa per il 2030 obiettivi separati per estrazione, lavorazione e riciclo delle materie strategiche, oltre a un limite alla concentrazione delle forniture da Paesi terzi. Sono traguardi relativi al consumo dell'UE, non quote già raggiunte. Per valutarne i progressi serviranno dati sulla

produzione effettiva delle singole materie e sulla provenienza degli input, distinti dai progetti annunciati.

Il contributo della materia recuperata

Un'altra fonte di approvvigionamento è il materiale che rientra nei processi industriali dopo l'uso. Eurostat stima che nel 2024 il 12,2% dell'uso complessivo di materiali nell'UE provenisse da materia riciclata. È il tasso di uso circolare dell'intera economia: comprende famiglie di materiali molto diverse e ha come riferimento il loro uso complessivo, dominato in massa anche dai minerali non metallici. Non dice quanta parte dei rifiuti sia stata raccolta, né quale quota di un particolare metallo torni in produzione.

Per seguire un singolo materiale serve un altro indicatore. Nella valutazione europea sui materiali critici, il tasso di input da riciclo a fine vita era del 55% per il rame e del 32% per l'alluminio nel periodo di riferimento 2016–2020. Misura il contributo del rottame post-consumo riciclato alla fornitura europea di ciascuno dei due metalli; non è il tasso di raccolta dei loro rifiuti e non usa il denominatore del 12,2% generale. Le tre percentuali possono dunque essere tutte corrette senza descrivere una circolarità uniforme. Anche per una materia recuperabile contano quantità di beni che arrivano effettivamente a fine vita, separazione, qualità del materiale e possibilità di rimetterlo in un processo produttivo.

Il tempo limita ciò che il recupero può offrire oggi. Una parte dei metalli in uso resta per anni in edifici, reti, macchinari e veicoli; si renderà disponibile come rottame soltanto quando quei beni saranno sostituiti. Un'altra parte entra in oggetti dispersi, leghe o componenti che richiedono separazioni complesse. Anche una buona raccolta non cambia il calendario con cui i materiali escono dagli impieghi esistenti, né assicura che il materiale ottenuto possieda la purezza richiesta dalla lavorazione successiva. Per valutare il contributo industriale del riciclo occorre guardare alla materia che torna effettivamente nelle linee produttive, al materiale richiesto in quel momento e alla qualità necessaria per usarlo.

La posizione materiale dell'Unione non si riassume quindi in un'unica quota di autosufficienza. Per pietra e altri minerali di massa la base interna è ampia; per i minerali metallici le importazioni pesano molto di più; per alcune lavorazioni

la concentrazione dei fornitori introduce un rischio ulteriore. Gli impianti europei e il recupero sono capacità reali, da misurare accanto all'origine e alla qualità dei loro input. È la combinazione di materiale, fase e provenienza a dire di quale disponibilità l'UE possa contare.

Fonti e riferimenti

Eurostat – Material flow accounts and resource productivity.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_and_resource_productivity

Eurostat – Physical imports and exports.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Physical_imports_and_exports

Eurostat – Material flow accounts statistics: material footprints.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_statistics_-_material_footprints

KGHM Polska Miedź – Management Board's Report on the Activities in 2023.

https://kghm.com/sites/default/files/2024-04/MBs%20report%20on%20activities%20in%202023.pdf

Commissione europea – Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023.

https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1&format=PDF&language=en&productionSystem=cellar

Unione europea – Regolamento (UE) 2024/1252 sulle materie prime critiche.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1252

Eurostat – Over 12% of materials in the EU come from recycling.

https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20251119-1

04.04 – Il mondo

Una mappa delle miniere non basta a spiegare il sistema mondiale delle materie prime. Indica dove una risorsa viene estratta, ma il materiale può essere lavorato altrove, attraversare altri confini e alimentare industrie lontane. Anche una carta dei maggiori produttori cambia aspetto quando si passa dal minerale al metallo raffinato o dal metallo ai beni che lo incorporano. Per capire dove si trova la materia occorre prima chiedere in quale fase la si sta osservando.

La distinzione conta anche per le quantità. Una riserva è uno stock stimato; l'estrazione è un flusso annuo; una statistica doganale pesa una merce che attraversa una frontiera. Nessuna di queste grandezze, presa da sola, identifica chi usa il prodotto alla fine della catena. Bauxite, rame e minerale di ferro permettono di seguire tre passaggi diversi di questa geografia, senza presumere che i numeri di Paesi differenti traccino lo stesso carico. Non si tratta di scegliere la carta più vera: ciascuna rende leggibile una parte del sistema e nasconde le altre.

La materia mondiale ha forme diverse

Nel 2020, secondo l'International Resource Panel delle Nazioni Unite, l'estrazione mondiale comprendeva circa 45,3 miliardi di tonnellate di minerali non metallici e 9,6 miliardi di tonnellate di minerali metallici. Il primo insieme include la massa dei materiali da costruzione; il secondo registra minerali estratti, non tonnellate di metallo puro. La differenza di scala aiuta a non leggere il mondo delle materie prime soltanto attraverso i metalli più discussi. Anche dove una filiera è strategica per un'industria, la sua massa può restare piccola rispetto a quella delle rocce e degli aggregati movimentati ogni anno.

La biomassa costituisce un altro insieme, che nello stesso quadro valeva circa 24,8 miliardi di tonnellate. Comprende colture e biomassa pascolata, oltre al legname: il totale non può essere usato come misura del solo materiale destinato all'industria. Per isolare quest'ultimo occorre cambiare statistica e unità. La FAO stima che nel 2023 la produzione mondiale di legname industriale in tondo fosse circa 1,92 miliardi di metri cubi. Sono metri cubi solidi sotto corteccia, non tonnellate: una conversione richiederebbe di conoscere

caratteristiche del legno come densità e umidità. Già all'inizio, dunque, la scelta di una categoria modifica ciò che compare sulla mappa.

La bauxite tra riserve e trasformazione

La Guinea offre un esempio netto della differenza tra disponibilità geologica ed estrazione. Nelle stime dello US Geological Survey pubblicate nel 2025, le sue riserve di bauxite ammontavano a circa 7,4 miliardi di tonnellate, su un totale mondiale di 29 miliardi. La riserva indica la parte considerata economicamente recuperabile secondo le condizioni della valutazione: non è tutta la bauxite presente nel sottosuolo e non misura quanto ne esce in un anno. La produzione mineraria guineana stimata per il 2024 era invece di circa 130 milioni di tonnellate secche, a fronte di un totale pubblicato di circa 450 milioni. Da quest'ultimo sono esclusi i dati statunitensi, non divulgati: il confronto dà la scala dell'estrazione guineana, senza fornire una quota mondiale esatta.

La posizione cambia quando si considera ciò che accade dopo l'estrazione. La bauxite viene trasformata in allumina e quest'ultima in alluminio primario. Per il 2024 la stessa fonte stima che la Cina abbia prodotto 84 milioni di tonnellate di allumina, su 142 milioni mondiali, e 43 milioni di tonnellate di alluminio primario, su 72 milioni mondiali. Sono circa il 59% e il 60% dei rispettivi prodotti. La Guinea, che figura fra i maggiori estrattori di bauxite, registrava invece circa 0,3 milioni di tonnellate di allumina. Un territorio può quindi occupare una posizione centrale nell'estrazione senza avere un peso analogo nei passaggi industriali successivi.

Le tre quantità non descrivono la resa di un unico impianto. La bauxite è minerale secco, l'allumina un prodotto raffinato intermedio e l'alluminio primario il metallo ottenuto nella fase successiva. Inoltre, il confronto tra i totali nazionali non dimostra che la bauxite estratta in Guinea alimenti specificamente le raffinerie cinesi. La Cina estrae anche bauxite sul proprio territorio e gli impianti possono acquistare materie da origini diverse. Per seguire i carichi servirebbero dati sugli scambi, sulla qualità dei materiali e sugli input degli stabilimenti. Queste statistiche mostrano dove si concentra la produzione di ciascuna fase; non sono documenti di tracciabilità.

La geologia indica dove il minerale può essere prelevato, ma gli impianti di trasformazione richiedono investimenti, energia, infrastrutture e forniture

continue. Queste condizioni rendono possibile separare il luogo della miniera da quello della produzione industriale. I numeri della bauxite mostrano che la separazione esiste; da soli non permettono di stabilire quale di quei fattori abbia determinato la collocazione di ogni raffineria. Anche per questa ragione la quota di alluminio prodotta in un Paese non può essere usata come misura delle sue riserve.

Il rame aggiunge la mappa dell'uso

Con il rame si può spostare lo sguardo ancora più avanti. Per il 2024 lo US Geological Survey stimava una produzione mineraria mondiale di circa 23 milioni di tonnellate, espresse come contenuto recuperabile di rame. Il Cile ne produceva 5,3 milioni, la Repubblica Democratica del Congo 3,3 e il Perù 2,6. La Cina compariva nella stessa statistica con circa 1,8 milioni di tonnellate. Sono quantità di rame contenuto nel prodotto minerario, non il peso della roccia estratta per ottenerlo.

Nella produzione di raffineria la distribuzione è diversa. La stima mondiale era di 27 milioni di tonnellate di rame raffinato, di cui 12 milioni in Cina. Il dato comprende metallo ottenuto sia da materie primarie sia da input secondari, come i rottami. Per questa ragione la mappa delle raffinerie non coincide automaticamente con quella delle miniere, né la loro produzione può essere attribuita tutta al minerale estratto nel Paese. Anche il confronto fra 23 milioni da miniera e 27 milioni raffinati non misura, per differenza, il riciclo: le due serie riguardano fasi e alimentazioni diverse e non costituiscono un bilancio chiuso dello stesso anno.

La geografia cambia ancora quando si guarda alla prima manifattura. Secondo l'International Copper Study Group, nel 2024 la Cina rappresentava circa il 58% dell'uso apparente mondiale di rame raffinato, stimato in circa 27,4 milioni di tonnellate. «Apparente» indica un uso ricostruito dalle statistiche di produzione, scambi e scorte disponibili, non un consumo fittizio. L'indicatore riguarda il rame che arriva ai produttori di semilavorati, come fili e tubi; non dice dove saranno acquistati e utilizzati tutti i beni costruiti con quei semilavorati. Un Paese può dunque contare relativamente meno nella miniera, molto nella raffinazione e ancora di più nella lavorazione industriale iniziale. I tre valori rispondono a tre domande distinte.

Questo secondo esempio aggiunge ciò che la bauxite, fermata al metallo primario, non mostrava: dopo la raffineria esiste un altro luogo di impiego industriale, e nella raffineria entra anche materia che ha già avuto una vita d'uso. Non si può ricostruire l'origine del rame raffinato cinese dai soli totali di estrazione del Cile o della Repubblica Democratica del Congo. Per farlo occorrerebbe conoscere gli input effettivi delle raffinerie, inclusi concentrati e rottami di diversa provenienza.

Un corridoio visto dalla dogana

Le statistiche sul commercio rendono visibile almeno una parte degli spostamenti tra queste mappe. Nel 2024 la Cina ha registrato circa 742 milioni di tonnellate di importazioni dall'Australia nella sottovoce 260111 del Sistema Armonizzato, la classificazione doganale internazionale indicata dalla sigla HS. La voce comprende minerali e concentrati di ferro non agglomerati. È il peso netto della merce dichiarata alla frontiera. La misura dà la scala fisica di un singolo corridoio commerciale e identifica una provenienza e una destinazione registrate nelle importazioni cinesi.

Il numero non rappresenta 742 milioni di tonnellate di ferro puro: il minerale contiene anche altri componenti e il suo tenore non è riportato da quel peso doganale. Non equivale neppure ad acciaio prodotto, perché tra l'alimentazione del minerale e l'ottenimento di un materiale lavorato intervengono altre fasi, altri input e possibili variazioni delle scorte. Dallo stesso dato non si ricavano i porti percorsi, i passaggi logistici obbligati né l'utilizzatore del metallo che se ne otterrà. La dogana misura un attraversamento preciso; lascia aperto ciò che accade prima e dopo.

Un confronto tra Paesi produttori può quindi indicare dove si estrae o si lavora una materia; un record doganale aggiunge un movimento osservato fra due territori. Anche insieme, queste informazioni non costituiscono automaticamente la storia completa del materiale fino al bene finito. Sono strumenti diversi, che acquistano valore quando viene esplicitato il tratto della catena che ciascuno riesce a illuminare.

Il codice merceologico è essenziale per questa lettura. Se si allargasse l'osservazione a tutta la famiglia dei minerali di ferro, si includerebbero anche voci diverse dai concentrati non agglomerati; se si guardasse l'acciaio, si

sarebbe già oltre la prima trasformazione. Il numero di 742 milioni dipende perciò dalla scelta della voce, dell'anno e del Paese che dichiara lo scambio. È una misura solida di quel flusso definito, non un totale di tutti gli scambi di ferro fra Australia e Cina.

Dalla frontiera alla domanda finale

C'è un'ultima domanda che il carico australiano non può risolvere: a quale domanda finale attribuire la materia estratta nel mondo? Un minerale può entrare in un Paese, essere trasformato e diventare parte di beni utilizzati nello stesso territorio oppure venduti altrove. La massa registrata all'importazione indica dove è arrivata la merce in quel passaggio, non chi beneficerà alla fine dei prodotti che essa contribuisce a realizzare. Non serve presumere quale quota di quel carico segua ciascun percorso per riconoscere il limite della misura.

Per cambiare prospettiva l'International Resource Panel confronta l'estrazione interna di un territorio con la sua impronta materiale. L'estrazione interna attribuisce il prelievo al luogo in cui avviene; l'impronta attribuisce alla domanda finale le materie estratte nel mondo per soddisfarla. Quest'ultima è una stima ottenuta ricostruendo le catene produttive con modelli economici e dati sui flussi materiali. Non nasce dalla somma dei pesi riportati nei documenti doganali e non consente di seguire il percorso di una particolare partita di minerale.

Nel 2020, per i gruppi di Paesi ad alto reddito, il rapporto stima un'impronta materiale di circa 24 tonnellate per abitante e un'estrazione interna di circa 19. Nei gruppi a basso reddito le due grandezze erano rispettivamente circa 3 e 5 tonnellate per abitante. Sono medie di gruppi che comprendono economie differenti: mostrano la distanza possibile fra luogo del prelievo e domanda finale, senza misurare le importazioni nette né il tragitto di uno specifico materiale.

Più mappe per leggere lo stesso sistema

La bauxite separa riserve, estrazione e trasformazione; il rame aggiunge l'uso industriale; il minerale di ferro rende visibile un movimento alla frontiera.

L’impronta materiale guarda invece alla domanda finale. Ciascuna prospettiva restituisce una geografia diversa dello stesso sistema.

Davanti a ogni cifra occorre riconoscere la fase, l’unità e l’anno. Solo così le diverse mappe delle materie prime possono essere accostate senza confondere produzione, commercio e consumo.

Fonti e riferimenti

UNEP / International Resource Panel – Global Resources Outlook 2024

https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024

FAO – Global Forest Products Facts and Figures 2023

https://doi.org/10.4060/cd3650en

US Geological Survey – Mineral Commodity Summaries 2025

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf

International Copper Study Group – World Copper Factbook 2025

https://icsg.org/copper-factbook/

UN Comtrade – Importazioni cinesi dall’Australia, HS 260111, 2024

https://comtradeapi.un.org/public/v1/preview/C/A/HS?period=2024&reporterCode=156&cmdCode=260111&partnerCode=36&flowCode=M&partner2Code=0&motCode=0

04.05 – Dalla risorsa al materiale

Una materia prima può essere presente nel sottosuolo, crescere in una foresta o trovarsi in un oggetto che ha terminato la propria vita utile. In nessuno dei tre casi la sua presenza equivale a una fornitura pronta per l'industria. Occorre sapere quanta materia è disponibile, raggiungerla, separarla da ciò che non serve, portarla a una qualità definita e trovare un impianto capace di utilizzarla. Per un metallo questi passaggi possono comprendere una miniera, un concentrato e una raffineria; per il legno, il prelievo, la segheria e l'essiccazione; per un rottame, la selezione e la verifica delle impurità. Le operazioni sono differenti, ma condividono una domanda: quale quantità, di quale qualità e in quale fase stiamo chiamando «materia prima»?

Ogni passaggio modifica il bilancio. La roccia movimentata non coincide con quella lavorata, né il metallo presente in quest'ultima coincide con il metallo venduto. Il volume di un albero non è tutto tronco da sega e il tronco non diventa interamente tavola. Una tonnellata di oggetti contenenti rame non è una tonnellata di rottame accettabile da una fonderia. Fra la risorsa e la merce si trovano perdite, prodotti intermedi, materiali con altri possibili impieghi, consumi di acqua ed energia, lavoro e rischi che rimangono nei luoghi di produzione. Seguire queste differenze permette di leggere i capitoli dedicati ai singoli materiali senza scambiare la disponibilità teorica per produzione effettiva.

Conoscere una risorsa

Un'indicazione mineralogica su una carta non basta per aprire una miniera. I primi campioni possono mostrare che un elemento è presente; le indagini successive devono stabilire dove si trova, quanto è continuo il corpo mineralizzato, quali concentrazioni presenta e come cambiano in profondità. Una media di tenore può nascondere una zona ricca circoscritta, ampie parti povere o impurità difficili da rimuovere. La distanza fra i punti osservati conta: un giacimento descritto attraverso pochi sondaggi lascia più incertezza di uno studiato con una campagna fitta e coerente. Anche la stima migliore resta una rappresentazione del corpo naturale, da aggiornare man mano che nuove misure diventano disponibili.

La parola «risorsa» designa una quantità potenzialmente utilizzabile descritta secondo le regole del sistema di classificazione adottato. «Riserva» riguarda una parte valutata come recuperabile in condizioni tecniche ed economiche definite. La distinzione non trasforma ogni riserva in una miniera già aperta: prezzi, costi, metodo di estrazione, accesso, permessi e infrastrutture entrano nella valutazione e possono cambiare. Lo U.S. Geological Survey, in una classificazione pubblicata nel 1980, distingueva esplicitamente conoscenza geologica e recuperabilità economica, osservando che l'esistenza di una riserva non implica la presenza di impianti già operativi. Quel documento illustra il problema, ma le stime pubblicate oggi possono seguire codici diversi: per interpretare un totale occorre conoscere la definizione usata da chi lo ha prodotto.

Una foresta richiede un altro tipo di inventario. La superficie boscata non misura da sola il legno ottenibile: servono specie, età e dimensioni degli alberi, crescita nel tempo, stato del bosco, accessibilità e destinazioni possibili dei fusti. Il volume degli alberi in piedi è una consistenza accumulata negli anni; il prelievo in un anno è un flusso. Confondere i due equivale a trattare tutto il patrimonio forestale come se fosse immediatamente raccoglibile. Anche l'accrescimento biologico ha un tempo proprio: una porzione prelevata può ricrescere solo nelle condizioni ecologiche e gestionali che lo consentono. Il volume autorizzato o programmato, inoltre, non coincide necessariamente con quello che arriva a una segheria.

Lo stesso ragionamento impedisce di usare «risorsa» come una misura identica per tutte le materie. Per la pietra da costruzione può essere decisiva la distanza dal cantiere oltre alla qualità della roccia; per una sostanza in salamoia contano concentrazione, disponibilità della soluzione e possibilità di separarla; per il sale ottenuto per evaporazione servono condizioni climatiche e superfici di lavorazione. Nei pozzi la risorsa raggiunge la superficie attraverso un flusso di fluidi, mentre in una cava è prelevata e selezionata come solido. Non si può applicare a questi processi lo stesso numero di tonnellate di sterile per tonnellata di prodotto. La domanda comune rimane quali proprietà si siano misurate e quale parte sia accessibile con i metodi e le condizioni effettive del luogo.

Un inventario cambia anche perché cambiano le conoscenze e le condizioni economiche. Ulteriori misure possono aggiungere porzioni di materiale oppure

correggere stime troppo ottimistiche; un prezzo più alto può rendere interessante un'area prima esclusa, mentre un costo energetico o una restrizione d'uso dell'acqua possono fare il contrario. La variazione delle riserve dichiarate non equivale dunque automaticamente a nuova materia formatasi in natura o a materia già consumata. Per leggerla occorre separare nuove scoperte, revisione delle stime, produzione avvenuta e modifica dei criteri economici. La conseguenza pratica è che i grandi totali delle riserve non si trasformano in una data di esaurimento dividendo semplicemente per la produzione di un anno.

I due inventari rispondono a domande simili senza essere la stessa cosa. Nel giacimento si cercano continuità, tenore e comportamento del minerale; nel bosco contano crescita, specie, qualità dei fusti e condizioni del prelievo. Un deposito non si rinnova ai tempi della produzione, mentre la ricrescita forestale può rifornire la filiera se i prelievi e la gestione lo permettono. In entrambi i casi la cifra iniziale delimita ciò che si conosce, non promette la consegna di una quantità identica di prodotto. È la prima separazione necessaria quando si leggono annunci di nuove risorse o potenzialità di un territorio.

Il tempo prima della prima consegna

Anche dopo aver caratterizzato una risorsa resta da costruire il percorso che la rende accessibile. Per un progetto minerario occorre provare che il materiale possa essere estratto e trattato con risultati sostenibili nelle condizioni previste; scegliere gli accessi e il metodo di scavo; ottenere le autorizzazioni; progettare impianti, gestione dei residui e approvvigionamento di acqua ed energia; reperire capitale e costruire. Ognuna di queste attività può modificare la valutazione precedente. Se una prova mostra un recupero più basso del previsto, una quantità geologicamente presente può perdere interesse economico. Se la corrente elettrica, l'acqua o la strada mancano, il solo prezzo del metallo non finanzia automaticamente l'infrastruttura che occorre per produrlo.

Il tempo necessario è osservabile, ma non è una costante della natura. L'Agenzia internazionale dell'energia ha esaminato i maggiori progetti minerari entrati in produzione fra il 2010 e il 2019 e ha rilevato una media superiore a sedici anni dalla scoperta alla prima produzione. Nel campione, esplorazione e studi di fattibilità hanno richiesto oltre dodici anni, cui si sono aggiunti circa

quattro o cinque anni di costruzione. Sono intervalli arrotondati, non le parti di un'identità aritmetica esatta. La media riguarda quelle grandi miniere: non misura i tempi di ogni cava, progetto di raffinazione o impianto forestale. Mostra tuttavia perché annunciare una risorsa, ottenere un permesso e produrre materiale appartengano a stadi distinti.

Le prove preliminari servono a evitare di attribuire alla risorsa le proprietà di un prodotto che nessuno ha ancora fabbricato. Un campione può reagire bene in laboratorio e comportarsi diversamente quando arrivano insieme materiali provenienti da zone differenti del deposito. La progettazione deve prevedere come cambierà l'alimentazione nel corso degli anni, dove andranno i residui e quali parti dell'impianto richiedono manutenzione. Una linea dimensionata per un certo volume può diventare il limite di tutto il progetto se la risorsa accessibile cresce; può restare sottoutilizzata se la qualità si rivela più variabile. Il progetto economico dipende quindi dalla continuità della materia e dal funzionamento delle singole fasi, non soltanto dalla dimensione del giacimento.

La prima produzione, a sua volta, non è la produzione ordinaria. Un impianto appena avviato deve mettere a punto alimentazione, manutenzione, controlli e qualità del prodotto. Una capacità nominale esprime ciò che potrebbe trattare o produrre entro determinate condizioni; il risultato annuale dipende dalle ore effettive di funzionamento, dal materiale disponibile, dai guasti, dal mercato e dalla resa. Un impianto esistente può inoltre lavorare materiale estratto altrove. La posizione della raffineria non certifica l'origine geografica dell'intera materia che ne esce.

Per il legno il calendario segue altre condizioni. Prima della raccolta contano l'accrescimento degli alberi, la pianificazione forestale, la scelta delle aree, i periodi di intervento e l'accesso ai cantieri. Una segheria può adattare i turni al flusso di tronchi, ma non può sostituire in pochi mesi il tempo necessario a far crescere alberi adatti a determinate lavorazioni. Trasporto, essiccazione e assortimento aggiungono tempi dopo il taglio. Confrontare direttamente questi tempi con la media delle grandi miniere avrebbe poco significato: la domanda comune è dove si trovi il vincolo che separa la risorsa conosciuta dalla fornitura continuativa.

Il volume programmato per il taglio ha bisogno anche di persone, mezzi e condizioni di accesso. Un luogo raggiungibile in una stagione può non esserlo con la stessa facilità in un'altra; un assortimento richiesto dalla segheria può

essere scarso anche se il volume complessivo prelevabile è alto. La continuità di una filiera forestale dipende quindi da un incontro fra tempi biologici, decisioni di gestione e capacità di raccolta. Una tonnellata di materia promessa per il futuro ha significato solo se sono descritti i tempi e le operazioni che la renderanno disponibile.

Il tempo è anche un costo. Studi, terreni, infrastrutture e impianti impegnano capitale prima delle vendite; chi investe deve valutare prezzi futuri, recuperi tecnici, obblighi di ripristino e rischio che il progetto non proceda. Una volta avviata la produzione, entrano salari, manutenzione, materiali ausiliari, trasporto e consumi di energia e acqua. Senza dati coerenti su impianti e perimetri non è possibile riassumere queste voci in un costo universale per tonnellata. Capire in quale fase si sostengono serve però a spiegare perché due risorse fisicamente simili possano avere prospettive commerciali differenti.

Che cosa entra nel bilancio

Quando una miniera dichiara tonnellate estratte, la prima domanda riguarda la massa che quel numero comprende. Per raggiungere il materiale utile può essere necessario rimuovere terreno o roccia che non sarà inviata all'impianto di separazione. Questa roccia di scavo è diversa dal minerale selezionato per essere trattato. Lo scavo può a sua volta includere materiale di tenore inferiore a quello previsto dal modello geologico: si parla di diluizione. Parte della mineralizzazione può rimanere nel corpo perché non è accessibile o perché il metodo di scavo la lascia sul posto. La massa movimentata, il minerale estratto e l'alimentazione della linea di trattamento possono quindi essere tre numeri diversi anche nello stesso anno e nello stesso sito.

Il tenore indica la proporzione del componente utile nel materiale considerato. Occorre sempre dire se si riferisce alla roccia nel deposito, al minerale estratto o alla miscela che entra nell'impianto. Un rapporto dell'Agenzia statunitense per la protezione dell'ambiente sul rame, pubblicato nel 1994, descriveva depositi recuperabili in particolari condizioni anche intorno allo 0,5% di rame. È un esempio tecnico storico, non il tenore medio odierno delle miniere né una soglia valida ovunque. Se si assume per esercizio una tonnellata secca di materiale con tenore dello 0,5%, il rame in essa contenuto è 0,005 × 1.000 chilogrammi, cioè cinque chilogrammi. Sono cinque chilogrammi teoricamente

presenti all'ingresso, non cinque chilogrammi prodotti. Il valore serve a mostrare quanta massa accompagna un componente relativamente disperso.

Anche conoscendo quel contenuto, non possiamo ancora calcolare il metallo venduto. Una parte può andare perduta nello scavo, un'altra rimanere nei residui della separazione, e il prodotto intermedio può richiedere passaggi ulteriori prima di raggiungere il grado richiesto. Il recupero misura quanta parte del componente utile alimentato al processo si ritrova nel prodotto o nel flusso considerato; la purezza misura invece quanta parte di quel prodotto o flusso è composta dalla sostanza ricercata. La resa massica risponde a una terza domanda: quale frazione della massa alimentata diventa il prodotto. Una concentrazione maggiore nel prodotto non implica, da sola, che sia stato recuperato più metallo complessivamente. Le tre percentuali hanno denominatori differenti.

Il minerale è inoltre una miscela fisica, non una formula uniforme. Dimensione dei cristalli, associazione con altre sostanze, durezza e impurità cambiano il modo in cui può essere separato. Macinare più finemente può liberare particelle che prima erano ancora legate alla roccia; richiede però lavoro meccanico aggiuntivo e può rendere più impegnativa la gestione della frazione fine. Il compromesso non si legge dal solo tenore. Per questa ragione due depositi con identico contenuto medio del metallo possono richiedere impianti diversi e produrre quantità differenti di concentrato e residui.

Anche la scelta di quale parte del corpo estrarre dipende dalle condizioni in cui si opera. Un tenore di taglio individua, in un progetto specifico, la soglia sotto la quale una porzione non viene inviata alla lavorazione prevista. Se si abbassa la soglia, possono aumentare le tonnellate che entrano nel circuito e diminuire il tenore medio dell'alimentazione; il metallo contenuto totale potrebbe cambiare, ma senza conoscere recuperi e capacità non sappiamo in quale direzione cambierà il metallo effettivamente vendibile. Non tutte le porzioni escluse hanno la stessa sorte: parte può essere lasciata nel terreno, parte separata temporaneamente in attesa di una decisione successiva. Un bilancio annuale non dovrebbe sommare quelle categorie al prodotto già realizzato.

La qualità dell'alimentazione può cambiare anche mentre un'attività continua a produrre. L'Agenzia internazionale dell'energia ha segnalato che in Cile il tenore medio del minerale di rame è diminuito di circa il 30% nel quindicennio esaminato fino al 2019. Il dato descrive quel settore, quel Paese e quel periodo;

non dimostra che tutti i giacimenti del mondo si stiano impoverendo allo stesso ritmo. Aiuta piuttosto a porre una domanda concreta: quando la quota utile nell'alimentazione cambia, quante tonnellate occorre trattare per ottenere la stessa quantità teorica di metallo, mantenute ferme le altre condizioni? Non possiamo ricavarne automaticamente un aumento identico di acqua, energia o costi: metodo di estrazione, recupero, impianti e composizione del minerale possono variare nello stesso tempo.

Una sintesi dello U.S. Geological Survey offre un'immagine della distanza fra prodotto e roccia: riporta circa tre tonnellate complessive di materiale movimentato — fra roccia di scarto rimossa e minerale destinato al trattamento — per ottenere un grammo d'oro, sulla base di uno studio scientifico sui rapporti fra roccia e metallo. Il riepilogo disponibile non espone però campione e metodo in modo sufficiente per applicare quella cifra a tutte le miniere aurifere. Non descrive tre tonnellate di soli residui prodotti da un impianto. Per valutarne il significato bisogna sempre distinguere lo scavo non trattato, l'alimentazione e i residui prodotti dopo il trattamento.

Nel bosco il controllo dei denominatori comincia ancora prima della segheria. L'albero in piedi comprende parti che seguono destinazioni diverse o restano sul posto: rami, cimali, radici e, secondo il metodo di misurazione, corteccia. Il legname raccolto può essere suddiviso per diametro e qualità; non ogni tronco è adatto a ottenere tavole. Distanza dall'impianto e condizioni di esbosco incidono su ciò che viene effettivamente ritirato. Non sarebbe corretto prendere il volume complessivo degli alberi inventariati e moltiplicarlo per la resa delle tavole: fra i due dati stanno prelievo, selezione, misure e possibili destinazioni alternative. Come nel minerale, definire l'ingresso è indispensabile prima di parlare di rendimento.

Neppure l'unità di misura elimina il problema. Una tonnellata di materiale umido comprende una quantità d'acqua che può variare; la stessa massa secca può avere pesi lordi differenti. Nel legno si usano spesso metri cubi, ma volume sotto corteccia, volume sopra corteccia e volume del prodotto non coincidono. Una sega sottrae materia nel taglio e l'essiccazione modifica umidità e dimensioni. Per confrontare le masse alimentate e quelle ottenute, bisogna dichiarare se si sta costruendo un bilancio di massa secca, massa umida o volume secondo una convenzione precisa. Sommare indiscriminatamente queste misure può far apparire materia scomparsa o creata.

Separare significa distribuire la materia

Dopo l'estrazione, il materiale deve essere preparato secondo le sue proprietà. Nelle filiere minerarie frantumare e macinare riduce le dimensioni e libera le particelle associate; lavaggio, selezione per dimensione, densità, magnetismo o proprietà di superficie possono concentrare la parte utile. Alcune sostanze vengono invece trasferite in soluzione e recuperate con altri trattamenti. Il risultato di questa prima separazione può essere un concentrato: contiene una quota più alta della sostanza cercata rispetto al materiale iniziale, ma non è per questo un metallo puro. La fusione e la raffinazione appartengono a stadi successivi e possono svolgersi lontano dalla miniera. Il percorso esatto dipende dal materiale e sarà sviluppato nei capitoli dedicati alle singole filiere.

Ogni flusso prodotto ha un'origine precisa. Il materiale non inviato all'impianto resta roccia di scavo; la frazione separata dall'impianto dopo la lavorazione del minerale forma residui di trattamento, eventualmente mescolati con acqua. Una fusione può generare scorie e polveri differenti dalle due categorie precedenti. Chiamare tutto «scarto minerario» può essere comodo, ma impedisce di capire dove nasce ciascun flusso, come viene controllato e quale parte eventualmente conserva componenti recuperabili. Che un residuo contenga un elemento di interesse non prova ancora che si possa recuperarlo in modo tecnico ed economicamente sostenibile: occorrono quantità, caratterizzazione, processo e utilizzatore.

Il tronco percorre una sequenza materiale diversa. Selezionato per le sue dimensioni, viene tagliato in assortimenti e segato; la forma delle tavole ottenibili dipende dalla forma e dal diametro del tronco, dalla strategia dei tagli e dai difetti. Il segato può poi essere essiccato e classificato per la vendita. La preparazione non consiste nella «raffinazione» del legno come se fosse un metallo: la sega divide una geometria irregolare in prodotti di forma più regolare e in frazioni che possono alimentare altre lavorazioni. L'essiccazione cambia il contenuto di acqua, non fa scomparire fibra legnosa nella stessa proporzione.

Il modo in cui si taglia un tronco dipende da ciò che si intende ottenere. Lunghezze e sezioni ordinate, posizione dei difetti e possibilità di impiegare parti più corte orientano la scelta dei tagli. Un segato idoneo a una destinazione può non esserlo per un'altra pur provenendo dallo stesso albero.

Se la destinazione richiede legno essiccato, la segheria o un impianto successivo deve controllarne umidità e stabilità; il materiale appena segato non costituisce ancora necessariamente una partita pronta da spedire. Fra la raccolta e la vendita possono quindi esserci più misure di volume e di peso, tutte corrette nel punto in cui vengono effettuate. L'errore nasce quando il volume del tronco viene presentato come volume di prodotto conforme.

Un esempio pubblicato nel 2020 dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura, dall'Organizzazione internazionale dei legni tropicali e dalla Commissione economica ONU per l'Europa rende visibile la ripartizione. Per un metro cubo di tronco da sega con circa 15 centimetri di diametro all'estremità più sottile, il bilancio volumetrico illustrativo attribuisce 0,41 metri cubi al segato, 0,43 al cippato, 0,09 alla segatura e 0,07 ai trucioli da piallatura. Le frazioni sono espresse come volume di legno solido equivalente, misurato sotto corteccia: la segatura sfusa o il cippato accatastato occuperebbero un volume apparente diverso. Così le quattro parti sommano al metro cubo di legno assunto in ingresso. Non significa che ogni segheria del mondo realizzi quelle percentuali, né che il valore economico delle quattro frazioni sia uguale. La stessa fonte mostra che, a parità di efficienza di lavorazione nell'esempio, un tronco di 60 centimetri all'estremità sottile può dare circa 0,63 metri cubi di segato per metro cubo di tronco: geometria e qualità dell'ingresso cambiano il risultato.

La parte non diventata tavola non è necessariamente materia perduta. Cippato, segatura e trucioli possono essere impiegati, in condizioni appropriate, nella produzione di pannelli, carta, altri materiali o energia. Sono però destinazioni possibili, non ricavi garantiti. Se mancano un compratore, la qualità richiesta o un trasporto ragionevole, l'esistenza fisica del materiale non equivale a una vendita. La corteccia va considerata a parte quando il volume iniziale è misurato sotto corteccia: aggiungerla al bilancio senza cambiare denominatore farebbe superare artificialmente il cento per cento. L'esempio insegna così due cose diverse: la resa del prodotto principale può essere molto inferiore all'utilizzo complessivo della fibra, e il valore di un coprodotto dipende dalla sua destinazione reale.

Per un bilancio industriale completo occorre inoltre seguire i flussi nel tempo. Cippato prodotto oggi può essere stoccato e consegnato in un altro periodo; segatura raccolta in un impianto può essere miscelata con quella di altri; una

frazione può essere consumata nello stesso stabilimento per fornire calore. Il bilancio fisico dei materiali prodotti dalla linea non coincide allora con il bilancio delle vendite del mese. Misurare separatamente prodotto, impiego interno e variazione delle scorte impedisce di attribuire a un mercato quantità che non vi sono mai entrate. Per il lettore questo è il significato operativo della parola «coprodotto»: un possibile flusso con una funzione, non una promessa che ogni residuo sia automaticamente valorizzato.

Separazioni simili nella funzione generale possono avere costi fisici diversi. Una parte della roccia minerale richiede macinazione e circuiti con acqua; il legno può richiedere essiccazione, scortecciatura e trasporto di volumi ingombranti; altre materie prime seguono evaporazione, lavaggio o trasformazioni chimiche. Il punto comune è che una data quantità in ingresso si divide in più flussi materiali e che alcune devono raggiungere una qualità definita prima del passaggio industriale successivo. Se il concentrato è spedito altrove, la massa che attraversa la dogana è quella del concentrato, non tutta la roccia che è stata movimentata a monte. Se si trasporta segato anziché tronchi, cambia la forma del carico e cambiano le attività rimaste nel territorio di raccolta.

Il luogo di produzione conta

Un processo usa acqua, energia e suolo in luoghi determinati. La domanda ambientale non si esaurisce nel calcolare un consumo medio per tonnellata: conta dove l’acqua viene prelevata, in quale stagione, quanta ne viene ricircolata, quanta ritorna e con quale qualità. Prelievo e consumo non sono sinonimi. Una parte dell’acqua può essere restituita, un’altra evaporare o restare nel prodotto e nei residui; il ritorno può avvenire in un momento o in condizioni diverse dal prelievo. Questo rende poco utile trasferire automaticamente a un’altra miniera o segheria il dato di un solo impianto, anche quando il materiale prodotto ha lo stesso nome.

Nel rapporto del 2021 sulle materie prime della transizione energetica, l’Agenzia internazionale dell’energia stimava che oltre metà della produzione mondiale di litio provenisse da aree classificate ad alto stress idrico; indicava inoltre che una quota prossima all’ottanta per cento del rame estratto in Cile proveniva da miniere in aree aride e soggette a forte stress idrico. Sono stime di localizzazione della produzione nel quadro esaminato allora, non litri d’acqua consumati per chilogrammo di metallo né una misura degli effetti subiti da una

specifica comunità. Mostrano perché un processo fisicamente simile abbia implicazioni diverse secondo il bacino idrico in cui si trova. I dati più dettagliati sulle singole filiere appartengono ai capitoli sul rame e sul litio.

Anche l'energia risponde al luogo e alla materia. Rimuovere materiale, trasportarlo, ridurne la dimensione e separarlo richiede macchine e impianti; una roccia più dura o una separazione più fine possono cambiare il lavoro necessario. Una segheria richiede forza meccanica e, se deve consegnare legno essiccato, energia per togliere acqua al prodotto. Ma l'energia per una tonnellata di concentrato non è confrontabile direttamente con quella per un metro cubo di tavole: cambiano prodotto, unità, alimentazione e confini del processo. Inoltre parte della trasformazione può avvenire in uno stabilimento esterno. Assegnare tutta l'energia al solo sito di estrazione oppure ignorare le lavorazioni successive descriverebbe due storie diverse, entrambe incomplete per la domanda sull'intera filiera.

Un circuito che riutilizza acqua al proprio interno riduce il bisogno di nuovi prelievi, ma deve comunque controllare qualità, perdite e sostanze accumulate. Una quantità scaricata in un corso d'acqua non risponde, da sola, alla domanda su quanta acqua fosse disponibile durante i periodi asciutti. Per confrontare due siti servirebbero almeno il punto di prelievo, il periodo, l'impiego nel processo, il ricircolo e il destino dell'acqua restituita. Sul piano energetico servirebbero invece la forma e la quantità del prodotto utile, le fasi incluse e la qualità della materia in ingresso. Le misure relative a miniere, cave e segherie non formano una serie omogenea che permetta di assegnare a tutte un unico consumo in metri cubi o chilowattora per tonnellata.

Gli impianti occupano suolo, richiedono vie d'accesso e devono gestire ciò che resta dalla lavorazione. La roccia sterile, i residui fini di separazione e le scorie hanno proprietà e rischi differenti; la loro sistemazione dipende da quantità, composizione, acqua, stabilità e durata del deposito. Lo stesso vale, in forme diverse, per i residui di lavorazione del legno. Una possibile utilizzazione successiva non fa sparire le esigenze di deposito, controllo e sicurezza nel tempo in cui il materiale resta sul sito. Nel settore minerario le indicazioni internazionali sulla gestione dei residui insistono su responsabilità, conoscenza del sito, monitoraggio e preparazione alle emergenze. Ridurre tutto alla massa dei residui perderebbe la differenza fra un materiale stabile e uno che, in certe condizioni, può trasferire sostanze o cedere fisicamente.

La chiusura dell'attività appartiene allo stesso bilancio. Una miniera può dover mettere in sicurezza aperture, stabilizzare depositi e controllare l'acqua anche dopo che l'ultima partita di concentrato è stata venduta. Una strada di servizio o un piazzale possono cambiare l'uso del suolo per un periodo diverso da quello della produzione. Nella gestione forestale restano il terreno, le infrastrutture d'accesso e le condizioni di ricrescita dopo il prelievo. Prevedere questi passaggi mentre si valuta il progetto rende più chiaro chi debba sostenerne i costi. Il prezzo di vendita di una materia prima, preso isolatamente, non dice se quelle attività siano state finanziate, rinviate o già realizzate.

Il lavoro avviene lungo l'intero percorso: indagini, scavo o taglio, manutenzione, conduzione degli impianti, analisi, trasporto e ripristino. Le esposizioni cambiano con attività e luogo: traffico di mezzi e macchine, polveri, rumore, instabilità del terreno o dei depositi, attrezzature da taglio, sostanze usate nel processo. La Convenzione n. 176 dell'Organizzazione internazionale del lavoro disciplina prevenzione e responsabilità per la sicurezza e la salute nelle miniere; non fornisce, da sola, un tasso mondiale di infortuni con cui confrontare il settore forestale. Descrivere le misure necessarie è diverso dal quantificare incidenti effettivamente avvenuti, per i quali servirebbero statistiche con denominatore e periodo comparabili.

L'impianto e la risorsa toccano inoltre chi vive nei dintorni, anche quando il prodotto viene venduto lontano. Accesso alle strade, uso dell'acqua, rumore, traffico, qualità dell'aria e cambiamento del paesaggio possono incidere su persone che non lavorano nell'impianto. Ci possono essere redditi e attività locali; durata e distribuzione dei benefici dipendono da contratti, occupazione, acquisti e permanenza dell'attività. Le condizioni vanno valutate progetto per progetto: non si può trasformare l'esistenza di un impatto possibile in un danno già osservato, né dedurre dal valore delle vendite quanto riceve la comunità vicina. Il prodotto che esce da un sito porta con sé una storia fisica e sociale che il solo prezzo alla consegna non racconta.

Quando il materiale diventa un prodotto commerciabile

Separare una sostanza non basta per avere una materia prima adatta a qualsiasi compratore. Un concentrato può avere metallo utile ma contenere impurità che rendono difficile la lavorazione successiva. Per altri minerali contano dimensione delle particelle, comportamento alla fusione, colore o costanza della composizione. Un legno segato deve corrispondere alle dimensioni ordinate; umidità, specie, nodi e altri difetti incidono sulle lavorazioni cui sarà destinato. In ciascun caso la qualità è una relazione fra caratteristiche del materiale e possibilità di usarlo in un processo specifico, non una graduatoria universale del «buono» e del «cattivo».

Le specifiche trasformano questa relazione in criteri misurabili. Il compratore deve sapere quale prodotto riceverà, entro quali tolleranze e con quale documentazione; il venditore deve selezionare, misurare, classificare e mantenere lotti riconoscibili. Il peso fatturato può essere accompagnato da condizioni sull'umidità o sul contenuto utile. Due partite dello stesso materiale nominale possono quindi avere valori differenti o richiedere destinazioni industriali diverse. Un campione conforme non basta necessariamente a dimostrare che tutte le consegne future saranno uguali: il controllo deve accompagnare la variabilità degli ingressi e del processo.

La qualità viene definita anche dalla fase in cui una partita cambia proprietario. Un minerale venduto alla rinfusa, un concentrato filtrato e un metallo raffinato possono portare lo stesso nome dell'elemento principale, ma hanno valori per tonnellata e requisiti tecnici differenti. Se il contratto riguarda il contenuto metallico, servono campionamento e analisi affidabili per determinare quanta materia utile si stia comprando; se riguarda un assortimento di legname, servono misure e classificazioni coerenti con ciò che l'impianto acquirente lavorerà. L'accettazione può anche richiedere che un lotto non contenga sostanze incompatibili con il processo. La documentazione non è un'aggiunta amministrativa al materiale: rende controllabile la promessa fisica su cui si fonda lo scambio.

La standardizzazione consente di acquistare materia da chi non possiede direttamente la miniera, il bosco o l'impianto di recupero. Richiede però

continuità della fornitura e una forma in cui il materiale possa essere trasportato e utilizzato. Un impianto che produce un concentrato senza un utilizzatore capace di raffinarlo non consegna ancora il metallo finale; una segheria che ottiene cippato senza sbocchi può aver realizzato un flusso fisico, ma non una vendita. È possibile misurare correttamente la produzione di ciascuna fase e, nello stesso tempo, non conoscere ancora l'origine di tutti gli input o il risultato delle fasi successive. Per questo estrazione, trasformazione e commercio vanno osservati separatamente prima di ricostruire un'intera catena.

Il prezzo aggiunge un'informazione, ma non sostituisce il bilancio fisico. Può riflettere caratteristiche, costi di trasporto e condizioni contrattuali; non esprime automaticamente quanta roccia è rimasta presso la miniera né come sono stati gestiti acqua, residui e sicurezza. Anche l'unità del prezzo va letta: pagare un concentrato in base al contenuto utile non significa che tutta la sua massa sia metallo, mentre il prezzo di un legname per metro cubo dipende dalla classificazione del prodotto e dall'umidità prevista. Le ragioni della volatilità e i mercati saranno oggetto di un capitolo dedicato; qui basta riconoscere che «materia prima» è il nome commerciale di un prodotto dalle caratteristiche definite, prodotto da una catena fisica più ampia.

Il materiale che ritorna

La stessa domanda sulla qualità vale quando la materia proviene da beni già utilizzati. Una struttura, un cavo o una macchina possono contenere rame, ma finché restano in uso quel rame non è disponibile come rottame. Dopo la dismissione occorrono raccolta, separazione da altri componenti e preparazione. Ogni passaggio può perdere una parte del materiale o mescolarlo con sostanze indesiderate. La raccolta e il trattamento dei rifiuti hanno una propria filiera; dal punto di vista delle materie prime, il problema decisivo è quale materiale ne esce e a quali condizioni un altro impianto possa riceverlo.

Un caso preciso è quello dei rottami di rame nell'Unione europea. Il regolamento 715/2013 stabilisce criteri che determinano quando determinate partite cessano di essere classificate come rifiuti. Fra i requisiti figurano la suddivisione in categorie adatte all'impiego industriale e una soglia del 2% in peso per i materiali estranei, definiti dalla norma. Sono previsti controlli visivi

sulle partite e analisi di campioni rappresentativi, per ciascuna categoria, almeno ogni sei mesi secondo la frequenza adeguata alla variabilità del materiale. Si tratta della qualità del rottame che esce dal recupero: il 2% non misura la quota di rame riciclato in Europa e non indica quanto metallo verrà recuperato nella successiva fusione.

Anche qui il denominatore conta. Il limite riguarda la massa dei materiali che la norma qualifica come estranei rispetto alla massa della partita di rottame; non autorizza a dire che il resto della partita sia rame chimicamente puro. Leghe di rame e altre caratteristiche richiedono la classificazione e i controlli pertinenti. Il controllo visivo di ciascuna partita e le analisi rappresentative svolte con la periodicità prevista sono verifiche diverse: non sarebbe corretto presentare l'intervallo semestrale come l'unico controllo compiuto su ogni consegna. La regola mostra che rendere commerciabile la materia recuperata richiede una procedura capace di gestire una qualità variabile, oltre al semplice fatto di averla separata da un oggetto a fine vita.

La conformità giuridica e l'idoneità per una particolare lavorazione sono collegate, ma non identiche. Un impianto può richiedere una composizione più stretta di quella ammessa dalla regola generale, oppure distinguere lotti secondo lega, dimensioni e origine. Anche il passaggio legale fuori dalla categoria dei rifiuti non dimostra che una tonnellata di rottame sostituisca una tonnellata di materiale primario in qualsiasi processo. Occorre osservare quanto materiale viene davvero accettato, che trattamento subisce e che qualità esce dall'impianto. Le percentuali di raccolta, riciclo e contenuto riciclato rispondono a domande ulteriori e saranno trattate nel capitolo sulle materie prime secondarie.

Il ritorno del rame chiarisce il significato più generale del percorso. La materia primaria parte da una risorsa e attraversa trasformazioni che ne rendono nota la qualità; quella recuperata parte da beni eterogenei e deve tornare a essere riconoscibile, controllata e acquistabile. Entrambe possono entrare in lavorazioni che producono materiali standardizzati, ma hanno bilanci a monte differenti. Un quantitativo «disponibile» è quindi sempre una quantità collocata in una fase e in un tempo: roccia stimata, minerale alimentato, concentrato, legno segato, rottame qualificato o prodotto finale non sono diverse etichette dello stesso numero.

La misura che serve

Per capire quanta materia prima un sistema può fornire occorre seguire il passaggio dalla conoscenza della risorsa alla continuità delle consegne. Il tenore e la quantità iniziale mostrano un potenziale; la fattibilità e le infrastrutture determinano se può diventare produzione; il bilancio delle lavorazioni mostra quanto entra nei prodotti, nei coprodotti e nei residui; le specifiche stabiliscono quale prodotto o frazione un'altra industria può usare. Per le risorse biologiche a questa catena si aggiunge esplicitamente il tempo della crescita, per la materia recuperata la disponibilità dei beni a fine uso e la verifica della qualità.

Nessuna cifra singola sostituisce queste domande. La quantità presente, il materiale movimentato e quello venduto possono essere tutti dati corretti e raccontare scale molto diverse. Precisare fase, qualità, periodo e luogo non complica inutilmente il numero: permette di capire che cosa è stato prodotto, quale parte della materia ha seguito altre strade e che cosa deve ancora accadere perché il materiale arrivi davvero a chi lo utilizzerà.

Fonti e riferimenti

U.S. Geological Survey — Classificazione delle risorse minerarie, 1980

https://pubs.usgs.gov/circ/1980/0831/report.pdf

Agenzia internazionale dell'energia — Materie prime critiche, 2021

https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/reliable-supply-of-minerals

U.S. Environmental Protection Agency — Minerali di rame, 1994

https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/industrial/special/web/pdf/copper1a.pdf

FAO, ITTO e UNECE — Fattori di conversione del legno, 2020

https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/c39a1bcc-439c-4ca3-8cea-78c40e5fc5f7/content

U.S. Geological Survey — Critical Minerals in Mine Wastes

https://www.usgs.gov/programs/mineral-resources-program/science/critical-minerals-mine-wastes

Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente — Gestione dei residui minerari

https://www.unep.org/resources/report/global-industry-standard-tailings-management

Organizzazione internazionale del lavoro — Convenzione n. 176 sulle miniere

https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_en/f?p=NORMLEXPUB:12100:0::NO::P12100_ILO_CODE:C176

Unione europea — Regolamento n. 715/2013 sui rottami di rame

https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2013/715/oj

04.06 – Sabbia, ghiaia e pietra

Nel 2022 dalle cave italiane sono state estratte 66,9 milioni di tonnellate nella categoria statistica «sabbie e ghiaie». È una quantità che rende visibile il peso dei materiali più comuni: entrare nella famiglia dei minerali non metallici significa spesso muovere masse assai maggiori di quelle associate ai metalli di cui si parla più frequentemente. Eppure, quelle tonnellate non costituiscono un unico prodotto. La statistica registra quanto materiale è stato prelevato, senza dire se ogni frazione abbia la dimensione, la composizione e la qualità richieste da un particolare compratore.

Si può avere sabbia a pochi chilometri di distanza e dover cercare altrove la sabbia adatta a uno specifico processo. Si può disporre di roccia ma non di un fronte di cava autorizzato, oppure ottenere dalla stessa roccia un buon pietrisco e nessun blocco ornamentale integro. Dopo la selezione, il materiale deve ancora raggiungere chi lo acquista: su merci pesanti e relativamente economiche, il viaggio può incidere molto sul costo finale. Disponibilità geologica, qualità commerciale e distanza descrivono perciò tre parti della stessa domanda.

Il deposito utile ha una geografia precisa

La sabbia e la ghiaia naturali si accumulano dove l'acqua, il ghiaccio e gli altri processi sedimentari hanno trasportato e depositato frammenti di roccia. Le particelle si separano parzialmente per dimensione durante il trasporto, ma un deposito naturale non esce già diviso nei prodotti ordinati dai clienti. Può contenere insieme ghiaia, sabbia, limi e argille; la proporzione cambia tra depositi vicini e anche all'interno dello stesso sito. La profondità dello strato, la presenza di acqua e ciò che ricopre il materiale determinano quanto sia semplice raggiungerlo.

Un aggregato può nascere anche da una roccia compatta. In questo caso si estraggono blocchi o frammenti grandi, poi li si riduce per frantumazione alle dimensioni richieste. La pietra di partenza può essere calcarea, dolomitica o appartenere ad altre famiglie geologiche. Qui il calcare interessa quando viene venduto come pietrisco; la sua trasformazione in calce o cemento segue

un'altra filiera. Il prodotto ricavato dalla frantumazione dipende sia dalle proprietà della roccia sia dal modo in cui essa si rompe.

La parola «cava» accomuna quindi attività fisicamente differenti. In un deposito sciolto l'operatore scava e carica materiale che può essere già granulare; nella roccia compatta deve separare la pietra dal fronte e ridurne la dimensione. Una cava ornamentale compie una scelta quasi opposta a quella della frantumazione: tenta di conservare porzioni grandi e continue di roccia, evitando fratture che renderebbero il blocco meno commerciabile. Il materiale presente nel terreno non è ancora il materiale utile prodotto dalla cava.

Anche l'acqua cambia il lavoro da svolgere. Un deposito di sabbia e ghiaia può trovarsi sopra o sotto il livello della falda; scavarlo non pone allora gli stessi problemi tecnici, né produce la stessa interazione con le acque circostanti. La possibilità di lavare e classificare il materiale dipende inoltre dagli impianti disponibili e dalla gestione delle acque utilizzate. Dire che una valle contiene ghiaia non dice quanto materiale sia accessibile nelle condizioni ammesse né quanto possa essere preparato per la vendita. La quantità geologica è il punto di partenza di una scelta concreta di sito e di processo.

La distinzione conta anche prima dell'estrazione. Un deposito individuato, un'area prevista da un piano, una cava autorizzata e un sito che produce effettivamente nell'anno sono stati diversi. Fra il primo e l'ultimo intervengono accessibilità, disponibilità delle superfici, permessi, possibilità di lavorare vicino ad abitazioni e corsi d'acqua, collegamenti stradali e presenza di impianti. Contare le autorizzazioni non permette di ricavare le tonnellate disponibili sul mercato: alcune cave non producono, altre producono soltanto una parte di ciò che potrebbero estrarre in condizioni differenti.

La distribuzione italiana rende concreta questa geografia. Secondo l'Istituto nazionale di statistica, il Nord-Ovest concentrava nel 2022 il 43,1 per cento della quantità nazionale estratta nella voce «sabbie e ghiaie». La quota riguarda la localizzazione del prelievo, non il numero di cave, il consumo regionale o la qualità dei materiali. Per stabilire se un territorio rifornisca sé stesso o altri territori servirebbero inoltre flussi commerciali omogenei: la mappa delle estrazioni, da sola, non è una mappa dell'autosufficienza.

Il totale nazionale misura la scala annua del prelievo e la quota geografica indica dove si concentra. Per ricostruire il mercato servirebbero inoltre dati

sulle consegne fra regioni, sulle frazioni ottenute dalla lavorazione e sulle quantità in deposito. Sono passaggi concreti: dalla stessa massa estratta possono uscire lotti diversi, destinati ad acquirenti e luoghi differenti.

Dal materiale grezzo alle pezzature

Dal deposito al compratore c'è una fase di separazione. Se il materiale è sciolto, si possono usare vagli che dividono le particelle secondo la loro dimensione; il lavaggio elimina parte delle frazioni fini o delle impurità quando la specifica lo richiede. Se il materiale proviene da roccia compatta, la frantumazione produce un insieme di pezzature: le parti troppo grandi possono tornare nel circuito, mentre quelle già della dimensione cercata vengono separate. Il risultato non è semplicemente «meno pietra», ma una serie di lotti descritti in modo che l'acquirente sappia cosa riceve.

Anche i termini quotidiani coprono dimensioni diverse. Nelle specifiche commerciali le pezzature vengono definite attraverso vagli con aperture dichiarate: si descrivono la frazione che passa, quella trattenuta e la distribuzione complessiva dei granuli. Sabbia e ghiaia sono quindi suddivise in classi misurabili, la cui definizione precisa dipende dalla specifica applicabile. Uno stesso materiale grezzo può contribuire a più classi dopo essere stato vagliato; l'acquirente sceglie il lotto in base alla distribuzione effettiva dei granuli e agli altri requisiti richiesti.

La dimensione media, da sola, non basta. Un lotto di sabbia può contenere troppi granuli molto fini, oppure distribuirli in modo diverso da quanto richiede il processo a valle. Nella roccia frantumata contano anche forma delle particelle, resistenza all'usura e alla frammentazione, impurità e stabilità delle caratteristiche fra consegne successive. Per alcuni compratori una proprietà è decisiva, per altri lo è una proprietà diversa. Non esiste quindi una graduatoria unica dalla pietra «buona» a quella «cattiva»: esistono lotti conformi o inadatti a richieste specifiche.

Fra i granuli piccoli e quelli grandi non cambia soltanto il nome. La distribuzione delle dimensioni determina come le particelle si dispongono quando vengono mescolate o compattate; una quantità eccessiva di fini può cambiare il comportamento del materiale e il trattamento richiesto. Nella roccia frantumata, inoltre, la forma delle particelle nasce in parte dal tipo di pietra e

in parte dalla sequenza di macchine utilizzate. Per questo il controllo della qualità non può limitarsi a indicare la provenienza della cava: deve riguardare campioni e lotti effettivamente preparati.

Questa è anche la ragione per cui la quantità estratta e quella venduta non coincidono necessariamente. La selezione separa prodotti di qualità e dimensioni diverse, lascia frazioni che possono avere un altro mercato e può generare materiale fuori specifica. Le quantità registrate dalla statistica di cava misurano un passaggio fisico precedente alla vendita. Per confrontarle con un dato sulle consegne occorrerebbe conoscere scorte, passaggi di lavorazione, uso interno e definizione di ogni classe commerciale. Trattare tutte le tonnellate estratte come un prodotto omogeneo cancellerebbe proprio l'attività che rende il materiale acquistabile.

La classificazione influisce inoltre sulle scelte di impianto. Aggiungere una fase di lavaggio può rendere adatta una frazione che prima non soddisfaceva la richiesta, ma impone di gestire acqua, particelle fini ed energia. Una frantumazione più spinta può aumentare un certo tipo di prodotto e cambiare la quantità delle altre pezzature. La cava deve quindi gestire l'insieme delle pezzature prodotte, non soltanto massimizzare una frazione desiderata. Se il mercato locale chiede una combinazione diversa da quella che il deposito restituisce, alcune quantità possono essere più difficili da collocare.

Un ordine per una determinata pezzatura, per esempio, non fa scomparire le altre particelle prodotte dal trattamento. Possono essere vendute in lotti separati, rimesse in circolo nell'impianto o restare temporaneamente in cumulo, a seconda della qualità e della domanda. La produzione di un materiale richiesto può quindi essere limitata non solo dalla quantità di roccia disponibile, ma dalla capacità di gestire tutti i flussi che la lavorazione genera. È un vincolo industriale e commerciale che le statistiche sull'estrazione grezza non rendono visibile.

La separazione può essere ripetuta nel tempo, perché il fronte di scavo e la composizione del deposito cambiano. Una cava che avanza dentro un banco naturale può incontrare più fini, un diverso rapporto fra sabbia e ghiaia o una pietra con comportamento differente alla frantumazione. Il prodotto commerciale richiede allora controlli e regolazioni dell'impianto; la presenza di una risorsa abbondante non garantisce che ogni giornata di lavoro produca la

stessa miscela di lotti. La continuità della fornitura dipende dalla possibilità di mantenere le caratteristiche dichiarate.

La disponibilità commerciale dipende anche da come quei lotti vengono tenuti separati. Accumulare materiali con pezzature o contenuti di fini differenti in un unico cumulo può annullare il lavoro di classificazione; conservarli distinti permette invece di fornire al compratore la qualità concordata e di utilizzare ogni frazione dove è adatta. L'impianto può regolare vagliatura e frantumazione quando cambiano le proporzioni del materiale in ingresso, ma non può trasformare una composizione geologica inadatta in qualunque prodotto richiesto. Anche lo spazio per i cumuli separati diventa così parte della capacità effettiva della cava.

Quando il nome «sabbia» nasconde un'altra materia prima

Le sabbie industriali rendono evidente il peso della specifica. La sabbia silicea è ricercata per la sua composizione e per caratteristiche dei granuli che non si deducono dal semplice aspetto. Nella descrizione del British Geological Survey la sabbia silicea industriale contiene tipicamente più del 95 per cento di biossido di silicio; la fascia granulometrica indicativa si colloca fra circa 0,1 e 2 millimetri. Sono caratteristiche generali della famiglia, non una soglia legale che ogni impiego debba rispettare.

Ferro e altre impurità, dimensione e forma dei granuli diventano importanti in modo diverso secondo il compratore. Una sabbia che soddisfa una richiesta può non soddisfarne un'altra pur provenendo dallo stesso deposito e pur avendo una granulometria apparentemente simile. La sabbia comune usata come aggregato non può essere dichiarata sabbia industriale soltanto perché contiene quarzo: occorrono controlli sul materiale e, quando necessario, separazione e preparazione. La lavorazione del vetro, che è uno dei possibili impieghi, appartiene alla fase industriale successiva.

Nel caso della sabbia silicea il valore dell'analisi è particolarmente evidente. Due campioni possono avere granuli della stessa dimensione e differire per la composizione; due campioni ricchi di silice possono presentare distribuzioni granulometriche differenti. La parola «purezza» non sostituisce quindi una scheda di prodotto completa. Un giacimento può alimentare più gradi, ma è il

risultato del controllo e della preparazione a stabilire quali gradi siano realmente disponibili in modo regolare.

Una qualità più selettiva cambia anche la geografia del rifornimento. Se il deposito più vicino non offre le caratteristiche richieste, la distanza verso una fonte idonea può aumentare. Questa osservazione non autorizza però una regola universale secondo cui ogni sabbia industriale viaggi più lontano degli aggregati: prezzo, purezza, quantità acquistata, disponibilità di impianti e trasporto variano. La differenza essenziale è che il compratore non può sostituire automaticamente un grado con un altro per accorciare il tragitto.

Le statistiche ampie non mostrano bene questo livello di dettaglio. Le 66,9 milioni di tonnellate italiane nella voce «sabbie e ghiaie» non isolano la quota di sabbia silicea con un preciso grado commerciale. Allo stesso modo, una produzione venduta registrata in una classificazione industriale rappresenterebbe una fase diversa dal prelievo in cava. Per sapere quanto materiale di qualità specifica sia disponibile serve una misura che identifichi insieme prodotto, anno, luogo e fase della filiera.

Nella pietra ornamentale conta ciò che resta intero

La pietra da taglio mette alla prova una diversa idea di resa. Per ottenere un blocco commerciabile non basta che la roccia abbia una composizione adatta: serve una porzione sufficientemente grande e continua. Giunti, fratture, stratificazione, venature, variazioni di colore e geometria del fronte possono limitare la dimensione ricavabile. La stessa cava può produrre pietra da taglio e materiale che non conserva i requisiti del blocco ma può essere utilizzato in un'altra forma.

Il monitoraggio delle cave della Toscana registra separatamente questi flussi. Per il 2023 riporta 392.493 metri cubi di «materiali da taglio» e 1.680.494 metri cubi di «derivati ornamentali». La distinzione non è un modo diverso di chiamare prodotto e rifiuto. Nella normativa regionale i derivati comprendono materiale della coltivazione non idoneo a blocchi e lastre e sfridi della riquadratura o del taglio in cava destinati alla commercializzazione. La presenza di una destinazione commerciale nella definizione non garantisce, a sua volta, che ogni metro cubo sia stato effettivamente venduto.

Le due cifre non vanno trasformate in una percentuale di resa del marmo italiano. Sono volumi di categorie regionali, riferiti a un anno e a più cave; non descrivono un unico blocco iniziale da cui sia stata separata una quantità precisa di prodotto. Non sappiamo da quel rapporto quanto materiale resti in deposito, quanto entri in altri mercati o quanto valga ciascuna frazione. Il confronto serve a una domanda più semplice e più solida: quanta materia di una filiera ornamentale viene registrata fuori dalla categoria del blocco da taglio.

Si tratta inoltre di metri cubi secondo le convenzioni di un sistema regionale. Convertirli in tonnellate con una densità scelta per comodità sembrerebbe aumentare la confrontabilità con il dato Istat, ma introdurrebbe un'ipotesi non giustificata per cave e materiali diversi. La misura volumetrica è adeguata alla domanda posta qui: permette di vedere che la filiera registra due categorie di prodotto nettamente distinte, senza fingere che siano la stessa unità commerciale dei 66,9 milioni di tonnellate nazionali.

L'esempio mostra anche perché il valore per tonnellata non possa essere attribuito all'intera roccia estratta usando il prezzo di una lastra finita. Il blocco integro, i derivati commerciali, una lastra segata e un manufatto lavorato appartengono a stadi differenti. Lavorazioni, selezione, difetti e domanda possono modificare il valore in ciascuno di essi. Una cava che cerca pochi grandi blocchi non svolge la stessa funzione economica di una cava che produce soprattutto materiale da frantumare, anche quando entrambe muovono pietra.

La differenza raggiunge il trasporto. Un lotto di aggregati sfusi deve distribuire il costo del viaggio su una massa il cui valore unitario è relativamente limitato; un blocco scelto per continuità e aspetto può raggiungere compratori più lontani se il suo valore lo consente. Questo non significa che tutte le pietre ornamentali percorrano lunghe distanze o che il trasporto diventi trascurabile. Significa che la stessa distanza pesa in modo diverso quando cambiano prodotto, qualità e prezzo della fase considerata.

Tra la pietra da blocco e il pietrisco esistono inoltre materiali da costruzione venduti come elementi lapidei con caratteristiche proprie. La pietra destinata a essere tagliata o divisa per ottenere pezzi riconoscibili deve conservare dimensioni e comportamento adeguati anche se il suo aspetto non è quello di un blocco ornamentale pregiato. Il confine commerciale non coincide sempre

con una categoria geologica: il compratore valuta ciò che può effettivamente ricavare dal lotto. In questo capitolo interessa la pietra fornita dalla cava; la fabbricazione e la posa degli elementi appartengono alla filiera delle costruzioni.

La scelta del blocco comprende perciò più della ricerca di un colore uniforme. Una pietra destinata a restare esposta deve avere proprietà coerenti con le condizioni previste: porosità, resistenza e comportamento nel tempo possono essere decisivi quanto la facilità di taglio. Un materiale bello alla vista può essere inadatto a un certo impiego, mentre una pietra dall'aspetto meno ricercato può trovare un mercato diverso. Anche qui l'idoneità nasce dall'incontro fra caratteristiche misurate e richiesta dell'acquirente; non si può assegnare un valore unico a tutta la roccia di un bacino.

Anche un deposito marino deve diventare un prodotto

Sabbia e ghiaia si trovano anche nei fondali marini. Dove un deposito viene sfruttato commercialmente, una nave draga preleva sedimenti in un'area autorizzata; il materiale deve poi essere sbarcato, eventualmente separato e consegnato. L'accessibilità del deposito, le proprietà dei sedimenti e la disponibilità di porti e collegamenti verso l'interno decidono se il mare possa essere una fonte utile a un determinato mercato. La vicinanza geografica della costa non dice da sola quanto materiale idoneo possa arrivare al compratore.

Le registrazioni pubbliche delle attività marine richiedono una lettura attenta. Il sistema europeo EMODnet raccoglie informazioni su aree e punti di estrazione, licenze e, quando disponibili, quantità autorizzate, richieste o effettivamente prelevate. La presenza di un'area su una mappa non dimostra che una draga vi abbia lavorato in un dato anno; il volume permesso non misura le consegne commerciali. La diversa completezza delle segnalazioni impedisce di sommare automaticamente tutti i record per ottenere una produzione europea affidabile.

La finalità del prelievo distingue inoltre due percorsi che possono partire da sedimenti simili. Il materiale marino destinato al mercato degli aggregati è classificato e distribuito come materia prima. La sabbia dragata per ricostruire una spiaggia erosa entra invece in un intervento di ripascimento, non in una vendita ordinaria agli utilizzatori industriali. In entrambi i casi contano granulometria e condizioni ambientali del fondale, ma le quantità vanno

registrate secondo la finalità effettiva. Questa distinzione impedisce che un intervento costiero faccia apparire più grande l'offerta commerciale di sabbia.

Il costo del viaggio ridisegna l'offerta

Un aggregato pronto alla vendita occupa spazio e pesa molto. Per portarlo al compratore servono mezzi, carburante o energia, personale, accessi e tempo; il carico può dover passare anche da un impianto di selezione prima della consegna. Il prezzo alla cava è quindi soltanto una parte del costo sostenuto da chi deve disporre del materiale in un luogo preciso. Allungare il tragitto significa impiegare più risorse per trasportare ogni tonnellata, anche se il materiale del deposito lontano è abbondante.

Il costo consegnato può cambiare anche senza spostare la cava. Se il prodotto richiesto necessita di un passaggio di lavaggio o di un controllo più rigoroso, il prezzo del lotto non è quello del materiale grezzo accatastato nello stesso sito. Allo stesso modo una frazione apparentemente economica può smettere di esserlo quando richiede più trasferimenti fra cava, impianto e acquirente. Per capire la concorrenza fra due fonti occorre confrontare materiali della stessa qualità già portati nel luogo richiesto, includendo le operazioni intermedie.

Per questo la vicinanza fra cave e bacini di domanda ha un peso speciale negli aggregati comuni. La fonte più vicina, tuttavia, non è necessariamente la più conveniente o quella utilizzabile. Può offrire pezzature diverse, lavorare in quantità insufficienti o avere collegamenti stradali sfavorevoli; un'altra può raggiungere il mercato per ferrovia o nave. Il confronto economico riguarda l'intera consegna di un materiale conforme, non soltanto i chilometri in linea d'aria fra deposito e acquirente.

Una misura britannica rende concreto il raggio delle consegne. Secondo il British Geological Survey, nel 2017 la distanza media di consegna stradale degli aggregati primari in Gran Bretagna era di circa 43 chilometri. Nella ripartizione dei trasporti riportata dalla stessa scheda, circa l'83 per cento viaggiava su strada, l'11 per cento su ferrovia e il 6 per cento per vie d'acqua. È la fotografia di quel mercato e di quel periodo.

Una media nasconde inoltre viaggi molto diversi. La strada consente consegne flessibili fra una cava, un impianto e molti acquirenti; ferrovia e nave possono concentrare grandi carichi lungo corridoi compatibili con terminali e accessi. Un

tratto iniziale o finale su camion può restare necessario anche quando la parte più lunga avviene con un altro mezzo. Di conseguenza la scelta della modalità dipende dall'insieme di volumi, infrastrutture e destinazioni, non soltanto dalla distanza.

Due cave alla stessa distanza in linea d'aria da una città possono avere costi di consegna molto diversi. Contano il rilievo, gli accessi, il traffico, il carico utile e la possibilità di evitare il ritorno a vuoto dei mezzi. Per calcolare l'incidenza del trasporto sul prezzo servirebbero tariffe, percorsi effettivi e prezzi alla cava riferiti alla stessa qualità del materiale. Mancano dati pubblici italiani recenti e omogenei che permettano questo confronto. La distanza britannica descrive dunque un sistema di consegne, mentre ogni acquisto si decide sul costo del materiale conforme portato nel luogo richiesto.

La localizzazione delle cave è quindi anche una questione di pianificazione territoriale. Aprire un sito più vicino alla domanda riduce alcuni tragitti, ma avvicina l'attività estrattiva ai luoghi abitati e agli usi concorrenti del suolo. Rifornirsi più lontano modifica il traffico, i costi e l'eventuale bisogno di terminali. Non c'è una soluzione deducibile da un unico numero: autorizzazioni, condizioni locali, caratteristiche dei depositi e collegamenti determinano le alternative realmente disponibili.

In alcuni bacini anche gli aggregati ottenuti da materiali di demolizione possono integrare l'offerta primaria, dopo selezione e controllo delle caratteristiche. La loro disponibilità dipende dai quantitativi recuperati, dagli impianti, dalle specifiche richieste e dalla posizione rispetto agli acquirenti. Sono materiali con una filiera propria: considerarli come possibile fonte locale serve a descrivere il mercato, senza assimilare ogni rifiuto da costruzione a un aggregato già pronto per la vendita.

La disponibilità può cambiare nel tempo pur restando immutata la geologia. Una cava può esaurire la parte più facilmente accessibile di un deposito, modificare le pezzature prodotte oppure cessare l'attività prima che sia autorizzata una fonte alternativa. La domanda di un territorio può muoversi più rapidamente dei tempi necessari per individuare e mettere in produzione un altro sito. Parlare di «abbondanza» senza precisare dove, in quale forma e in quale anno trascura questa dimensione temporale del rifornimento.

Il territorio resta dentro ogni tonnellata

Scavare un deposito significa intervenire in un luogo determinato. Una cava modifica il profilo del terreno e può alterare habitat e usi delle superfici; frantumazione, vagliatura e transito dei mezzi possono produrre polveri e rumore. Dove si lavora vicino alla falda o a corsi d'acqua, occorre valutare anche il rapporto fra scavo, drenaggio e risorsa idrica. Questi effetti non hanno la stessa intensità ovunque: dipendono dal sito, dal metodo impiegato, dalla durata e dalle misure adottate durante l'attività e il ripristino.

Il peso degli aggregati lega inoltre l'effetto ambientale della cava a quello della consegna. Un sito può concentrare macchine e traffico nelle sue vicinanze; spostare il prelievo più lontano trasferisce parte delle pressioni sul percorso dei mezzi. Per valutare entrambi gli effetti occorrerebbero quantità movimentate, tipi di mezzi, percorsi, durata degli interventi e condizioni dei luoghi attraversati. Le rilevazioni nazionali disponibili non forniscono una serie omogenea di questi fattori per le sole sabbie e ghiaie italiane. L'esposizione di chi abita lungo una strada di accesso, per esempio, dipende dal traffico effettivo e dalla posizione delle case, non dal totale nazionale delle tonnellate estratte.

Per leggere gli effetti sul territorio bisogna collocare le cave sulla mappa, conoscere la superficie interessata, le condizioni precedenti e gli effetti osservati. La quota di prelievo del Nord-Ovest indica dove si concentrano le tonnellate estratte, mentre superficie trasformata, acqua utilizzata ed esposizione alle polveri richiedono misure differenti, raccolte nei siti interessati.

Anche il tipo di deposito conta. Nei contesti fluviali togliere sedimenti può modificare l'equilibrio locale del corso d'acqua e la disponibilità di materiale trasportato verso valle; su coste e fondali il prelievo richiede di considerare sedimenti e habitat. Il medesimo volume estratto non ha ovunque la stessa conseguenza: contano il movimento naturale dei materiali, le condizioni del sito e la durata dell'intervento.

Nelle cave ornamentali il rapporto con il territorio passa anche dalla destinazione delle frazioni che non diventano blocchi. Alcune sono commerciabili, altre possono avere sbocchi difficili e richiedere gestione sul posto. Chiamarle tutte «scarto» o tutte «materia recuperata» nasconderebbe due situazioni opposte. Per capire cosa resta alla cava e cosa ne esce occorrono

un bilancio delle singole frazioni e informazioni sui loro mercati, non una semplice sottrazione fra blocchi e materiale estratto.

Anche il recupero del sito ha tempi e funzioni concrete. Una parte dell'area può essere sistemata mentre altre porzioni sono ancora in lavorazione; un'altra richiede interventi dopo la cessazione dello scavo. Il risultato dipende dalla conformazione lasciata dalla cava, dalla stabilità dei fronti, dalle acque e dall'uso futuro previsto. La semplice promessa di ripristino non permette di annullare contabilmente polveri, traffico o trasformazioni avvenute durante gli anni di attività. Le valutazioni devono seguire il luogo interessato e le condizioni osservate prima e dopo l'intervento.

La disponibilità di sabbia, ghiaia e pietra nasce dunque in un punto preciso del territorio. La roccia o il deposito devono poter essere raggiunti e coltivati; il materiale deve diventare un lotto con proprietà riconoscibili; infine deve arrivare dove quelle proprietà servono. Nessuna delle tre condizioni è riassunta da una mappa geologica o da un totale nazionale. È per questo che materiali comuni possono scarseggiare nella qualità e nel luogo richiesti, mentre cave diverse continuano a produrre grandi quantità di materia che il mercato non tratta come equivalente.

Fonti e riferimenti

Istat — Annuario statistico italiano 2025, capitolo 2 (dati 2022)

https://www.istat.it/storage/ASI/2025/capitoli/C02.pdf

Regione Toscana — Piano regionale cave, integrazione del documento preliminare VAS, novembre 2024

https://www.regione.toscana.it/documents/10180/23252873/documento_preliminare_VAS_integrazione_novembre_2024_integrato.pdf/c6c37e77-fd3c-0145-822d-8a4fe20acd39

Regione Toscana — Legge regionale 35/2015, articolo 2

https://raccoltanormativa.consiglio.regione.toscana.it/articolo?urndoc=urn:nir:regione.toscana:legge:2015-03-25;35&dl_t=text/xml&dl_a=y&dl_id=&pr=idx,0;artic,0;articparziale,1&anc=art2

ARPAT — Cave di marmo in Toscana

https://www.arpat.toscana.it/cave-di-marmo-in-toscana/

British Geological Survey — Mineral Planning Factsheet: Construction Aggregates, 2019

https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/524079/1/aggregates_2019.pdf

British Geological Survey — Mineral Planning Factsheet: Silica Sand, 2020

https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/527215/1/CR19083N.pdf

British Geological Survey — Building and Roofing Stone Mineral Planning Factsheet, 2024

https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/537719/7/Buildingstone_factsheet2024.pdf

Aggregates Europe/UEPG — Annual Review 2020–2021, produzione primaria e secondaria

https://www.aggregates-europe.eu/wp-content/uploads/2023/03/Final_-_UEPG-AR2020_2021-V05_spreads72dpiLowQReduced.pdf

Commissione europea — Construction minerals

https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/related-industries/minerals-and-non-energy-extractive-industries/construction-minerals_en

EMODnet Human Activities — Aggregate Extraction, metadati

https://ows.emodnet-humanactivities.eu/geonetwork/srv/api/records/fde45abd-7bf3-4f05-869c-d1ce77f4ac63

UNEP — Sand and Sustainability, 2019

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/28163/SandSust.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ISPRA — Sabbie relitte dragate ai fini di ripascimento

https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/coste/sabbie-relitte-dragate-ai-fini-di-ripascimento

04.07 – Calcare, argilla, gesso e cemento

Nel 2025 la produzione mondiale di cemento è stimata dallo United States Geological Survey (USGS) in circa 3,8 miliardi di tonnellate. La cifra riguarda il legante che esce dagli stabilimenti, non la roccia scavata né il calcestruzzo che verrà preparato aggiungendo acqua e aggregati. La distinzione è decisiva: lungo la filiera cambiano la composizione, la massa, il luogo di produzione e perfino il nome del materiale. Anche la capacità mondiale stimata di produrre clinker era circa 3,8 miliardi di tonnellate nello stesso anno, ma l'apparente uguaglianza fra le due cifre non indica che tutti i forni lavorassero al massimo. Una è produzione di cemento, l'altra capacità di un prodotto intermedio; il cemento contiene anche componenti diversi dal clinker e può essere fabbricato con clinker importato.

Un cementificio non si limita a macinare calcare. Prepara una miscela di minerali, la porta a temperature elevate, libera anidride carbonica dai carbonati, forma noduli di clinker e infine li macina insieme a solfati e, secondo il prodotto, ad altri costituenti. Accanto a questo percorso esistono quello della calce, ottenuta cuocendo rocce carbonatiche con un risultato diverso, e quello del gesso, minerale che può entrare nella macinazione finale e alimentare anche mercati autonomi. Seguire i passaggi permette di capire perché una cava, un forno, un mulino e un carico di cemento rappresentino capacità materiali differenti.

La roccia non è ancora la ricetta

Il componente principale della miscela destinata al clinker Portland è in genere un materiale ricco di carbonato di calcio: calcare oppure marna, che contiene già una combinazione di carbonati e altri minerali. La fabbrica ha bisogno anche di silice, allumina e ferro. Materiali argillosi e correttivi forniscono questi componenti in proporzioni adatte a formare, durante la cottura, i minerali reattivi del clinker. La semplice presenza di calcare in un territorio non dice dunque quanta materia idonea possa arrivare stabilmente al forno. Una roccia può avere una composizione poco adatta, impurità problematiche o una variabilità che richiede altre alimentazioni per correggere la miscela.

L'Istituto nazionale di statistica registra per il 2022, nelle cave italiane, 82,845 milioni di tonnellate sotto la voce congiunta «calcare, marne, gesso e arenaria». Registra inoltre 6,039 milioni di tonnellate di «marna da cemento» nella categoria delle miniere. I due numeri mostrano la scala dell'estrazione minerale, ma descrivono raggruppamenti statistici, non le consegne ai forni. Il primo include rocce e destinazioni diverse; il secondo identifica un'altra categoria estrattiva. Moltiplicare quei volumi per un rendimento presunto produrrebbe un quadro fuorviante della produzione italiana di cemento.

La composizione viene controllata prima della cottura. Dopo estrazione e frantumazione, materiali provenienti da punti diversi possono essere accumulati e miscelati per attenuare le differenze del banco. Vengono dosati e macinati fino a ottenere la farina cruda. La finezza della polvere e la sua omogeneità servono a rendere il più possibile costante l'alimentazione della linea termica. Un correttivo contenente ferro o silice può rappresentare una piccola parte della massa, ma avere un ruolo importante nel riportare la ricetta entro i parametri richiesti. L'industria compra quindi continuità di composizione oltre a tonnellate di roccia.

La collocazione della cava incide sull'organizzazione dell'impianto. Trasportare continuamente grandi masse di materiale grezzo richiede mezzi e infrastrutture; collocare un forno vicino a una fonte utilizzabile riduce una parte del percorso, ma lascia il problema di reperire gli altri componenti della miscela. Quando cambia il giacimento alimentato o varia la qualità del materiale, il dosaggio deve adattarsi. È un vincolo quotidiano di esercizio, distinto dalla domanda generale se il sottosuolo contenga abbastanza calcare.

Una materia secondaria può entrare già in questo punto della filiera, come correttivo della composizione della farina, se le sue proprietà sono adatte e il processo lo ammette. In quel caso viene cotta insieme al resto della miscela. La medesima categoria di residuo industriale, se invece viene aggiunta durante la macinazione finale, si ritrova in un bilancio completamente diverso: modifica la composizione del cemento senza attraversare il forno. La parola «recupero» copre entrambe le operazioni, ma non consente di attribuire a ciascuna il medesimo risparmio di clinker o di energia. La fase di ingresso del materiale va conosciuta prima di quantificarne l'effetto.

Il passaggio alla farina mostra anche perché le masse non restano identiche. Nella lavorazione possono essere rimossi o aggiunti materiali; la materia

contiene acqua e, soprattutto, durante la cottura il carbonato perde anidride carbonica. Una tonnellata di roccia estratta non diventa una tonnellata di clinker e una tonnellata di clinker non coincide necessariamente con una tonnellata di cemento. Per chi vuole capire la scala della filiera, il nome della grandezza è importante quanto il numero che la misura.

Nel forno la materia cambia identità

La farina cruda entra nel sistema di preriscaldamento, attraversa nelle configurazioni che lo prevedono un precalcinatore e raggiunge il forno rotante. Il contatto con i gas caldi prepara e in parte realizza la decomposizione dei carbonati; nel forno, a temperature più elevate, si formano le fasi minerali del clinker. Il clinker appena formato viene raffreddato rapidamente e il calore recuperato dal raffreddatore può tornare al processo. Alla fine di questa catena si ottengono noduli solidi: sono un prodotto industriale intermedio, non ancora il cemento venduto per preparare malte o calcestruzzo.

Il precalcinatore non è una macchina che separa automaticamente l'anidride carbonica. Nelle linee convenzionali riceve combustibile e svolge una parte della calcinazione prima del forno rotante. Le emissioni prodotte dalla reazione e quelle della combustione possono trovarsi nello stesso circuito dei gas. Per ottenere flussi separati occorrono configurazioni progettate per quello scopo; la sola presenza del precalcinatore non basta a dedurle.

La continuità della linea conta quanto la sua temperatura massima. La farina attraversa più stadi di scambio termico prima di raggiungere le condizioni di formazione del clinker; i gas caldi cedono energia al materiale in arrivo, mentre il raffreddatore sottrae calore al prodotto appena uscito e lo rende disponibile all'impianto. Un'interruzione dell'alimentazione o un cambiamento rapido della miscela coinvolge perciò un sistema intero, non soltanto la camera dove il materiale è più caldo. La manutenzione programmata e gli arresti imprevisti incidono sia sulle tonnellate annue sia sul modo in cui viene impiegata l'energia. Non si ricava la produzione annuale contando i giorni di calendario e moltiplicandoli per una targa di capacità.

La trasformazione chimica più semplice da osservare è la decomposizione del carbonato di calcio: $CaCO_3$ diventa ossido di calcio, CaO, e CO_2. Considerando carbonato puro, da una tonnellata di $CaCO_3$ si formano teoricamente circa 0,56

tonnellate di CaO e si liberano circa 0,44 tonnellate di CO_2. È un bilancio molecolare: non descrive le emissioni per tonnellata di clinker di un impianto. La farina comprende altri componenti, le proporzioni variano e al processo si aggiungono i combustibili. Il calcolo aiuta però a riconoscere una proprietà non negoziabile della reazione: il carbonio contenuto nel carbonato deve avere una destinazione.

La seconda origine della CO_2 diretta è il calore fornito bruciando combustibili. Secondo la tabella dell'Agenzia internazionale dell'energia (IEA), nel 2022 i forni richiedevano mediamente a livello mondiale 3,6 gigajoule di energia termica per tonnellata di clinker. È una misura dell'alimentazione termica del forno, non del consumo elettrico necessario per frantumare, macinare e muovere i materiali. Cambiare il combustibile o migliorare l'efficienza agisce su questo fabbisogno e sulle emissioni associate; la decomposizione dei carbonati rimane un passaggio della produzione convenzionale di clinker.

Il denominatore «per tonnellata di clinker» impedisce un equivoco frequente. Se un cementificio produce meno clinker perché cambia la formulazione del cemento, il consumo termico totale può scendere anche senza variazioni nei gigajoule richiesti per ciascuna tonnellata che continua a uscire dal forno. Viceversa, una linea più efficiente può consumare meno energia per tonnellata di clinker pur aumentando il proprio consumo complessivo se lavora molto di più. Per attribuire una riduzione a un miglioramento tecnologico servono quindi quantità prodotte e consumi riferiti allo stesso periodo e alla stessa fase.

La tecnologia modifica l'energia necessaria per compiere il processo. Nella ricognizione del Centro comune di ricerca della Commissione europea (JRC), le linee a secco con preriscaldatore e precalcinatore presentano valori indicativi compresi fra 3 e meno di 4 gigajoule per tonnellata di clinker. I forni a umido esaminati si collocano fra 5 e 6,4 gigajoule: una parte del calore deve evaporare l'acqua della miscela. Sono intervalli associati alle tecnologie censite, non una classifica dei singoli cementifici italiani. Rendono visibile come la modalità di preparazione della stessa materia possa pesare sul consumo del forno.

Una roadmap dell'IEA attribuiva storicamente all'incirca due terzi delle emissioni dirette della filiera cementiera alla calcinazione e un terzo alla combustione. Questa ripartizione aggregata aiuta a comprendere la dimensione del problema chimico, ma non è una quota fissa per ogni paese, impianto o anno. In Italia, l'inventario nazionale pubblicato dall'Istituto

superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA) nel 2026 stima per il 2024 circa 6,762 milioni di tonnellate di CO_2 di processo per la produzione di cemento. La categoria nazionale relativa alla combustione dei minerali non metallici comprende anche calce, laterizi e vetro: non fornisce un totale di combustione del solo cemento da sommare ai 6,762 milioni. La cifra italiana dà quindi misura di una componente identificata, non dell'intero bilancio emissivo del settore.

Cuocere calcare può produrre anche un materiale differente. Nella filiera della calce, la decomposizione dei carbonati dà calce viva, prevalentemente ossido di calcio; un'ulteriore reazione con acqua produce calce idrata. La calce detta «aerea» indurisce principalmente reagendo con la CO_2 dell'aria. La calce idraulica, ottenibile da rocce che contengono anche componenti argillose, sviluppa durante la cottura minerali capaci di reagire con l'acqua: per questo può fare presa anche in presenza d'acqua. Il clinker Portland nasce invece da una miscela e da una cottura progettate per ottenere un altro insieme di minerali reattivi. Questi leganti condividono alcuni elementi chimici, ma hanno composizione e processi distinti. Secondo le stime USGS per il 2025, la produzione mondiale della categoria «calce» è circa 420 milioni di tonnellate, di cui circa 2,5 milioni attribuite all'Italia. La categoria statistica comprende diverse forme di calce e, per l'Italia, anche calce idraulica; la cifra non riguarda soltanto gli impieghi edilizi.

Forno e mulini devono inoltre operare come un sistema. Alimentazioni irregolari, guasti o arresti per manutenzione cambiano le tonnellate effettivamente prodotte, anche quando la potenza nominale delle attrezzature rimane invariata. Una capacità di forno esprime ciò che la linea può sostenere nelle condizioni considerate; la produzione annuale risente di fermate, qualità dell'alimentazione, disponibilità energetica e domanda.

Il clinker diventa una famiglia di cementi

Dopo il raffreddamento, il clinker viene macinato. In questa fase si aggiunge una quantità controllata di solfato di calcio, spesso sotto forma di gesso, per regolare la presa: senza un controllo adeguato, le reazioni iniziali del legante con l'acqua non avrebbero le caratteristiche richieste. Il gesso non sostituisce il calcare nella farina cruda e non viene conteggiato come se fosse clinker; entra in un'altra fase con un'altra funzione. Lo USGS stima per il 2025 circa 160

milioni di tonnellate di gesso naturale estratto nel mondo, ma quel volume alimenta anche lastre, intonaci, usi agricoli e altri mercati. Non rappresenta la quantità consumata dai cementifici.

La funzione del solfato chiarisce perché le quantità di un ingrediente vanno lette insieme al processo. Una piccola frazione nella ricetta può condizionare il comportamento del legante più di una massa molto maggiore di materiale inerte. Il dosaggio viene stabilito in relazione alle caratteristiche del clinker e del cemento che si vuole ottenere: regola ciò che avverrà quando il prodotto verrà mescolato con acqua. Se il solfato proviene da un materiale secondario invece che da una cava di gesso naturale, occorre verificarne le caratteristiche per quel particolare prodotto. Per quantificare l'uso del gesso nel cemento servirebbe isolare la quota assorbita dai mulini rispetto alle quantità destinate agli altri mercati.

La macinazione può comprendere altri costituenti minerali. In funzione del tipo di cemento, fra i materiali utilizzabili compaiono loppa granulata d'altoforno opportunamente trattata, ceneri volanti qualificate, pozzolane, calcare finemente macinato e argille calcinate. Questi nomi non identificano ingredienti equivalenti: origine, reattività, finezza, impurità e disponibilità cambiano. Un materiale aggiunto al cemento dopo il forno svolge inoltre una funzione diversa dallo stesso materiale immesso nella farina cruda e sottoposto a cottura. Attribuire a entrambi una identica tonnellata di clinker evitata cancellerebbe questa differenza.

La macinazione stessa è una lavorazione industriale, non una semplice miscelazione di sacchi. Il clinker raffreddato deve raggiungere la finezza prescritta; il dosaggio dei costituenti e il controllo della composizione servono a riprodurre lotti con caratteristiche definite. Un centro di macinazione può avere un proprio approvvigionamento, depositi, mulini e laboratori anche senza possedere un forno. Per questo una statistica che registri cemento finito nel paese non descrive automaticamente l'energia termica spesa per produrne il clinker. Al contrario, un dato sui combustibili dei forni non misura tutta l'elettricità assorbita dalla fase successiva.

Nel 2019 il settore cementiero europeo, secondo dati dell'associazione industriale GCCA riportati dal JRC, ha riciclato o utilizzato oltre 14 milioni di tonnellate di scorie e oltre 3 milioni di tonnellate di ceneri volanti. Le quantità dimostrano che alcuni flussi di materiali secondari hanno già dimensione

industriale. Non costituiscono però una disponibilità libera per nuove fabbriche: il dato non divide i materiali per paese, grado commerciale e fase d'impiego, né dice quante tonnellate siano ancora acquistabili. La scoria generica menzionata dalla fonte non può neppure essere equiparata automaticamente a loppa granulata idonea come costituente del cemento.

La dipendenza da altre industrie crea una conseguenza meno immediata. Una scoria utilizzabile nasce dalla siderurgia; le ceneri volanti sono legate a determinati processi di combustione. Se quelle attività cambiano volume o tecnologia, può cambiare anche la quantità e la qualità del materiale disponibile al cementificio. In alternativa occorrono nuove fonti, trattamenti o formulazioni qualificate. Parlare di «sostituire il clinker» senza chiedere da dove provenga la massa che prenderà il suo posto sposta il vincolo fuori dal perimetro del forno, ma non lo risolve.

L'argilla calcinata pone una questione parzialmente differente: per diventare un costituente utilizzabile richiede una trasformazione termica propria, che impiega energia e dispone di una capacità industriale specifica. Il calcare macinato come aggiunta richiede a sua volta materia con caratteristiche compatibili e lavorazioni di preparazione. Una scelta di formulazione può quindi ridurre la cottura del clinker e introdurre altri consumi a monte. Il confronto corretto considera quali materiali vengono effettivamente prodotti e con quali passaggi, anziché trattare ogni costituente diverso dal clinker come una massa senza costo materiale o energetico.

Il rapporto fra clinker e cemento misura una di queste scelte a livello aggregato. L'IEA indica per il mondo 0,71 tonnellate di clinker per tonnellata di cemento nel 2022. Nella sua traiettoria verso emissioni nette nulle il valore scende a 0,65 nel 2030: il primo è un dato di riferimento, il secondo una tappa di scenario. A parità di definizione e quantità di cemento, un rapporto inferiore richiede meno clinker a monte. L'emissione dovuta alla calcinazione di ciascuna tonnellata di clinker continua a dipendere dal processo che la produce; la miscela italiana, inoltre, richiederebbe un dato nazionale distinto dalla media mondiale.

I prodotti commerciali mostrano quanto possa variare la formulazione. Nelle sigle europee CEM identifica un tipo di cemento: CEM I designa il Portland, CEM II/C-M un Portland composito che combina clinker con più costituenti principali e CEM VI una famiglia di cementi compositi. In una figura del Centro

comune di ricerca che riproduce esempi basati sulle norme, la quota di clinker è rispettivamente del 95–100%, del 50–64% e, per la specifica combinazione CEM VI raffigurata, del 35–49%. Sono intervalli di composizione dei tipi rappresentati, non quote osservate nelle vendite. Passare dall'uno all'altro richiede costituenti disponibili, adatti e qualificati e un prodotto conforme alle specifiche applicabili.

Le norme EN 197-1, EN 197-5 ed EN 197-6 identificano famiglie di cementi e formulazioni, ma la loro pubblicazione tecnica e il loro riconoscimento nel quadro armonizzato dell'Unione europea sono passaggi distinti. La lista della Commissione consultata nel 2026 riporta EN 197-1:2011 nel regime precedente, mentre non riporta le altre due edizioni. Per capire quali prodotti possono essere immessi sul mercato con determinate dichiarazioni serve dunque verificare il regime vigente del tipo specifico, oltre alla sua composizione. La percentuale di clinker, da sola, non certifica prestazioni o conformità.

I passaggi industriali possono trovarsi in luoghi diversi

Una linea integrata fabbrica clinker e poi lo macina per ottenere cemento. Un centro di macinazione può invece acquistare clinker prodotto altrove e completare il legante vicino ai propri mercati. La distinzione cambia la lettura delle statistiche nazionali: un paese può ospitare mulini e vendere cemento senza aver cotto sul proprio territorio tutto il clinker impiegato. Può anche scambiare cemento già finito. La mappa delle cave, quella dei forni e quella dei mulini non coincidono necessariamente.

I dati doganali italiani danno una misura concreta di questa circolazione. Nel 2024 Eurostat Comext registra circa 1,827 milioni di tonnellate di clinker importate dall'Italia e circa 20.700 tonnellate esportate. Delle importazioni, circa 1,531 milioni di tonnellate provengono da partner extra UE e circa 296.000 da partner dell'Unione. La voce doganale identifica clinker che attraversa la frontiera; non segue la singola partita fino al mulino e non dice quanto clinker sia stato prodotto in Italia nello stesso anno. Il forte divario fra importazioni ed esportazioni documenta il verso di quel particolare scambio, non una percentuale nazionale di dipendenza.

Le voci dei cementi finiti raccontano altri flussi. Nel medesimo anno l'Italia ha importato circa 2,247 milioni di tonnellate di cemento Portland escluso il bianco e ne ha esportate circa 1,264 milioni. Per questa specifica voce le importazioni sono ripartite fra circa 1,166 milioni di tonnellate da partner UE e 1,081 milioni da partner extra UE. Altri codici comprendono Portland bianco, cemento alluminoso e altri cementi; non hanno la stessa composizione o destinazione e non vanno fusi con il clinker prima di chiarire quale prodotto si vuole misurare. I flussi di clinker e quelli di cemento mostrano che alla frontiera possono transitare stadi diversi della stessa filiera.

La quota extra UE è molto più alta nelle importazioni italiane di clinker che in quelle di Portland non bianco. I due flussi riguardano fasi e mercati diversi: nel primo caso entra un intermedio da macinare, nel secondo un legante già classificato alla frontiera. Per confrontare i costi di cottura fra impianti europei ed esteri conta anche il prezzo del carbonio. Nel 2024 i forni dell'Unione erano soggetti al sistema europeo di scambio delle quote di emissione, EU ETS, pur potendo ricevere una parte delle quote gratuitamente per il rischio di delocalizzazione delle emissioni. Il meccanismo europeo di adeguamento del carbonio alle frontiere, CBAM, era allora in fase transitoria; il suo regime definitivo si applica dal 2026 anche ai prodotti cementieri interessati. Queste regole influiscono sul confronto economico fra origini, insieme a combustibili, qualità, contratti e trasporto. I volumi doganali mostrano dove gli acquisti sono stati dichiarati, ma non permettono di attribuire a un singolo fattore la scelta dei fornitori.

Il rapporto fra scambi e produzione locale dipende anche dal valore del carico, dal trasporto e dall'ubicazione degli impianti. Il clinker può viaggiare come materiale sfuso verso un mulino; il cemento finito richiede condizioni di stoccaggio e consegna compatibili con il prodotto e con il mercato di destinazione. La possibilità tecnica di separare forno e macinazione non implica che ogni tonnellata importata attraversi esattamente quel percorso. I dati Eurostat descrivono le importazioni e le esportazioni dichiarate; stabilire dove venga poi macinato il clinker o usato il cemento richiederebbe informazioni sui singoli flussi industriali.

Questo intreccio spiega anche perché la cifra mondiale del cemento includa fabbricazione da clinker importato. Una tonnellata di clinker e una tonnellata di cemento possono comparire in statistiche di due paesi diversi senza

rappresentare due tonnellate indipendenti di prodotto finale. Per chi misura energia ed emissioni, la localizzazione è determinante: la CO_2 della calcinazione è attribuita al luogo del forno, mentre la trasformazione commerciale del cemento può essere registrata dove si trova il mulino. Il commercio non cancella le fasi fisiche; le distribuisce nello spazio.

Quattro interventi, quattro bersagli

La prima possibilità di ridurre le emissioni per tonnellata di clinker riguarda il calore necessario al processo. Migliori scambi termici, preparazione dell'alimentazione e recupero del calore del raffreddatore possono ridurre i gigajoule richiesti dal forno. La tecnologia e lo stato dell'impianto determinano il margine praticabile. Il dato mondiale IEA di 3,6 gigajoule per tonnellata di clinker nel 2022 e la sua tappa di scenario di 3,4 nel 2030 descrivono una riduzione del fabbisogno termico unitario, non delle tonnellate di clinker necessarie né della CO_2 contenuta nei carbonati in ingresso.

La seconda possibilità riguarda il combustibile usato per fornire quel calore. Composizione, contenuto energetico, umidità, emissioni e comportamento nel forno contano insieme: sostituire una massa di combustibile non equivale a sostituire la stessa quantità di energia. L'IEA attribuisce ai combustibili a basse emissioni circa il 5% del calore della produzione mondiale di cemento nel 2022; il 30% riportato per il 2030 è una tappa della sua traiettoria, non una misura di ciò che gli impianti hanno già fatto. La categoria dell'IEA non coincide automaticamente con tutte le sostituzioni di combustibili fossili tramite rifiuti o altri materiali alternativi.

Il terzo intervento avviene dopo il forno: impiegare meno clinker per unità di cemento, rispettando qualità e requisiti del prodotto. Qui il bersaglio è la quantità di clinker richiesta a monte, non il consumo termico per produrne una tonnellata. Il risultato dipende dalla disponibilità di costituenti idonei, dalla loro preparazione e dai mercati serviti. Anche un materiale apparentemente abbondante può presentare vincoli di purezza o di trasporto, mentre alcuni sottoprodotti hanno già destinazioni concorrenti. Perciò l'intervallo ammesso per un tipo di cemento non misura da solo il potenziale immediatamente sfruttabile dall'industria italiana.

Il quarto intervento riguarda la CO_2 che resta da gestire dopo gli altri cambiamenti. La cattura post-combustione tratta i gas esausti dell'impianto; la combustione con ossigeno anziché con aria modifica la composizione dei gas; la separazione diretta tiene distinti, con una configurazione dedicata, il trasferimento di calore e il flusso proveniente dalla calcinazione. Sono soluzioni tecniche differenti, con esigenze proprie di installazione, energia e gestione della CO_2 separata. Descriverle non significa attribuire a un cementificio esistente un impianto di cattura già funzionante. Soprattutto, separare e trattenere CO_2 non significa che la reazione del carbonato non sia avvenuta.

Il confine dell'impianto non chiude neppure la questione una volta separato il gas: l'anidride carbonica raccolta deve essere compressa, trasportata e avviata a una destinazione che ne impedisca il rilascio se l'obiettivo è ridurre le emissioni atmosferiche. Ogni passaggio richiede infrastrutture e consumi propri. Per giudicare una tecnologia occorre quindi sapere quanto gas venga catturato rispetto a quello generato, quanta energia aggiuntiva venga richiesta e quale percorso segua il flusso separato. Una percentuale di cattura alla macchina e una riduzione delle emissioni dell'intera filiera possono differire.

Le quattro azioni agiscono dunque su denominatori diversi: gigajoule per tonnellata di clinker, origine del calore, tonnellate di clinker per tonnellata di cemento e quantità di CO_2 rilasciata dopo la separazione. Possono essere combinate, ma le percentuali associate non si sommano direttamente. Un forno più efficiente può continuare a usare molto clinker; un cemento con meno clinker può dipendere da materiali disponibili soltanto in altri territori; una tecnologia di cattura modifica i flussi di gas e richiede una catena per la CO_2 raccolta. La scelta industriale deve tenere insieme queste condizioni, non selezionare il numero più favorevole fra indicatori incompatibili.

Anche gli effetti locali hanno una geografia propria. Cave, trasporti, depositi di polveri, combustione e movimento di materiali coinvolgono luoghi e persone diversi da quelli rappresentati dall'inventario nazionale della CO_2. L'inventario quantifica un'emissione climatica nel suo perimetro; la valutazione di rumore, qualità dell'aria, acqua ed esposizione dei residenti richiede invece misure riferite ai siti e ai territori interessati. Per una cava specifica contano luogo, attività effettiva e condizioni circostanti, oltre alla quantità estratta.

Il legante è il risultato di una filiera

Dal calcare in cava al cemento in un silos non esiste una conversione unica. La qualità delle materie decide la ricetta; il forno trasforma i carbonati e forma clinker; la macinazione incorpora gesso e altri costituenti per ottenere prodotti diversi. La calce segue una ramificazione della cottura e il gesso ha mercati che vanno oltre il cemento. Infine, clinker e legante finito possono attraversare frontiere differenti: il luogo in cui si vende il cemento non rivela da solo dove si è verificata la calcinazione.

Il vincolo più tenace sta nella chimica del clinker convenzionale: fornire calore in modo diverso riduce una parte delle emissioni, mentre i carbonati continuano a liberare CO_2 durante la trasformazione. Cambiare formula riduce la quantità di clinker necessaria per un dato cemento, nei limiti delle materie realmente disponibili e dei requisiti del prodotto. È in questi passaggi distinti, misurati ciascuno con la propria unità, che una roccia diffusa diventa un legante industriale commerciabile.

Fonti e riferimenti

ISTAT — Annuario statistico italiano 2025, capitolo 2, tavola 2.14

https://www.istat.it/storage/ASI/2025/capitoli/C02.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026, Cement, Gypsum e Lime

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026.pdf

IEA — Cement, Analysis e tabella Milestones, 2023

https://www.iea.org/reports/cement-3

IEA e Cement Sustainability Initiative — Technology Roadmap Low Carbon Transition in the Cement Industry, 2018

https://iea.blob.core.windows.net/assets/d982ca3b-837f-4176-8440-d964c2475671/Technology_Roadmap_LowCarbonTransitionintheCementIndustry_Foldout.pdf

Commissione europea JRC — Decarbonisation options for the cement industry, 2023

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC131246/JRC131246_01.pdf

ISPRA — National Inventory Document 2026, inventario italiano 1990–2024

https://www.isprambiente.gov.it/files2026/pubblicazioni/rapporti/rpporto-428_26_nid2026_italy_stampa.pdf

Eurostat — Comext DS-045409, commercio italiano per voce CN8 nel 2024

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/product/view/DS-045409

Commissione europea — Specifiche armonizzate per i prodotti da costruzione

https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/construction-products-regulation-cpr/harmonised-standards_en

Commissione europea — EU ETS, assegnazione gratuita per il rischio di delocalizzazione delle emissioni

https://climate.ec.europa.eu/areas-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation/carbon-leakage_en

Commissione europea — CBAM, fase transitoria e regime definitivo

https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en

Historic England — Mortars for Conservation, materiali e presa della calce idraulica

https://historicengland.org.uk/education/training-skills/training/webinars/recordings/webinar-on-mortars-for-conservation-part-1-history-and-materials/

04.08 – Vetro

Nel 2024 nell'Unione europea sono stati prodotti 36,1 milioni di tonnellate di vetro, secondo la ricostruzione del Centro comune di ricerca della Commissione europea. Il 63,4% apparteneva alla famiglia del vetro da contenitori e il 30,0% a quella del vetro piano. Insieme rappresentano quasi tutta la massa della classificazione usata dalla fonte, ma hanno forme, controlli e impianti differenti. Una bottiglia deve resistere alla formatura, al riempimento e alla movimentazione; una lastra deve offrire una superficie regolare, uno spessore controllato e la qualità ottica richiesta. Le fibre aggiungono un'altra esigenza ancora: ottenere filamenti sottili e continui.

Queste differenze nascono prima che il vetro acquisti una forma. La sabbia silicea, la soda, i carbonati e gli altri componenti devono produrre una massa della composizione adatta; il materiale fuso deve diventare omogeneo, liberarsi dalle bolle e raggiungere la viscosità richiesta dalla linea. Anche il vetro già usato può rientrare nella miscela, ma soltanto se colore, composizione e contaminanti sono compatibili con il prodotto da fabbricare. Per capire quanto vetro un'industria può consegnare, occorre seguire la materia attraverso la ricetta e il forno, fino alla forma commerciale che ne esce.

La ricetta precede la fusione

Il vetro comune di bottiglie e lastre appartiene in gran parte alla famiglia soda-calcica. La silice ne costituisce la struttura principale. In una sabbia destinata alla vetreria contano quindi sia la quantità di silice sia ciò che la accompagna: ferro e altre impurità possono modificare il colore o produrre difetti. Anche la distribuzione delle dimensioni dei granuli influisce sulla preparazione della miscela e sulla regolarità della fusione. Parlare genericamente di sabbia disponibile in una regione non identifica quanta di quella sabbia possa entrare in una ricetta vetraria, né a quali prodotti sia adatta.

La silice da sola richiederebbe condizioni di fusione assai più impegnative. Il carbonato di sodio, spesso chiamato soda, fornisce ossido di sodio e aiuta ad abbassare la temperatura e la viscosità alle quali la miscela può essere lavorata. Calcare e dolomite forniscono invece soprattutto ossidi di calcio e magnesio, che contribuiscono alla stabilità chimica e alle proprietà del vetro ottenuto.

Sono funzioni diverse: una sostanza facilita la lavorazione, altre rendono il prodotto adatto a durare e a svolgere la propria funzione. Piccole quantità di altri componenti possono modificare colore, comportamento nella fusione e proprietà finali. La ricetta cambia quando cambia il prodotto richiesto.

Il documento tecnico europeo sulle migliori tecniche disponibili riporta, per esempio, che nei vetri da contenitori soda-calcici la silice rappresenta indicativamente il 71–73% della composizione del vetro finito, l'ossido di sodio il 12–14% e l'ossido di calcio il 9–12%. Sono quote degli ossidi nel materiale ottenuto, non istruzioni per versare la stessa percentuale di sabbia, soda e calcare nel mescolatore. I carbonati liberano anidride carbonica durante la fusione; cambiano quindi massa e forma chimica prima di contribuire al vetro. Un impianto dosa gli ingredienti in funzione della composizione che vuole ottenere, del rottame disponibile e delle caratteristiche dei lotti ricevuti.

La qualità di una materia prima comprende anche la sua costanza. Una fornitura di sabbia che varia molto per ferro o granulometria richiede correzioni, selezioni o una destinazione differente. La stessa esigenza riguarda la soda, i carbonati e gli additivi, che devono essere consegnati in forme e quantità prevedibili. Il prezzo di una tonnellata di materia non esaurisce il costo di utilizzarla: variazioni inattese possono aumentare scarti, controlli e difficoltà di esercizio. L'obiettivo della preparazione è alimentare il forno con una miscela omogenea e dosata, chiamata carica, capace di dare nel tempo un vetro con caratteristiche ripetibili.

In questa fase il controllo non può limitarsi a leggere un'analisi chimica media. Una miscela corretta sulla carta può alimentare male il forno se i suoi componenti si separano durante la movimentazione, se la granulometria cambia fra consegne o se una parte degli ingredienti arriva con proprietà diverse da quelle usate per stabilire la ricetta. Dosare e miscelare servono a ridurre queste differenze prima che diventino variazioni del vetro fuso. Quando l'impianto cambia prodotto, deve inoltre preparare una composizione adatta al nuovo prodotto: i tempi necessari a sostituire il materiale presente nel circuito limitano l'idea di un forno universale capace di alternare liberamente lastre e bottiglie.

Il rottame vetroso entra già in questo bilancio, ma non come ingrediente indifferenziato. Se sostituisce una parte della miscela minerale, apporta ossidi che hanno già attraversato una fusione. La sua composizione deve però essere

nota: il rottame di una famiglia di vetri non è automaticamente adatto a un'altra. Anche scarti puliti generati nello stesso stabilimento e frammenti raccolti all'esterno hanno storie diverse. Prima di quantificare quanta materia vergine possano sostituire, bisogna conoscere quali rottami siano stati effettivamente accettati nella ricetta.

Dentro la massa fusa

La carica viene alimentata nel forno in modo continuo o regolare secondo la tecnologia utilizzata. I componenti reagiscono e si fondono; la silice deve sciogliersi nella massa e i carbonati liberano anidride carbonica. Il risultato non è immediatamente un vetro pronto per una bottiglia o una lastra. Un bagno ancora disomogeneo contiene zone di composizione differente, granuli non completamente disciolti e bolle nate anche dalle reazioni della carica. Se questa massa fosse inviata direttamente alla formatura, molte irregolarità resterebbero nel prodotto.

Una parte del percorso serve perciò all'affinaggio: ridurre bolle e altre discontinuità e rendere più uniforme il vetro fuso. Temperatura, tempo di permanenza, composizione e modalità di circolazione del bagno influiscono sul risultato. Il produttore deve concedere alla massa il tempo necessario per dissolvere le particelle e far diminuire i gas intrappolati, continuando nello stesso tempo a rifornire le linee di formatura. Aumentare semplicemente la portata non equivale a ottenere più prodotto idoneo: se la qualità peggiora, parte di quel vetro diventa scarto da recuperare internamente o materiale non conforme.

Una bolla ha un significato diverso secondo il prodotto e la posizione in cui compare. Può interrompere la continuità di un filamento, compromettere l'aspetto di una lastra o costituire un difetto in un contenitore. Anche una piccola particella che non si sia dissolta, oppure una zona con composizione diversa dal resto del bagno, può alterare il comportamento nella formatura e nel raffreddamento. Per questo il controllo comincia prima dell'ispezione finale: la qualità nasce dal dosaggio della carica e dalla storia termica del vetro mentre attraversa la linea.

Nel bacino la massa non percorre tutta la stessa traiettoria: la distribuzione delle temperature e i moti convettivi creano percorsi con tempi di permanenza

diversi. Una zona che circola male può trattenere vetro con caratteristiche differenti e rilasciarlo nella corrente diretta alla formatura. Bolle e strie, sottili disomogeneità ottiche legate alla composizione, possono rivelare queste irregolarità. Controllare la circolazione del bagno serve a mantenere uniforme la massa che alimenta le linee.

Prima della formatura la massa viene condizionata, cioè portata alle condizioni di temperatura e viscosità adatte alla tecnologia successiva. Viscosità indica quanto il vetro resiste allo scorrimento: una massa troppo fluida può perdere la forma imposta, una troppo viscosa può non distribuirsi correttamente. L'intervallo utile cambia fra la goccia destinata a uno stampo, il nastro che scorre verso una lastra e la massa alimentata a una filiera per fibre. Questo raccordo fra fusione e formatura spiega perché produrre genericamente «vetro fuso» non equivale a poterlo trasformare in qualsiasi prodotto.

L'affinaggio e il condizionamento sono passaggi fisici, non semplici attese fra due macchine. Il produttore deve coordinare ciò che avviene nel bagno con ciò che chiede la linea a valle: composizione, colore, portata e viscosità devono arrivare insieme entro specifiche accettabili. Una variazione della materia in ingresso può propagarsi nel tempo prima di manifestarsi come difetto visibile. La continuità delle operazioni rende quindi essenziale seguire i lotti e intervenire sulla ricetta e sulle condizioni di processo quando la qualità cambia.

La forma decide quali difetti contano

Per ottenere un contenitore, una porzione dosata di vetro fuso raggiunge una macchina formatrice. Stampi e aria, oppure combinazioni di pressatura e soffiatura, distribuiscono la massa fino alla geometria prevista. Il contenitore viene poi raffreddato secondo un ciclo controllato. Una forma esterna corretta non basta: occorrono una distribuzione della materia compatibile con l'uso, dimensioni regolari e l'assenza di difetti che ne compromettano integrità e lavorabilità. Peso e spessore, se variabili, cambiano sia il risultato commerciale sia la quantità di vetro necessaria per ciascun pezzo.

Il vetro piano segue un percorso diverso. Nel processo float la massa fusa forma un nastro sopra un bagno di stagno liquido. La superficie del bagno aiuta a ottenere facce regolari; l'avanzamento e il controllo del nastro permettono di governare spessore e larghezza. Dopo la formazione, il nastro viene raffreddato

e ricotto con attenzione alle tensioni interne, quindi controllato e tagliato in lastre. Una bolla o un'inclusione osservata su una grande superficie può rendere inadatto un tratto della lastra; uniformità ottica e planarità assumono quindi un'importanza diversa da quella che hanno nella fabbricazione di un contenitore colorato.

Ricottura significa raffreddare in maniera controllata per limitare le tensioni che rimarrebbero intrappolate nel vetro. Un pezzo che appare integro appena formato può comportarsi male nelle lavorazioni successive se queste tensioni sono eccessive. Il ciclo di raffreddamento dipende dalla forma e dallo spessore. Anche qui la materia prima industriale non nasce tutta nel momento in cui esce dal bagno fuso: deve attraversare i passaggi che rendono il pezzo o la lastra abbastanza stabile da essere classificato e consegnato secondo una specifica.

Il controllo finale osserva difetti diversi a seconda della destinazione. Sulle lastre contano uniformità di spessore, planarità e qualità ottica lungo una superficie ampia; nei contenitori assumono rilievo geometria, integrità e regolarità fra pezzi prodotti in successione. Gli esiti del controllo tornano a informare la gestione della linea: un difetto può derivare dalla carica, dal bagno, dalla formatura o dalla ricottura, e correggere il solo stampo non aiuterebbe se la sua origine fosse una particella nella miscela. Questa tracciabilità è parte della capacità produttiva effettiva: riconoscere un problema prima che si ripeta evita di destinare altra materia ed energia a oggetti non conformi.

Le fibre continue offrono un terzo contrasto. Il vetro viene tirato attraverso aperture molto piccole per ottenere filamenti; composizione della massa e continuità del flusso diventano decisive. Una particella non disciolta può ostacolare la formazione regolare di un filo assai più facilmente di quanto una piccola variazione invisibile alteri la massa di un contenitore. Le lane di vetro impiegano a loro volta tecniche di formazione di fibre con caratteristiche proprie. Raggruppare tutte queste produzioni sotto un'unica media energetica o un'unica percentuale di rottame cancellerebbe i requisiti differenti delle linee.

Il confine industriale di questo percorso è il vetro formato, ricotto, controllato e classificato secondo la famiglia. Le lastre possono poi essere rivestite, stratificate o assemblate; i contenitori sono riempiti e distribuiti; le fibre entrano in materiali e componenti. Si tratta di passaggi successivi alla formatura primaria, con requisiti tecnici e controlli propri.

Quale rottame può tornare nel forno

La possibilità di rifondere vetro non trasforma automaticamente tutto il vetro scartato in una materia utilizzabile da ogni vetreria. Il primo requisito è riconoscere la composizione: prodotti diversi possono contenere ossidi e additivi differenti, avere colorazioni incompatibili o reagire in modo imprevisto nella ricetta di destinazione. Il secondo è la pulizia. Frammenti di ceramica, pietra o metallo e residui estranei possono sopravvivere al trattamento previsto per il vetro soda-calcico o produrre difetti. Se un'inclusione resta nel prodotto, la sua risposta al raffreddamento può differire da quella del vetro circostante e compromettere qualità o resistenza.

La selezione non serve dunque a rendere «riciclabile» un materiale in astratto. Serve a consegnare a un forno preciso una materia della quale il produttore conosca composizione e impurità residue. Una lastra che richiede caratteristiche ottiche elevate e un contenitore verde possono accettare rottami differenti. Anche il rottame di vetro piano ottenuto dopo rivestimenti e altre lavorazioni pone questioni diverse dallo scarto pulito della linea primaria. Le specifiche del lotto recuperato diventano una forma di garanzia per chi deve mantenere costante la qualità della produzione successiva.

Il colore offre un esempio immediato. Una linea che deve consegnare vetro trasparente ha una tolleranza ristretta per frammenti colorati; alcune produzioni di vetro scuro possono usare una miscela cromatica più ampia. Anche in quest'ultimo caso servono composizione e qualità controllate: «scuro» non significa che qualunque materiale raccolto possa entrare nel forno. La separazione può avvenire in più punti della filiera e richiede che il rottame arrivi al produttore con caratteristiche dichiarate. La disponibilità di tonnellate raccolte, senza questa informazione, lascia irrisolta la domanda industriale fondamentale: quali linee le possono usare?

Il rottame interno alla vetreria nasce da rifili e pezzi scartati durante il processo. Quando rimane identificato per composizione e colore, può essere relativamente semplice reimmetterlo nel circuito appropriato. Quello di provenienza esterna può venire da imballaggi usati o da altri processi di lavorazione: la sua origine va controllata e non coincide sempre con il solo post consumo. Preparazione e selezione possono inoltre produrre frazioni non

idonee alla ricetta cercata. La massa che compare nelle statistiche di raccolta e quella accettata da un forno rispondono a domande diverse.

Nel rapporto di sostenibilità pubblicato da Assovetro nel 2026, il campione di 14 imprese produttrici di vetro cavo e piano registra per il 2024 circa 2,14 milioni di tonnellate di rottame di provenienza esterna e 0,89 milioni di rottame interno, accanto a circa 2,36 milioni di materie prime vergini. I rottami rappresentano il 56,2% degli input di materiale registrati dal campione. L'associazione indica che le imprese considerate rappresentano circa l'80% della produzione italiana, ma il rapporto resta una rilevazione di aziende partecipanti: il 56,2% non è il contenuto riciclato di ogni bottiglia italiana, né una misura censuaria di tutto il vetro fabbricato nel paese.

Eurostat registra un'altra grandezza: nel 2023 il 74,9% dei rifiuti di imballaggio in vetro generati nell'Unione europea risulta riciclato secondo il punto di calcolo della statistica europea. Il denominatore riguarda gli imballaggi divenuti rifiuto; il dato Assovetro riguarda invece gli input di un campione industriale, compresi scarti interni che non sono passati per la raccolta degli imballaggi. Anno, territorio e percorso della materia cambiano. Il primo indicatore descrive una fase a monte della disponibilità di rottame; il secondo quanto rottame quelle imprese hanno effettivamente impiegato nella produzione. Accostarli serve soltanto a vedere che riciclare imballaggi e alimentare un forno sono passaggi distinti.

Un rottame idoneo sostituisce parte delle materie vergini ed è già passato per una fusione. Può perciò ridurre il lavoro necessario a fondere la carica e la CO_2 liberata dai carbonati che non occorre più introdurre. La quantità risparmiata dipende però dalla miscela e dal forno; selezionare, preparare e trasportare il rottame richiede anch'esso lavoro e risorse. Il documento tecnico europeo del 2013 riporta come ordine di grandezza una diminuzione del fabbisogno di fusione di circa il 2,5–3% per dieci punti percentuali in più di rottame nella carica. È un riferimento tecnico, non una relazione da applicare a qualsiasi impianto moltiplicando le tonnellate raccolte.

La circolarità del vetro è dunque una possibilità industriale concreta con condizioni precise. Conservare separati un flusso chiaro, uno colorato e materiali di composizione diversa aumenta le opzioni per i produttori. Mescolarli e correggere soltanto dopo può restringerle. Questa differenza spiega perché un alto risultato nella gestione dei rifiuti sia utile ma non

sostituisca la domanda posta dal responsabile della linea: quale rottame, in quale quantità e con quali specifiche può entrare nella prossima carica?

Il forno lega energia e tempo

Un forno vetrario continuo deve mantenere un bagno fuso e alimentare le linee con una portata regolare. Spegnerlo e riaccenderlo non equivale a fermare per una notte una macchina che lavora a temperatura ambiente: materiali refrattari, contenuto del bagno e sequenza di riscaldamento richiedono gestione tecnica. La disponibilità effettiva della linea dipende dalle condizioni dei componenti, dalle fermate e dalla qualità ottenuta. Anche quando la capacità nominale esprime quante tonnellate potrebbero essere fuse in condizioni definite, la produzione annua di prodotto conforme resta una grandezza osservata distinta.

Il Centro comune di ricerca indica che, per i vetri soda-calcici, il minimo teorico di energia per fondere è circa 2,6 gigajoule per tonnellata; nelle condizioni di esercizio riportate dal suo factsheet l'energia necessaria è indicativamente 5,8 gigajoule per tonnellata nel vetro da contenitori e supera 6,5 nel vetro piano. Fra minimo e pratica ci sono limiti di trasmissione del calore e perdite dell'impianto. Sono riferimenti per la fusione di famiglie differenti, non una graduatoria di efficienza delle imprese italiane né valori da attribuire a qualsiasi forno contemporaneo.

Fornire calore è solo una parte della storia energetica dello stabilimento. Occorrono anche preparazione delle materie, movimentazione, macchine di formatura, controllo e gestione della temperatura dopo che il vetro lascia il forno. Un indicatore riferito a una tonnellata di vetro fuso non misura necessariamente l'energia consumata per consegnare una tonnellata di prodotto vendibile: gli scarti e le lavorazioni successive cambiano il denominatore. È per questo che valori provenienti da campioni e da tecnologie differenti richiedono confini comparabili prima di diventare una classifica.

I forni possono recuperare calore dai gas caldi, utilizzare combustibili differenti o introdurre elettricità nella fusione. Nella combustione con ossigeno anziché aria cambiano i gas e la loro gestione; per valutare il consumo dell'intero sistema bisogna includere anche l'energia necessaria a produrre l'ossigeno. La fusione elettrica trasferisce una parte del fabbisogno verso l'infrastruttura e

l'approvvigionamento elettrico. Dimensione del forno, composizione del vetro e colore possono limitare quali configurazioni siano disponibili. Il cambiamento energetico, quindi, è una scelta tecnica sulla linea e sulle forniture, oltre che sul combustibile.

Accanto alla CO_2, la produzione comporta pressioni locali di natura diversa. La preparazione delle materie può generare polveri; combustione e fusione sono associate a inquinanti atmosferici che dipendono da combustibile, temperatura, composizione e sistemi di abbattimento. Il documento europeo sulle migliori tecniche disponibili distingue questi flussi e le condizioni con cui vanno misurati. Una concentrazione allo scarico non è già una massa emessa nell'anno: per collegare le due occorrono anche portata dei gas e ore di funzionamento. Per le persone che lavorano nell'impianto e per chi vive vicino contano esposizione effettiva, gestione delle materie e condizioni locali, grandezze che non si ottengono dalla sola produzione nazionale in tonnellate.

Una campagna di forno può durare, per grandi linee continue da contenitori o vetro piano, nell'ordine di dieci o vent'anni secondo il documento tecnico europeo e il factsheet del Centro comune di ricerca. È il periodo fra interventi maggiori sul forno, non la vita dell'intera fabbrica né una durata garantita per ogni impianto. Le linee per vetri speciali o alcuni forni elettrici possono avere cicli diversi. Quando si ricostruisce una linea si possono modificare tecnologia e prestazioni; nel frattempo gli investimenti e le infrastrutture installate condizionano le scelte quotidiane. Il tempo industriale spiega perché una tecnologia interessante non sostituisca rapidamente tutto il parco dei forni.

Le emissioni dirette hanno due origini principali. La combustione di gas o altri combustibili libera CO_2 per ottenere calore. La decomposizione dei carbonati presenti nella carica libera altra CO_2 come parte della reazione chimica che fornisce gli ossidi al vetro. Per il 2022 il Centro comune di ricerca stima circa 22 milioni di tonnellate di CO_2 equivalente dirette nel settore vetrario europeo: indica che, in quel quadro, circa il 75–80% proviene dalla combustione e il 20–25% dalle reazioni di processo. La ripartizione è una stima di settore, sensibile a ricette e tecnologie, non una quota fissa da applicare a ogni stabilimento.

In Italia l'inventario pubblicato dall'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale nel 2026 attribuisce alla produzione del vetro 534 mila tonnellate di CO_2 di processo per il 2024. Riguardano la componente chimica della carica. Le emissioni italiane da combustione dei soli forni vetrari non si

possono isolare dalla categoria più ampia dell'inventario che comprende anche altri minerali non metallici. La cifra di processo permette di vedere che la reazione dei carbonati ha una dimensione misurabile; non rappresenta l'intero bilancio climatico dell'industria italiana del vetro.

Queste due origini delle emissioni suggeriscono interventi differenti. Migliorare la trasmissione e il recupero del calore o cambiare la fonte energetica agisce sulla componente necessaria a scaldare il forno; usare rottame qualificato al posto di una parte dei carbonati modifica anche la CO_2 di processo. La compatibilità del prodotto limita quanta sostituzione si possa ottenere. Misurare l'effetto complessivo di un intervento richiede poi di considerare le forniture esterne, come elettricità e ossigeno, e le tonnellate conformi effettivamente consegnate. La fisica della reazione e il funzionamento della macchina concorrono allo stesso risultato, ma si modificano attraverso leve diverse.

Una geografia fatta di prodotti e impianti

La disponibilità di silice adatta è una condizione per produrre vetro, ma non disegna da sola la carta delle vetrerie. Servono soda, altri ingredienti, energia, accesso al rottame qualificato e impianti capaci di rispettare la specifica richiesta. La continuità del forno rende importante un approvvigionamento regolare; la formatura lega la massa fusa a una linea che realizza un certo tipo di prodotto. Di conseguenza una capacità importante in un comparto non sostituisce automaticamente una capacità mancante in un altro.

I dati italiani pubblicati da Assovetro per il 2025 rendono concreta questa distinzione. L'associazione indica 4,545 milioni di tonnellate prodotte nella categoria del vetro cavo a processo automatico, che comprende bottiglie e vasi ma anche flaconi e articoli domestici; per il vetro piano indica 0,951 milioni di tonnellate. Si tratta di aggregati settoriali con definizioni proprie: il «vetro cavo» italiano è più ampio del «vetro da contenitori» nella ripartizione europea citata all'inizio. I due insiemi mostrano il diverso peso delle filiere italiane senza formare, per semplice somma, un censimento di tutto il vetro prodotto nel paese.

Anche la direzione degli scambi cambia secondo il prodotto. Nelle stesse statistiche associative, nel 2025 il vetro cavo conta circa 1,126 milioni di

tonnellate importate e 0,537 esportate; il vetro piano circa 0,125 milioni importate e 0,293 esportate. Nel primo aggregato entrano dall'estero più tonnellate di quante ne escano, nel secondo accade il contrario. Questi dati descrivono gruppi di prodotti e flussi commerciali secondo la fonte settoriale, senza dettaglio doganale verificato per singolo codice né aggiustamento noto per scorte e trasformazioni. Offrono una traccia della specializzazione degli scambi, non una percentuale di autosufficienza materiale.

Una lastra prodotta da una linea italiana può inoltre incorporare ingredienti acquistati altrove; un contenitore importato può essere fabbricato con rottame raccolto in un altro paese. Il luogo in cui la materia viene fusa, quello in cui una forma primaria viene venduta e l'origine delle materie prime rispondono a domande diverse. Per descrivere l'intera dipendenza italiana servirebbero bilanci omogenei delle materie, dei rottami, delle produzioni per famiglia e degli scambi di prodotti comparabili. Le masse disponibili mostrano già un fatto più circoscritto e solido: l'industria produce vetri differenti in proporzioni differenti e partecipa a mercati che non si muovono tutti nello stesso verso.

La disponibilità di vetro dipende quindi da una sequenza industriale. La ricetta rende possibili determinate caratteristiche; il bagno fuso deve raggiungerle in modo regolare; formatura e raffreddamento trasformano quella materia in lastre, contenitori o fibre accettabili. Il rottame amplia le opzioni quando arriva con qualità riconoscibile. Il forno impone energia, tempo e capacità specializzata. Solo quando queste condizioni si incontrano in un luogo e in un momento determinati la massa disponibile diventa vetro commerciabile.

Fonti e riferimenti

Centro comune di ricerca della Commissione europea — Mapping the transition of the EU glass manufacturing industry to carbon neutrality, 2026

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC144091/Glass_factsheet_JRC144091_1.pdf

Centro comune di ricerca della Commissione europea — Best Available Techniques Reference Document for the Manufacture of Glass, 2013

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC78091/lfna25786enn.pdf

Assovetro — Quarto rapporto di sostenibilità, dati 2023–2024

https://assovetro.it/wp-content/uploads/2026/03/RDS-2026-high_compressed.pdf

Eurostat — Rifiuti di imballaggio per operazione di trattamento, dataset env_waspac

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_waspac/default

Eurostat — Tassi di riciclo degli imballaggi, dataset env_waspacr

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_waspacr/default

ISPRA — National Inventory Document 2026, inventario italiano 1990–2024

https://www.isprambiente.gov.it/files2026/pubblicazioni/rapporti/rpporto-428_26_nid2026_italy_stampa.pdf

Assovetro — Dati di settore, produzione e scambi italiani 2025

https://www.assovetro.it/dati-di-settore/

Agenzia europea dell'ambiente — EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023, Glass production

https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/2-industrial-processes-and-product-use/2-a-mineral-products/2-a-3-glass-production-2023

04.09 – Sale

Nel 2024 la produzione mondiale di sale era stimata dallo US Geological Survey in circa 275 milioni di tonnellate. La cifra riunisce un materiale familiare a tutti, ma ottenuto in modi che hanno poco in comune fra loro: si può scavare una roccia sotterranea, pompare una soluzione salina oppure far evaporare acqua in bacini estesi. In ciascun caso il cloruro di sodio, NaCl, deve arrivare nella forma e con la qualità richieste da chi lo compra. Il suo impiego negli alimenti è soltanto una delle destinazioni di una materia che alimenta anche processi chimici, trattamento dell'acqua e manutenzione delle strade.

La semplicità della formula nasconde quindi una domanda industriale: quale quantità di sale si può consegnare regolarmente, con quali caratteristiche e a quale distanza dall'utilizzatore? Una tonnellata di salgemma appena estratto, una tonnellata di salamoia e una tonnellata di cristalli purificati non rappresentano lo stesso prodotto. Per rispondere occorre seguire le tre vie produttive fino al momento in cui la materia entra in un lotto commerciabile.

Il salgemma si estrae come roccia

Il salgemma è cloruro di sodio cristallizzato in un deposito geologico. Quando si trova a profondità e in condizioni adatte all'estrazione sotterranea, il produttore apre accessi, realizza gallerie e libera la roccia con macchine di taglio o altri sistemi di abbattimento. In alcune miniere la coltivazione lascia pilastri di materiale a sostenere le camere scavate. La geometria dei vuoti non è una scelta decorativa: stabilità del tetto, spessore del deposito e presenza di altri strati determinano dove le macchine possono lavorare e quanta roccia resta nel sottosuolo.

Il materiale estratto risale, viene frantumato e passa attraverso vagli che separano le pezzature. Da uno stesso deposito possono uscire grani grossi, frazioni fini e materiale da lavorare ulteriormente. Inclusioni insolubili o minerali associati possono richiedere selezione e lavaggio. Una grande massa abbattuta in miniera non diventa automaticamente sale vendibile della qualità richiesta: bisogna considerare la porzione lasciata a sostegno, il materiale separato e le operazioni necessarie a rendere ripetibile il prodotto.

La scelta fra consegnare il materiale dopo la sola classificazione e inviarlo a una raffinazione più spinta dipende dalle condizioni del deposito e dal mercato raggiungibile. Per ottenere cristalli di qualità più controllata, alla selezione si aggiungono altre lavorazioni; entrambi i percorsi cominciano dall'estrazione. Per leggere la capacità di una miniera occorre così capire se il numero indica roccia abbattuta, sale separato oppure tonnellate consegnate in una determinata classe: le perdite e le frazioni destinate ad altri usi si collocano fra queste misure.

La granulometria ha conseguenze operative concrete. Cristalli di dimensioni diverse si distribuiscono, scorrono e si conservano in modo diverso; la scelta di frantumare più finemente non è utile a ogni cliente. Per alcune applicazioni si può vendere una pezzatura relativamente grossa, mentre altre richiedono una distribuzione stretta, limiti sulle impurità e umidità controllata. Il passaggio dal deposito al lotto commerciale dipende dalla specifica, non soltanto dalla disponibilità della macchina estrattiva.

In Italia le miniere siciliane di Racalmuto, Realmonte e Petralia, indicate dall'operatore Italkali fra i propri siti, rendono concreta questa via produttiva. La loro esistenza documenta una filiera nazionale del salgemma; da quella lista di impianti non si ricavano i volumi annuali estratti né la quota che soddisfa una determinata classe commerciale. Per una misura nazionale occorrono rilevazioni con prodotto, fase e periodo definiti, che esamineremo dopo aver attraversato anche le altre vie.

Una miniera sotterranea concentra lavoro e macchine in ambienti che richiedono ventilazione, manutenzione, controllo della stabilità e vie di accesso affidabili. Questi vincoli restano anche se il sale non è un minerale raro. Un sito può disporre di molta roccia salina ma dover limitare le aree coltivabili, fermare una macchina per manutenzione o scartare una frazione inadatta. L'abbondanza geologica e la continuità delle consegne appartengono a due bilanci diversi.

La salamoia può restare liquida

Il sale arriva in superficie anche disciolto nell'acqua. Una salamoia naturale è una soluzione presente in un deposito o in una formazione acquifera salina e prelevata tramite pozzi. La sua concentrazione e le altre sostanze disciolte

variano con il luogo. Un'altra tecnica, chiamata estrazione per dissoluzione, introduce acqua in una formazione di salgemma: l'acqua scioglie una parte del deposito e la salamoia ottenuta viene pompata in superficie. In questo secondo caso l'estrazione crea una cavità che deve essere progettata e sorvegliata. Le due salamoie si assomigliano come liquidi, ma la loro origine comporta lavori sotterranei e bilanci idrici diversi.

Al pozzo si apre un bivio. La salamoia può essere inviata come soluzione a un utilizzatore che ne conosce concentrazione e impurità, oppure diventare il materiale di partenza per produrre cristalli solidi. Nel primo percorso contano portata, composizione e continuità dell'approvvigionamento; nel secondo si devono aggiungere purificazione, evaporazione, cristallizzazione e separazione del liquido residuo. Cambia il prodotto commercializzato e cambia il luogo in cui occorre spendere energia per eliminare l'acqua.

Il peso della soluzione non è il peso del suo contenuto in NaCl. Per calcolare quanta materia utile viaggia in una condotta o in una cisterna servono la concentrazione del sale e, se si parte da un volume, anche la densità del liquido. L'umidità di un cristallo raccolto pone un problema analogo su scala diversa. Queste distinzioni contano quando si confrontano capacità, prezzi o statistiche: l'acquirente di una salamoia riceve acqua insieme al sale, mentre l'acquirente di un prodotto secco compra una forma concentrata e più semplice da conservare o trasportare in sacchi.

Quando si vuole ottenere sale cristallino da una salamoia, la soluzione può essere trattata per rimuovere impurità che interferirebbero con la cristallizzazione o con l'uso successivo. Negli evaporatori il calore rimuove acqua; operare sotto vuoto abbassa la temperatura di ebollizione. Una successione di effetti può riutilizzare parte del vapore prodotto, mentre altri impianti impiegano la ricompressione del vapore per recuperare calore. Alla formazione dei cristalli seguono separazione, lavaggio e asciugatura secondo il grado richiesto. È una fabbricazione continua e controllabile con maggiore indipendenza dal meteo rispetto a una salina all'aperto, ma richiede attrezzature, energia e manutenzione.

La purificazione della soluzione precede spesso la cristallizzazione perché i composti di calcio e magnesio possono formare incrostazioni sulle superfici di scambio o compromettere la qualità del prodotto. Il trattamento genera a sua volta precipitati e liquidi da gestire. Se l'impianto vende direttamente una

salamoia, parte di questi interventi può essere affidata all'utilizzatore e comparire altrove nel bilancio energetico e dei residui. Confrontare due stabilimenti senza stabilire dove finisca la responsabilità del produttore farebbe apparire più semplice il processo che si è limitato a spostare una lavorazione a valle.

Una statistica statunitense mostra quanto sia importante precisare la forma. Per il 2025 lo US Geological Survey stima che il 44% del sale venduto o usato dai produttori degli Stati Uniti sia classificato come sale in salamoia, il 38% come salgemma, il 9% come sale solare, ottenuto per evaporazione all'aperto, e il 9% come sale evaporato in impianti. Sono quote di prodotti o vie registrati in quel paese, non una ripartizione mondiale né quote dei diversi impieghi finali. La salamoia che entra successivamente in un evaporatore richiede inoltre attenzione ai confini statistici: per costruire un totale di materiale non si devono contare sia la soluzione in ingresso sia i cristalli ottenuti da quella stessa soluzione.

Il pozzo rende possibile un prelievo senza scavare la roccia come solido, ma non annulla il rapporto con il sottosuolo. Nel caso della dissoluzione bisogna seguire forma e stabilità della cavità e decidere da dove provenga l'acqua introdotta. Nel caso di una salamoia naturale contano invece la risposta della formazione al pompaggio e le caratteristiche della soluzione. Dai soli volumi di sale consegnato non si ricava un consumo locale di acqua dolce né un rischio di subsidenza valido per ogni sito.

La salina usa superficie e stagioni

La terza via sfrutta la concentrazione di acqua marina o di altre acque saline in una rete di bacini poco profondi. L'acqua passa attraverso comparti successivi; sole e vento ne rimuovono una parte, mentre il gestore regola ingressi, livelli e trasferimenti della salamoia. Quando la concentrazione raggiunge le condizioni adatte, il cloruro di sodio cristallizza nelle vasche predisposte. Il sale viene raccolto, drenato e, secondo la destinazione, lavato, asciugato o calibrato. La superficie non è un semplice terreno occupato dall'impianto: svolge una parte della separazione che altrove richiederebbe macchine termiche.

La successione delle vasche consente anche di separare, almeno in parte, sostanze che precipitano in momenti diversi. Dirigere male la salamoia o

raccogliere al momento sbagliato può modificare il contenuto di altri sali e la qualità dei cristalli. La pioggia può diluire la soluzione, il vento e la temperatura cambiano l'evaporazione, la disponibilità d'acqua da convogliare influenza il ciclo. Il produttore deve quindi amministrare uno stock di salamoia distribuito nel territorio, non soltanto attendere che il mare lasci sale sul fondo.

Questa sequenza lega tempi di produzione e tempi di vendita. Le vasche devono raggiungere concentrazioni adeguate prima della raccolta, mentre gli ordini dei clienti possono arrivare lungo tutto l'anno. Il sale raccolto può essere accumulato, controllato e prelevato dai depositi in periodi diversi da quelli di cristallizzazione. La capacità annua di una salina, quindi, riguarda l'insieme di vasche, raccolta e gestione dei lotti: non equivale alla produzione uniforme di una macchina che rilascia ogni giorno la stessa quantità.

La Salina di Cervia descrive, per il proprio processo, l'ingresso di acqua marina, la progressiva concentrazione, la cristallizzazione e il lavaggio dei cristalli con soluzione salina. Dichiara anche che il suo sale asciuga naturalmente e non viene essiccato in forno. È un esempio di come le operazioni dopo la raccolta possano differire da quelle di un sale ottenuto in evaporatori; il metodo di Cervia non definisce tutti i prodotti chiamati «sale marino».

La salina di Margherita di Savoia in Puglia offre un secondo riferimento concreto. Il suo operatore, Atisale, dichiara una capacità produttiva annua di circa 500.000 tonnellate: la cifra descrive ciò che la struttura può produrre nelle condizioni considerate dall'impresa, non un consuntivo delle tonnellate effettivamente raccolte nell'ultimo anno. La differenza fra capacità e produzione conta soprattutto in un processo esposto alle condizioni meteorologiche e alla gestione idraulica dei bacini.

Una parte del territorio della salina ricade in un'area protetta riconosciuta come zona umida di importanza internazionale. I bacini produttivi e gli habitat dipendono entrambi dai livelli e dalla salinità dell'acqua. Il vincolo industriale non permette di concludere che ogni scelta produttiva sia favorevole alla biodiversità; la designazione della riserva, a sua volta, non misura un danno netto provocato dall'estrazione. Servono osservazioni sulle condizioni del sito e sulle modalità di gestione per descrivere gli effetti ambientali. La superficie protetta, quella dichiarata dall'operatore e l'area effettivamente impegnata nella cristallizzazione hanno perimetri differenti.

Anche dopo la raccolta la salina continua a produrre decisioni industriali. Un lotto umido può richiedere drenaggio o asciugatura; un cliente può volere una grana più stretta o limiti particolari su impurità e insolubili. Le acque madri rimaste dopo la cristallizzazione possono essere rimesse in circolo, ulteriormente concentrate o gestite con altre soluzioni secondo il sito. Chiamarle sempre rifiuto, o sempre coprodotto vendibile, cancellerebbe proprio la differenza fra flussi che la conduzione delle vasche deve controllare.

La specifica decide quale sale si può vendere

L'origine spiega come il sale è stato ottenuto; la specifica stabilisce dove lo si può impiegare. Lavaggio e purificazione riducono determinate impurità, l'essiccazione modifica l'umidità, frantumazione e vagliatura fissano la distribuzione dei granuli. Il produttore può aggiungere un agente che limiti l'agglomerazione o, per un prodotto alimentare, sostanze ammesse dalla disciplina pertinente. Non ogni lotto attraversa tutte queste operazioni. Il prodotto richiesto da un acquirente si definisce attraverso composizione, dimensione dei cristalli, acqua residua, insolubili e modalità di consegna.

Il Codex Alimentarius fornisce un esempio di soglia verificabile. Il suo standard per il sale alimentare richiede almeno il 97% di NaCl sulla sostanza secca, esclusi gli additivi. La specifica comprende anche condizioni relative a contaminanti e sostanze aggiunte. Il 97% non è la purezza misurata di tutto il sale da cucina, né un requisito da trasferire automaticamente alle forniture industriali: indica la soglia minima di uno standard che ha un perimetro preciso. Un prodotto può superarla e richiedere comunque altri controlli per essere adatto a uno specifico impiego.

Il medesimo standard fissa, per esempio, un limite di 2 milligrammi di rame per chilogrammo di sale alimentare. Qui cambiano insieme unità e domanda: una percentuale di NaCl misura la composizione dominante, un limite espresso in milligrammi per chilogrammo controlla una sostanza presente in tracce. Un lotto può essere ricco di cloruro di sodio e richiedere ancora verifiche su contaminanti, umidità e additivi. La provenienza marina o mineraria, presa isolatamente, non risolve nessuna di queste misure.

Alcuni processi chimici hanno bisogno di una salamoia dalla composizione accuratamente controllata, perché determinati ioni e particelle interferiscono

con le apparecchiature. Questa è una domanda di qualità della materia prima; la trasformazione del cloruro di sodio in cloro o soda caustica appartiene a un'altra filiera. Un impianto di trattamento dell'acqua può comprare sale in pastiglie o granuli regolari; una fornitura per il disgelo stradale deve poter essere conservata e distribuita con le macchine previste. Due lotti diventano sostituibili per un acquirente quando soddisfano la stessa specifica d'uso.

«Marino», «di miniera» ed «evaporato» descrivono origine o metodo, mentre «fino», «grosso» o «in pastiglie» indicano soprattutto la forma fisica. Nessuna di queste parole costituisce da sola una graduatoria universale di purezza. La roccia può essere purificata; il sale marino può essere lavato e classificato; una salamoia può essere trattata prima della vendita come liquido o prima della cristallizzazione. La scelta utile per il compratore è confrontare le specifiche misurate del lotto con le esigenze della propria linea.

Anche la classificazione economica riflette in parte queste trasformazioni. Le note dell'Istat per le attività ATECO 2025 includono nell'estrazione del sale la salicoltura marina, la produzione da salamoie e la purificazione effettuata dal produttore; collocano invece l'additivazione del sale alimentare, per esempio la iodazione, nella fabbricazione alimentare. Si tratta di una classificazione delle attività, non di un contatore di tonnellate: la collocazione di un'impresa può aiutare a capire quali passaggi svolge, ma non ricostruisce da sola l'offerta fisica nazionale.

Quando una partita non supera un controllo, l'esito non è sempre la perdita dell'intera massa. Una frazione può essere destinata a un grado diverso, rilavorata se il processo lo consente o separata come residuo. L'opzione dipende dalla natura dell'impurità e dall'esistenza di un compratore per il grado alternativo. In questo punto si vede il legame fra qualità ed economia: una quantità disponibile diventa fornitura solo se qualcuno può usarla con una specifica definita e riceverla con continuità.

Quantità e valore cambiano con la forma

La domanda aiuta a leggere i mercati del sale. Nelle stime dello US Geological Survey per gli Stati Uniti nel 2025, l'industria chimica assorbe il 42% delle vendite totali dei produttori. Il dato non riguarda la quota di sale presente negli alimenti e non può essere proiettato sull'Italia o sul mondo. Il disgelo delle

strade è un'altra grande destinazione, la cui domanda varia anche con gli inverni; per l'acquirente contano pezzatura, disponibilità stagionale e costo della consegna. Una fabbrica che usa sale per processi continui e un gestore che prepara scorte per le gelate acquistano lo stesso composto in condizioni commerciali diverse.

La fonte stima separatamente che il disgelo stradale rappresenti il 37% del sale consumato negli Stati Uniti nello stesso anno. Le due percentuali non formano una ripartizione da sommare: per l'industria chimica il denominatore sono le vendite dei produttori, per il disgelo è il consumo stimato. Il confronto serve a individuare due domande importanti, una legata alla continuità di processo e una particolarmente sensibile alle condizioni meteorologiche, senza ricostruire quote globali per settore che il dato non offre.

Le statistiche statunitensi distinguono inoltre quanta materia viene prodotta e quanta viene venduta o usata dai produttori. Nel 2024 riportano rispettivamente 40,4 e 39,4 milioni di tonnellate. La differenza fra le due colonne è già sufficiente a mostrare perché produzione e flussi sul mercato non siano parole intercambiabili; non basta da sola a misurare una variazione delle scorte, perché per farlo occorrerebbe verificare tutte le definizioni e i passaggi del bilancio.

Per il 2025, ancora come stima, lo US Geological Survey registra 39 milioni di tonnellate vendute o usate dai produttori statunitensi, 19 milioni importate e 1,5 milioni esportate. Da queste grandezze costruisce un consumo apparente arrotondato a 57 milioni di tonnellate: 39 più 19 meno 1,5. È una contabilità nazionale di flussi definiti dalla fonte, non il peso del sale effettivamente utilizzato da ogni settore nell'anno. La differenza fra produzione interna e disponibilità apparente mostra anche perché non si possa dedurre il fabbisogno di un paese dalla sola dimensione delle sue miniere.

Anche i valori medi alla produzione cambiano molto. Per il 2025 lo US Geological Survey stima negli Stati Uniti circa 54 dollari per tonnellata di salgemma e 260 per il sale evaporato in impianti: valori medi alla miniera o allo stabilimento, non prezzi pagati da un cliente italiano. I due aggregati comprendono prodotti, qualità e rapporti contrattuali differenti. La distanza fra le cifre mostra che «tonnellata di sale» non designa un mercato unico; non indica da sola quanto costi scavare rispetto a far evaporare la salamoia, né il margine di ciascun produttore.

Per prodotti così pesanti rispetto al loro valore unitario, trasporto, deposito e forma della consegna possono modificare molto il costo per l'utilizzatore. Il cristallo secco viaggia con modalità diverse da una soluzione destinata a un impianto collegato da condotta. Un compratore di sale per disgelo può aver bisogno di accumularlo prima dell'inverno; uno stabilimento che riceve materia per un processo continuo privilegia regolarità e composizione. Il prezzo consegnato in un'altra regione dipende anche da distanze, contratti e quantità, che il valore alla miniera non comprende.

Le cifre italiane mostrano quanto sia delicato stabilire persino che cosa si è prodotto. Per il 2024 lo US Geological Survey riporta 3,0 milioni di tonnellate di sale per l'Italia, in una voce nazionale non separata per metodo. Il British Geological Survey indica circa 2,45 milioni nella categoria «salgemma e sale in salamoia» ed esclude il sale raffinato dalla propria tavola; il grafico minerario Istat relativo al 2022 mostra il salgemma, ma non fornisce un totale nazionale isolato che includa anche le saline marine. Le cifre descrivono coperture differenti e non sono state riconciliate: il loro scarto non misura una perdita di produzione attribuibile a un impianto.

La divergenza riguarda anche i totali mondiali. Per il 2024 il BGS riporta circa 253,4 milioni di tonnellate, mentre lo USGS ne stima 275. Il BGS avverte che la sua tavola esclude il sale raffinato e che mancano statistiche per alcuni paesi produttori. Non si tratta quindi di due osservazioni identiche tra cui scegliere il valore più preciso. La cifra usata in apertura è una stima compilata dallo USGS: conoscere il suo ordine di grandezza è utile, ma qualsiasi confronto temporale dovrebbe restare all'interno di una serie con criteri coerenti.

Il confronto non autorizza una media fra fonti né una percentuale di autosufficienza nazionale. Per quest'ultima servirebbero produzione interna e scambi coerenti per contenuto e forma del sale, oltre a informazioni sulle scorte. Una voce doganale ampia può includere anche cloruro di sodio in soluzione e acqua marina: il suo peso non corrisponde necessariamente a NaCl secco. In assenza di una serie verificata per le diverse merci, è più utile sapere quali forme il paese è capace di produrre che simulare un bilancio italiano apparentemente preciso.

La geografia mondiale conferma la scala del fenomeno senza risolvere le differenze di definizione. Nelle stime USGS per il 2025 la Cina produce circa 56 milioni di tonnellate, gli Stati Uniti 40 e l'India 30. Sono tonnellate attribuite a

paesi produttori, non misure della quantità che ognuno può esportare o consegnare a ogni tipo di cliente. Il sale marino, il salgemma e la salamoia distribuiscono impianti e sbocchi secondo geologia, clima, disponibilità di acqua, energia e collegamenti di trasporto.

Acqua ed energia seguono il processo

Confrontare le tre vie richiede di separare che cosa si evapora da dove si ottiene l'energia. Nella salina una grande quantità di acqua salina lascia le vasche grazie a sole e vento; pompe, raccolta, movimentazione e eventuali trattamenti richiedono comunque energia. Nella produzione di sale evaporato da salamoia quasi satura l'acqua da allontanare è meno abbondante, ma il calore viene fornito da un impianto. Nella miniera che vende salgemma frantumato la trasformazione non richiede cristallizzare di nuovo il sale: macchine, ventilazione e trasporto restano però parte del consumo energetico. Si tratta di confini industriali diversi, non di tre valori di efficienza da mettere in fila senza contesto.

Un confronto tecnico pubblicato nel 2009 da V. M. Sedivy dà una misura fisica a questa differenza, entro le ipotesi dello studio. Per la concentrazione di acqua marina scelta nell'esempio calcola circa 44 chilogrammi di acqua evaporata per ottenere un chilogrammo di NaCl; partendo da una salamoia mineraria quasi satura, circa 3. Per un evaporatore a sei effetti stima circa 450 chilowattora di energia primaria per tonnellata di sale, assumendo una caldaia con rendimento del 75%; per la ricompressione meccanica del vapore indica circa 160 chilowattora elettrici per tonnellata. Nel suo bilancio quest'ultimo valore equivale a circa 450 chilowattora primari perché l'autore divide l'energia elettrica per un rendimento di generazione assunto del 35%. Sono calcoli di processo su condizioni definite, redatti da un autore legato al settore, non consumi misurati nei moderni impianti italiani né fattori da applicare a ogni salina.

I due modi di esprimere l'energia nel confronto non vanno accostati come se il numero più piccolo identificasse da solo il processo migliore: energia elettrica ed energia primaria hanno confini differenti. Allo stesso modo, i chilogrammi di acqua salina evaporata non misurano metri cubi di acqua dolce prelevata, restituita o consumata in un bacino. L'estrazione per dissoluzione può invece richiedere acqua immessa sottoterra, in quantità che dipendono da

concentrazione della salamoia, disponibilità locale e ricircolo. Per descrivere l'effetto idrico occorre sapere origine dell'acqua, condizioni del sito e destino del liquido residuo.

Ogni processo lascia inoltre una forma diversa di territorio da gestire. La miniera ha vuoti e macchine sotterranee, la dissoluzione produce cavità e pozzi, la salina coordina vasche e salinità all'aperto. Fanghi da purificazione, frazioni insolubili e acque madri possono richiedere riutilizzo, recupero o smaltimento secondo composizione e luogo. La massa prodotta non permette di calcolare una quantità uniforme di residui per tutte le filiere. Anche le condizioni di lavoro cambiano: ventilazione e stabilità del tetto in miniera, conduzione dei pozzi e degli evaporatori, lavoro stagionale e movimentazione nelle saline richiedono controlli diversi.

Una tecnologia può essere adatta a un sito e inadatta a un altro pur producendo la stessa sostanza chimica. Una salina dipende da spazio e condizioni climatiche, un evaporatore da energia e salamoia disponibile, una miniera dalla geometria del deposito e dagli accessi. Le condizioni ambientali locali e la specifica del compratore aggiungono vincoli che una media mondiale non registra. La scelta di processo nasce dall'incontro fra risorsa, impianto e mercato, e richiede dati del sito per misurarne benefici e costi.

La consegna utile

Il sale sembra una materia uniforme quando lo si descrive con la sua formula. Sulla strada che porta al compratore, però, la forma cambia ciò che è disponibile: la roccia va estratta e classificata, la salamoia può essere venduta come liquido o cristallizzata, l'acqua marina richiede una salina capace di accompagnarla fino alla raccolta. Dopo queste operazioni restano da rispettare purezza, umidità, grana, quantità e tempi di consegna.

Per questo la presenza del cloruro di sodio in un luogo non equivale alla fornitura di qualunque tipo di sale. La risorsa diventa commercio quando un processo può trasformarla nella forma richiesta e portarla con continuità a chi la usa. La scala mondiale dice quanta materia viene prodotta; le tre filiere spiegano quale parte di quella materia può diventare, nel posto e nel momento necessari, una consegna utile.

Fonti e riferimenti

US Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026, Salt

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-salt.pdf

British Geological Survey — World Mineral Production 2020–2024, tavola Salt

https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/541620/1/WMP_2020%20to%202024.pdf

Istat — Annuario statistico italiano 2025, capitolo 2, Ambiente e territorio

https://www.istat.it/storage/ASI/2025/capitoli/C02.pdf

Istat — Note esplicative ATECO 2025

https://www.istat.it/wp-content/uploads/2025/03/Note-esplicative-ATECO-2025-italiano.pdf

FAO e OMS — Codex Alimentarius CXS 150-1985, Standard for Food Grade Salt

https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fa48b5df-8de7-442b-a0ce-5a4f730d02c2/content

V M Sedivy — Environmental balance of salt production speaks in favour of solar saltworks, Global NEST Journal, 2009

https://cosmos.gnest.org/sites/default/files/Journal%20Papers/41-48_567_Sedivy.pdf

Atisale — Le saline, capacità dichiarata di Margherita di Savoia

https://atisale.eu/le_saline.php

Italkali — Dove produciamo, sedi delle miniere di salgemma

https://www.italkali.com/dove-produciamo/

Società Parco della Salina di Cervia — Il Sale di Cervia

https://www.salinadicervia.it/sale-di-cervia

Carabinieri — Riserva naturale Salina Margherita di Savoia

https://www.carabinieri.it/chi-siamo/oggi/organizzazione/tutela-forestale-ambientale-e-agroalimentare/comando-tutela-biodiversita'-e-parchi/utcb-e-le-130-riserve-naturali/utcb-di-foresta-umbra/salina-margherita-di-savoia

04.10 – Fosfati, potassa e fertilizzanti

Nel 2023 in Italia sono stati distribuiti per uso agricolo oltre 4,5 milioni di tonnellate di fertilizzanti, ammendanti e correttivi. Nella stessa rilevazione, il contenuto dei tre nutrienti principali era molto più piccolo: 627 mila tonnellate di azoto, 311 mila tonnellate espresse come anidride fosforica e 134 mila come ossido di potassio. Le cifre appartengono allo stesso mercato, ma misurano oggetti diversi. La prima è la massa complessiva dei prodotti commercializzati; le altre descrivono quanto nutriente dichiarato è contenuto nelle formulazioni.

Questa distinzione accompagna tutta la filiera. Una tonnellata di roccia fosfatica non è una tonnellata di fosforo, così come una tonnellata di minerale potassico non è una tonnellata di cloruro di potassio pronto alla vendita. Fra la risorsa e il fertilizzante intervengono separazioni fisiche, reazioni chimiche, aggiunte di altri reagenti, eliminazione di impurità e controlli sulla composizione. Ogni passaggio cambia la massa e il denominatore con cui viene descritta.

Anche le sigle commerciali richiedono attenzione. Il fosforo viene spesso espresso come P_2O_5 e il potassio come K_2O, secondo convenzioni consolidate nell'industria e nelle statistiche. Ciò non significa che il sacco contenga necessariamente quei due ossidi come sostanze pure. Le formule permettono di confrontare il contenuto nutritivo di prodotti differenti. L'azoto, invece, è normalmente espresso come elemento N. Prima di sommare o confrontare due valori occorre quindi conoscere la convenzione, la fase della filiera e il prodotto cui si riferiscono.

Tre nutrienti con funzioni diverse

Azoto, fosforo e potassio sono distinti perché svolgono funzioni differenti nella pianta. L'azoto partecipa alla formazione di proteine e sostiene la crescita vegetativa. Il fosforo interviene nei trasferimenti energetici cellulari, nello sviluppo radicale e nei processi riproduttivi. Il potassio contribuisce alla regolazione idrica e ionica e alla risposta agli stress. Uno non sostituisce semplicemente la mancanza dell'altro.

Questa diversità biologica diventa una struttura industriale. Le imprese producono fertilizzanti semplici, nei quali prevale un nutriente, oppure

formulazioni che combinano azoto, fosforo e potassio in titoli dichiarati. Lo zolfo può comparire nel prodotto, ma ha anche una funzione a monte: attraverso l'acido solforico permette di trasformare la roccia fosfatica. Comprendere l'uso essenziale dei nutrienti spiega quindi perché l'industria debba collegare materie prime e processi che hanno origini molto diverse.

Due risorse minerali seguono strade differenti

Il fosforo commerciale proviene soprattutto da rocce contenenti minerali del gruppo dell'apatite. Un deposito diventa utile quando la concentrazione, la mineralogia, le impurità e la geometria permettono di estrarre e preparare un materiale adatto alle lavorazioni successive. Dopo lo scavo, la roccia può essere frantumata, macinata, lavata, classificata e sottoposta a flottazione o ad altre separazioni. Il risultato è una roccia fosfatica arricchita e commerciabile, ancora lontana dal fertilizzante finito.

Le statistiche dello US Geological Survey utilizzate per questa filiera si riferiscono alla marketable phosphate rock, la roccia beneficiata con caratteristiche adatte alla produzione di acido fosforico o di altri derivati. Il dato esclude quindi una parte della roccia movimentata e della ganga, la frazione minerale sterile separata dal materiale utile. Anche tra i concentrati commerciabili restano differenze di tenore e impurità che influenzano il processo, i residui e la qualità dell'acido.

La qualità non si riduce alla percentuale di fosforo. Carbonati, silice, argille, ferro, alluminio e altri elementi modificano il comportamento durante la preparazione e l'attacco acido. Un minerale più ricco può richiedere comunque una separazione accurata; un deposito con caratteristiche costanti può essere industrialmente più semplice da alimentare di uno molto variabile. Campionamento, miscelazione dei lotti e controllo del concentrato collegano perciò la miniera all'impianto chimico. Il compratore acquista una materia con proprietà definite, non una generica quantità di fosfato.

La potassa parte da un'altra famiglia di depositi. Il termine comprende sali potassici presenti soprattutto in successioni evaporitiche, dove possono trovarsi minerali come silvite e carnallite. La produzione può usare miniere sotterranee convenzionali, dissoluzione in posto con recupero della salamoia oppure evaporazione in bacini adatti. Frantumazione, flottazione, dissoluzione,

cristallizzazione ed essiccazione separano il potassio dagli altri sali e portano il materiale alla purezza e alla granulometria richieste.

Nella miniera convenzionale si estrae una roccia salina che deve essere ridotta di dimensione e separata nelle sue componenti. L'estrazione in soluzione introduce invece acqua nel deposito, scioglie una parte dei sali e riporta in superficie una salamoia: il solido utile viene ottenuto più tardi, mediante evaporazione e cristallizzazione controllata. Nei bacini salini naturali la concentrazione può sfruttare anche l'evaporazione all'aperto. I tre percorsi spostano il lavoro fra sottosuolo, gestione dei liquidi e impianto, e producono bilanci diversi di acqua, energia e residui.

La parentela con la filiera del sale riguarda alcuni metodi e l'origine evaporitica, ma il prodotto è differente. Il cloruro di sodio trattato nel capitolo precedente e il cloruro di potassio hanno composizione, destinazioni e specifiche proprie. Una salamoia ricca di potassio richiede inoltre una successione di separazioni capace di gestire la solubilità dei diversi sali. La semplice presenza di un bacino salino non determina quindi quale prodotto potrà essere ottenuto né in quale quantità.

Anche il mercato distingue le forme. Il cloruro di potassio è la principale fonte potassica per molti fertilizzanti; il solfato di potassio serve quando la formulazione o l'impiego richiedono una fonte con solfato e una diversa presenza di cloro. Questa destinazione influenza la purezza richiesta e i passaggi necessari. Il capitolo si ferma alla forma commerciabile, ma l'uso finale spiega perché separare un sale dall'altro abbia valore industriale.

Dal fosfato all'acido

La trasformazione del fosforo è la parte più articolata della filiera. Il concentrato fosfatico contiene il nutriente in una matrice minerale stabile. Per renderlo disponibile nella produzione di molti fertilizzanti, l'industria ricorre soprattutto al processo umido: la roccia preparata reagisce con acido solforico, generando una soluzione contenente acido fosforico e una fase solida composta principalmente da solfato di calcio.

La separazione avviene mediante filtrazione e lavaggio. L'acido può essere successivamente concentrato secondo il prodotto richiesto, mentre la fase solida forma il fosfogesso. La quantità e le proprietà di questo materiale

dipendono dalla composizione della roccia, dalle condizioni della reazione e dalla forma cristallina ottenuta. Impurità presenti nel minerale iniziale possono distribuirsi fra acido, fosfogesso e altri flussi di processo, influenzando sia la qualità del prodotto sia le possibilità di gestione del residuo.

Filtrare bene significa recuperare fosforo dalla torta solida e limitare le impurità nell'acido. Lavaggi più estesi muovono però altra acqua, che deve rientrare nel processo o essere gestita. La concentrazione dell'acido richiede calore e produce vapori da trattare o riutilizzare. Le scelte tecniche collegano quindi resa, consumo energetico, qualità e volume dei flussi secondari. Un confronto fra stabilimenti ha senso solo quando usa lo stesso confine: l'acido diluito ottenuto subito dopo la filtrazione e l'acido concentrato pronto per una reazione successiva sono prodotti diversi.

Il fosfogesso rappresenta un flusso materiale considerevole. Può essere accumulato in strutture dedicate, trattato o impiegato in alcune applicazioni quando composizione e norme lo consentono. La sua esistenza rende visibile un principio generale: concentrare un elemento utile non elimina il resto della materia. Il processo trasferisce il fosforo nella fase desiderata e contemporaneamente produce una massa distinta che richiede spazio, controllo delle acque e una destinazione.

La possibilità di utilizzare il fosfogesso dipende dalla regolarità della composizione, dalla presenza di impurità, dalla domanda locale e dal costo del trasporto. Una frazione tecnicamente recuperabile può restare accumulata quando non incontra un mercato. Al contrario, chiamare residuo tutto il flusso nasconderebbe le applicazioni effettivamente ammesse e realizzate. La qualifica commerciale nasce dall'incontro fra caratteristiche misurate, regole e utilizzatore, come per la materia primaria.

Il processo umido non è l'unica strada per ottenere acido fosforico. Una via termica parte dal fosforo elementare prodotto in forno elettrico e consente di raggiungere purezze elevate, richieste soprattutto da impieghi diversi dalla fertilizzazione ordinaria. È una catena distinta, con altri consumi e intermedi. Affiancare le due vie sotto un'unica voce “acido fosforico” nasconderebbe perciò differenze importanti di qualità, energia e mercato. Nella filiera dei fertilizzanti domina l'acido ottenuto per via umida, perché permette di trasformare direttamente grandi quantità di concentrato fosfatico.

La roccia fosfatica, l'acido solforico e l'ammoniaca appartengono a catene diverse che si incontrano nello stabilimento. Un Paese dotato di risorse fosfatiche può esportare concentrato, produrre acido o spingersi fino ai fertilizzanti finiti. Un altro può importare roccia o acido e disporre della capacità necessaria per formulare il prodotto. La geologia localizza il primo anello, mentre reagenti, energia, impianti e logistica determinano quali passaggi possano essere svolti nello stesso luogo.

L'ammoniaca e l'acido solforico aggiungono vincoli distinti dalla miniera. Fermare un impianto di conversione o interrompere uno di questi reagenti può ridurre l'offerta di fertilizzante anche quando il concentrato fosfatico continua a essere estratto. Uno stabilimento integrato collega preparazione della roccia, produzione di acido e successiva formulazione; un impianto specializzato acquista invece l'acido o un altro intermedio. L'integrazione riduce alcuni trasferimenti, ma concentra capitale, manutenzione e gestione dei residui. La specializzazione distribuisce questi compiti fra più siti e rende la continuità produttiva dipendente da trasporti e contratti.

L'acido fosforico diventa infine un intermedio per diversi fertilizzanti. La reazione con ammoniaca produce, fra gli altri, fosfato monoammonico e fosfato diammonico, indicati comunemente come MAP e DAP. In questi prodotti l'ammoniaca fornisce azoto e neutralizza in misura diversa l'acido fosforico. Accanto a questa via, l'attacco della roccia con acido solforico o fosforico permette di ottenere il superfosfato semplice e quello triplo. Il titolo finale dipende dalla via scelta, dalla concentrazione degli intermedi e dagli altri componenti presenti.

Prodotti semplici, composti e miscele

Le materie ottenute dalle due filiere entrano nel mercato in forme diverse. Un fertilizzante semplice fornisce principalmente uno dei tre macronutrienti; un prodotto composto incorpora due o tre nutrienti nello stesso granulo o nello stesso processo; una miscela combina granuli prodotti separatamente. MAP e DAP sono composti che uniscono fosforo e azoto, mentre il cloruro di potassio può essere venduto come fertilizzante potassico o diventare un componente di formulazioni NPK. I superfosfati forniscono fosforo attraverso una via produttiva distinta da MAP e DAP, mentre il solfato di potassio risponde a specifiche che richiedono una forma diversa dal cloruro.

Dopo la reazione o la separazione, il prodotto deve assumere una forma che possa essere conservata, trasportata e distribuita. Granulazione, essiccazione, raffreddamento, vagliatura e riciclo delle particelle fuori misura permettono di ottenere lotti più uniformi. Granuli troppo fini generano polvere; quelli troppo grandi compromettono l'omogeneità della miscela. Resistenza meccanica, tendenza ad assorbire umidità e comportamento in magazzino diventano parte della disponibilità commerciale quanto il titolo chimico.

La differenza fra composto e miscela riguarda l'uniformità della consegna. In un prodotto granulato con più nutrienti, ogni granulo può avere una composizione controllata dal processo. In una miscela fisica, dimensione, densità e resistenza dei granuli devono limitare la segregazione durante carico, trasporto e distribuzione. Rivestimenti e condizioni di conservazione aiutano inoltre a contenere agglomerazione e deterioramento. Lo stesso titolo nominale può quindi richiedere impianti e controlli differenti.

La specifica commerciale comprende contenuto nutritivo, umidità, granulometria e condizioni fisiche del lotto. Serve a far sì che il materiale attraversi silos, nastri, terminali e sistemi di dosaggio conservando composizione e uniformità. L'impiego agricolo resta fuori da questo capitolo, ma la funzione del prodotto determina già nello stabilimento quali materie prime, forme e controlli siano necessari.

La filiera può attraversare più frontiere

Le fasi non devono trovarsi tutte accanto alla miniera. La roccia beneficiata può viaggiare verso un impianto di acido fosforico; l'acido può alimentare nello stesso sito la produzione di MAP e DAP oppure essere trasferito a un altro stabilimento; un fertilizzante semplice può infine entrare in una miscela preparata vicino al mercato di destinazione. Ogni scelta sposta masse, costi, rischi e responsabilità fra imprese e territori.

Trasportare roccia significa muovere anche componenti che non diventeranno nutrienti. Convertirla vicino al deposito riduce alcuni flussi a valle, ma concentra nello stesso luogo consumo di reagenti, produzione di fosfogesso e necessità di infrastrutture. Spostare acido o ammoniaca richiede mezzi, serbatoi e procedure compatibili con sostanze corrosive o pericolose.

Trasportare il fertilizzante finito semplifica l'uso da parte del compratore, ma incorpora nel carico tutta la formulazione commerciale.

La stessa logica vale per la potassa. Un produttore può esportare cloruro di potassio standardizzato, mentre miscelazione e confezionamento avvengono vicino agli utilizzatori. La regolarità del titolo e della granulometria permette di combinare lotti provenienti da origini diverse, ma la sostituibilità resta vincolata alla specifica. Una materia disponibile su una nave o in un terminale non è automaticamente adatta a ogni formulazione.

La geografia degli approvvigionamenti nasce dunque dalla posizione congiunta di depositi, impianti chimici, terminali e mercati. I dati doganali possono registrare la massa a uno qualsiasi di questi stadi. Per ricostruire la dipendenza occorre distinguere il codice della roccia da quello dell'acido e dei fertilizzanti finiti, evitando di sommare la stessa materia mentre attraversa trasformazioni successive.

Riserve e produzione disegnano mappe diverse

Nel 2025 lo US Geological Survey stimava una produzione mondiale di circa 250 milioni di tonnellate di roccia fosfatica commerciabile. La Cina ne rappresentava 110 milioni, il Marocco 36 milioni, gli Stati Uniti 20 milioni e la Russia 14 milioni. La Finlandia, principale presenza estrattiva dell'Unione europea esplicitamente riportata nella tabella, era poco sotto un milione di tonnellate.

La mappa delle riserve è molto diversa. Il totale mondiale riportato dalla stessa fonte era di circa 73 miliardi di tonnellate, delle quali 50 miliardi attribuite alla riga del Marocco. Il dato mostra una concentrazione geologica ed economica eccezionale, ma non descrive la produzione corrente, la capacità di arricchimento o la quota esportata. La tabella consultata non precisa inoltre il perimetro territoriale rispetto al Sahara Occidentale; attribuzioni più dettagliate richiederebbero una fonte cartografica esplicita.

Le riserve sono la parte della risorsa considerata recuperabile nelle condizioni tecniche ed economiche adottate dalla fonte. Possono cambiare con nuove esplorazioni, prezzi, tecnologie e rivalutazioni dei depositi. La produzione misura invece il flusso ottenuto in un anno. Dividere i 73 miliardi di tonnellate per i 250 milioni prodotti annualmente restituirebbe un rapporto aritmetico,

ma non una data di esaurimento: tratterebbe come fissi giacimenti, domanda, qualità, capacità e convenienza.

La distanza fra Cina e Marocco illustra bene questa separazione. La Cina guidava il flusso produttivo stimato, mentre il Marocco concentrava gran parte dello stock classificato come riserva. Il ruolo industriale dipende anche dagli impianti collegati alle miniere e dalla possibilità di convertire o esportare la materia. Una graduatoria delle riserve e una graduatoria della produzione rispondono perciò a domande differenti.

La potassa e l'equivalente K_2O

Nel 2025 la produzione mondiale di potassa era stimata in 49 milioni di tonnellate espresse come equivalente K_2O. Il Canada contribuiva con 15 milioni, la Russia con 10 milioni, la Cina con 6,3 milioni e la Bielorussia con 6 milioni. Germania e Spagna, all'interno dell'Unione europea, figuravano rispettivamente con circa 3 milioni e 450 mila tonnellate.

Applicata a questi dati, la convenzione K_2O misura il contenuto potassico. Per ricavare la massa fisica serve conoscere il prodotto e il suo titolo: il cloruro e il solfato di potassio incorporano anche gli elementi che accompagnano il potassio, oltre a eventuale umidità e impurità.

Dopo l'estrazione e la separazione, il cloruro di potassio può essere essiccato, compattato o granulato. Dimensione dei granuli, purezza, umidità e comportamento durante stoccaggio e distribuzione fanno parte della specifica. Il materiale destinato a essere miscelato con altri nutrienti deve inoltre mantenere una granulometria compatibile, per limitare la separazione dei componenti durante la movimentazione.

La filiera potassica richiede meno trasformazioni chimiche di quella fosfatica, ma non consiste in una semplice vendita del minerale. Le evaporiti contengono più sali; le salamoie cambiano composizione durante evaporazione e cristallizzazione; gli impianti devono separare la frazione desiderata e controllare le impurità. Depositi diversi richiedono schemi differenti, e la quantità recuperata dipende dalla mineralogia e dalle perdite nelle fasi di separazione.

La scelta fra flottazione e cristallizzazione dipende anche dalla tessitura del minerale e dalla possibilità di liberare i cristalli utili. Nella flottazione, reagenti e condizioni del circuito favoriscono la separazione fra sali; nella dissoluzione, il processo sfrutta differenze di solubilità e temperatura. Il prodotto può poi essere venduto in forma standard o granulare. Ogni fase genera ricircoli di soluzione, fini, sali separati e materiali che devono essere reinseriti nel processo o collocati altrove.

Poiché i sali sono solubili, la gestione dell'acqua assume un ruolo particolare. Infiltrazioni, salamoie residue e depositi salini richiedono controllo per evitare che il materiale torni in soluzione e migri fuori dal sito. Il profilo cambia fra una miniera sotterranea asciutta, un impianto di estrazione in soluzione e un bacino evaporativo. Un valore medio unico per tonnellata nasconderebbe queste differenze; per questo la filiera può essere confrontata sul prodotto ottenuto, ma gli impatti vanno ricondotti al metodo e al luogo.

Lo US Geological Survey stimava per il 2025 una capacità mondiale di circa 66,1 milioni di tonnellate K_2O equivalente, superiore alla produzione di 49 milioni. La capacità descrive ciò che gli impianti potrebbero produrre secondo le definizioni adottate, mentre la produzione effettiva dipende da domanda, manutenzione, avviamenti, vincoli tecnici e disponibilità commerciale. Le due grandezze condividono l'unità, ma il loro rapporto non basta a ricostruire un tasso di utilizzo affidabile per l'intera industria.

Le riserve mondiali riportate dalla stessa fonte superavano 5,9 miliardi di tonnellate K_2O equivalente. Russia e Canada figuravano rispettivamente con circa 2 e 1,1 miliardi; la tabella separava inoltre le riserve dal minerale recuperabile, espresso con un altro perimetro. Questi stock mostrano che la concentrazione della potassa non coincide con quella dei fosfati, ma non indicano quanta capacità possa entrare rapidamente sul mercato. Una nuova miniera richiede accessi, pozzi, impianti di separazione e infrastrutture; un deposito sfruttato in soluzione richiede pozzi, circuiti idrici ed evaporazione. La riserva diventa offerta solo attraverso questi sistemi.

La dipendenza europea cambia con la materia

Lo studio europeo sulle materie prime critiche pubblicato nel 2023 consente di confrontare fosfati e potassa con definizioni comuni. I dati si riferiscono

prevalentemente alla media 2016–2020 e descrivono quindi la struttura di quel periodo. Per la roccia fosfatica l'import reliance dell'Unione era stimata all'82%; per la potassa al 33%. L'indicatore mette in relazione importazioni nette, produzione interna e approvvigionamento complessivo.

Nella roccia fosfatica, le principali quote dell'approvvigionamento europeo indicate dallo studio erano Marocco 27%, Russia 24%, Finlandia 17% e Algeria 10%. La Finlandia rappresentava la principale base mineraria interna visibile in questa ripartizione, mentre gran parte della materia arrivava dall'esterno. La capacità europea di produrre fertilizzanti non cancellava quindi la dipendenza dalla risorsa estratta e arricchita altrove.

La potassa presentava una struttura differente. La Germania forniva il 56% dell'approvvigionamento dell'Unione e la Spagna l'11%; Russia e Bielorussia rappresentavano rispettivamente l'11% e il 10%, mentre il Canada contribuiva per il 5%. Queste percentuali sono sourcing share: includono produzione interna e importazioni. Il 56% tedesco descrive quindi la quota della Germania nell'approvvigionamento complessivo europeo del periodo, non una quota delle importazioni.

La differenza fra le due percentuali di import reliance nasce dal modo in cui produzione interna e commercio si combinano. Un valore del 33% per la potassa non significa che ogni impresa europea utilizzi un terzo di materia importata: l'indicatore riguarda il bilancio dell'intera Unione nel periodo considerato. Produttori, miscelatori e utilizzatori possono avere catene molto diverse. Analogamente, l'82% della roccia fosfatica descrive la forte esposizione aggregata dell'UE alla materia estratta all'esterno, senza stabilire da solo quale Paese o stabilimento ne dipenda maggiormente.

Il confronto fra 82% e 33% mostra che una stessa area economica può essere fortemente dipendente per un nutriente e disporre di una base estrattiva più consistente per un altro. Non offre però una fotografia dei contratti e dei flussi del 2026. I siti minerari possono variare i volumi estratti, rotte e fornitori possono essere sostituiti e le politiche commerciali possono modificare gli scambi. Le percentuali storiche restano utili per capire la struttura della filiera purché il periodo sia dichiarato.

La vulnerabilità cambia inoltre con la fase osservata. La disponibilità interna di potassa riduce l'esposizione dell'Unione alla materia estratta all'estero, ma non

assicura che ogni grado commerciale, ogni impianto di formulazione e ogni area geografica ricevano lo stesso prodotto. Per il fosforo, importare roccia significa mantenere in Europa la trasformazione chimica; importare acido o fertilizzante finito sposta all'esterno anche una parte degli impianti, del consumo di reagenti e della gestione del fosfogesso. Due flussi con lo stesso contenuto nutritivo possono quindi distribuire valore industriale e impatti in luoghi differenti.

Questa distinzione aiuta a interpretare la sicurezza dell'approvvigionamento. Diversificare l'origine della roccia riduce la dipendenza da un singolo fornitore, ma non sostituisce la capacità di produrre acido. Disporre di miniere potassiche interne rafforza la base materiale, ma richiede continuità operativa degli impianti e collegamenti con i centri di miscelazione. La dipendenza è una proprietà della catena e cambia quando si sposta il punto in cui la si misura.

Anche la trasformazione modifica la geografia. Un flusso di roccia fosfatica può attraversare la frontiera come concentrato, acido fosforico o fertilizzante. La potassa può viaggiare come cloruro di potassio, solfato o prodotto composto. Senza serie doganali coerenti per codice, massa netta, partner e anno, non è possibile ricostruire un bilancio italiano attuale sommando valori eterogenei. La dipendenza mineraria europea documentata dallo studio non diventa automaticamente una percentuale di dipendenza del fertilizzante finito italiano.

Dal prodotto al contenuto nutritivo

La FAO stimava per il 2024 una produzione mondiale di fertilizzanti inorganici pari a 216 milioni di tonnellate di nutrienti. L'uso agricolo era di 197 milioni: 115 milioni di N, 44 milioni di P_2O_5 e 38 milioni di K_2O. Il divario non dimostra un'eccedenza: produzione e uso sono separati da commercio, scorte, altri impieghi e differenze temporali.

Un fertilizzante composto può dichiarare percentuali di N, P_2O_5 e K_2O. Quelle quote permettono all'acquirente di sapere quanto nutriente riceve per unità di prodotto e all'industria di formulare lotti conformi. Il resto comprende altri nutrienti, ioni di accompagnamento come solfati o cloruri, acqua e componenti necessari alla stabilità o alla distribuzione.

La formulazione determina anche il lavoro logistico per unità di nutriente consegnata. Un prodotto più concentrato muove meno massa per la stessa quantità dichiarata, ma può richiedere intermedi più puri, controlli più stretti o un processo diverso. Un prodotto meno concentrato può includere componenti utili o rispondere a un'altra specifica. La concentrazione da sola non stabilisce quale formulazione sia preferibile; chiarisce però perché il peso trasportato e il contenuto nutritivo non possano essere usati come sinonimi.

Nel dato italiano dell'apertura, gli oltre 4,5 milioni di tonnellate comprendevano concimi minerali e organici, ammendanti, correttivi e altre categorie; N, P_2O_5 e K_2O isolavano i nutrienti principali dichiarati. La rilevazione descrive l'immissione sul mercato per uso agricolo, senza stabilire produzione nazionale, origine mineraria o applicazione effettiva.

Le unità seguono quindi la funzione della statistica. Il gestore di una miniera misura minerale estratto e concentrato; l'impianto chimico controlla intermedi, reagenti e resa; il produttore di fertilizzanti garantisce un titolo; la statistica agricola osserva nutrienti distribuiti o utilizzati. Tutti possono parlare di tonnellate senza parlare della stessa materia.

Anche i confini temporali possono differire. La produzione industriale viene registrata quando il prodotto esce dall'impianto; il commercio quando attraversa una frontiera; la distribuzione quando viene immesso sul mercato; l'uso quando entra nelle rilevazioni agricole. Scorte e tempi di trasporto separano questi momenti. Un bilancio materiale completo deve quindi allineare prodotto, unità, territorio e periodo prima di sommare produzione, importazioni ed esportazioni.

La disponibilità è una catena

Una riserva diventa una fornitura utile solo attraverso una catena completa. Il deposito deve essere accessibile; la materia estratta deve raggiungere un tenore e una purezza adatti; gli impianti devono trasformarla; reagenti ed energia devono arrivare con continuità; il prodotto deve rispettare una specifica e la logistica deve consegnarlo al mercato.

Per il fosforo, la miniera apre una filiera chimica. La roccia viene arricchita, reagisce con acido solforico, genera acido fosforico e fosfogesso e può incontrare ammoniaca per diventare MAP o DAP. Ogni anello introduce

capacità, flussi secondari e possibili strozzature. Una grande riserva non sostituisce un impianto fermo o un reagente indisponibile.

Per la potassa, il vincolo principale consiste nell'estrarre e separare sali con qualità commerciabile da depositi o salamoie geograficamente concentrati. La Germania e la Spagna offrivano all'Unione una base interna significativa nel periodo osservato, mentre il fosfato dipendeva molto di più dalle origini esterne. La differenza nasce dalla geologia e prosegue nella struttura degli impianti e degli scambi.

Alla fine della catena, il mercato acquista un prodotto con massa, composizione e titolo dichiarati. La tonnellata iniziale di roccia, la tonnellata equivalente di K_2O e la tonnellata di fertilizzante descrivono fasi diverse. Seguirle senza confonderle permette di capire dove si trovi davvero la disponibilità: nel materiale adatto, nell'impianto capace di trasformarlo e nella consegna conforme che arriva quando serve.

Fonti e riferimenti

US Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026, Phosphate Rock

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-phosphate.pdf

US Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026, Potash

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-potash.pdf

Commissione europea — Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023

https://single-market-economy.ec.europa.eu/publications/study-critical-raw-materials-eu-2023-final-report_en

FAO — Inorganic fertilizers 2015–2024

https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/inorganic-fertilizers.-2015-2024/en

ISPRA — Distribuzione per uso agricolo dei fertilizzanti

https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/agricoltura/distribuzione-uso-agricolo-dei-fertilizzanti-concimi-ammendanti-e-correttivi

Commissione europea Joint Research Centre — Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals Ammonia Acids and Fertilisers

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-03/LVIC-AAF.pdf

04.11 – Ferro e acciaio

Il ferro nella roccia

Una trave, una barra per cemento armato e una lamiera sottile possono nascere dallo stesso elemento chimico, ma non dalla stessa materia pronta all'uso. Il ferro si trova soprattutto legato all'ossigeno nei minerali. Per ottenere acciaio bisogna prima individuare una roccia sfruttabile, separare una parte dei materiali indesiderati, togliere l'ossigeno, controllare la composizione del metallo e dargli una forma. Ogni passaggio produce una quantità diversa. Per questo il peso del minerale estratto non può essere letto come peso dell'acciaio disponibile.

Il tenore indica quanta parte di un materiale è ferro. Una tonnellata di minerale secco al 62% di ferro contiene, per definizione, 620 chilogrammi di ferro. È un esempio di calcolo, non il tenore medio delle miniere mondiali; quei 620 chilogrammi non sono neppure acciaio già prodotto. Una parte del ferro può perdersi nella preparazione e nella trasformazione, mentre il prodotto finale conterrà anche altri elementi. Se il minerale contiene meno ferro, bisogna trattare più roccia per ottenere la stessa massa di ferro contenuto: prima ancora di accendere un forno, il tenore influisce su scavo, macinazione, residui e trasporto.

Le miniere lavorano soprattutto ossidi e idrossidi, fra cui ematite, magnetite e goethite. In molti giacimenti a cielo aperto occorre rimuovere uno strato di materiale sterile per raggiungere la parte mineralizzata. Il rapporto fra sterile e minerale cambia da luogo a luogo: non esiste una quantità fissa di roccia da movimentare per ogni tonnellata commerciabile. Mezzi di grandi dimensioni, fronti di scavo e polveri rendono il lavoro minerario un'attività industriale distinta da quella che si svolge in acciaieria.

Anche «risorsa» e «riserva» hanno significati distinti. Una risorsa descrive una concentrazione geologica conosciuta o stimata; una riserva è la parte che può essere recuperata economicamente alle condizioni dichiarate di conoscenza, tecnologia e prezzi. Non basta dunque conoscere l'abbondanza del ferro nella crosta terrestre per sapere quanta materia arriverà a un porto o a un forno. Occorrono qualità, autorizzazioni, impianti, vie di trasporto e investimenti, e

ciascuno può cambiare la quantità commerciabile senza modificare il ferro presente nella roccia.

Secondo la stima dello United States Geological Survey per il 2024, nel mondo sono stati prodotti circa 2,50 miliardi di tonnellate di minerale di ferro utilizzabile, corrispondenti a circa 1,60 miliardi di tonnellate di ferro contenuto. Sono due misure della produzione mineraria, non due fasi consecutive da sottrarre per trovare uno scarto. Neppure la seconda cifra si trasforma direttamente nella produzione annua di acciaio: i tempi degli scambi, le scorte, l'uso di rottame e i confini delle statistiche sono differenti. Il punto industriale è che una roccia deve diventare una carica con tenore, granulometria e impurità accettabili prima di entrare nel reattore.

Preparare la carica

Il minerale estratto viene frantumato e vagliato. Quando il ferro e la ganga, cioè la parte minerale non desiderata, sono mescolati finemente, occorre macinare e separare. La magnetite può essere concentrata con separatori magnetici; per altri materiali si impiegano, secondo il giacimento, processi basati sulla densità o sulla superficie delle particelle. Il concentrato ottenuto ha un tenore di ferro più alto dell'alimentazione, ma una massa più bassa. I residui della separazione possono ancora contenere ferro e richiedono gestione di acqua e depositi: chiamarli semplicemente «minerale perso» nasconde sia la ganga rimossa sia il recupero effettivo.

Tenore, recupero e resa massica rispondono a tre domande. Il tenore dice quanto ferro c'è nel concentrato; il recupero quale parte del ferro iniziale è arrivata lì; la resa massica quale parte di tutta la massa alimentata è diventata concentrato. Un concentrato può essere ricco di ferro e tuttavia rappresentare meno della metà della roccia trattata. È un passaggio decisivo per capire perché la capacità di una miniera, quella di un concentratore e quella di un'acciaieria non si possono sommare come tonnellate dello stesso prodotto. La frantumazione e la macinazione consumano energia e producono rumore e polveri; la separazione può richiedere acqua, che deve essere gestita insieme ai residui fini.

La dimensione delle particelle determina il passo seguente. I pezzi di minerale sufficientemente resistenti e conformi, detti lump, possono entrare nel reattore

previsto. I fini invece ostacolerebbero il passaggio dei gas in un altoforno se fossero caricati indiscriminatamente. Per trasformarli in un materiale permeabile si può produrre sinter: fini, fondenti e una piccola frazione di combustibile solido vengono riscaldati fino a saldarsi in un agglomerato poroso. Si possono anche formare pellet, sferule di concentrato fine e leganti indurite con il calore. La scelta dipende dall'impianto e dalla qualità del materiale, non soltanto da una diversa forma commerciale della stessa roccia.

I pellet destinati alla riduzione diretta richiedono specifiche di tenore, impurità, resistenza e comportamento in reazione più esigenti di molte cariche per altoforno. Una miniera che vende grandi quantità di minerale non offre per questo automaticamente pellet adatti a una nuova via produttiva. Sinterizzazione e pelletizzazione aggiungono impianti, energia, polveri e controlli di processo. Una volta ottenuta una carica utilizzabile, resta la trasformazione chimica principale: separare il ferro dall'ossigeno.

Questo vincolo fisico ha anche una geografia. Il sinter viene normalmente preparato in connessione con l'impianto integrato che lo consuma; il pellet può essere una merce trasportata su distanze maggiori. Lo stesso concentrato deve essere filtrato, miscelato, formato e indurito prima di diventare pellet. Se si vuole aumentare la riduzione diretta, non basta contare la capacità dei forni nuovi: bisogna chiedere quanta capacità di concentrazione e pelletizzazione fornirà la carica della qualità necessaria. Ogni passaggio introduce una possibile strozzatura fra la miniera e l'acciaieria.

La via dell'altoforno

Nella via integrata, il carbone metallurgico viene trasformato in coke riscaldandolo senza aria. Il coke non serve soltanto a fornire calore. Nel grande forno verticale sostiene fisicamente la carica, mantiene spazi per il passaggio dei gas e fornisce carbonio alla riduzione degli ossidi. Per questo sostituire una parte del combustibile non significa poter eliminare a piacere il coke da un altoforno convenzionale. Minerale in forma di sinter, pellet o pezzi conformi, coke e fondenti vengono caricati dall'alto; aria calda entra dal basso.

I gas ricchi di monossido di carbonio risalgono e sottraggono ossigeno agli ossidi di ferro. Più in basso la temperatura permette la fusione; il ferro incorpora carbonio e si raccoglie come ghisa liquida, chiamata anche hot metal.

La ganga del minerale e i fondenti formano una fase separata, la scoria. Dall'alto esce inoltre gas che può essere recuperato come combustibile per lo stabilimento. Una tonnellata di ghisa non è quindi una tonnellata di minerale che ha cambiato nome: nel forno entrano e escono anche ossigeno, carbonio, fondenti, gas e scoria.

La scoria è parte del funzionamento chimico del reattore. Il documento europeo sulle migliori tecniche disponibili per ferro e acciaio, il BREF, riporta per gli altiforni osservati un intervallo di 150–346 chilogrammi di scoria per tonnellata di ghisa liquida. Riporta anche polveri e fanghi, che vanno raccolti e trattati. Questi intervalli descrivono impianti e confini specifici; non sono coefficienti da moltiplicare per tutta la produzione mondiale. La scoria d'altoforno può diventare materia per altri usi, per esempio nei leganti, se qualità e regole lo consentono. La possibilità di venderla non cancella i processi necessari a raffreddarla, controllarla e movimentarla.

La ghisa liquida contiene troppo carbonio per molti acciai. Nel convertitore a ossigeno una lancia immette ossigeno nel bagno: il carbonio e altri elementi si ossidano, i fondenti aiutano a raccogliere impurità nella scoria e il metallo viene portato verso la composizione richiesta. Si può aggiungere rottame, anche per assorbire parte del calore della reazione. La presenza di rottame nella carica non trasforma tuttavia il ciclo altoforno-convertitore in una produzione interamente secondaria. Il BREF riporta per il convertitore intervalli di scoria distinti da quelli dell'altoforno, perché sono due reattori e due denominatori diversi.

Nemmeno l'uscita del convertitore conclude la produzione di un grado commerciale: l'acciaio liquido può richiedere ulteriori correzioni della composizione. La quantità di scoria e il recupero del ferro dipendono dalla ghisa in ingresso e dal prodotto voluto. Per conoscere le rese reali servono bilanci di impianto, non una sottrazione teorica fra la massa della ghisa e quella dell'acciaio.

Il ciclo richiede una continuità di approvvigionamento e molti impianti collegati: agglomerazione del minerale, coke, altoforno, trattamento dei gas, convertitore e gestione del metallo liquido. Acque di raffreddamento e di lavaggio dei gas circolano in circuiti che devono contenere solidi e contaminanti. Calore, monossido di carbonio, gas e metallo liquido comportano rischi professionali specifici, descritti dal codice di pratica dell'Organizzazione

internazionale del lavoro. Sono anche le ragioni per cui cambiare la via di produzione significa intervenire su un sistema industriale, non sostituire semplicemente il combustibile in un forno. Una seconda via toglie ossigeno dal minerale senza portare subito tutto il materiale alla fusione.

Riduzione diretta e forno elettrico

La riduzione diretta produce ferro metallico mantenendo il materiale prevalentemente solido. Negli impianti a gas naturale una miscela che contiene idrogeno e monossido di carbonio reagisce con gli ossidi; usando idrogeno come riducente, la reazione che toglie ossigeno al ferro forma acqua. Il prodotto è ferro direttamente ridotto, abbreviato DRI: è poroso e contiene ancora ganga, elementi residui e una parte di ferro non metallico. La metallizzazione misura quale frazione del suo ferro totale si trova già allo stato metallico. Non misura il tenore totale di ferro e non permette da sola di calcolare quanta massa di acciaio uscirà dal forno successivo.

Il DRI può essere usato caldo vicino al luogo di produzione oppure compattato a caldo in bricchette, chiamate HBI. La forma più densa facilita stoccaggio e trasporto rispetto al materiale poroso sfuso. Entrambe sono cariche metalliche, non acciaio finito. La qualità del minerale o del pellet alimentato al riduttore conta ancora: una ganga elevata dovrà essere gestita nella fase di fusione, aumentando scoria, fondenti e fabbisogno del forno. Per questo la disponibilità di minerale adatto alla riduzione diretta può limitare una transizione industriale anche dove elettricità e gas siano disponibili.

Nel forno elettrico ad arco, o EAF, gli elettrodi generano un arco che fonde la carica. Ossigeno, carbonio e fondenti partecipano alle reazioni e alla formazione della scoria. L’energia elettrica non è l’unico ingresso energetico o materiale: possono servire combustibili ausiliari e gli elettrodi stessi si consumano. La carica può comprendere rottame, DRI, HBI e ghisa in proporzioni diverse. Un forno EAF che fonde DRI ottenuto da minerale parte da ferro primario; uno alimentato soprattutto con rottame utilizza materia secondaria. La statistica che conta le tonnellate prodotte in EAF non dice da sola quanto rottame contenessero.

La differenza conta anche per le emissioni. Con DRI ottenuto da gas naturale, parte del carbonio è già stata impiegata nel riduttore prima che la carica

raggiunga l'EAF. Con idrogeno prodotto da elettricità, il risultato climatico dipende dalla produzione di quell'elettricità e dalla disponibilità dell'idrogeno nelle ore richieste. Con rottame il passaggio di riduzione degli ossidi è già avvenuto nella storia del metallo, ma rimangono fusione, affinazione e materiali ausiliari. Chiamare tutte e tre le situazioni semplicemente «acciaio elettrico» cancella il processo che determina buona parte dei loro fabbisogni.

La scoria EAF raccoglie parte delle impurità e dei fondenti; i gas vengono depolverati. Nella tabella europea del BREF, gli intervalli sono 60–270 chilogrammi di scoria di forno e 10–30 chilogrammi di polveri per tonnellata di acciaio liquido. Sono dati raccolti per configurazioni e cariche diverse, non una media mondiale. Una polvere con metalli richiede una gestione diversa da una scoria utilizzabile. Elettricità, arco, rumore, cariche potenzialmente umide e metallo fuso richiedono misure di sicurezza diverse da quelle della miniera o del laminatoio. Passare all'EAF sposta parte della dipendenza industriale verso rete elettrica e qualità della carica; non elimina automaticamente emissioni o residui. Se la carica contiene rottame, la sua composizione diventa una questione metallurgica decisiva.

Il limite della qualità del rottame

Non tutto il rottame torna in forno con la stessa velocità o con la stessa qualità. Gli scarti interni a un'acciaieria possono rientrare rapidamente nel processo. Gli scarti nuovi delle lavorazioni industriali hanno spesso composizione nota e tempi di ritorno brevi. L'acciaio contenuto in edifici, macchinari e altri beni può invece restare in uso per anni o decenni prima di comparire come rottame post-consumo. Quanta materia è teoricamente riciclabile, quanta è stata preparata secondo specifiche e quanta è effettivamente accettata da un'acciaieria sono quantità diverse. All'ingresso del forno conta la partita commerciabile, con caratteristiche note e controllate.

Una partita vendibile è definita da dimensione, densità, umidità, composizione e materiali estranei. Esistono rottami pesanti e puliti, scarti nuovi omogenei e miscele post-consumo più difficili da controllare. Il Regolamento europeo 333/2011 stabilisce condizioni perché certi rottami di ferro e acciaio cessino giuridicamente di essere rifiuti. Fra i criteri compare un massimo del 2% in peso di materiali estranei. Questo limite riguarda lo status della partita e non stabilisce quale tenore di rame sia compatibile con ogni qualità di acciaio.

Il rame e lo stagno possono restare nel metallo anche dopo le normali operazioni di affinazione di un forno elettrico. Se la specifica richiede una composizione più stretta, si può scegliere rottame più pulito oppure diluire la carica con DRI, HBI o ghisa con una composizione adatta. È una soluzione tecnica, ma richiede nuovo ferro da minerale e modifica energia ed emissioni della via produttiva. Uno studio di Dworak, Rechberger e Fellner sul possibile accumulo di elementi residui nel riciclo siderurgico europeo attribuisce contenuti di rame differenti ai diversi flussi di rottame. Gli intervalli adottati sono ipotesi del modello, non soglie universali oltre le quali ogni laminato diventa difettoso.

Il rottame è dunque indispensabile ma non illimitato. La produzione attuale di acciaio non può essere alimentata integralmente dal ritorno di prodotti ancora in uso, e alcune qualità dipendono da cariche controllate. Nel rapporto tecnologico del 2020 l'Agenzia internazionale dell'energia, IEA, descriveva una filiera in cui circa il 70% degli input metallici proveniva dal minerale e il resto dal rottame. Il dato non è una quota EAF né una previsione immutabile: indica perché riduzione primaria e riciclo continueranno a interagire. Dopo fusione, il metallo deve comunque soddisfare una specifica prima di diventare una forma acquistabile.

Dall'acciaio liquido alla forma

Il convertitore e l'EAF consegnano acciaio liquido che può richiedere ulteriori correzioni. Nel forno siviera si regolano temperatura e composizione; l'aggiunta di ferroleghe introduce elementi richiesti dal grado, mentre altri trattamenti controllano zolfo, ossigeno, gas disciolti e inclusioni. Un acciaio al carbonio, uno microlegato e uno inossidabile impiegano quantità e qualità diverse di elementi. Non esiste quindi un prezzo unico dell'«acciaio» indipendente da grado, superficie e forma.

La colata continua fa solidificare il metallo in una sezione controllata. Una billetta ha una sezione relativamente piccola e alimenta spesso i laminatoi di barre e vergella. Il blumo ha una sezione più grande e può essere destinato a profilati o altri prodotti lunghi. La bramma è larga e serve ai laminati piani. Si tratta di semilavorati riconoscibili e commerciabili: un laminatoio può acquistarli senza possedere la miniera, l'altoforno o l'acciaieria che li hanno

prodotti. Per alcune qualità si usano ancora lingotti e percorsi diversi, ma gran parte dell'acciaio passa dalla colata continua.

La laminazione a caldo comprime il semilavorato fra cilindri e gli conferisce sezione e dimensioni. Dalle bramme si ottengono nastri avvolti in coil e lamiere; da billette e blumi barre, tondo, profilati e vergella. La vergella può poi essere trafilata in filo, con una lavorazione successiva. Superficie, tolleranze, saldabilità, resistenza e duttilità spiegano perché due prodotti dello stesso peso possano richiedere gradi e controlli diversi. Il tondo per opere in calcestruzzo e una lamiera destinata a essere formata hanno specifiche diverse prima ancora che qualcuno fabbrichi i beni che li useranno.

Una specifica non si esaurisce nel contenuto medio di ferro. Fosforo e zolfo, inclusioni non metalliche e residui come rame o stagno possono condizionare la possibilità di laminare, saldare o deformare il materiale. In alcuni acciai piccole aggiunte di elementi di lega modificano resistenza e tenacità; negli inossidabili il cromo è essenziale alla resistenza alla corrosione. Anche la forma conta: una bramma adatta a laminare una lamiera piana non sostituisce una billetta per vergella soltanto perché le due masse sono entrambe acciaio. Il mercato acquista un grado, una dimensione e una tolleranza, non un elemento chimico astratto.

Fra acciaio liquido e laminato vendibile il peso cambia. Durante solidificazione e laminazione si formano scaglia, rifili e pezzi fuori specifica; parte del metallo rientra internamente come rottame. La differenza fra massa in ingresso e prodotto vendibile non è per intero una perdita definitiva di ferro. Le acque di raffreddamento e quelle impiegate nella disincrostazione, che asporta la scaglia superficiale con getti ad alta pressione, richiedono circolazione e trattamento; carichi sospesi, metallo caldo e organi di laminazione aggiungono rischi per chi lavora. Quando il materiale ha una composizione certificata e una forma standardizzata, può passare all'industria successiva. Il fatto che minerale, acciaieria e laminatoio possano trovarsi in paesi diversi spiega la geografia della filiera.

Dove si estrae, dove si produce

Australia e Brasile sono fra i grandi poli di estrazione ed esportazione del minerale di ferro. La produzione siderurgica segue invece anche la disponibilità

di energia, porti, ferrovie, capitale industriale e mercati. La Cina può produrre acciaio su una scala molto maggiore della sua quota di minerale commerciabile estratto sul territorio: importa materia prima attraverso corridoi marittimi. Una tonnellata di minerale imbarcata, una tonnellata di acciaio grezzo colato e una tonnellata di coil acquistata sono tre flussi distinti.

Fra miniera e acciaieria il trasporto non è un dettaglio esterno. Per milioni di tonnellate annue servono ferrovie, terminali, navi da rinfusa e scorte capaci di mantenere regolare l'alimentazione dei forni. Una miniera con grandi riserve ma senza un collegamento affidabile non può offrire la stessa continuità di una filiera già collegata al porto. Anche quando l'acciaieria è vicina agli acquirenti, può dipendere da minerale, pellet, carbone metallurgico o rottame che arrivano da altri paesi. Questa separazione dei luoghi rende il commercio parte del funzionamento materiale della siderurgia.

Secondo World Steel in Figures 2026, nel 2025 il mondo ha prodotto 1.848,9 milioni di tonnellate di acciaio grezzo. La Cina ne ha prodotto 960,8 milioni e l'India 164,9 milioni. Il ruolo dell'India mostra che la mappa non si esaurisce nella Cina e nei paesi industrializzati più antichi. Queste cifre descrivono l'uscita siderurgica, non il consumo dei laminati o la domanda finale incorporata nei beni. Nella stessa edizione worldsteel rivede il totale mondiale del 2024 a 1.886,8 milioni di tonnellate: per misurare una variazione si deve usare una serie della stessa edizione, non mescolare il 2025 con un totale 2024 pubblicato prima della revisione.

Nell'Unione europea a ventisette, EUROFER registra per il 2025 circa 125,8 milioni di tonnellate di acciaio grezzo, con il 54,2% da convertitore a ossigeno e altri processi e il 45,8% da forno elettrico. La capacità operativa aggregata è circa 194 milioni di tonnellate e il tasso di utilizzo pubblicato è 64,8%. In altre parole, il rapporto fra produzione e capacità mostra quanto degli impianti disponibili sia stato utilizzato nell'anno; non dice da solo se la differenza dipenda da domanda, fermate, energia o altri vincoli. Il consumo apparente di prodotti siderurgici, circa 134,4 milioni di tonnellate, misura ancora un'altra grandezza e non va sottratto dalla capacità per trovare una presunta carenza di acciaio.

L'UE combina poli integrati e acciaierie elettriche e scambia sia prodotti sia materia prima secondaria. EUROFER riporta per il 2025 un consumo aggregato di 74,4 milioni di tonnellate di rottame ed esportazioni nette di circa 11,5

milioni. Il saldo non indica quanta parte di ciascun EAF sia alimentata a rottame, né prova che ogni partita esportata avrebbe soddisfatto una specifica europea. Qualità, luogo, tempi e prezzo influenzano gli scambi. Per ricostruire le importazioni e le esportazioni di minerale, pellet, semilavorati e singole forme laminate occorrerebbero serie doganali con codici e perimetri coerenti.

L'Italia ha prodotto 20,733 milioni di tonnellate di acciaio grezzo nel 2025 secondo EUROFER, dopo 20,007 milioni nel 2024. Worldsteel arrotonda il valore 2025 a 20,7 milioni e stima che il 90,1% della produzione italiana sia passato per forni elettrici. È una stima della via produttiva, non la percentuale di acciaio proveniente da rottame. Il paese comprende una rete di EAF, laminatoi e produzioni specializzate, oltre al ciclo integrato di Taranto. Elettricità, qualità del rottame e possibili apporti di ghisa o DRI contano quindi quanto il minerale e il coke per comprendere le sue dipendenze. Non si può ricavare da una media mondiale di emissioni il bilancio ambientale degli impianti italiani: occorrono dati locali con lo stesso confine di misura.

Costi fisici e cambiamento industriale

L'acciaio è venduto in forme e gradi diversi. Il costo di una bramma dipende da materie prime, riduzione, fusione, energia, fondenti, ferroleghe, manutenzione, lavoro, trattamento dei gas e dei residui; quello di un coil comprende inoltre laminazione, resa e qualità richiesta. Anche la distanza fra miniera, porto e forno conta. Un prezzo del pellet consegnato in Asia e uno di una lamiera venduta in Europa non possono essere messi uno accanto all'altro come se misurassero la stessa fase della filiera. Senza serie coerenti per forma, qualità, luogo e periodo, un costo universale per tonnellata nasconderebbe le differenze che spiegano il funzionamento della filiera.

Le emissioni mostrano una differenza importante fra le vie. Worldsteel riporta, per un calcolo riferito al 2023, intensità medie di 2,32 tonnellate di CO_2 per tonnellata di acciaio grezzo colato nella via altoforno-convertitore, 1,43 nella via riduzione diretta-forno elettrico e 0,70 nella via EAF alimentata a rottame. Il denominatore è lo stesso prodotto siderurgico, ma sono medie di vie diverse e non la prestazione di tre alternative disponibili nello stesso stabilimento. Secondo la nota metodologica della pubblicazione, il calcolo include emissioni dirette, elettricità acquistata e alcune componenti a monte: non è né la sola

emissione al camino né una valutazione completa del ciclo di vita. Il numeratore è CO_2, non CO_2 equivalente.

La differenza nasce dai processi. L'altoforno usa carbonio per separare l'ossigeno dal ferro; l'EAF che fonde rottame evita questa riduzione primaria, pur consumando elettricità e altri materiali; il DRI alimenta una via che deve ancora ridurre minerale e poi fondere il ferro. Quanto emetta un impianto specifico dipende anche da gas, elettricità, carica e confine del conteggio. La stessa attenzione vale per l'acqua: worldsteel pubblica per gli indicatori 2024 8,50 metri cubi di acqua dolce prelevata e 2,30 consumata per tonnellata di acciaio grezzo. La differenza non equivale a un volume privo di impatto; una parte dell'acqua torna o circola, ma qualità, trattamento e disponibilità locale restano importanti. I dati volontari degli indicatori non sono un censimento di tutti gli impianti mondiali.

La sicurezza ha un problema statistico simile. Il codice dell'Organizzazione internazionale del lavoro descrive rischi e prevenzione lungo la siderurgia, ma non fornisce un tasso di infortunio globale confrontabile per l'intera filiera. Worldsteel pubblica un indicatore di 0,68 infortuni con assenza per milione di ore lavorate nel 2025 per dipendenti e appaltatori delle organizzazioni rispondenti. Non rappresenta automaticamente miniere, fornitori e tutti i lavoratori siderurgici del mondo. La lettura delle condizioni di lavoro richiede anche definizioni degli eventi, copertura, ore e differenze fra siti.

Ridurre la dipendenza dal carbone del ciclo integrato può richiedere nuovi riduttori, pellet di qualità adatta, forni elettrici, reti e grandi quantità di energia a basse emissioni. Usare idrogeno come riducente cambia il prodotto della reazione con l'ossigeno del minerale, ma l'idrogeno deve essere prodotto e trasportato; la sua intensità emissiva dipende da come viene ottenuto. Aumentare la quota di rottame aiuta soltanto dove disponibilità e qualità permettono di soddisfare la specifica richiesta. Impianti integrati relativamente giovani, investimenti già realizzati e domanda di acciaio di gradi diversi rendono la transizione una sostituzione coordinata di capacità, non un interruttore che si può azionare ovunque insieme.

La distanza fra capacità annunciata e risultato effettivo chiarisce il problema. Nel Breakthrough Agenda Report 2025, l'IEA indicava circa 10 milioni di tonnellate di capacità di produzione di ferro a emissioni quasi nulle prevista per il 2030 e poco più di 80 milioni di tonnellate di capacità tecnicamente capace di

operare in quel modo. Una parte dei progetti era ancora iniziale e molta capacità prevedeva dapprima l'uso di gas naturale. Non erano 80 milioni di tonnellate già prodotte con emissioni quasi nulle. Il cambiamento prenderà forma soltanto quando minerale, riducente, elettricità, impianti, investimenti e acquirenti saranno disponibili nello stesso luogo e nello stesso tempo. Una billetta, una bramma o un coil con qualità definita è il risultato concreto di quell'incontro: solo allora il ferro, estratto dalla roccia o rientrato come rottame, è una materia che l'industria successiva può davvero acquistare e lavorare.

Fonti e riferimenti

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2025, Iron Ore

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-iron-ore.pdf

World Steel Association, World Steel in Figures 2026

https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2026/

World Steel Association, World Steel in Figures 2025

https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025.pdf

EUROFER, European Steel in Figures 2026

https://www.eurofer.eu/assets/european-steel-in-figures-2026/Steel-in-Figures-SIF-Final_printer.pdf

EUROFER, European Steel in Figures 2025

https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2025/European-Steel-in-Figures-2025_23062025.pdf

International Energy Agency, Iron and Steel Technology Roadmap

https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap

International Energy Agency, Breakthrough Agenda Report 2025, Steel

https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2025/steel

European Commission Joint Research Centre, Best Available Techniques Reference Document for Iron and Steel Production

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/IS_Adopted_03_2012.pdf

Unione europea, Regolamento (UE) n. 333/2011

https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:094:0002:0011:EN:PDF

Dworak, Rechberger e Fellner, How will tramp elements affect future steel recycling in Europe, supplemento

https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/20501/3/supplement-23682-1.pdf

International Labour Organization, Safety and health in the iron and steel industry

https://www.ilo.org/media/270686/download

04.12 – Bauxite e alluminio

La roccia e il tenore

Una lattina e un profilo per serramenti sembrano mostrare una proprietà semplice dell'alluminio: il metallo può cambiare forma e tornare in forno. Prima di essere metallo, però, è alluminio legato all'ossigeno dentro una roccia. Per ottenere una forma commerciabile occorre estrarre bauxite, separarne l'allumina, ridurre l'ossido con elettricità e infine colare e lavorare il liquido. Ogni passaggio cambia il nome della materia, la massa misurata e le condizioni che rendono possibile produrla. Il riciclo può abbreviare il percorso, ma richiede metallo già entrato nell'economia e disponibile come rottame di qualità adatta.

La bauxite non è un minerale puro. È una roccia nella quale l'alluminio compare soprattutto in minerali idrati, tra cui gibbsite, boehmite e diasporo, insieme a ossidi di ferro, silice, titanio e acqua. Due bauxiti con la stessa percentuale nominale di ossido di alluminio possono comportarsi diversamente nella raffineria: conta quanta allumina si riesce davvero a sciogliere, quale minerale la contiene e quanta silice reagisce con la soda. La gibbsite richiede in genere condizioni di digestione meno severe della boehmite e del diasporo. Il tenore della roccia, da solo, non determina quindi né il consumo di reagenti né la quantità di prodotto ottenuto.

Nei depositi vicini alla superficie l'estrazione avviene prevalentemente a cielo aperto. Si rimuovono suolo e copertura, si apre un fronte di scavo e si movimentano separatamente minerale e materiale che non alimenterà la raffineria. Il rapporto tra sterile e minerale dipende dalla geometria del deposito; una tonnellata venduta non descrive da sola il movimento terra necessario. Frantumazione, vagliatura e talvolta lavaggio preparano il materiale al trasporto e alla digestione. Dove si lava la bauxite, l'acqua può essere ricircolata, mentre i fini minerali separati vanno gestiti. Polveri, traffico di mezzi, stabilità dei fronti e ripristino del suolo sono questioni fisiche della miniera, non proprietà astratte di ogni tonnellata di alluminio.

La regola orientativa riportata dallo United States Geological Survey è circa quattro tonnellate di bauxite secca per due di allumina e una di alluminio:

4:2:1. Serve a vedere le trasformazioni, non a calcolare la resa di un giacimento qualsiasi. Se si parte, per esempio, da quattro tonnellate secche in questa rappresentazione semplificata, circa due diventano allumina raffinata; la tonnellata finale è metallo, non la somma dei tre prodotti. Umidità, mineralogia, allumina recuperabile e perdite cambiano il bilancio reale. Le produzioni mondiali non formano lo stesso bilancio: bauxite e allumina hanno anche destinazioni non metallurgiche, i flussi attraversano anni e scorte differenti e le statistiche misurano prodotti distinti.

Lo USGS valuta le risorse mondiali di bauxite in 55–75 miliardi di tonnellate. «Risorsa» non significa tutto materiale estraibile oggi a un costo dato: una riserva economica è una porzione definita con criteri ulteriori di recuperabilità. Un grande numero geologico non dice quanta bauxite sia accessibile a una particolare raffineria, né a quale prezzo o con quali effetti sul territorio. Il vincolo prossimo alla miniera è spesso la combinazione di qualità della roccia, gestione del suolo, acqua, trasporto e autorizzazioni.

L’allumina e il residuo

La raffineria Bayer riceve roccia preparata, non alluminio già separato. La bauxite frantumata incontra una soluzione concentrata e calda di soda caustica. Durante la digestione, in condizioni di temperatura e pressione scelte secondo i minerali presenti, i composti idrati di alluminio passano nel liquore come alluminato. Gran parte del ferro, del titanio e di altri solidi resta insolubile. Una silice particolarmente reattiva può sottrarre soda e allumina formando composti che finiscono nel residuo: perciò una roccia apparentemente ricca può essere meno favorevole di quanto suggerisca il solo tenore nominale.

Il liquore viene separato dai solidi mediante chiarificazione e lavaggi. La soluzione pulita viene raffreddata e seminata per far precipitare idrossido di alluminio; il materiale separato passa poi alla calcinazione, che elimina l’acqua legata e lascia polvere di ossido di alluminio, Al_2O_3. L’acqua, il vapore e la soluzione alcalina circolano fra più apparecchiature. Una parte della soda e del liquore torna al processo, ma il circuito ha reintegri, spurghi e perdite. Il prodotto della raffineria è allumina: deve ancora perdere il proprio ossigeno per diventare metallo.

Il calore è necessario soprattutto per preparare vapore, digerire il minerale e calcinare l'idrato. Il Joint Research Centre europeo riporta, per il riferimento mondiale del 2022 usato nel suo studio del 2024, circa 10,2 gigajoule per tonnellata di allumina raffinata. È un'intensità riferita a quel prodotto e al perimetro dello studio; non è l'energia di tutta la filiera per una tonnellata di alluminio. Recupero del calore, cogenerazione, combustibile, qualità della bauxite e integrazione degli impianti cambiano le prestazioni. Una raffineria che deve digerire minerali diversi non può essere descritta con un'unica temperatura valida per ogni vasca.

La separazione crea anche un altro flusso materiale: il residuo di bauxite, comunemente chiamato fango rosso. Il colore viene spesso dagli ossidi di ferro, ma non ne definisce una composizione costante. I solidi possono contenere composti di ferro, silice, alluminio, titanio, calcio e sodio; il liquore rimasto fra le particelle è alcalino. La massa dipende dalla roccia, dalla resa e dalle modalità di lavaggio e disidratazione. Un residuo umido e uno filtrato non hanno lo stesso denominatore di massa. Per stimare il residuo mondiale occorrerebbe una base verificata e omogenea per massa umida o secca, resa e composizione.

Lavaggi e recupero del liquore riducono la soda trascinata. Ispessimento e filtrazione possono trasformare una sospensione in una pasta o in un materiale adatto all'impilamento con meno acqua; altri siti usano bacini. Ogni scelta richiede controllo del percolato, stabilità delle strutture e monitoraggio anche dopo la chiusura. «Impilamento a secco» descrive una modalità di gestione, non l'assenza automatica di acqua o di rischio. Le soluzioni caustiche, le tubazioni in pressione, il calore e l'integrità dei depositi riguardano insieme chi lavora nella raffineria e le comunità circostanti. L'acqua prelevata, quella consumata e quella riutilizzata internamente devono essere contabilizzate separatamente, soprattutto nei bacini soggetti a stress idrico.

Il recupero di ferro, titanio o altri elementi e l'impiego del residuo in materiali da costruzione sono studiati e talvolta praticati, ma non trasformano qualsiasi deposito in una miniera pronta all'uso. Alcalinità, sali, variabilità della composizione, distanza dai possibili acquirenti e requisiti del prodotto limitano le applicazioni. Anche quando un utilizzo è tecnicamente possibile, occorre confrontare trattamento, trasporto e mercato con la quantità effettivamente disponibile. La quantità di residuo prodotta è dunque una conseguenza della

chimica del minerale e della raffineria, non un dettaglio che scompare quando l'allumina viene venduta.

Il metallo nella cella

L'allumina è un ossido molto stabile. Un forno che si limiti a scaldarla non la trasforma economicamente in metallo: la via industriale dominante è l'elettrolisi Hall-Héroult. La polvere viene alimentata in un bagno fuso a base di criolite, la cui composizione consente di operare intorno a 960–980 °C secondo la descrizione dell'International Aluminium Institute. Celle rivestite di carbonio sono collegate in serie e attraversate da corrente continua; anodi di carbonio entrano nel bagno. L'alluminio si raccoglie liquido sul fondo e viene spillato periodicamente. La cella è un reattore chimico ed elettrico che richiede alimentazione, controllo termico, materiali di rivestimento e manutenzione continua.

La reazione ideale si può scrivere come $2\ Al_2O_3 + 3\ C \rightarrow 4\ Al + 3\ CO_2$. Le masse molari mostrano che, per una tonnellata di alluminio, il minimo teorico è circa 1,89 tonnellate di allumina e 0,33 tonnellate di carbonio, con circa 1,22 tonnellate di CO_2 formata dalla reazione. Questo è il secondo bilancio didattico: la CO_2 non viene solo dalla centrale che fornisce corrente, perché l'ossigeno dell'allumina reagisce con l'anodo consumabile. Nella pratica entrano più allumina e carbonio a causa di perdite, ossidazioni e funzionamento reale. Il JRC riporta come riferimenti operativi circa 1,92 tonnellate di allumina e 0,40–0,45 di carbonio per tonnellata di primario; non si deve scambiare il minimo stechiometrico con una misura d'impianto.

L'anodo viene fabbricato con materiali carboniosi, sostituito man mano che si consuma e accompagnato da sistemi che raccolgono i fumi. Il trattamento può recuperare fluoruri e rimandarli al processo, ma restano esigenze di controllo delle emissioni e di gestione dei rivestimenti esausti. Quando l'allumina disciolta nel bagno scende troppo, un effetto anodico può generare perfluorocarburi, soprattutto CF_4 e C_2F_6. La loro massa è piccola rispetto a quella della CO_2, ma il loro effetto climatico per chilogrammo è migliaia di volte maggiore nell'orizzonte di cento anni. Il potenziale di riscaldamento globale, detto GWP dall'inglese Global Warming Potential, converte le emissioni dei diversi gas in CO_2 equivalente. L'IAI adotta dal 2024 i valori AR6 di 7.380 per CF_4 e 12.400 per C_2F_6. Frequenza degli effetti anodici e coefficienti adottati

influenzano quindi il risultato; una revisione dei GWP può cambiare la serie calcolata senza un'uguale variazione delle emissioni fisiche.

Il JRC riporta circa 14,1 megawattora di elettricità per tonnellata di alluminio primario nella media mondiale di riferimento del 2022. Il valore riguarda la riduzione elettrolitica nel riferimento citato: non è il contenuto energetico totale del prodotto, né misura la calcinazione, la miniera o la fabbricazione successiva. Le definizioni statistiche IAI distinguono inoltre elettricità in corrente alternata, rettificazione e corrente continua e delimitano in modo proprio gli ausiliari; la loro serie non include automaticamente colata e fabbrica degli anodi. Anche a parità di consumo elettrico per tonnellata, le emissioni indirette cambiano se l'elettricità arriva da carbone, idroelettrico o altre fonti.

Le celle funzionano in modo continuo e trattengono molto calore. Un'interruzione lunga può solidificare il bagno e danneggiare la linea: avere una fonte di energia poco costosa per qualche ora non basta. Occorrono fornitura affidabile, rete, contratti e gestione della potenza. Alta corrente, metallo liquido, calore, anodi e fumi definiscono anche rischi professionali specifici, da trattare con protezioni e procedure del sito. Non esiste un tasso mondiale verificato di incidenti confrontabile tra miniere, raffinerie, celle e rifusione. Il vincolo elettrico collega direttamente la fisica del metallo alle scelte di localizzazione industriale.

Dal metallo liquido alla forma vendibile

Lo spillaggio misura l'alluminio primario liquido prima di aggiunte di rottame o di elementi di lega nella definizione IAI. Un lingotto vendibile è un oggetto successivo. Il metallo passa a forni di attesa, dove si controllano composizione e temperatura; secondo il grado richiesto si aggiungono elementi, si degasa e si filtrano inclusioni prima della colata. La specifica chimica e la forma fisica non sono dettagli intercambiabili: una billetta adatta all'estrusione, una placca per laminazione e un pane destinato alla rifusione rispondono a lavorazioni successive diverse.

La colata può dare lingotti e pani, placche larghe, billette cilindriche o vergella. Il bagno solidifica con una struttura che influisce sulle operazioni seguenti; omogeneizzazione e controlli possono essere necessari per evitare difetti o ottenere deformazioni regolari. La placca viene riscaldata e fatta passare tra

cilindri che ne riducono lo spessore fino a nastri, coils o lamiere standardizzate. La billetta riscaldata può essere spinta attraverso una matrice: la sezione della matrice determina il profilo estruso. Queste prime lavorazioni producono ancora materiali forniti ad altre industrie. Tagliare, assemblare o fabbricare un serramento, una lattina o un componente d'automobile appartiene invece alle filiere dei prodotti finiti.

La deformazione richiede una lega compatibile con la forma voluta. Alcune leghe sono progettate per colata, altre per lavorazioni plastiche; elementi utili a una famiglia di prodotti possono essere contaminanti per un'altra. Esistono specifiche industriali per composizione, dimensione, superficie e proprietà, ma non si può attribuire a tutte le billette o lamiere una soglia chimica unica. Neppure la quotazione di alluminio primario standardizzato rappresenta il prezzo di tutte le leghe e di tutti i semilavorati. La quantità uscita dalla cella, quella entrata in colata e quella di profili conformi sono denominatori distinti.

Fondi di billetta, estremità tagliate, rifili di lamiera e scarti di colata possono tornare rapidamente al forno dello stesso stabilimento. Se composizione e origine sono note, questo runaround scrap è un ricircolo interno: compare nelle masse lavorate più di una volta, ma non è un nuovo afflusso di metallo dall'esterno. Contarlo come produzione primaria aggiuntiva o come rottame nuovo compravenduto gonfierebbe il bilancio. La resa commerciale dipende da geometrie, difetti, lega e processo; senza un bilancio d'impianto non si assegna una percentuale universale di scarto. Raffreddamento, lubrificanti, trattamento delle superfici e movimentazione di grandi pezzi caldi generano consumi e rischi propri di questa fase.

Il confine del capitolo è quindi una soglia materiale verificabile: alluminio e leghe nella forma standardizzata che altre imprese acquistano per fabbricare oggetti. Anche un coil sottile o un profilo complesso può essere un semilavorato se richiede ancora taglio e trasformazione per diventare bene d'uso. Seguire fino a questa soglia impedisce di chiamare «produzione di alluminio» qualsiasi massa di oggetti venduti, ma fa vedere che il percorso industriale non termina con il metallo liquido.

La seconda vita del metallo

Una via diversa parte dal metallo che l'economia ha già prodotto. Il rottame nuovo nasce durante la fabbricazione e arriva al commercio prima che il prodotto sia usato; quello vecchio torna da beni a fine vita. I rifili che circolano dentro lo stesso stabilimento, descritti nella fase precedente, formano invece una categoria interna. Una lamiera non rivestita e identificata per lega offre informazioni che un insieme di oggetti smontati, verniciati e mescolati può non conservare. La raccolta e la selezione dei rifiuti che preparano quest'ultimo materiale restano fuori da questa filiera; qui il punto di partenza è il rottame che può essere acquistato e caricato in un impianto metallurgico.

Prima della rifusione il materiale può richiedere separazione per lega, rimozione di rivestimenti, essiccazione e preparazione dimensionale. L'acqua intrappolata nella carica che incontra metallo liquido comporta pericoli immediati. Vernici, oli e altri contaminanti richiedono trattamento dei gas; l'ossidazione produce perdite metalliche e scorie. Il forno può essere alimentato con combustibile o elettricità e, dopo la fusione, il bagno viene corretto e colato in una forma commerciale. Anche questa via consuma energia e materiali e può generare residui: riciclare non significa recuperare il cento per cento della massa immessa.

La difficoltà decisiva è spesso la composizione. Il ferro non scompare automaticamente da una fusione di rottami di alluminio, e neppure rame o altri elementi di lega vengono rimossi semplicemente alzando la temperatura. Cariche mescolate possono essere inadatte a un prodotto che richiede composizione o comportamento nella deformazione più controllati. Si può separare meglio all'origine, orientare il metallo verso una lega compatibile oppure diluire alcuni elementi con materiale di composizione nota, anche primario. Ognuna di queste scelte ha un costo e un limite. Il fatto che una tonnellata di alluminio sia tecnicamente rifondibile non prova che possa sostituire una tonnellata di qualunque grado primario.

La via secondaria evita le trasformazioni chimiche ed elettriche della roccia in ossido e dell'ossido in metallo. Il JRC descrive per il riciclo un fabbisogno energetico molto minore di quello della produzione primaria, spesso riassunto come circa il 5% nel confine degli studi richiamati. È un confronto fra percorsi definiti, non una promessa di risparmio identico per ogni carica e ogni

prodotto. Se si includono raccolta, pulizia, trasporto, rifusione e fonte dell'elettricità, il risultato va ricalcolato con un perimetro dichiarato. Il materiale che resta per decenni in edifici o veicoli non è oggi disponibile per una domanda che cresce; anche con buoni tassi di ritorno serve metallo nuovo durante l'espansione dello stock in uso.

Le statistiche devono seguire questa distinzione. «Rottame raccolto» non è «metallo recuperato», «alluminio secondario prodotto» non è «contenuto riciclato» in ogni manufatto e la massa interna che torna più volte al forno non è una nuova produzione nazionale. Un tasso di riciclo degli imballaggi riguarda quella famiglia di prodotti, non tutto l'alluminio di un Paese. Le cifre di riciclo possono dunque essere alte e, contemporaneamente, una raffineria e uno smelter restare necessari per gradi specifici e per la crescita della domanda. La qualità, oltre alla quantità, determina quanto la seconda vita del metallo possa sostituire la prima.

Tre mappe per una filiera

Miniera, raffineria e smelter non seguono la stessa mappa. Lo USGS stima per il 2025 circa 440 milioni di tonnellate di bauxite mondiale in peso secco equivalente, 150 milioni di allumina in equivalente calcinato e 74 milioni di alluminio primario. Sono tre produzioni mondiali, con destinazioni e confini diversi. Per la bauxite la Guinea è stimata a 150 milioni di tonnellate, l'Australia a 97, la Cina a 87, il Brasile a 33 e l'India a 25. Queste masse descrivono estrazione nei rispettivi Paesi; non indicano quanta bauxite sia esportata o trasformata localmente.

La raffinazione sposta il baricentro: la Cina è stimata a 93 milioni di tonnellate di allumina su 150 mondiali, mentre Australia e Brasile ne producono rispettivamente 17 e 11. Nella fusione primaria la Cina è stimata a 45 milioni di tonnellate su 74, circa tre quinti del totale; seguono, a distanza, India, Russia, Canada ed Emirati Arabi Uniti fra i grandi produttori. La bauxite può attraversare un confine per diventare allumina e attraversarne un altro prima di arrivare alla cella. Le quote produttive non sono automaticamente quote di importazione, consumo o capacità; anche gli arrotondamenti e le stime nazionali vanno letti nell'anno indicato.

La geologia colloca il deposito, ma non basta a collocare la raffineria. Quest'ultima richiede combustibile o calore, soda, acqua, infrastrutture di trasporto e un luogo dove gestire il residuo. Lo smelter dipende in modo ancora più forte dalla continuità e dal costo della corrente, oltre che dalla rete e dai porti: per questo Canada, Norvegia e Islanda hanno un ruolo nella fusione che non corrisponde alla loro disponibilità di bauxite. Trasportare minerale, polvere di allumina o metallo comporta mercati e infrastrutture differenti. Un impianto integrato riduce alcuni passaggi logistici, ma non annulla i requisiti fisici di ogni fase.

Nel maggio 2026 l'International Aluminium Institute ha documentato un'interruzione che rende concreta questa dipendenza, usando dati preliminari riferiti ad aprile. La produzione primaria del Golfo, secondo i dati allora preliminari, è scesa a 10.989 tonnellate al giorno, rispetto alle 15.000 di marzo riviste e a circa 17.800 precedenti alle interruzioni. L'istituto collega il calo alle difficoltà di rifornimento e spedizione attraverso lo Stretto di Hormuz nel contesto della guerra. Il Golfo rappresentava, secondo IAI, circa l'8% della produzione primaria mondiale ma il 19% delle importazioni europee di primario: il secondo numero misura l'esposizione di uno specifico compratore, non una quota della produzione mondiale. I tassi giornalieri di aprile non dicono quanto sia stato prodotto nell'intero 2026 né descrivono da soli la situazione di settembre.

La filiera risulta così concentrata in punti diversi per ragioni diverse. Una difficoltà nella miniera riduce il minerale disponibile; una raffineria in crisi può interrompere la fornitura di allumina; un problema elettrico o logistico in uno smelter ferma il metallo primario. A valle, i produttori di forme standardizzate possono cercare fornitori o ricorrere a rottame compatibile, ma non sempre sostituiscono rapidamente una qualità con un'altra. Seguire l'oggetto fisico scambiato è il primo passo per leggere un rischio commerciale senza attribuire a un singolo Paese il controllo indistinto di tutta la catena.

La scala europea e il caso italiano

L'Unione europea compra, produce e ricicla alluminio, ma questi verbi misurano oggetti diversi. Nel quadro ricostruito dal JRC nel 2026, la produzione primaria UE era circa 1,2 milioni di tonnellate nel 2022, contro 2,7 milioni nel 2002; gli smelter operativi erano passati da 23 a 11. Il factsheet indica una

capacità primaria di circa 2,1 milioni di tonnellate all'anno. Capacità è la massa teoricamente producibile in determinate condizioni, produzione è quanto effettivamente uscito dalle celle. La capacità è presentata come valore approssimativo, mentre la produzione è datata 2022: il loro rapporto non fornisce un utilizzo preciso per quell'anno.

Un'altra figura JRC descrive l'approvvigionamento europeo nel 2020: circa 54% da importazioni nette, 39% da riciclo e 7% da produzione primaria UE nel perimetro rappresentato. Le quote descrivono le fonti dell'approvvigionamento rappresentate nella figura del 2020; la produzione dei soli smelter e la composizione dei prodotti venduti sono grandezze diverse. Non si può sommare il 39% del 2020 ai 1,2 milioni di tonnellate primarie del 2022 e ricavare la domanda del 2025. La dipendenza dall'estero varia inoltre lungo la catena: acquistare bauxite, allumina o metallo primario espone a mercati e strozzature differenti.

L'Europa possiede raffinerie e capacità di trasformazione, ma una capacità nominale non prova che tutti gli impianti siano in marcia nello stesso momento. La contrazione degli smelter primari riflette fra l'altro il vincolo energetico di un processo continuo; la presenza di riciclo non rende superfluo il primario per tutte le leghe. Uno studio della Commissione sulle materie prime critiche usa medie del 2016–2020 per descrivere dipendenze e origini dell'approvvigionamento: quelle percentuali storiche non sono saldi commerciali del 2025. Per misurare importazioni e esportazioni recenti occorrerebbe separare almeno bauxite, allumina, alluminio greggio e rottame, oltre a commercio interno ed esterno all'UE, con codici e pesi omogenei.

Per l'Italia le statistiche pubbliche disponibili non permettono di ricostruire una serie recente e omogenea che distingua produzione primaria, secondaria, capacità e commercio delle diverse forme. Questa lacuna non autorizza a concludere che tutte le attività siano assenti. La serie nazionale IAI dell'alluminio primario si ferma a settembre 2014. Questo dato si colloca nella crisi dello smelter di Portovesme: Alcoa dichiara che l'impianto di riduzione elettrolitica era fermo da novembre 2012 e che nel 2014 ne annunciò la chiusura definitiva. La fine della serie IAI non costituisce da sola la prova della data esatta di arresto, né offre una rendicontazione per gli anni successivi. Nel settembre 2025 il MIMIT descriveva il sito, passato a Sider Alloys, come oggetto di un progetto di rilancio e di lavori di revamping, non come produzione

primaria riavviata. Eurallumina è un'altra fase della filiera: una raffineria Bayer di allumina, per la quale il Ministero ha comunicato nel dicembre 2025 misure di continuità e interventi legati alla possibile ripresa. Né il progetto per lo smelter né l'annuncio sulla raffineria attestano tonnellate prodotte nel 2025–2026.

Anche la misura del riciclo richiede cautela. CIAL riporta per gli imballaggi italiani un tasso di riciclo del 68,2% nel 2024; il denominatore è quella categoria di imballaggi, con le regole del sistema di rendicontazione, non la produzione complessiva di alluminio secondario del Paese. Una statistica di materiale raccolto o avviato al riciclo non può riempire la casella mancante della metallurgia nazionale. L'Italia compare dunque come luogo di consumo, trasformazione e recupero nel quadro descritto dalle fonti, ma i pesi delle singole fasi devono restare aperti finché non si disponga di una tabella industriale e doganale verificata per anno e prodotto.

Il costo delle trasformazioni

Il prezzo di una tonnellata di bauxite, di allumina e di alluminio primario non rappresenta tre prezzi della stessa cosa. Alla roccia si aggiungono scavo, trasporto, soda, calore, gestione del residuo, anodi, elettricità continua, colata e capitale immobilizzato. Il prezzo di mercato del metallo comprende condizioni commerciali che non coincidono con il costo tecnico di una cella. Anche il rottame ha prezzi diversi secondo lega, pulizia e preparazione. Valori unitari doganali statunitensi o una quotazione spot riferita agli Stati Uniti non misurano il costo industriale globale e non sono una quotazione universale di tutte le forme vendute.

I 10,2 gigajoule per tonnellata di allumina riportati per Bayer e i 14,1 megawattora elettrici per tonnellata di primario riportati per Hall-Héroult hanno denominatori e vettori diversi. Per avvicinare le scale, si può usare il riferimento operativo JRC di circa 1,92 tonnellate di allumina per una di primario: 1,92 × 10,2 dà circa 19,6 gigajoule riferiti alla raffinazione a monte. L'elettricità della riduzione, 14,1 megawattora, equivale dimensionalmente a circa 50,8 gigajoule di energia elettrica finale. È una combinazione illustrativa di medie e confini di studio, non il bilancio verificato di un impianto né un totale di energia primaria. La conversione mostra il peso della cella senza assimilare il calore della raffineria all'elettricità erogata allo smelter.

Le emissioni rispondono a un'analoga separazione. In raffineria contano i combustibili usati per vapore e calcinazione; nella cella l'anodo genera CO_2 direttamente, gli effetti anodici possono generare PFC e l'elettricità acquistata ha emissioni a monte dipendenti dalla fonte. Il riciclo evita gran parte della rotta primaria, ma comporta fusione, trattamenti e perdite. Un dato delle sole emissioni dirette di smelter non va confrontato con un'impronta completa che comprende miniera, elettricità e trasporti. Anche la CO_2 e la CO_2 equivalente dei PFC richiedono metodi dichiarati. La domanda utile davanti a un numero climatico è quale prodotto, anno, fase e confine abbia al denominatore.

Usare elettricità a minori emissioni riduce la componente indiretta della fusione, purché l'approvvigionamento rimanga affidabile per celle continue; non impedisce agli anodi di carbonio di consumarsi. Migliore alimentazione dell'allumina e controllo degli effetti anodici riducono i PFC. Recupero del calore, efficienza e sostituzione di combustibili possono intervenire su Bayer. Anodi inerti, elettrificazione di ulteriori unità e cattura del carbonio sono opzioni con maturità, vincoli e costi diversi. Lo scenario di riconversione agli anodi inerti stimato dal JRC nel 2024 dipende da ipotesi su tecnologia e costo delle celle: non è un piano industriale già deliberato. Ridurre le emissioni di un passaggio senza esaminare elettricità, materiali e produzione residua può semplicemente spostarne una parte altrove.

La disponibilità di rottame compatibile rimane una leva concreta, insieme alla qualità della separazione e a una progettazione che faciliti il ritorno del metallo dopo l'uso. Ma gli edifici, i veicoli e gli impianti trattengono alluminio per anni: l'aumento dello stock in uso può richiedere produzione primaria anche mentre cresce la rifusione. I costi degli investimenti devono quindi essere letti con la vita degli impianti, la sicurezza della fornitura elettrica, il costo del capitale, la qualità del minerale e dei ritorni. Non c'è una sola tecnologia che cancelli simultaneamente residuo Bayer, anodi, elettricità e limiti metallurgici del rottame.

Alla fine della catena, una tonnellata di profili standardizzati non è mai stata semplicemente una tonnellata di roccia rinominata. Ha attraversato separazioni e reazioni, ha richiesto materia e energia e può incorporare metallo primario, secondario o entrambi. Per capire quantità, impatti e dipendenze bisogna chiedere ogni volta se la cifra riguarda bauxite secca, allumina calcinata, alluminio spillato, rottame entrato nel forno o forme commerciali conformi. È

questa distinzione, più della grandezza isolata di un totale mondiale, che rende leggibile la filiera dell'alluminio.

Fonti e riferimenti

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Bauxite and Alumina

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-bauxite-alumina.pdf

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Aluminum

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-aluminum.pdf

International Aluminium Institute, Primary Aluminium Production

https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/

International Aluminium Institute, The Aluminium Story, Mining Process

https://alustory.international-aluminium.org/mining-refining/process-mining/

International Aluminium Institute, The Aluminium Story, Refining Process

https://alustory.international-aluminium.org/mining-refining/process-refining/

International Aluminium Institute, The Aluminium Story, Bauxite Residue Management

https://alustory.international-aluminium.org/mining-refining/bauxite-residue-management/

International Aluminium Institute, The Aluminium Story, Reduction

https://alustory.international-aluminium.org/primary-production/reduction/

International Aluminium Institute, Primary Aluminium Smelting Energy Intensity

https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/

International Aluminium Institute, Aluminium Sector Greenhouse Gas Emissions

https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-aluminium-sector/

International Aluminium Institute, Perfluorocarbon PFC Emissions

https://international-aluminium.org/statistics/perfluorocarbon-pfc-emissions/

International Aluminium Institute, Gulf Aluminium Output Collapses, May 2026

https://international-aluminium.org/gulf-aluminium-output-collapses-by-40-of-pre-war-levels-as-global-supply-crisis-deepens/

European Commission Joint Research Centre, Decarbonisation Options for the Aluminium Industry, 2024

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC136525/JRC136525_01.pdf

European Commission Joint Research Centre, Mapping the Transition of the EU Aluminium Industry to Carbon Neutrality, 2026

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC144120/Aluminium_factsheet_JRC144120.pdf

Alcoa, Alcoa to Close Portovesme Smelter in Italy, 2014

https://news.alcoa.com/press-releases/press-release-details/2014/Alcoa-to-Close-Portovesme-Smelter-in-Italy/default.aspx

Ministero delle Imprese e del Made in Italy, Sider Alloys e rilancio del sito di Portovesme, 2025

https://www.mimit.gov.it/it/notizie-stampa/sider-alloys-mimit-interlocutori-internazionali-interessati-al-rilancio-sito-portovesme

Ministero delle Imprese e del Made in Italy, Eurallumina via libera alla continuità produttiva, 2025

https://www.mimit.gov.it/it/notizie-stampa/eurallumina-via-libera-alla-continuita-produttiva

CIAL, Italy Recycling Aluminium Packaging 2024

https://www.cial.it/en/italy-results-recycle-aluminium-2024/

04.13 – Rame

Il rame nella roccia

Il rame conduce bene l'elettricità e il calore, può essere deformato in forme sottili e mantiene queste proprietà dopo la rifusione, se la composizione rimane adatta. Per questo un catodo può diventare vergella, una barra o una lamiera destinata ad altre industrie. Il metallo commerciale, però, è l'ultimo risultato di una separazione: nella miniera non si estrae una massa di rame puro, ma una roccia nella quale il rame occupa una frazione spesso piccola.

La calcopirite e la bornite sono minerali solforati; la malachite, la cuprite e altri minerali alterati appartengono a famiglie chimiche diverse. I depositi possono essere porfirici, sedimentari o associati ad altri sistemi geologici. La loro forma determina come si scava; mineralogia, tenore e impurità determinano come il metallo può essere recuperato. Il tenore è la quota di rame contenuta nella massa di minerale considerata. Non dice da solo quanto metallo uscirà dall'impianto, perché una parte può restare nei residui o richiedere processi non convenienti. La differenza tra una risorsa geologica e una riserva recuperabile dipende anche da conoscenze, prezzi, tecnologia e condizioni del sito.

Si immagini un lotto didattico di 100 tonnellate di minerale secco con tenore dello 0,8% in massa. Contiene 0,8 tonnellate di rame; le altre 99,2 tonnellate comprendono minerali di accompagnamento e ganga. Quel valore misura il rame presente prima delle perdite di lavorazione. Inoltre non comprende lo sterile rimosso per raggiungere il banco minerario: se la copertura e il rapporto fra sterile e minerale cambiano, può cambiare enormemente la massa totale movimentata per ottenere la stessa quantità di rame contenuto. Umidità e criteri di misura devono essere tenuti costanti anche in un confronto apparentemente semplice fra tonnellate.

Nelle grandi miniere a cielo aperto si rimuove la copertura, si abbatte la roccia, la si carica e la si trasporta verso gli impianti. In altri depositi si scava in sotterraneo. Mezzi pesanti, fronti di lavoro, esplosivi, traffico interno e polveri rendono il rischio professionale concreto prima che cominci qualsiasi raffinazione. La separazione tra minerale e sterile richiede controllo geologico e

analisi: mandare all'impianto materiale troppo povero consuma capacità ed energia, mentre classificare come sterile una roccia recuperabile può perdere metallo. Lo sterile resta un flusso fisico da collocare e gestire sul territorio, distinto dai residui fini prodotti più avanti.

La natura del minerale introduce subito due percorsi. Molti solfuri seguono la via convenzionale della macinazione, della flottazione e della fusione; minerali ossidati e alcuni materiali idonei possono essere lisciviati e portati al catodo per estrazione con solvente ed elettrodeposizione. Esistono variazioni tecniche e non ogni solfuro è obbligato alla stessa via. Il bivio conta nei numeri: una quota significativa del rame da miniera raggiunge il metallo raffinato attraverso la seconda rotta senza diventare concentrato da fondere.

Concentrare prima di fondere

Per i solfuri avviati alla via termica, la roccia estratta viene frantumata e poi macinata. Ridurre la granulometria espone i granuli dei minerali di rame e permette di separarli dalla ganga. Quanto più finemente occorre macinare, tanto più la durezza e la quantità di roccia incidono sul lavoro dei mulini e sul consumo di energia. Un tenore inferiore, a parità di rame desiderato e recupero, richiede più minerale da trattare. Non esiste quindi un unico consumo elettrico per tonnellata di rame valido per ogni miniera: dipende dalla roccia, dall'impianto e da dove si fissa il confine del calcolo.

Nella flottazione, la polpa formata da particelle macinate e acqua incontra reagenti che favoriscono l'adesione dei minerali utili alle bolle d'aria. La schiuma raccoglie una frazione arricchita di rame; il resto lascia il circuito come residuo di concentrazione. Più passaggi di pulizia possono aumentare il tenore del concentrato, ma le scelte operative devono anche preservare il recupero. Il tenore misura la quota di rame nel prodotto; il recupero confronta il rame che esce in quel prodotto con quello entrato nel processo. Per valutare quanto rame iniziale sia stato salvato occorre quindi conoscere anche il recupero.

Riprendiamo le 100 tonnellate secche allo 0,8%: all'ingresso sono presenti 0,8 tonnellate di rame. Se la flottazione ne recupera il 90%, nel concentrato se ne trovano 0,72 tonnellate; le restanti 0,08 tonnellate non sono state recuperate in questo bilancio semplificato. Con un tenore del concentrato ipotizzato al 30%, la sua massa è 0,72 diviso 0,30, cioè 2,4 tonnellate. Il passaggio da 100 a

2,4 tonnellate non crea rame: sposta gran parte della massa priva del metallo utile fuori dal prodotto che sarà trasportato alla fonderia. Sono ipotesi didattiche, non dati di una miniera. Il 30% è un riferimento tipico indicato dall'International Copper Study Group (ICSG); a seconda di minerale e impianto i concentrati possono collocarsi grossomodo dal 20% a oltre il 40% di rame.

Il concentrato contiene ancora ferro, zolfo e altri elementi. L'umidità residua conta quando si paga o si trasporta una massa fisica, mentre il contratto può riferirsi al rame contenuto, a impurità e a condizioni di trattamento. Una nave carica di concentrato non trasporta tonnellate equivalenti di catodi. La separazione geografica fra miniera e fonderia nasce proprio dalla possibilità di spedire un materiale già arricchito, senza spostare tutta la roccia scavata. Anche il molibdeno o altri elementi associati possono richiedere circuiti separati; la loro presenza non autorizza a sommare le masse dei diversi prodotti come se fossero soltanto rame.

La frazione fine scartata dalla flottazione, spesso chiamata tailings, contiene acqua, particelle minerali e tracce di reagenti e metalli non recuperati. Può essere addensata, filtrata o depositata secondo sistemi diversi, ma necessita di controllo della stabilità, delle infiltrazioni e delle acque. Ricircolare acqua riduce il prelievo fresco senza cancellare il consumo netto per evaporazione, la necessità di reintegro o il rischio legato alla qualità. Polveri e rumore accompagnano frantumazione e macinazione; la sicurezza del deposito dei residui riguarda anche le comunità a valle. Quando il concentrato lascia questo impianto, il rame è più denso nel carico, ma è ancora un minerale da trasformare chimicamente.

Dal concentrato all'anodo

La fonderia riceve concentrati che non hanno una composizione fissa. Prima della fusione si possono miscelare carichi con tenori e impurità diversi, asciugarli e introdurli in un forno con aria arricchita di ossigeno. Nella via convenzionale dei solfuri, parte del ferro e dello zolfo viene ossidata. La silice aggiunta come fondente lega ossidi di ferro in una scoria, separabile dalla fase ricca di rame. Non è una semplice operazione di liquefazione: modifica la chimica della carica e trasferisce materiale in metallo intermedio, scoria, gas e polveri. Per conoscere la resa servono bilanci di impianto, perché una quota di rame può seguire i residui e venire recuperata in circuiti dedicati.

Il prodotto intermedio chiamato matte contiene rame e zolfo, oltre ad altri elementi in quantità dipendenti dalla rotta. Non è rame commerciale ad alta purezza. Nel convertitore, l'immissione di ossigeno prosegue l'ossidazione dello zolfo e del ferro, mentre si separano nuove scorie. Il rame che ne esce è detto blister, con un tenore tipico vicino al 98% secondo le definizioni ICSG. Il 98% caratterizza questo intermedio; matte e catodo occupano altri punti della catena e hanno composizioni differenti. Il nome descrive una forma impura, che deve ancora essere affinata per eliminare elementi incompatibili con le specifiche elettriche o di lavorazione.

Nel forno anodico il blister viene affinato al fuoco, controllando anche ossigeno e zolfo, e il metallo è colato in grandi piastre destinate all'elettroaffinazione. La composizione dell'anodo dipende dalla carica e dalla lavorazione precedente. Alcuni elementi accompagnatori potranno sciogliersi nell'elettrolita; altri finiranno nei fanghi anodici, dai quali possono essere recuperati metalli di valore. Questa diversità spiega perché le impurità non siano un dettaglio marginale del prezzo del concentrato: cambiano trattamento dei gas, gestione dei residui, qualità del catodo e possibile valore dei coprodotti.

Lo zolfo dei minerali solforati produce anidride solforosa, SO_2, nei gas di processo. Senza captazione e trattamento sarebbe una pressione importante sull'aria locale. Le fonderie moderne raccolgono i gas più concentrati, separano polveri e trasformano lo zolfo recuperato in acido solforico, oppure trattano il flusso con altre soluzioni compatibili con l'impianto. Nella via a contatto, SO_2 viene ossidata cataliticamente a SO_3; quest'ultima è assorbita in acido solforico concentrato, regolando l'acqua del circuito. Il rapporto di massa teorico mostra il potenziale della trasformazione: una tonnellata di zolfo, se convertita interamente, corrisponde a circa 3,06 tonnellate di H_2SO_4 puro. Non è la produzione garantita per tonnellata di minerale: occorrerebbero il contenuto di zolfo della carica e le rese effettive di captazione e conversione.

L'acido può essere un prodotto vendibile o un input di altri processi, ma richiede capacità di stoccaggio, trasporto e un mercato. La gestione dell'SO_2 non si esaurisce quindi nella presenza di un impianto: contano captazione dei gas primari e secondari, fermate, manutenzione, qualità dei concentrati e sbocchi del coprodotto. Le conclusioni europee sulle migliori tecniche disponibili fissano, per emissioni convogliate di SO_2 nella produzione primaria del rame, intervalli di livelli associati alle tecniche di 50–500 milligrammi per

metro cubo normale, secondo condizioni di misura specifiche. Sono riferimenti autorizzativi, non la media degli impianti nel mondo né tonnellate emesse per tonnellata di rame.

Scorie di ferro e silice, polveri con metalli e fanghi richiedono analisi e gestione distinta. Arsenico e altri elementi possono concentrarsi in alcuni flussi secondo la carica. Gas caldi, SO_2, polveri, acido e metallo liquido espongono inoltre i lavoratori a rischi differenti da quelli della miniera. Il fatto che il concentrato abbia ridotto la massa da trasportare non ha eliminato la materia indesiderata: la fusione la distribuisce in uscite che devono avere un destino fisico e controllato. Solo dopo l'affinazione al fuoco e la colata dell'anodo comincia il passaggio elettrochimico verso un metallo di purezza molto maggiore.

Due strade verso il catodo

Nell'elettroaffinazione, gli anodi di rame ottenuti dalla via termica vengono immersi in un elettrolita acido insieme ai catodi su cui il rame si deposita. La corrente dissolve il rame dell'anodo e lo ricostruisce sul catodo. L'anodo è consumato nel processo; la soluzione non è semplicemente una vasca di lavaggio. Occorre controllare composizione dell'elettrolita, temperatura, corrente e deposizione per evitare difetti e per mantenere la qualità richiesta. Il catodo di alta purezza descritto dal Factbook ICSG supera il 99,99% di rame, un livello ben diverso dal circa 98% del blister. La definizione doganale generale di «rame raffinato» copre tuttavia una famiglia più ampia della singola specifica di catodo ad alta purezza.

L'elettroaffinazione separa le impurità in modi diversi: alcune restano in soluzione e richiedono controllo dell'elettrolita, mentre altre, incluse componenti di valore, si raccolgono nei fanghi anodici. Acidi, nebbie, movimentazione di piastre pesanti ed elettricità richiedono protezioni e manutenzione. L'elettricità consumata non può essere attribuita a tutta la filiera con un coefficiente unico senza aggiungere macinazione, fusione, trasporti e origine della corrente. Il catodo può essere venduto a un utilizzatore di semilavorati, ma non ogni catodo mondiale proviene da un anodo di fonderia.

La seconda via prende avvio da minerali e materiali che possono rilasciare rame in soluzione. Una lisciviazione, spesso applicata a cumuli di minerale preparato,

mette la soluzione in contatto con la roccia. Il liquido arricchito passa all'estrazione con solvente, chiamata SX: il rame viene selezionato e trasferito a una soluzione più adatta alla fase elettrolitica. Nell'elettrodeposizione, chiamata EW, la corrente deposita rame al catodo. Qui gli anodi sono insolubili; non forniscono rame dissolvendosi come accade nell'elettroaffinazione. Il rame arriva invece dalla soluzione alimentata dal circuito di lisciviazione e purificazione.

Acqua, acido, reagenti, elettricità e controllo delle soluzioni sono parte materiale di questa rotta. Se la lisciviazione avviene su cumuli, contano impermeabilizzazione, raccolta dei liquidi e gestione del materiale dopo il trattamento. La SX-EW evita la sequenza fonderia-convertitore per il materiale idoneo, ma non elimina la miniera né rappresenta un sostituto universale della via termica. Anche il confronto climatico richiede il tipo di minerale, l'intensità dell'elettricità e il confine del bilancio: saltare un forno non basta a quantificare da solo l'impatto totale.

Nel 2024 il Factbook ICSG attribuisce circa 4,8 milioni di tonnellate di rame alla via SX-EW. Rapportate ai 22,955 milioni di tonnellate di rame contenuto della produzione mineraria mondiale riportati dalla tabella ICSG, danno circa il 20,9%: è una nostra divisione fra due grandezze espresse come rame da miniera. Il denominatore è il rame contenuto prodotto in miniera; la massa della roccia e la produzione raffinata mondiale rispondono ad altre domande. La misura rende visibile perché una narrazione che mandasse automaticamente tutto il minerale allo smelter lascerebbe fuori una parte importante del sistema. Entrambe le rotte possono produrre catodi commerciabili; è il percorso a monte, con i suoi residui e consumi, che cambia.

Rottame e prime forme commerciali

Anche quando il catodo soddisfa una specifica elevata, la storia del rame non è fatta soltanto di materiale nuovo da miniera. Un impianto che cola o lamina può recuperare sfridi e ritorni di composizione nota all'interno del proprio ciclo. Fuori da questo ricircolo, l'ICSG distingue il rottame nuovo generato dalla fabbricazione prima dell'uso del prodotto e il rottame vecchio recuperato da beni che hanno terminato la loro vita. La raccolta e la separazione dei rifiuti hanno una loro filiera; per fonderie e primi trasformatori il punto decisivo è quando il materiale arriva con qualità, disponibilità e prezzo definiti. In questa

filiera il prezzo di acquisto dipende dal metallo recuperabile, dalla pulizia e dai costi di trattamento.

Rame pulito, separato e di composizione conosciuta può entrare direttamente in una rifusione per una forma o lega compatibile. Una miscela di rame con stagno, piombo, rivestimenti o altri materiali può richiedere preparazione, fusione e affinazione più complesse, fino alla produzione di anodi e al ritorno all'elettroaffinazione. L'ottone e il bronzo sono leghe, non masse di rame puro. La conducibilità richiesta a una vergella per usi elettrici restringe le impurità tollerabili; altre forme e leghe hanno specifiche diverse. «Riciclabile» descrive una possibilità tecnica, mentre il rame effettivamente reimmesso dipende da raccolta, qualità, perdite, domanda industriale e convenienza del percorso.

Nel 2024 la produzione mondiale di rame raffinato secondario riportata dall'ICSG è 4,705 milioni di tonnellate, a fronte di 27,414 milioni di tonnellate di raffinato totale. Il rapporto è circa il 17,2%. Il denominatore è il raffinato, non tutto il rame impiegato nell'industria: il rottame rifuso direttamente nei semilavorati o nelle leghe non compare come raffinato secondario. Per questo il 17,2% non è il tasso complessivo di impiego del rottame, né misura quanto rame sia stato raccolto a fine vita. La distinzione conta quando si confrontano la crescita della domanda e la possibilità che il riciclo riduca il fabbisogno di miniera. Senza sapere quanta materia passa davvero per ciascuna rotta, una sola percentuale descrive solo una parte del recupero.

Il catodo è una forma di vendita e una materia prima dei primi utilizzatori. Per ottenere vergella, il rame è rifuso, colato e laminato in una forma continua standardizzata, che altri stabilimenti potranno trafilare in fili secondo diametro e destinazione. Barre, verghe e profili richiedono processi di colata e deformazione appropriati; lastre e nastri derivano da laminazione, mentre tubi e altre forme seguono lavorazioni specifiche. Non basta chiamarli tutti «rame»: massa, lega, purezza, dimensioni e condizione superficiale determinano che cosa può fare l'acquirente. Il passaggio da catodo a semilavorato comporta altra energia, sfridi e controlli di qualità, ma non equivale ancora alla fabbricazione di un cavo o di un'apparecchiatura.

La classificazione doganale del Sistema Armonizzato (HS) separa, fra l'altro, i catodi di rame raffinato nella voce HS 740311 e il rottame nella voce HS 7404; barre e profili, fili, lastre e tubi appartengono ad altri gruppi. Questi codici descrivono oggetti scambiati, non una sequenza di masse equivalenti di rame

puro. Un carico di rottame può comprendere leghe e impurità; una fattura di semilavorato incorpora lavorazioni oltre al valore del metallo. La prima trasformazione conclude qui il percorso del capitolo: il prodotto standardizzato conserva una destinazione industriale aperta, mentre la costruzione dell'oggetto finale appartiene alla filiera successiva.

Le geografie della filiera mondiale

Una mappa delle miniere non è una mappa delle fonderie, e nessuna delle due coincide necessariamente con quella dei produttori di vergella o degli utilizzatori finali. Secondo lo United States Geological Survey, nel 2024 il Cile ha prodotto circa 5,51 milioni di tonnellate di rame contenuto da miniera, la Repubblica Democratica del Congo 2,99 milioni e il Perù 2,74 milioni. Il dato è metallo contenuto, non minerale scavato. Le differenze fra paesi dipendono da giacimenti, capacità e rotte: parte del rame minerario può diventare catodo con SX-EW vicino alla miniera, parte viaggia come concentrato verso un impianto termico anche lontano. La geografia del lavoro e dei residui segue questa separazione di fasi.

La tabella ICSG aggiornata a settembre 2026 registra per il mondo, nel 2024, 22,955 milioni di tonnellate di rame da miniera, 23,2755 milioni di produzione degli smelter, 27,4135 milioni di rame raffinato e 27,4199 milioni di uso raffinato. Le quattro cifre misurano stadi diversi: la prima serie misura rame contenuto nell'output minerario, la seconda un output intermedio di fusione, la terza comprende anche raffinato secondario e la quarta l'assorbimento di raffinato da parte dei primi utilizzatori. Rottami, scambi di materiali intermedi e scorte spiegano perché livelli e variazioni non debbano coincidere anno per anno. Tracciare davvero ogni tonnellata richiederebbe bilanci e definizioni compatibili per ogni fase.

Per il 2025, ancora indicato come preliminare nella stessa tabella, i quattro valori diventano rispettivamente 23,205; 24,3751; 28,6631 e 28,2005 milioni di tonnellate. L'aumento del raffinato e il diverso andamento dell'uso producono un saldo mondiale del raffinato indicato dall'ICSG in circa 463 mila tonnellate per quell'anno. È una misura di mercato all'interno delle definizioni della tabella, soggetta alle revisioni dei dati e alle convenzioni sulle scorte; non equivale a un accumulo di rame nelle miniere né alla capacità di produrre negli anni successivi. Nel 2024 lo stesso saldo era vicino all'equilibrio, circa meno 6

mila tonnellate, e la variante corretta per determinate scorte cinesi aveva un valore diverso.

L'aumento della produzione raffinata può dipendere dal materiale primario, dal riciclo e dall'assetto degli impianti; non dimostra che la produzione mineraria aumenti nella stessa misura. Il Factbook ICSG presenta una capacità mineraria mondiale di circa 28,4 milioni di tonnellate di rame nel 2024 e una prospettiva di 32,3 milioni per il 2028. La capacità descrive un potenziale secondo il perimetro del documento; la prospettiva include futuro sviluppo. Dividere la produzione osservata per una cifra che combina impianti e progetti non darebbe un tasso di utilizzo affidabile. Fermate, tenori, approvvigionamento idrico, lavorazione e tempi di avvio fanno sì che la capacità nominale non si trasformi automaticamente in tonnellate vendibili.

Il commercio materializza le distanze fra queste mappe. Minerali e concentrati, matte e anodi, catodi, rottami e semilavorati attraversano confini diversi con pesi lordi e contenuti di rame differenti. Un paese può estrarre poco rame e raffinarne molto importando concentrati o altri intermedi; può produrre catodi e importarli comunque per qualità, tempi o localizzazione; può vendere rottame mentre acquista metallo raffinato. Senza flussi distinti per forma e partner, parlare di «autosufficienza del rame» riduce un sistema a una cifra che non lo descrive.

Europa e Italia nella catena

La tabella geografica pubblica dell'ICSG offre un riferimento europeo, ma la riga è denominata «Unione europea + Regno Unito». Per il 2024 indica 762,9 mila tonnellate di rame da miniera, 2.314,9 mila tonnellate di produzione di smelter, 2.403,2 mila tonnellate di raffinato e 2.949,3 mila tonnellate di uso raffinato. La quantità lavorata nelle fonderie supera quindi il rame estratto all'interno di quell'area: è coerente con l'esistenza di approvvigionamenti esterni e altri flussi, ma la tabella non fornisce da sola le quantità importate di concentrato. Il Regno Unito fa parte dell'aggregato ICSG: quei numeri non sono valori UE-27. Un'altra riga, «Europe (post-1992)», segue ancora un perimetro geografico differente.

Anche sottrarre 2.403,2 da 2.949,3 dà soltanto 546,1 mila tonnellate di differenza fra uso e produzione raffinata nell'aggregato. Per chiamarla

importazione netta di raffinato occorrerebbe ricostruire importazioni, esportazioni e scorte nella stessa definizione; per descrivere il fabbisogno totale bisognerebbe inoltre considerare rottame, concentrati e semilavorati. Gli scambi fra membri dell'area si compensano in un bilancio territoriale coerente. La sottrazione aiuta a porre una domanda, non a risolvere tutti i flussi. Il preliminare 2025 ICSG registra, nello stesso perimetro UE + Regno Unito, circa 749,7 mila tonnellate da miniera, 2.311,2 mila da smelter, 2.391,1 mila di raffinato e 2.961,0 mila di uso: neppure questa sequenza è una serie UE-27.

Per l'Italia occorre separare origine geologica e industria. Secondo ISPRA, l'estrazione nazionale di minerali metalliferi era inesistente nel quadro pubblicato nel 2024, pur essendo noti depositi di rame e siti minerari storici. La filiera italiana opera invece nella trasformazione: Assomet rileva la produzione nazionale di semilavorati di rame e leghe. La descrizione pubblica dell'indagine Istat PRODCOM non fornisce un totale riconciliato di catodi, raffinato secondario e semilavorati. L'assenza di estrazione nazionale rende necessario l'apporto di metallo e materiali secondari alla trasformazione; per quantificarne le diverse forme servono serie omogenee per fase e periodo.

Un'analisi doganale affidabile dovrebbe scegliere un anno, i partner, il flusso e le voci corrette. HS 2603 riguarda minerali e concentrati di rame; HS 740311 individua i catodi nella famiglia del raffinato; HS 7404 riguarda rifiuti e rottami. Le masse doganali del concentrato e del rottame non equivalgono al loro contenuto di rame, né possono essere sommate ai catodi come se fossero tre misure della stessa produzione. Per l'Unione europea servirebbe anche separare scambi interni ed esterni e usare i codici più dettagliati pertinenti all'anno. Un saldo italiano verificabile richiede record dichiarati e riconciliati per voce, partner, flusso e massa netta: le anteprime aggregate di UN Comtrade non bastano a calcolarlo.

Questa cautela non rende l'Italia irrilevante. Indica semplicemente la scala alla quale i dati raccolti consentono un'affermazione precisa: la produzione e l'uso dell'area UE + Regno Unito sono misurati, mentre per ripartire i flussi fra UE-27 e singoli paesi occorrono altre tabelle controllate. La domanda nazionale di catodi, rottame e semilavorati e la presenza di impianti hanno significati diversi. Un paese inserito nella trasformazione e negli scambi può dipendere dall'estero per alcune forme e restare attivo in altre; la sua posizione non è descritta dalla sola presenza di una miniera sul territorio.

Il costo delle trasformazioni

Il prezzo del rame raffinato offre un riferimento per gli scambi, ma non paga indistintamente tutti i passaggi della filiera. Un concentrato è valutato considerando metallo recuperabile, condizioni di trattamento, raffinazione, impurità e possibili crediti per altri elementi; un catodo ha una qualità, un luogo e tempi di consegna; un semilavorato include lavorazioni ulteriori. Lo USGS riporta per il 2024, nella propria tabella statunitense, medie di 431,8 centesimi di dollaro per libbra per il catodo dei produttori USA, 421,6 per COMEX High Grade e 414,7 per LME Grade A cash. Anche quando si riferiscono tutti al rame, non sono tre misure dello stesso costo di produzione o tre prezzi della stessa consegna. I valori 2025 nella scheda sono stime e non vanno trasformati in una contabilità mondiale degli impianti.

Prima di quel prezzo stanno investimenti con tempi diversi: accesso al giacimento, strade e movimento terra, impianti di macinazione, acqua, depositi dei residui, fonderia, cattura dei gas, circuito di acido, raffineria e collegamenti elettrici. Ogni passaggio può diventare un collo di bottiglia. Una capacità mineraria annunciata non aggiunge subito concentrato commerciabile, e una nuova fonderia ha bisogno di carica adatta e di un destino per scorie, polveri e acido. Le oscillazioni dei prezzi possono modificare quali giacimenti siano convenienti, ma non comprimono automaticamente autorizzazioni, costruzione, sviluppo della miniera e avviamento in pochi mesi.

Nella fonderia lo zolfo è un problema di emissioni locali e una possibile materia prima dell'acido. Le conclusioni europee sulle migliori tecniche disponibili indicano, per lo scarico diretto di acque trattate, livelli associati alle tecniche di 0,05–0,5 milligrammi di rame per litro e condizioni specifiche anche per l'arsenico. Sono concentrazioni dell'effluente in una cornice autorizzativa, non la quantità totale di metallo scaricata da una fabbrica o la media mondiale. Per passare dalla concentrazione alla massa occorrerebbe conoscere la portata; per valutare l'effetto, il corpo idrico e le condizioni locali. Lo stesso principio vale per le polveri convogliate: la loro concentrazione non dice quanti residui solidi siano stati generati e gestiti altrove. L'esposizione di lavoratori e comunità dipende dai luoghi e dalle operazioni, dalle miniere ai depositi e agli impianti. Le fonti esaminate non offrono una serie globale omogenea di occupati e

incidenti per l'intera catena: un tasso aziendale descriverebbe soltanto il suo perimetro.

La pressione climatica segue combustibili, calore ed elettricità in proporzioni che cambiano fra le rotte. Mulini e pompe usano corrente già all'inizio; la fusione richiede processi termici e trattamento dei gas; elettroaffinazione ed EW richiedono elettricità; il rottame evita parte dei passaggi primari solo quando sostituisce davvero materiale nuovo con qualità comparabile. Una rete meno emissiva può ridurre la componente indiretta, mentre migliorare recupero e macinazione può contenere energia per tonnellata di rame ottenuta. Se il tenore cala o la roccia diventa più difficile da trattare, gli stessi miglioramenti possono essere controbilanciati dalla maggiore massa lavorata. Senza un confine comune non è corretto attribuire un unico valore di energia o CO_2 a ogni tonnellata di «rame».

L'International Energy Agency, nello scenario delle politiche dichiarate (Stated Policies Scenario, STEPS) del Global Critical Minerals Outlook 2025, prospetta una domanda di rame superiore del 30% al livello di partenza entro il 2040. Per il 2035 valuta che miniere esistenti e progetti annunciati lascerebbero un divario implicito pari al 30% del fabbisogno primario minerario previsto nello scenario. È una relazione fra ipotesi di domanda e una pipeline di offerta, non una carenza già osservata né la prova che tutti i progetti annunciati saranno realizzati. Nuove scoperte, prezzi, ritmi autorizzativi, recupero, sostituzioni e domanda effettiva possono cambiare il quadro.

Il rame non diventa disponibile quando viene scoperto un giacimento, annunciata una raffineria o dichiarato riciclabile un prodotto. Diventa disponibile quando roccia, processi, acqua, energia, controllo delle impurità, impianti e scambi consegnano una forma che un altro stabilimento può davvero usare. Il percorso dalle 100 tonnellate di roccia dell'esempio al concentrato, dal minerale al catodo e dal catodo alla vergella rende visibile la domanda centrale del capitolo: quanto materiale e quante trasformazioni servono perché una piccola quota di metallo dispersa nella roccia diventi una materia prima standardizzata.

Fonti e riferimenti

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Copper

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-copper.pdf

International Copper Study Group, World Copper Factbook 2025

https://icsg.org/copper-factbook/

International Copper Study Group, Copper Bulletin settembre 2026, Table 1

https://icsg.org/wp-content/uploads/Table1.pdf

International Copper Study Group, Copper Bulletin settembre 2026, Table 2

https://icsg.org/wp-content/uploads/Table2.pdf

International Copper Study Group, Definitions of Copper Products and Trade

https://icsg.org/wp-content/uploads/2021/12/Definitions.pdf

International Copper Study Group, What Is Copper

https://icsg.org/what-is-copper/

International Copper Study Group, Copper Recycling

https://icsg.org/copper-recycling/

International Copper Study Group, Statistical

https://icsg.org/statistical/

Istituto nazionale di statistica, Estrazioni di risorse minerali non energetiche

https://www.istat.it/sistema-informativo-6/estrazioni-di-risorse-minerali-non-energetiche-e-acque-minerali-naturali/

Istituto nazionale di statistica, Indagine PRODCOM

https://www.istat.it/informazioni-sulla-rilevazione/prodcom/

ISPRA, Materie prime critiche e siti minerari in Italia, 2024

https://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2024/materie-prime-critiche-ecco-quali-e-dove-si-trovano

Assomet, Circolari statistiche sulla produzione italiana di semilavorati di rame e leghe

https://www.assomet.it/prodotti/

Commissione europea, Decisione di esecuzione UE 2016/1032 sulle migliori tecniche disponibili per i metalli non ferrosi

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016D1032

International Energy Agency, Global Critical Minerals Outlook 2025, Overview of outlook for key minerals

https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/overview-of-outlook-for-key-minerals

United States Environmental Protection Agency, AP-42 Section 8.10, Sulfuric Acid

https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch08/final/c08s10.pdf

04.14 – Piombo, zinco e stagno

Tre metalli nella roccia

Una vena metallifera può portare insieme piombo e zinco. Nella galena il piombo è legato allo zolfo; nella sfalerite lo è lo zinco. Le due specie possono essere disseminate nella stessa roccia, insieme ad altri minerali. Lo stagno segue più spesso un'altra storia: la sua principale fonte commerciale è la cassiterite, un ossido che può restare nella roccia originaria oppure accumularsi, dopo l'erosione, nei sedimenti. La vicinanza geologica di due metalli non implica dunque un'identica strada per separarli, così come la comune destinazione in una fonderia non cancella la differenza tra un solfuro e un ossido.

Per aprire una miniera occorre conoscere la geometria del corpo mineralizzato, il tenore e la distribuzione delle specie utili. La massa scavata comprende roccia che porta il metallo, materiali sterili rimossi per raggiungerla e ganga che sarà separata in seguito. La massa di metallo contenuto si assottiglia nel passaggio dalla roccia al concentrato e poi al prodotto raffinato. Le rese dipendono dalla mineralogia e dalle singole operazioni; un tenore tipico assegnato indiscriminatamente ai tre metalli nasconderebbe proprio le decisioni che rendono coltivabile un deposito. Anche una riserva classificata è una quantità recuperabile secondo conoscenze e condizioni economiche definite, non un conto alla rovescia geologico.

Nei giacimenti misti, il valore di argento e di altri elementi associati può cambiare l'economia del progetto, ma la loro presenza non garantisce un ricavo separato. Occorrono un circuito capace di recuperarli e una specifica commerciale. La miniera, la fabbrica del concentrato e la raffineria possono appartenere a imprese e Paesi diversi: il contenuto metallico che esce dal primo stabilimento deve ancora percorrere diversi stadi prima di diventare un lingotto acquistabile.

Le destinazioni finali spiegano la richiesta di qualità. Il piombo alimenta soprattutto la filiera delle batterie al piombo e trova anche impiego in leghe; lo zinco è richiesto in larga misura per proteggere l'acciaio dalla corrosione e per alcune leghe; lo stagno serve, fra l'altro, a saldature, rivestimenti, leghe e

prodotti chimici. Qui questi impieghi indicano perché impurità e composizione contano. La costruzione della batteria, la zincatura di un manufatto e la fabbricazione di componenti elettronici iniziano oltre il confine della materia prima. Prima di arrivarci, bisogna trasformare un minerale eterogeneo in un flusso riconoscibile e trattabile.

Il campionamento è una decisione industriale, oltre che geologica. Un saggio su pochi frammenti può individuare un minerale promettente, mentre progettare una miniera richiede di stimare come tenore e associazioni varino nello spazio e nel tempo. Se piombo e zinco si distribuiscono diversamente nel corpo, cambiano il piano di scavo e il carico dei due circuiti di concentrazione. Per lo stagno, distinguere un deposito in roccia da un accumulo sedimentario orienta fin dall'inizio il metodo di coltivazione e l'impianto.

Separare prima di raffinare

Un impianto di preparazione rende accessibili minerali che nella roccia sono mescolati su scale molto piccole. Frantumazione e macinazione liberano i grani utili dalla ganga; il materiale viene classificato per dimensione e avviato alla separazione. Macinare più finemente può aumentare la liberazione, ma richiede energia e può produrre particelle difficili da recuperare. Perciò la scelta del grado di macinazione è un compromesso fisico, specifico del deposito e dei circuiti a valle.

Quando galena e sfalerite coesistono, la flottazione selettiva può ottenere un concentrato ricco di piombo e un altro ricco di zinco. Reagenti e condizioni della polpa favoriscono in momenti diversi l'adesione delle particelle minerali alle bolle d'aria; la schiuma le trascina fuori dalla miscela. Una frazione di piombo segue il concentrato di zinco e viceversa, mentre altre specie restano nei residui: la separazione è selettiva, ma imperfetta. Per valutare l'operazione servono almeno il tenore dell'alimentazione, quello di ciascun concentrato e la percentuale di metallo recuperata. Un concentrato più ricco può anche essere stato ottenuto perdendo una parte maggiore del metallo iniziale.

La cassiterite, più densa di molti minerali di ganga, si presta in condizioni adatte a separazioni gravimetriche. Tavole, spirali e altri dispositivi sfruttano il diverso movimento delle particelle nell'acqua o in un mezzo di separazione; granulometria, associazione mineralogica e caratteristiche del deposito

determinano il risultato. Nei sedimenti alluvionali la concentrazione naturale ha già selezionato parte del materiale, ma l'estrazione deve comunque distinguere il minerale dalla sabbia e dagli altri granuli pesanti. Nei corpi in roccia dura vengono prima abbattuti e frantumati i materiali. In entrambi i casi il materiale concentrato deve ancora essere ridotto e raffinato.

La preparazione produce un secondo flusso, spesso molto più voluminoso del concentrato: sterili fini e acqua di processo. La loro composizione decide se vadano separati, ricircolati, contenuti o trattati; la stabilità dei depositi di residui dipende dal progetto e dalla gestione nel tempo. Polveri durante frantumazione e trasporto, macchinari in movimento e contatto con reagenti espongono i lavoratori a rischi diversi da quelli della fusione. Prelievo, restituzione e perdite descrivono quanta acqua circola e quanta ne viene effettivamente consumata. Dal concentrato si diramano poi tre percorsi, governati dalla diversa chimica di Pb, Zn e Sn.

Il concentrato viene disidratato prima del trasporto e della lavorazione. La specifica di consegna riguarda contenuto del metallo pagabile, umidità ed elementi che disturbano il processo successivo. Due carichi con uguale peso possono avere valore e destinazione diversi. Se la separazione del deposito misto è incompleta, la raffineria riceve impurità che dovrà rimuovere, concentrare in un sottoprodotto o confinare in un residuo. Il confine tra miniera e metallurgia è già un contratto sulla qualità materiale, oltre che un passaggio di proprietà.

Il piombo dalla galena al metallo

La galena porta il piombo sotto forma di solfuro. Per ottenere il metallo occorre rompere quel legame e separare lo zolfo, gli altri elementi e la ganga. In alcune configurazioni il concentrato viene prima agglomerato e parzialmente ossidato; in altre alimenta processi di fusione più diretti. Temperatura, apporto di ossigeno, fondenti e materiale riducente determinano quali componenti passano nel metallo e quali nella scoria o nei gas. Descrivere una sola sequenza di forni come obbligatoria per tutti gli stabilimenti cancellerebbe la varietà delle tecnologie impiegate.

Nel forno la scoria è uno strumento di separazione: i fondenti aiutano a raccogliervi componenti della ganga e ossidi indesiderati. Una parte del piombo

può restare trascinata nei residui o nelle polveri. I ritorni al processo migliorano il recupero quando il trattamento ulteriore è compatibile con il controllo delle impurità. La domanda per batterie collega questo metallo primario al materiale che tornerà dopo l'uso.

Il prodotto metallico grezzo è chiamato bullion di piombo. Ha attraversato la separazione principale dalla roccia, ma contiene ancora elementi che possono essere indesiderati oppure recuperabili: rame, argento, antimonio e altri, a seconda della carica. Trattamenti successivi li concentrano in drossi, cioè croste e schiume superficiali ricche di ossidi e metalli, oppure in altre fasi intermedie e residui; la scelta dipende dalla composizione richiesta al prodotto e dal valore dei coprodotti. L'affinazione può condurre a piombo raffinato o a leghe controllate, colate in pani e altre forme standardizzate. Un produttore di batterie o di leghe acquista una composizione specificata, non semplicemente il peso del bullion uscito dal forno. Un bilancio di impianto distingue metallo nella carica, bullion, piombo raffinato e contenuto metallico dei residui.

Le leghe al piombo richiedono poi un controllo intenzionale di elementi che nell'affinazione del metallo puro sarebbero stati separati. L'antimonio, per esempio, può essere parte di una specifica anziché una semplice impurità. Il valore di una tonnellata di piombo dipende quindi anche dal suo grado: la parola «raffinato» descrive un esito industriale e statistico, ma la formula commerciale precisa quali elementi sono ammessi e in quale forma si consegna il metallo.

Il passaggio del solfuro attraverso forni e sistemi di trattamento comporta gas contenenti anidride solforosa. Il controllo richiede captazione, depolverazione e, secondo la configurazione, trasformazione o trattamento del gas. Le scorie trattengono parte delle impurità e una quota di metalli che può richiedere recupero o gestione dedicata. Polveri e drossi possono rientrare nel circuito solo quando la loro composizione lo consente: chiamarli tutti «scarto» o tutti «metallo recuperato» oscurerebbe il bilancio reale.

La specificità del piombo è anche sanitaria. Polveri e fumi contenenti piombo possono essere inalati o ingeriti; le superfici, gli indumenti e le mani diventano vie di esposizione se il materiale esce dai sistemi confinati. Ventilazione, captazione, pulizia e sorveglianza dell'esposizione sono parte del funzionamento dell'impianto. Le conclusioni europee sulle migliori tecniche disponibili (BAT, dall’inglese «Best Available Techniques») fissano prestazioni

associate a flussi emissivi definiti, misurati in concentrazioni: servono a progettare e controllare determinate fasi, non descrivono da sole l'esposizione di ogni lavoratore o abitante. La prevenzione riguarda tanto la fusione primaria quanto quella secondaria.

Lo zinco: arrostire, sciogliere, depositare

La sfalerite pone un problema diverso. Lo zinco può essere separato dal minerale attraverso una catena in cui la soluzione acquosa è il passaggio decisivo. Nella rotta elettrolitica comune, l'arrostimento ossida il concentrato solforato e produce una calcina ricca di ossido di zinco. Lo zolfo liberato alimenta un flusso gassoso di anidride solforosa che richiede captazione e può essere convertito in acido solforico. L'ossidazione lascia lo zinco nella calcina, pronto per la lisciviazione.

La calcina viene lisciviata con una soluzione acida. Gli ioni di zinco passano nel liquido, mentre una parte dei componenti resta in residui solidi. Separazione solido-liquido e purificazione eliminano specie che disturberebbero l'elettrodeposizione o degraderebbero la qualità del catodo. Ferro e altri elementi possono generare residui ferriferi; metalli associati, fra cui cadmio in certe cariche, richiedono circuiti e controlli propri. Per vendere questi elementi come coprodotti occorre concentrarli, ottenere la qualità richiesta e gestire i flussi rimasti.

Nelle celle elettrolitiche la corrente elettrica deposita lo zinco dalla soluzione sui catodi. Il metallo viene rimosso, rifuso e colato nelle forme richieste dal mercato. Acidità, purezza del liquore, consumo elettrico e ricircolo delle soluzioni incidono sulla continuità operativa. L'acqua usata per lavare o circolare nei circuiti ha significati diversi da quella effettivamente consumata; l'acido impiegato o rigenerato non è un costo fisso ricavabile dalla sola massa del lingotto. Senza misure coerenti per impianto e confine di processo, attribuire alla filiera una cifra universale di energia o acqua per tonnellata produrrebbe una precisione apparente.

Esistono anche vie termiche di produzione e raffinazione. In esse la volatilità dello zinco a temperatura elevata può diventare il principio della separazione: il metallo passa nel vapore e viene poi condensato oppure recuperato come composto ossidato, secondo il circuito. Alimentazione, residui e prodotti non

coincidono con quelli della via elettrolitica. Questa pluralità sarà importante quando entreranno i materiali secondari, specialmente le polveri delle acciaierie elettriche.

Il controllo delle emissioni segue i punti in cui nascono gas e polveri: arrostimento, movimentazione della calcina, lisciviazione, celle e colata. Le prescrizioni BAT europee distinguono i flussi e i contaminanti, comprese sostanze acide e gas indesiderati nella raffinazione; un valore limite espresso in milligrammi per metro cubo di gas non può diventare una massa annua senza portata e tempi di esercizio. I residui ferriferi e le acque di lavaggio richiedono destinazioni compatibili con la loro composizione. Dal punto di vista dell'acquirente, infine, un lingotto di zinco di grado commerciale, un drosso, una polvere metallica e un ossido grezzo svolgono ruoli diversi, anche se tutti contengono zinco.

L'elettrodeposizione trasferisce il metallo dal liquido a una superficie solida, ma il circuito non finisce quando il catodo è estratto. Liquori impoveriti tornano ai passaggi appropriati, mentre spurghi e residui tengono sotto controllo l'accumulo delle impurità. Una variazione nella composizione del concentrato può aumentare il lavoro necessario alla purificazione ben prima di modificare la massa dei lingotti in uscita. Questa dipendenza dalla qualità della carica collega direttamente la miniera al costo tecnico della raffineria.

Un ossido di zinco prodotto come intermedio può alimentare la lisciviazione o una successiva riduzione termica. Chi lo acquista deve ancora completare la trasformazione metallurgica prima di vendere lingotti di composizione specificata.

Lo stagno: cassiterite e fusione

La cassiterite contiene stagno legato all'ossigeno, non allo zolfo. Il minerale può restare in un corpo mineralizzato in roccia dura oppure essere liberato dall'erosione e concentrato in sedimenti alluvionali, colluviali o marini. Un rapporto geologico USGS del 2017 attribuiva ai depositi sedimentari detti placer circa il 70% della produzione mondiale del 2012: è una fotografia storica che mostra l'importanza di questa origine, non una quota da trasferire agli anni recenti. Cambia anche la maniera di lavorare. In roccia dura occorrono abbattimento e comminuzione; nei sedimenti si movimenta e si separa

materiale già disgregato. Alcuni depositi sono dragati, altri coltivati con metodi differenti.

I placer nascono quando l'alterazione della roccia libera granuli resistenti e il trasporto naturale li seleziona per dimensione e densità. La concentrazione può variare molto anche lungo uno stesso corso d'acqua o tratto costiero. Perciò individuare un deposito utile richiede campionare il sedimento e stimare quanto materiale debba essere movimentato per alimentare l'impianto. Nel giacimento in roccia dura, invece, conta liberare i grani mediante frantumazione e macinazione senza perderli nelle frazioni troppo fini. La scelta dell'impianto si decide su queste proprietà fisiche prima che la riduzione chimica possa cominciare.

La densità della cassiterite aiuta a raccoglierla in un concentrato quando i grani sono sufficientemente liberati. Nei depositi sedimentari le particelle molto fini possono seguire l'acqua e gli sterili; altre impurità minerali, simili per densità, richiedono passaggi aggiuntivi. La mobilizzazione dei sedimenti può alterare l'acqua o il fondo interessato, perciò contano il contenimento delle particelle e il ripristino dei luoghi. Gli effetti dipendono dal sito, dal metodo e dalle opere adottate. In roccia dura la preparazione comporta frantumazione e gestione dei materiali sterili e dei residui fini. In entrambe le origini, la resa della separazione determina quanto stagno arriva al forno.

Nella fusione un agente riducente sottrae ossigeno all'ossido e permette allo stagno di passare nella fase metallica. Composizione del concentrato, temperatura e fondenti influenzano quanta parte del metallo rimane nella scoria o richiede un nuovo trattamento. L'affinazione successiva porta lo stagno verso le specifiche delle diverse destinazioni: saldature, rivestimenti e leghe richiedono composizioni adatte. La quantità di stagno nei pani riflette le perdite della separazione e della fusione, oltre alla raffinazione richiesta.

Alla fusione appartengono calore, gas, polveri e scorie; il lavoro con metallo liquido comporta rischi propri. Lo stagno metallico e alcuni composti organici dello stagno hanno profili di pericolo differenti: una proprietà di questi ultimi non descrive automaticamente il rischio della produzione di lingotti. La valutazione del rischio deve indicare sostanza, forma e via di esposizione.

La seconda vita dei tre metalli

Il circuito secondario comincia, per questa parte della filiera, quando un rottame o un residuo preparato diventa carica per un impianto metallurgico. La raccolta, lo smontaggio dei beni e l'organizzazione dei rifiuti hanno una propria logica a monte. All'ingresso del forno o della raffineria contano composizione, contaminanti e capacità di ottenere un prodotto specificato. Rifondere e vendere direttamente una lega, separare un metallo raffinato e produrre un ossido intermedio sono risultati industriali distinti.

Nel piombo, le batterie esauste costituiscono un'alimentazione importante. Componenti metallici, paste e altri materiali seguono trattamenti diversi prima o durante la fusione; la chimica della carica e il controllo di polveri e fumi decidono quanta parte del piombo arrivi al raffinato. L'impianto deve gestire anche acidi, scorie e residui contenenti altri elementi. La massa delle batterie raccolte include componenti estranei al piombo e non misura i pani raffinati ottenuti. Negli Stati Uniti l'ultima raffineria primaria di piombo ha chiuso nel 2013, mentre lo USGS registra circa 1,03 milioni di tonnellate di piombo secondario da vecchio rottame nel 2024. Il caso mostra quanto un Paese possa produrre metallo raffinato senza raffinarne da miniera in proprio.

Un piccolo bilancio statunitense chiarisce il limite dell'esempio. Per il 2024, alle 1.030 migliaia di tonnellate di produzione secondaria da vecchio rottame si aggiungono circa 410 mila tonnellate di importazioni di raffinato e si sottraggono 37 mila tonnellate di esportazioni: il risultato, 1.403 migliaia di tonnellate, è vicino alle 1.410 mila pubblicate dallo USGS come consumo apparente. Le righe sono arrotondate e il risultato non corregge il totale della fonte. Misura una disponibilità statistica secondo quella definizione nazionale, senza dire quante batterie siano state raccolte né quale percentuale del piombo mondiale sia riciclata.

Per lo zinco, gli input secondari comprendono drossi e residui di lavorazione, oltre alle polveri intercettate negli impianti siderurgici elettrici. Un forno Waelz può volatilizzare lo zinco di queste polveri e raccoglierlo come ossido grezzo. Quest'ossido, pur potendo essere commercializzato come alimentazione, contiene impurità e deve affrontare ulteriori stadi idrometallurgici o termici prima di dare zinco metallico raffinato. Dalla polvere iniziale all’ossido e infine

al lingotto cambiano massa e purezza. Il metallo secondario si misura soltanto dopo la raffinazione.

Lo stagno può tornare da scarti nuovi di fabbricazione o da beni giunti a fine vita. Nei secondi la dispersione in saldature, rivestimenti e leghe rende la separazione più difficile; qualità e concentrazione della carica orientano la via di recupero. Per gli Stati Uniti lo USGS distingue nel 2024 circa 8.000 tonnellate di stagno secondario da rottame nuovo e 8.550 da vecchio rottame. Queste quantità mostrano la provenienza del materiale lavorato negli impianti statunitensi; la dispersione dello stagno nei beni d'uso rende più complesso estendere il recupero del vecchio rottame.

La qualità del materiale in ingresso può limitare il riciclo più della capacità del forno. Mescolare rottami di leghe diverse cambia la composizione del bagno; separare prima le famiglie compatibili può conservare il valore del metallo, mentre una miscelazione indiscriminata richiede più affinazione o indirizza l'output verso impieghi meno esigenti. La quantità raccolta e quella trasformata in un prodotto con specifica verificata possono crescere a ritmi diversi.

Miniere, raffinerie e scambi su mappe diverse

Le statistiche minerarie dello USGS stimano per il 2025 circa 4,5 milioni di tonnellate di piombo contenuto, 13,0 milioni di zinco contenuto e 290 mila tonnellate di stagno contenuto prodotti nel mondo. La statistica mineraria esprime il contenuto di ciascun metallo nell'output estratto. La Cina è il primo produttore minerario per tutti e tre: circa 1,9 milioni di tonnellate di piombo, 4,1 milioni di zinco e 71 mila di stagno. L'Australia è rilevante per il piombo, il Perù per lo zinco; l'Indonesia segue da vicino la Cina nello stagno. Questi poli spiegano perché le rotte commerciali cambino a seconda del metallo, senza richiedere un elenco di tutti i Paesi estrattori.

Una seconda mappa riguarda la raffinazione. Uno stabilimento può importare concentrato, residui o metallo grezzo, lavorare materiale domestico e vendere altrove il raffinato. L'International Lead and Zinc Study Group prevede per il 2026 una produzione mondiale di circa 13,83 milioni di tonnellate di piombo raffinato e 13,99 milioni di zinco raffinato. Sono previsioni formulate nell'aprile 2026, non consuntivi. Le stime minerarie USGS per il 2025 e le previsioni ILZSG

per il raffinato 2026 misurano anni e stadi diversi; una loro differenza aritmetica non rappresenta il riciclo.

Per lo stagno, lo USGS stima 294 mila tonnellate di metallo contenuto nella produzione mineraria mondiale del 2024; l'International Tin Association registra 371,2 mila tonnellate di raffinato per lo stesso anno. Scorte, tempi di trasformazione, rottami e metodi statistici contribuiscono alla distanza fra produzione mineraria e raffinata; il riciclo richiede una misura propria.

Per l'Italia, ISPRA descriveva nel luglio 2024 l'estrazione di minerali metalliferi come allora inesistente. La data e l'attività sono essenziali: questa constatazione mineraria lascia aperte la trasformazione di materie importate e la produzione da rottame. L'indagine industriale europea PRODCOM registra per il 2024 in Italia 68.977 tonnellate di piombo raffinato non lavorato e 422.372 tonnellate di zinco non legato non lavorato come produzione effettiva nelle rispettive categorie. Per la categoria dello stagno non legato non lavorato restituisce uno zero esplicito; per una distinta categoria delle leghe di stagno non restituisce una quantità. La prima osservazione riguarda un prodotto definito, la seconda è un dato non disponibile: nessuna delle due descrive l'intera attività italiana sullo stagno. PRODCOM registra output dichiarato, senza identificare quanta parte della carica provenga da miniera, importazioni o recupero.

L'UE-27, negli stessi codici PRODCOM del 2024, registra circa 1,105 milioni di tonnellate di piombo raffinato non lavorato, 1,443 milioni di zinco non legato non lavorato e 13.122 tonnellate di stagno non legato non lavorato. Il confronto situa il caso italiano nell'industria europea; le leghe e le forme lavorate appartengono ad altre categorie, mentre capacità e utilizzo richiedono dati d'impianto. Produzione effettiva e venduta sono inoltre indicatori distinti: i valori possono differire senza che ciò costituisca un errore.

Una terza mappa segue le merci che attraversano i confini. Eurostat Comext distingue importazioni ed esportazioni intra- ed extra-UE, oltre a minerali, metalli non lavorati e rottami classificati in voci diverse. Nel 2024 l'Italia ha importato, nella voce doganale HS 7901 dello zinco non lavorato, circa 25.950 tonnellate da Paesi extra-UE e 183.041 da Paesi UE; ne ha esportate rispettivamente circa 4.386 e 18.818. Il saldo fisico delle quattro voci è quindi 25.949,673 + 183.040,696 − 4.385,548 − 18.818,106 = 185.786,715 tonnellate, circa 185,8 mila. Questa cifra misura la massa netta delle merci classificate HS

7901, che copre prodotti diversi dalla singola categoria PRODCOM delle 422.372 tonnellate prodotte. Comext misura passaggi di frontiera, PRODCOM output industriale degli stabilimenti censiti: sommare i due dati come se fossero addendi completi di un consumo apparente italiano introdurrebbe omissioni e sovrapposizioni.

Anche le importazioni di minerali e concentrati, per esempio la voce HS 2608 dello zinco, sono peso del materiale commerciato, non zinco contenuto. Le voci dei rottami contano la massa della merce, con inclusioni ed esclusioni proprie. Nei totali dell'UE i movimenti interni sono già transazioni fra Paesi membri e non vanno aggiunti ai dati nazionali per costruire un volume continentale. Le mappe sono tutte utili quando conservano il proprio oggetto: giacimenti, stabilimenti e scambi raccontano tre posizioni diverse nella stessa catena.

Prezzi, investimenti e vincoli futuri

Il prezzo di una tonnellata di metallo standardizzato si forma in un mercato diverso da quello del concentrato. Un compratore di minerale paga il contenuto recuperabile secondo condizioni contrattuali che considerano trattamento, affinazione, impurità ed eventuali coprodotti. Per i lingotti contano grado commerciale, luogo di consegna, disponibilità e premio fisico rispetto a un riferimento. Lo zinco fornisce un esempio: per il 2024 lo USGS riporta una media nordamericana per la qualità Special High Grade di 144,2 centesimi di dollaro per libbra e una media LME cash di 126,0. La distanza fra le due serie riflette basi commerciali differenti; non è il margine di una raffineria e non descrive il costo globale della produzione. Piombo e stagno hanno a loro volta riferimenti e premi legati al prodotto e alla piazza.

Una miniera deve investire in accesso al corpo mineralizzato, preparazione e gestione dei residui. Una fonderia o raffineria richiede forni, captazione e trattamento dei gas, celle o circuiti di affinazione, servizi energetici e controlli ambientali. La spesa precede spesso di anni le prime vendite. Per lo zinco elettrolitico conta la fornitura continua di elettricità, oltre alla qualità del concentrato e delle soluzioni; per il piombo secondario contano il flusso di batterie e la capacità di contenere le esposizioni; per lo stagno la dispersione dei depositi e dei piccoli flussi di rottame può pesare sulla scala economica. Tra annuncio, costruzione e produzione effettiva intercorrono investimenti, autorizzazioni e avviamento tecnico.

Le conclusioni europee sulle migliori tecniche disponibili impongono di trattare le pressioni dove nascono: polveri e gas di arrostimento o fusione, liquori e residui di lisciviazione, polveri secondarie e acque di lavaggio. I valori associati alle BAT hanno confini tecnici e condizioni di misura; l'impronta climatica, l'acqua consumata e le condizioni di lavoro di un'intera filiera richiedono altri bilanci. Le fonti aperte qui utilizzabili non forniscono un coefficiente globale comparabile di energia, acqua o emissioni per ciascuno dei tre metalli e delle rispettive vie. Il confronto più onesto fra progetti esige dati coerenti su alimentazione, resa, elettricità, calore, residui e confini del sito.

Le prospettive di mercato vanno lette con la stessa attenzione. Nell'aprile 2026 l'ILZSG prevedeva per quell'anno circa 13,72 milioni di tonnellate di uso di piombo raffinato contro 13,83 di produzione, con un surplus stimato di 109 mila tonnellate; per lo zinco, 14,00 milioni di uso e 13,99 di produzione, con un deficit stimato di 19 mila tonnellate. I saldi di 109 e 19 mila tonnellate sono quelli dichiarati dall'ILZSG: i volumi in milioni sono arrotondati al centesimo e la loro sottrazione non riproduce esattamente i saldi. Le previsioni restano suscettibili di revisione. Scorte, tempi di trasporto, qualità disponibile e distribuzione geografica possono rendere teso un mercato anche quando il totale mondiale appare vicino all'equilibrio.

Recuperare un coprodotto cambia anche il conto dell'impianto. Un elemento presente in piccole quantità nel concentrato trova una via commerciale se il circuito lo concentra e ne garantisce la qualità; altrimenti resta una sfida nella gestione dei residui. Trattamenti più selettivi, nuove linee di captazione e modifiche ai circuiti di riciclo richiedono capitale e tempo. Un prezzo elevato del metallo principale, da solo, non rende immediatamente disponibile nuova produzione raffinata.

Alla fine del percorso, l'industria compra pani, lingotti, leghe o altri intermedi con una composizione dichiarata. La loro disponibilità dipende da roccia, concentrazione, raffinerie, recupero dei residui e commercio, ognuno con un proprio tempo e una propria perdita materiale. Piombo, zinco e stagno possono condividere una miniera, una rotta di scambio o un impianto di riciclo, ma rispondono a chimiche e vincoli differenti. È in queste trasformazioni, prima che il metallo entri nei manufatti, che una quantità geologica diventa una materia prima industriale.

Fonti e riferimenti

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Lead

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-lead.pdf

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Zinc

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-zinc.pdf

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Tin

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-tin.pdf

United States Geological Survey, Professional Paper 1802-S, Tin, 2017

https://pubs.usgs.gov/pp/1802/s/pp1802s.pdf

Commissione europea, Decisione di esecuzione UE 2016/1032, conclusioni BAT per i metalli non ferrosi

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016D1032

International Tin Association, Global tin production falls in 2024 on supply disruptions

https://www.internationaltin.org/global-tin-production-falls-in-2024-on-supply-disruptions/

International Lead and Zinc Study Group, Spring 2026 Meetings and Forecasts, comunicato del 23 aprile 2026

https://www.ilzsg.org/wp-content/uploads/3.PRESS%20RELEASES/20260423_ILZSG%20April%202026%20Press%20Release.pdf

ISPRA, Materie prime critiche: ecco quali e dove si trovano, 24 luglio 2024

https://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2024/materie-prime-critiche-ecco-quali-e-dove-si-trovano

Eurostat, PRODCOM, produzione industriale totale, dataset DS-059359

https://ec.europa.eu/eurostat/api/comext/dissemination/sdmx/2.1/dataflow/ESTAT/DS-059359?references=None

Eurostat, PRODCOM, produzione industriale venduta, dataset DS-059358

https://ec.europa.eu/eurostat/api/comext/dissemination/sdmx/2.1/dataflow/ESTAT/DS-059358?references=None

Eurostat, Comext, scambi di merci per codici HS e CN, dataset DS-045409

https://ec.europa.eu/eurostat/api/comext/dissemination/sdmx/2.1/dataflow/ESTAT/DS-045409?references=None

Eurostat, metadati della statistica sul commercio internazionale di beni

https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/ext_go_detail_sims.htm

04.15 – Litio, nichel e cobalto

Tre metalli sotto la stessa etichetta

Litio, nichel e cobalto vengono spesso riuniti sotto l'etichetta dei «metalli per batterie». La domanda che li avvicina, però, si appoggia a filiere molto diverse. Il litio può provenire da una salamoia pompata in un bacino arido, da una pegmatite estratta e frantumata oppure da un deposito argilloso. Il nichel nasce da minerali solforati o da profili lateritici nei quali la posizione verticale cambia mineralogia e processo. Il cobalto, infine, è prodotto soprattutto come coprodotto del rame o del nichel: la sua disponibilità dipende quindi anche da decisioni prese per un altro metallo.

Per seguire queste trasformazioni servono quattro livelli. Il primo è la materia estratta: roccia, minerale, argilla o salamoia con ganga, acqua e impurità. Il secondo è il concentrato, ottenuto aumentando la frazione utile mediante operazioni fisiche. Il terzo comprende gli intermedi chimici o metallurgici, come una matte di nichel o un precipitato misto di nichel e cobalto. Il quarto è il prodotto raffinato che un'altra industria può acquistare secondo una composizione definita. La massa cambia a ogni passaggio e il metallo contenuto rappresenta soltanto una parte del materiale movimentato.

La geologia decide presto quale strada sia plausibile. Una salamoia richiede conoscenza dell'acquifero e della sua ricarica; uno spodumene deve essere liberato dalla roccia e reso chimicamente reattivo; un solfuro di nichel può essere concentrato e fuso; una laterite ricca di magnesio e una ricca di ferro alimentano impianti differenti. Anche il cobalto segue la chimica della filiera ospite: può entrare nella soluzione di un circuito idrometallurgico del rame oppure accompagnare il nichel in un intermedio misto.

Risorsa e riserva descrivono a loro volta due livelli differenti. Una risorsa identifica una concentrazione conosciuta o ipotizzata; una riserva è la parte dimostrata recuperabile secondo conoscenze, prezzi, tecnologie e criteri dichiarati. Modificare il prezzo o il processo può spostare materiale da una categoria all'altra senza cambiare la quantità di elementi nella crosta terrestre. Per questo i grandi totali geologici non misurano quanti sali o metalli potranno arrivare sul mercato in un anno.

Gli usi finali spiegano la richiesta di purezza senza definire il perimetro del capitolo. Nichel e cobalto servono anche ad acciai, superleghe, catalizzatori, rivestimenti e altri prodotti; il litio entra in vetro, ceramica, grassi lubrificanti e applicazioni chimiche. Le batterie hanno accresciuto il peso di specifiche particolarmente esigenti, ma la fabbricazione di catodi, celle, pacchi e veicoli appartiene a una fase successiva. Qui il percorso termina quando il materiale è diventato concentrato, sale, intermedio o metallo standardizzato. Prima di quel punto, la stessa parola «produzione» può indicare una quantità estratta, il contenuto dell'elemento o la massa di un composto: tre misure che descrivono momenti diversi.

Il litio dall'acquifero e dalla roccia

Le salamoie continentali si formano soprattutto in bacini chiusi e aridi, dove acqua e soluti si concentrano nel tempo. La presenza di litio da sola non rende sfruttabile il deposito: contano la permeabilità dell'acquifero, la composizione degli altri sali, la ricarica, la relazione fra acqua dolce e salata e la possibilità di pompare senza compromettere il sistema idrologico. Il rapporto USGS sulle salamoie indica per i depositi economici un ampio intervallo, da circa 200 a 4.000 milligrammi di litio per litro. La concentrazione, tuttavia, è solo una delle variabili che determinano resa e costi.

Nella via evaporativa, la salamoia pompata attraversa una serie di bacini. L'acqua evapora e diversi sali precipitano in sequenza; il liquido residuo si arricchisce di litio e viene infine trattato in un impianto chimico. Magnesio, calcio, boro, solfati e altre specie devono essere separati secondo la composizione iniziale e il prodotto desiderato. Il pompaggio della salamoia e l'impiego di acqua dolce per reagenti, lavaggi, raffreddamento e cristallizzazione appartengono a bilanci distinti. Valutare l'effetto sul territorio richiede portate, reiniezioni, precipitazioni, ricarica e usi concorrenti, non la sola superficie dei bacini.

L'estrazione diretta del litio, indicata dalla sigla DLE, comprende tecnologie diverse: adsorbimento, scambio ionico, membrane, solventi e sistemi elettrochimici. Può ridurre o evitare una parte dell'evaporazione, ma sposta il lavoro verso separazione selettiva, rigenerazione dei materiali, energia, reagenti e trattamento del fluido impoverito. Recupero, durata del sorbente, qualità del prodotto e destino della salamoia devono essere dimostrati per il

singolo progetto. «DLE» definisce una famiglia di processi, non una prestazione ambientale garantita.

La roccia dura segue un'altra catena. Nelle pegmatiti il litio può trovarsi nello spodumene insieme a quarzo, feldspati, miche e altri minerali. Lo spodumene puro contiene teoricamente il 3,73% di litio, ma una roccia estratta ne contiene molto meno e anche il concentrato commerciale è descritto spesso come percentuale di ossido di litio, Li_2O. Dopo abbattimento e frantumazione, separazioni per densità, gravità o flottazione producono il concentrato. La struttura cristallina naturale, detta alfa, resiste all'attacco chimico: la calcinazione la converte nella forma beta, più reattiva. Seguono tostatura, lisciviazione, rimozione delle impurità, precipitazione, filtrazione ed essiccazione. Calore, elettricità e reagenti si concentrano quindi in passaggi che non esistono nella stessa forma per una salamoia.

Un esempio rende visibile il cambio di unità. Si consideri una tonnellata di concentrato al 6,0% di Li_2O e si assuma, a fini didattici, un recupero successivo dell'85%. La massa di Li_2O è 1,00 × 0,060 = 0,060 tonnellate. Il litio rappresenta il 46,45% della massa di Li_2O, perché 2 × 6,94 / 29,88 = 0,4645. Il contenuto teorico è dunque 0,060 × 0,4645 = 0,0279 tonnellate di litio; applicando il recupero ipotetico si ottengono 0,0237 tonnellate, circa 23,7 chilogrammi. Il 6% di Li_2O non è 6% di litio e l'85% non descrive una raffineria reale: serve soltanto a mostrare come tenore e resa agiscano in successione.

Le argille costituiscono una terza origine. Il litio può essere incorporato in minerali argillosi o in materiale vulcanico alterato, con tenori e legami diversi dallo spodumene. Liberarlo può richiedere lisciviazione, calore e neutralizzazione, generando grandi masse di residuo. Il successo di una rotta dipende dal consumo di reagenti e dalla capacità di separare il litio da magnesio e altri elementi; il semplice confronto fra tenori non basta a scegliere il deposito migliore.

Ogni origine colloca gli impatti in punti diversi. La roccia dura produce sterili di miniera e residui della concentrazione prima della trasformazione chimica; calcinazione e tostatura aggiungono polveri, gas e sali di neutralizzazione. Le salamoie occupano superfici con bacini e infrastrutture e modificano flussi sotterranei che possono essere connessi a zone umide e utilizzatori locali. Le argille combinano movimentazione di grandi masse e circuiti di reagenti.

Sicurezza significa quindi controllare fronti di scavo, macchinari, polveri, sostanze corrosive e fluidi caldi nel luogo in cui ciascun rischio nasce.

Il nichel sceglie la via nella roccia

I minerali solforati di nichel possono essere frantumati, macinati e concentrati per flottazione. Il concentrato porta con sé zolfo, ferro e spesso rame, cobalto o metalli del gruppo del platino. In fonderia, ossidazione e fusione separano una scoria ricca di ganga e ferro da una fase solforata, la matte, nella quale si concentra il nichel insieme ad altri metalli. Conversione e raffinazione successive possono produrre nichel metallico, sali o intermedi destinati ad altri impianti. I gas contenenti anidride solforosa, le polveri e il metallo fuso richiedono captazione, trattamento e protezione dei lavoratori.

Le lateriti nascono invece dall'alterazione profonda di rocce ultramafiche. Nella parte superiore domina spesso la limonite, ricca di ossidi e idrossidi di ferro; più in basso la saprolite conserva silicati idrati di magnesio. Il modello USGS considera depositi con tenori di nichel fra 0,66% e 2,4%, con mediana dell'1,3%, e cobalto fra 0,01% e 0,15%, con mediana dello 0,08%. Questi intervalli descrivono un insieme geologico, non la carica uniforme di un impianto. La miniera deve distinguere, selezionare e miscelare strati che possono cambiare in pochi metri.

La saprolite alimenta soprattutto rotte termiche. Nel processo RKEF, dall'inglese rotary kiln–electric furnace, il minerale viene essiccato e preridotto in un forno rotativo, poi fuso in un forno elettrico. Nichel e ferro passano nella fase metallica; magnesio e silice contribuiscono alla scoria. Il prodotto può essere nickel pig iron, o NPI, oppure ferronichel, entrambi destinati principalmente alla metallurgia dell'acciaio inossidabile e delle leghe. Essiccazione, calcinazione, elettricità e riducenti carboniosi rendono la via sensibile all'energia e alla composizione del minerale.

La limonite si presta più facilmente alla lisciviazione acida ad alta pressione, HPAL. Il minerale finemente preparato entra come sospensione in autoclavi, dove acido solforico, temperatura e pressione portano nichel e cobalto in soluzione. Seguono neutralizzazione, separazione solido-liquido e purificazione. L'alto contenuto di magnesio della saprolite tende a consumare molto acido, rendendo spesso economicamente sfavorevole il suo impiego in HPAL; ferro

elevato e magnesio più basso possono invece orientare la limonite verso questa rotta. La scelta resta legata alla mineralogia e al progetto, non a una regola universale.

Da una soluzione HPAL si può precipitare un prodotto misto di idrossidi, il MHP, che contiene nichel e cobalto insieme ad acqua e impurità. Non possiede una formula fissa: per valutarlo servono base secca o umida, tenore dei due metalli ed elementi penalizzanti. Si considerino 50.000 tonnellate umide di MHP con il 35% di umidità, il 38% di nichel e il 3% di cobalto sulla base secca. La massa secca è 50.000 × 0,65 = 32.500 tonnellate; il nichel contenuto è 32.500 × 0,38 = 12.350 tonnellate e il cobalto 32.500 × 0,03 = 975 tonnellate. Dichiarare gli stessi tenori sulla massa umida produrrebbe un risultato diverso: l'umidità è parte del contratto, non un dettaglio tipografico.

La raffinazione prosegue oltre questi intermedi. Una matte può essere convertita, lisciviata e separata nei diversi metalli; un MHP può essere ridissolto e purificato prima della cristallizzazione dei solfati. Rame, ferro, manganese, magnesio e altri elementi devono seguire flussi controllati, mentre liquori riciclati e spurghi impediscono l'accumulo delle impurità. Il passaggio da un intermedio a un sale ad alta purezza può diventare il vero collo di bottiglia anche quando la capacità mineraria è abbondante.

L'impianto HPAL usa acido, vapore, acqua per la sospensione e i lavaggi, reagenti di neutralizzazione e apparecchiature soggette a pressione e corrosione. I residui possono contenere precipitati di ferro, gesso, solfati, magnesio e altri elementi; deposito, drenaggio e stabilità geotecnica fanno parte del processo. RKEF genera invece grandi volumi di scoria e gas di combustione. Per i solfuri pesa la gestione dello zolfo. Riunire queste vie in un solo coefficiente di energia, acqua o emissioni nasconderebbe le cause fisiche delle differenze; i valori emissivi privi di un confine verificabile sono quindi esclusi dal confronto.

Il cobalto dipende da un'altra filiera

Il cobalto è raramente il motivo unico per cui una grande miniera viene aperta. Nella cintura rame-cobalto della Repubblica Democratica del Congo e dello Zambia accompagna minerali lavorati soprattutto per il rame; nelle lateriti e in alcuni solfuri segue il nichel. La quantità disponibile dipende perciò dal tenore,

dalla resa del circuito dedicato e dalla convenienza della filiera ospite. Un prezzo elevato del cobalto può migliorare l'economia del recupero, ma non crea da solo nuovo minerale di rame o nichel né una raffineria capace di separarlo.

Nelle rotte idrometallurgiche il cobalto passa in soluzione insieme ad altri metalli. Precipitazioni selettive, estrazione con solvente, scambio ionico ed elettrodeposizione possono portare a idrossido, solfato o metallo. Nelle lateriti HPAL compare spesso nel MHP; da lì un altro stabilimento separa nichel e cobalto e produce sali con specifiche più strette. Nelle rotte solforate può restare nella matte e seguire la successiva raffinazione. La massa dell'intermedio comprende sempre sostanze diverse dal cobalto pagabile.

La geografia del 2025 mostra quanto questa dipendenza sia concentrata. Lo USGS stima circa 310.000 tonnellate di cobalto contenuto nella produzione mineraria mondiale, delle quali 230.000 nella Repubblica Democratica del Congo e 44.000 in Indonesia. Il primo valore deriva soprattutto dall'associazione con il rame; il secondo riflette la crescita delle lateriti di nichel. Circa tre quarti dell'output mondiale provengono quindi dal distretto congolese, mentre la nuova offerta indonesiana è legata all'espansione del nichel. Sono quantità di elemento contenuto nel minerale prodotto, non tonnellate di idrossido o metallo raffinato.

La piccola estrazione artigianale e su piccola scala, indicata dalla sigla ASM, aggiunge una dimensione sociale che non può essere ridotta a una percentuale di mercato. Nel novembre 2024 l'Organizzazione internazionale del lavoro riferiva oltre 100.000 minatori ASM nel Paese e più di 6.200 bambini registrati dal sistema di monitoraggio e rimedio del lavoro minorile (CLMRS, dall'inglese «Child Labour Monitoring and Remediation System») nelle province di Haut-Katanga e Lualaba. Il secondo numero riguarda i siti seguiti dal programma e non costituisce un censimento nazionale dei minori né una quota della produzione congolese. Documenta però un rischio concreto in un settore dove informalità, instabilità degli scavi, polveri, movimentazione manuale e debole protezione contrattuale possono sommarsi.

Formalizzazione, tracciabilità e controllo degli acquisti possono ridurre abusi soltanto se raggiungono i punti reali di estrazione e commercio. Escludere indistintamente ogni materiale artigianale può spostare il reddito senza eliminare l'attività; accettarlo senza controlli trasferisce il rischio lungo la

catena. La raffinazione, inoltre, è geograficamente separata: l'IEA attribuisce alla Cina oltre il 75% della produzione raffinata di cobalto nel dato considerato. La miniera congolese e l'impianto chimico cinese sono quindi due snodi della stessa offerta, con responsabilità, valore aggiunto e strumenti di controllo differenti.

Anche la misura della produzione deve restare legata al suo oggetto. La stima mineraria conta cobalto contenuto nel materiale ottenuto dalla miniera; un idrossido commerciale comprende acqua e altri elementi; il raffinato registra l'uscita di un impianto successivo. Scorte, tempi di trasporto e rese fanno sì che i tre totali annuali non debbano coincidere. La differenza fra loro non fornisce automaticamente né il riciclo né la perdita metallurgica.

La forma commerciale determina il mercato

Il litio viene scambiato come concentrato minerale, carbonato, idrossido e altri composti. La sigla LCE, lithium carbonate equivalent, permette di esprimere contenuti diversi come carbonato di litio equivalente. Il fattore teorico è 5,323 tonnellate di LCE per una tonnellata di litio, ricavato dal rapporto fra la massa molare di Li_2CO_3 e quella dei due atomi di litio. È una convenzione contabile utile per confrontare quantità e quotazioni, non un materiale aggiuntivo: le consegne fisiche riguardano concentrati o composti con purezza, umidità e granulometria definite.

L'idrossido di litio monoidrato aggiunge un'altra possibile ambiguità. La sua formula, $LiOH \cdot H_2O$, comprende acqua di cristallizzazione e contiene teoricamente circa il 16,5% di litio. Una tonnellata di monoidrato non coincide quindi con una tonnellata di idrossido anidro. La conversione in litio contenuto è utile per i bilanci; l'acquirente riceve però il composto reale e ne verifica la composizione.

Nel nichel, NPI e ferronichel sono leghe di ferro e nichel, la matte è una fase solforata, il MHP è un precipitato umido e il solfato è un sale cristallino. Una tonnellata di ciascuno contiene quantità diverse di nichel e richiede trasformazioni differenti. Anche il nichel metallico quotato in una piazza non coincide con il prezzo di un MHP, nel quale il compratore considera tenore, umidità, recuperi, costi di raffinazione e impurità. Per il cobalto valgono distinzioni analoghe fra idrossido, MHP, solfato e metallo.

La qualità per batterie nasce da specifiche contrattuali, non da un'etichetta universale. Per carbonato e idrossido di litio possono contare, secondo il prodotto e il cliente, sodio, calcio, magnesio, ferro, boro, cloruri, solfati e umidità. Negli intermedi e nei solfati di nichel e cobalto assumono rilievo rame, ferro, manganese, calcio, magnesio, sodio, zolfo, insolubili e altri elementi documentati nell'analisi. Una concentrazione minuscola può non incidere sul peso ma impedire l'impiego previsto. Il prodotto industriale è quindi una combinazione di forma chimica, composizione, metodo di misura e responsabilità contrattuale.

Anche i riferimenti di prezzo conservano questi confini. Lo USGS indica per il 2025 circa 15.000 dollari per tonnellata come prezzo medio LME del nichel; ciò non determina automaticamente il valore di NPI, ferronichel, matte, MHP o solfato. Per il cobalto riporta circa 21 dollari per libbra per il catodo spot statunitense e 15 dollari per libbra per il riferimento LME cash, su basi commerciali diverse. Un prezzo elevato di un prodotto raffinato può convivere con sconti su un intermedio difficile da trattare, così come un mercato complessivamente abbondante può avere scarsità di una qualità specifica.

Quando il materiale ritorna

Il circuito secondario trattato qui comincia quando rottami, residui o black mass sono diventati alimentazioni caratterizzate e accettate da un impianto metallurgico. Raccolta, smontaggio dei beni e preparazione generale dei rifiuti appartengono alla gestione a monte. Una black mass contiene polveri di materiali attivi, grafite, metalli e impurità in proporzioni che dipendono dalle batterie e dal processo di separazione; non equivale alla massa delle batterie ricevute né a quella dei sali che potranno essere venduti.

Le vie pirometallurgiche concentrano alcuni metalli in una lega o matte, lasciandone altri nella scoria; le vie idrometallurgiche usano lisciviazione, purificazione e precipitazione. Nichel e cobalto hanno storicamente un forte incentivo al recupero per valore e comportamento metallurgico. Il litio può richiedere passaggi dedicati e una purificazione capace di riportarlo a una specifica commerciale. La resa dipende dalla chimica delle batterie, dalla qualità della frazione preparata e dalla destinazione del prodotto, non dalla sola efficienza nominale di un reattore.

Un bilancio ipotetico mostra le perdite concatenate. Da 100 tonnellate di prodotti a fine vita, si suppongano l'80% di raccolta, il 90% di resa nella preparazione della frazione utile, il 20% di nichel in quella frazione e il 95% di recupero metallurgico. Il risultato è 100 × 0,80 × 0,90 × 0,20 × 0,95 = 13,68 tonnellate di nichel recuperato. Questo valore combina quattro ipotesi e non rappresenta automaticamente un tasso ufficiale di riciclo a fine vita: quello richiede confini, scorte in uso, esportazioni, composizione dei prodotti e regole statistiche coerenti.

Il tempo è un limite fisico del riciclo. Il materiale venduto oggi torna dopo anni, e una parte resta più a lungo in veicoli, apparecchiature e infrastrutture. L'IEA stima per il 2024 circa 7.000 tonnellate di litio, 62.000 di nichel e 26.000 di cobalto provenienti da fonti secondarie, espressi come metallo contenuto nel proprio sistema. Nello scenario delle politiche dichiarate, STEPS, i valori raggiungono nel 2040 rispettivamente 82.000, 295.000 e 82.000 tonnellate. Sono proiezioni di scenario, ma rendono evidente l'inerzia: la massa disponibile cresce quando le precedenti generazioni di prodotti arrivano realmente a fine vita.

Scarti nuovi di fabbricazione e materiali post-consumo hanno inoltre profili diversi. I primi possono avere composizione nota e percorsi brevi; i secondi portano mescole, degradazione e contaminanti accumulati durante uso e smontaggio. Vendere un precipitato, un solfato o un metallo secondario richiede infine la stessa disciplina analitica del primario. Il riciclo riduce il bisogno di nuova estrazione per la quantità effettivamente recuperata e sostituita, non per la massa lorda dei rifiuti entrati nel sistema.

Tre mappe mondiali e il vuoto europeo

La prima mappa riguarda le miniere. Lo USGS stima per il 2025 circa 290.000 tonnellate di litio contenuto, 3,9 milioni di tonnellate di nichel e 310.000 tonnellate di cobalto. Le scale non sono comparabili come domanda di batterie: descrivono tre mercati e tre contenuti elementari diversi. Il nichel è di gran lunga il flusso maggiore e l'Indonesia ne produce circa 2,6 milioni di tonnellate. Nel cobalto dominano le 230.000 tonnellate della Repubblica Democratica del Congo, seguite dalle 44.000 indonesiane. Il litio è distribuito fra Australia, Cina, Cile e altri produttori, con roccia dura e salamoie che alimentano circuiti differenti.

La seconda mappa segue il trattamento. Secondo l'IEA, nel 2024 i primi tre Paesi concentravano il 77% dell'estrazione del litio ma il 96% della raffinazione; per il nichel le quote erano 77% e 78%, per il cobalto 81% e 89%. La Cina rappresentava circa il 70% della raffinazione del litio e oltre il 75% di quella del cobalto nel dato citato. La separazione è particolarmente visibile per il cobalto: gran parte del minerale nasce nella DRC, mentre il passaggio a prodotti raffinati si concentra altrove. Sicurezza dell'offerta significa quindi disporre sia del giacimento sia degli impianti chimici e metallurgici.

La terza mappa è europea, ma manca una fotografia corrente unica e omogenea. Un'analisi JRC con anno di riferimento 2016 e perimetro UE senza Regno Unito riportava 0,3 migliaia di tonnellate di litio, 44 di nichel e 3 di cobalto estratti; indicava inoltre 70 migliaia di tonnellate di nichel e 14 di cobalto raffinati. È una base storica, non il bilancio del 2025. Il Critical Raw Materials Act stabilisce per il 2030 benchmark pari al 10% dei fabbisogni da estrazione europea, 40% da trattamento, 25% da riciclo e non più del 65% da un singolo Paese terzo a uno stadio pertinente. Sono obiettivi politici e industriali, non quote già raggiunte.

Per ricostruire commercio e produzione occorrerebbero serie europee con codice del prodotto, massa netta, valore, reporter, partner, flusso, anno e unità. I principali database statistici europei, come Eurostat Comext e PRODCOM, presentano tuttavia lacune: per il 2024 non restituiscono serie continue e omogenee che permettano di incrociare, per ciascun codice, volumi fisici, valori monetari e stadio effettivo di lavorazione. L'assenza di una riga non dimostra un flusso nullo. Pubblicare valori ricavati da anteprime, dividere un valore monetario per un prezzo medio o attribuire automaticamente una produzione a materiale primario o secondario creerebbe una precisione priva di base.

Per l'Italia, ISPRA segnala dipendenza completa dall'estero per il litio e la presenza dell'elemento nelle pegmatiti dell'Elba e del Giglio e nei fluidi geotermici di Toscana, Lazio e Campania. La presenza geologica non dimostra una riserva economica, un'autorizzazione o una produzione commerciale. Le fonti esaminate non consentono di attribuire al Paese quantità aggiornate e coerenti di estrazione o raffinazione primaria di litio, nichel e cobalto. L'Italia resta invece utilizzatrice, trasformatrice e candidata al recupero di materie

secondarie; anche in questo caso occorre distinguere ricerca, impianto pilota, capacità annunciata e output effettivamente venduto.

Questa lacuna statistica è essa stessa informativa. Una politica europea può fissare obiettivi comuni, ma un bilancio industriale deve rispettare la diversa natura fisica e contabile dei flussi già discussa per ciascun metallo. In caso contrario, la somma continentale diventerebbe un miscuglio di chimica e contabilità.

I colli di bottiglia si spostano

L'IEA stima per il 2024 una domanda di 205.000 tonnellate di litio, 3,371 milioni di nichel e 221.000 tonnellate di cobalto. Nello scenario STEPS, basato sulle politiche dichiarate, il litio sale a 455.000 tonnellate nel 2030 e 928.000 nel 2040; il nichel a 4,389 e 5,685 milioni; il cobalto a 314.000 e 330.000 tonnellate. Questi valori descrivono una possibile evoluzione coerente con le ipotesi dello scenario, non una previsione certa. Mostrano però che il collo di bottiglia può passare dalla miniera alla conversione chimica, all'energia, all'acqua, ai reagenti o alla qualità del prodotto.

Per il litio, l'IEA colloca oltre metà della produzione corrente in aree di elevato stress idrico. Ciò non assegna lo stesso impatto a ogni sito: una salamoia, una miniera australiana di spodumene e un progetto DLE interagiscono con sistemi idrologici diversi. Impone però di affiancare al tenore un bilancio del bacino. Per la roccia dura pesano calcinazione e reagenti; per le argille, lisciviazione e massa dei residui. Una nuova miniera senza conversione disponibile può limitarsi a esportare concentrato e dipendere da un altro Paese per il prodotto raffinato.

Nel nichel il bivio tecnologico moltiplica gli investimenti. RKEF necessita di calore, elettricità e riducenti; HPAL di acido, vapore, autoclavi, neutralizzazione e deposito stabile dei residui; i solfuri richiedono fonderie e gestione dell'anidride solforosa. Il cobalto eredita questi vincoli e quelli della filiera del rame, mentre la sua natura di coprodotto riduce la risposta automatica dell'offerta al prezzo. Anche le misure commerciali contano: quote o restrizioni all'esportazione possono cambiare disponibilità e potere contrattuale senza aggiungere una tonnellata estratta.

A livello industriale e societario, un esempio concreto della distanza fra presente operativo e pipeline progettuale viene da PT Vale Indonesia. Nel 2024 la società ha prodotto 71.311 tonnellate di nichel contenuto nella matte: è un flusso misurato, ottenuto da impianti in esercizio. Nello stesso rapporto compare un accordo da 1,4 miliardi di dollari per il progetto HPAL Sambalagi. Il primo numero è produzione consuntiva; il secondo è un investimento annunciato che deve attraversare progettazione, autorizzazioni, finanziamento, costruzione, avviamento e raggiungimento della qualità commerciale. Sommarli come se fossero offerta disponibile cancellerebbe gli anni e i rischi che li separano.

La stessa scansione vale per ogni progetto: risorsa, studio preliminare, fattibilità, autorizzazione, decisione finale d'investimento, cantiere, commissioning e produzione commerciale sono stati successivi. Il capitale deve finanziare non soltanto la miniera, ma anche energia, acqua, acido, logistica, trattamento dei gas, gestione dei residui e laboratori di controllo. Se uno di questi elementi manca, il metallo resta nella roccia o in un intermedio inadatto al cliente.

Il riciclo attenua la pressione, ma segue la disponibilità dei prodotti a fine vita e deve riconquistare purezza e forma chimica. La diversificazione geografica richiede impianti reali, non soltanto obiettivi percentuali. Litio, nichel e cobalto illustrano così tre modi diversi in cui una risorsa può diventare materia prima industriale: attraverso l'equilibrio di un acquifero e una raffineria chimica, attraverso la scelta fra forni e autoclavi, oppure come frazione di valore recuperata da una filiera costruita per un altro metallo. La domanda finale li avvicina; geologia, processi e tempi continuano a separarli.

Restano infine i costi che un prezzo di borsa non riassume: pressione sull'acqua, stabilità dei depositi, esposizione a polveri e reagenti, sicurezza degli impianti ad alta temperatura o pressione e condizioni del lavoro informale. Questi fattori possono rallentare autorizzazioni, imporre nuovi investimenti o rendere inadatto un progetto tecnicamente possibile. La disponibilità futura nasce dall'incontro fra quantità geologica, accettabilità territoriale, prestazioni industriali e capacità di consegnare con continuità una qualità verificata.

Fonti e riferimenti

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Lithium

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-lithium.pdf

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Nickel

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-nickel.pdf

United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2026, Cobalt

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-cobalt.pdf

United States Geological Survey, A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines, Open-File Report 2013-1006

https://pubs.usgs.gov/of/2013/1006/OF13-1006.pdf

United States Geological Survey, Professional Paper 1802-K, Lithium

https://pubs.usgs.gov/pp/1802/k/pp1802k.pdf

United States Geological Survey, Nickel-Cobalt Laterites—A Deposit Model, Scientific Investigations Report 2010-5070-H

https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/h/pdf/SIR10-5070-H.pdf

International Energy Agency, Global Critical Minerals Outlook 2025

https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025

Commissione europea, European Critical Raw Materials Act

https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en

Joint Research Centre e Raw Materials Information System, Material System Analysis of five battery-related raw materials

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/material_system_analyses_battery_21102020_online.pdf

ISPRA, Lithium in Geothermal Brines

https://www.isprambiente.gov.it/en/news/circular-economy-and-critical-raw-materials-lithium-in-geothermal-brines

Eurostat, Comext DS-045409, interrogazione API del 27 settembre 2026

https://ec.europa.eu/eurostat/api/dissemination/statistics/1.0/data/DS-045409?freq=A&reporter=IT&partner=WORLD&product=28369100&flow=1&indicators=QUANTITY_IN_100KG&indicators=VALUE_IN_EUROS&time=2024&time=2025&lang=en

International Labour Organization, ILO Launches GALAB project in DRC to address child labour in cobalt mining sector, 20 novembre 2024

https://www.ilo.org/resource/news/ilo-launches-galab-project-democratic-republic-congo-address-child-labour

PT Vale Indonesia, 4Q 2024 Results Release

https://vale.com/documents/d/guest/2025-2-26-pt-vale-indonesia-4q-2024-results-release-english

Eurostat, PRODCOM Data Browser

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/prodcom_2/default/table?lang=en

Joint Research Centre, Raw Materials Information System

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/

04.16 – Terre rare

Una famiglia, molti mercati

Le terre rare non sono una sostanza che si estrae e si vende in blocco. Sono una famiglia di elementi che spesso si trovano mescolati nello stesso minerale, ma arrivano all'industria come composti, ossidi, metalli o leghe con qualità differenti. Fra la roccia e un ossido di neodimio abbastanza puro per un cliente specializzato si inseriscono una miniera, un impianto di concentrazione e una successione di operazioni chimiche. Il passaggio più difficile non è sempre trovare gli elementi: è separarli gli uni dagli altri, senza perdere troppo materiale e senza trasferire le impurità nel prodotto.

Nella definizione più ampia adottata dall'U.S. Geological Survey, la famiglia comprende i quindici lantanidi, l'ittrio e lo scandio: diciassette elementi. Il promezio appartiene alla serie chimica, ma è instabile e non rappresenta un normale prodotto minerario commerciale. Lo scandio viene spesso trattato separatamente nelle statistiche; la riga «terre rare» di una tabella non copre necessariamente tutti e diciassette gli elementi. Anche le etichette «leggere» e «pesanti» dipendono dalla convenzione della fonte. Nel rapporto geologico USGS qui utilizzato, le prime vanno dal lantanio al gadolinio; le seconde comprendono dal terbio al lutezio e l'ittrio. Non si tratta di due minerali o di due mercati uniformi.

Il cerio e il lantanio trovano impiego, fra l'altro, in catalisi, vetro e lucidatura. Neodimio e praseodimio servono a materiali magnetici; disprosio e terbio rispondono a specifiche particolari di alcune applicazioni. Questi usi spiegano perché la purezza e la disponibilità di ciascun elemento contino più del totale indifferenziato. La fabbricazione dei magneti e dei dispositivi che li utilizzano comincia però dopo il confine di questo capitolo: qui si segue il materiale fino alle forme standardizzate acquistabili da altre industrie.

L'ittrio ha una chimica abbastanza affine da comparire spesso negli stessi depositi e nelle stesse statistiche, pur non essendo un lantanide. Questa parentela spiega la denominazione collettiva, ma non cancella le differenze fra i singoli mercati. Anche quando due elementi condividono la miniera, il loro

percorso dopo il concentrato può separarsi secondo qualità richiesta, destinazione e capacità dell'impianto.

Occorre tenere ferme le unità lungo il percorso. Una tonnellata di roccia contiene una frazione di minerali utili; un concentrato è una miscela arricchita, non un ossido puro. REO indica l'equivalente in ossidi delle terre rare, mentre TREO indica il totale degli ossidi considerati in una miscela. Il metallo elementare pesa meno del corrispondente ossido perché quest'ultimo contiene anche ossigeno. Una produzione mineraria espressa in REO contenuto descrive dunque un altro stadio rispetto alle tonnellate di ossidi separati o di leghe vendute. Questa grammatica consente di capire il problema industriale: la natura consegna un paniere, il mercato chiede prodotti distinti.

Il giacimento decide la rotta

Le terre rare sono presenti in molti luoghi della crosta, ma una concentrazione geologica non è ancora una riserva economicamente coltivabile. Contano tenore, dimensione, mineralogia, accesso, possibilità di separare gli elementi richiesti e gestione dei residui. Nel rapporto geologico USGS del 2017 il cerio ha un'abbondanza crostale media stimata di circa 60 parti per milione, il lutezio di circa 0,8: la stessa etichetta «terre rare» raccoglie elementi con distribuzioni naturali diverse. La presenza diffusa nella roccia non significa che il materiale possa essere prodotto con qualità commerciale a un costo sostenibile.

La bastnäsite è un carbonato fluorurato che può alimentare depositi importanti di terre rare leggere. La monazite è un fosfato, presente anche nelle sabbie minerali pesanti; può portare con sé torio e richiede quindi una caratterizzazione radiologica dei flussi. Lo xenotimo, anch'esso un fosfato, è spesso associato all'ittrio e a elementi più pesanti. Nelle argille ad adsorbimento ionico una parte degli elementi è trattenuta sulle superfici dei minerali argillosi e può essere mobilizzata con soluzioni di scambio. Per depositi di questo tipo il rapporto USGS riporta tenori nell'ordine dello 0,05–0,4% di ossidi: un tenore inferiore a quello di molti giacimenti in roccia dura può accompagnarsi a una chimica di recupero differente. Non basta ordinare i depositi per percentuale di REO per stabilire quale sia più conveniente.

Anche la composizione interna, oltre al tenore totale, condiziona i ricavi del progetto. Fosfati o altri minerali recuperabili possono generare entrate

aggiuntive, ma richiedono altri circuiti di separazione. Perciò la risorsa geologica non si converte in una riserva con una semplice moltiplicazione fra tonnellate e prezzo di listino.

Nella roccia dura l'estrazione può richiedere perforazione, abbattimento, camion, frantumazione e macinazione. Gravità, separazione magnetica e flottazione concentrano i minerali utili secondo la loro composizione e la dimensione dei grani. Una sabbia pesante può essere trattata con separazioni gravimetriche, magnetiche ed elettrostatiche; una monazite ottenuta come coprodotto non equivale a un nuovo giacimento esclusivo di terre rare. Le argille superficiali richiedono invece controllo delle soluzioni, della percolazione e dell'erosione. In tutti i casi il rapporto fra roccia movimentata e prodotto ottenuto influenza fronti di scavo, traffico, polveri, bacini e quantità di residui fini. La sicurezza dei lavoratori dipende anche dalla stabilità degli scavi e dall'esposizione alle polveri, non soltanto dai reagenti dell'impianto chimico successivo.

Un bilancio ipotetico rende concreta la differenza fra tenore e recupero. Da 100.000 tonnellate di minerale all'1,5% TREO partono 1.500 tonnellate di ossidi equivalenti contenuti. Se la concentrazione produce 2.500 tonnellate di concentrato al 50% TREO, in quel prodotto si trovano 1.250 tonnellate di ossidi equivalenti: 2.500 × 0,50. Il recupero del contenuto iniziale è 1.250 ÷ 1.500, ossia l'83,3%. I tenori e le masse sono ipotesi didattiche, non una media mondiale. Le 2.500 tonnellate sono concentrato, delle quali soltanto metà è TREO equivalente; la differenza rispetto al contenuto di partenza segue le altre frazioni e gli eventuali circuiti di ricircolo. Già prima della raffinazione, una grande massa iniziale si è trasformata in un flusso più piccolo e più ricco.

Aprire il minerale

La concentrazione lascia intatta gran parte della struttura chimica dei minerali. Per liberare gli elementi, un impianto deve «aprire» la bastnäsite, la monazite o altri materiali: calore, acidi o basi rompono i legami della matrice e rendono le terre rare disponibili per la lisciviazione. Non esiste un solo reattore valido per tutti i depositi. Cambiano temperatura, reagenti, sequenza dei lavaggi e comportamento di fosforo, fluoro, ferro, calcio e materiali radioattivi naturali. Un concentrato ricco può diventare difficile da trattare se porta con sé impurezze che consumano reagenti o complicano la separazione.

In una rotta possibile, la tostatura o digestione prepara il minerale, poi una soluzione acida trasferisce gli elementi desiderati nel liquido. In un'altra, l'attacco alcalino agisce su un fosfato e la successiva lisciviazione recupera le terre rare. Le argille ad adsorbimento ionico possono richiedere una soluzione di scambio anziché la frantumazione e la digestione di un cristallo resistente. In ciascun caso la scelta si verifica con prove sul minerale reale: un campione omogeneizzato deve mostrare resa, stabilità della chimica e comportamento delle impurità. Una percentuale di recupero misurata in laboratorio non basta da sola a descrivere una produzione industriale continua.

Dopo la lisciviazione si separano solido e liquido. La soluzione può contenere molte terre rare insieme, oltre a ferro, alluminio e altri ioni. Regolare l'acidità fa precipitare selettivamente alcune impurità; filtrazioni e lavaggi spostano il materiale fra soluzione, fango e solidi da trattare. La neutralizzazione consuma basi e può generare gesso, idrossidi, fosfati e sali. La stessa acqua può circolare più volte, ma gli spurghi e i residui richiedono controllo di composizione e destinazione. Un consumo idrico riferito a una tonnellata di prodotto acquista significato solo conoscendo minerale, clima, ricircolo e confine del calcolo. I processi esaminati non sostengono un coefficiente generale comparabile.

I residui non hanno tutti lo stesso destino. Uno sterile di concentrazione contiene soprattutto ganga e minerali non recuperati; un fango di neutralizzazione raccoglie sostanze precipitate dal circuito chimico. Entrambi richiedono stabilità del deposito e controllo delle acque, ma la composizione e la possibilità di riutilizzo vanno accertate separatamente. La massa di residuo può essere molto maggiore della quantità dei singoli elementi richiesti dal mercato.

La presenza di torio e uranio naturali in alcuni minerali introduce un problema specifico di bilancio. La monazite può averne quantità significative; il dato geologico sul tenore del minerale non è una misura della dose ricevuta da un lavoratore o da una comunità. Secondo pH e reagenti, questi elementi possono concentrarsi in un solido, in una soluzione o in una fase intermedia. Servono campionamento, controlli radiologici, contenimento delle polveri, autorizzazioni e una gestione del residuo adeguata al luogo e al processo. Dire che la radioattività «resta in miniera» sarebbe tanto impreciso quanto presumere che scompaia nella raffinazione.

Il lavoro in questa fase combina apparecchiature calde, acidi o basi corrosive, liquidi pompati e filtrazione di polveri. Il contenimento protegge operatori e ambiente soltanto se tiene conto degli avviamenti, delle manutenzioni e degli imprevisti, quando linee e serbatoi possono essere aperti. All'uscita della purificazione si dispone finalmente di una soluzione utilizzabile per separare gli elementi, ma il neodimio è ancora mescolato a praseodimio, cerio e agli altri componenti del deposito. L'apertura del minerale è una condizione della separazione, non la separazione stessa.

Separare elementi quasi simili

Gli ioni dei lantanidi tendono ad avere la stessa carica e proprietà chimiche simili. Sono proprio le piccole differenze nella loro affinità per un reagente che permettono di separarli, ma una sola operazione raramente produce tutti gli ossidi con la purezza richiesta. Nella cosiddetta estrazione con solvente, una soluzione acquosa viene messa in contatto con un liquido organico contenente un estrattante. Un elemento passa preferenzialmente in una fase, un altro rimane più facilmente nell'altra. Dopo il contatto, le fasi vengono separate; lavaggi e una successiva operazione di rilascio trasferiscono il metallo desiderato in una nuova soluzione acquosa. Il solvente può tornare in circuito, mentre gli spurghi impediscono l'accumulo di impurità.

Ripetere i contatti consente di sfruttare differenze minuscole. Gli impianti impiegano batterie di miscelatori e decantatori, spesso con correnti che avanzano in direzioni opposte. Le condizioni si regolano per la composizione della carica e per la coppia di elementi da dividere. L'operatore non sceglie soltanto quanti stadi installare: deve governare acidità, temperatura, rapporto fra le fasi, estrattante, portate e purezza delle soluzioni che ritornano a monte. Una variazione del minerale alimentato può spostare l'equilibrio e richiedere aggiustamenti in più punti della batteria. Per alcune separazioni ad alta purezza possono occorrere decine o centinaia di contatti teorici; questo non è un numero standard di apparecchiature per ogni impianto.

Lo scambio ionico sfrutta invece una fase solida, per esempio una resina, che trattiene alcuni ioni e li rilascia quando cambiano le condizioni della soluzione. Ha impieghi pertinenti per flussi diluiti e prodotti molto puri, ma la rigenerazione genera a sua volta liquidi da gestire. In entrambe le famiglie di processo, aumentare la purezza può costare prodotto utile: una parte resta nei

flussi laterali, torna al circuito o richiede un trattamento ulteriore. Per valutare l'impianto bisogna conoscere insieme la composizione della carica, la qualità dell'uscita, i recuperi dei singoli elementi e il destino delle correnti secondarie.

Il prodotto separato viene precipitato, per esempio come carbonato o ossalato, poi filtrato, lavato ed essiccato. La calcinazione porta all'ossido, eliminando acqua e altri componenti volatili secondo il composto di partenza. L'ossido è una forma commerciale, purché raggiunga le specifiche di composizione e impurità richieste: un nome chimico sulla scheda non garantisce da solo che ogni acquirente possa utilizzarlo. Anche qui polveri, calore, solventi e liquidi di lavaggio richiedono protezione dei lavoratori e trattamento dei flussi; i loro volumi dipendono dalla configurazione dell'impianto.

Tre rese alte, concatenate, possono lasciare una distanza visibile fra ingresso e prodotto. Si immagini una soluzione con 1.000 tonnellate REO equivalenti: la purificazione ne recupera il 95%, la precipitazione l'88% e la calcinazione il 97%. Restano 1.000 × 0,95 × 0,88 × 0,97 = 810,92 tonnellate REO, cioè l'81,092% del contenuto iniziale. I tassi illustrano la concatenazione dei rendimenti, senza rappresentare le prestazioni medie di un impianto reale. Il contenuto che non compare in quel prodotto può trovarsi in ricircolo o in flussi separati; per stabilire la perdita effettiva servirebbe il bilancio dell'intero impianto. La separazione conta quindi per due ragioni insieme: ottiene la qualità vendibile e determina quanto di ciascun elemento si riesce davvero a consegnare.

Il prodotto acquistato non è terra rara generica

Alcune industrie acquistano l'ossido separato; altre hanno bisogno del metallo o di una lega. Per passare dall'ossido al metallo bisogna sottrarre l'ossigeno, per esempio con una riduzione metallotermica o mediante elettrolisi di sali fusi quando la rotta è adatta. Seguono eventuali fusione, miscelazione e colata della lega. Un ossido di neodimio, neodimio metallico e una lega contenente neodimio hanno masse, impurità ammesse e lavorazioni successive differenti. Il mischmetal è una lega di più terre rare: nella voce di prezzo USGS esaminata la composizione di riferimento è il 65% cerio e il 35% lantanio. Non è una ricetta obbligatoria per qualunque lega commercializzata con quel nome.

Le specifiche trasformano una formula in un bene acquistabile. La purezza può riferirsi alla massa secca, mentre un carico consegnato contiene anche umidità;

ferro, calcio, sodio, torio, uranio o un altro lantanide possono essere tollerati in un uso e penalizzanti in un altro. Prezzo e resa economica dipendono dal prodotto effettivo e dalla possibilità di qualificarlo presso il cliente, oltre che dalla massa nominale di REO. Anche la forma fisica cambia la logistica e il trattamento: polvere di ossido, pezzi di metallo e lega non sono intercambiabili in un reattore.

Il giacimento consegna una composizione che non segue automaticamente la domanda. Se prevalgono cerio e lantanio, la crescita delle applicazioni del neodimio e del praseodimio non moltiplica la loro frazione nel minerale. Il produttore deve trovare sbocchi per gli altri elementi, stoccarli o ridimensionare il progetto. Questo squilibrio aiuta a capire perché il prezzo di un elemento richiesto non rappresenti il valore medio di una tonnellata di concentrato misto. La separazione più spinta ha senso soltanto se il prodotto aggiuntivo compensa lavorazioni, perdite e capitale immobilizzato.

La distinzione fra ossido e metallo ha anche una conseguenza quantitativa semplice. Nell'ossido Nd_2O_3 il neodimio rappresenta teoricamente circa l'85,73% della massa: l'ossigeno costituisce il resto. È una conversione stechiometrica, non la resa del processo di riduzione, che dipende da perdite e purezza. Anche una lega contiene altri elementi per definizione. Un contratto deve quindi precisare se paga la massa del composto, il contenuto di un elemento o una specifica qualità del prodotto.

Un confronto della stessa tabella USGS/Argus mostra la distanza fra mercati: nel 2024 la media FOB (franco a bordo, al porto di imbarco) dell'ossido di lantanio con purezza minima del 99,5% era 0,97 dollari al chilogrammo, quella dell'ossido di neodimio con la stessa soglia dichiarata era 56 dollari al chilogrammo. Sono prezzi di due ossidi distinti, con anno e base di quotazione comuni; non sono il costo di produzione di ciascuno né il ricavo ottenibile moltiplicando tutto il paniere minerario per 56 dollari. La tabella documentale esaminata non offre un prezzo analogo verificato per disprosio e terbio. Il valore commerciale delle terre rare nasce così dalla composizione, dalla qualità e dalla possibilità di portare ogni frazione fino al suo mercato, non da un singolo «prezzo delle terre rare».

La materia che ritorna

Una seconda alimentazione può provenire da materiali già passati per la prima filiera industriale: magneti permanenti, residui di fabbricazione, batterie al nichel-metallo idruro e altri flussi caratterizzati. La raccolta dei beni a fine vita, il loro smontaggio e la selezione generale appartengono alla gestione dei rifiuti. Per la metallurgia delle terre rare il punto di partenza è invece una carica con massa e composizione conosciute, che un impianto può accettare. Non ogni oggetto che contiene neodimio diventa automaticamente una materia prima secondaria commerciabile.

Anche una carica di magneti selezionati presenta una chimica propria. Ferro, boro, nichel dei rivestimenti, adesivi e altri componenti accompagnano neodimio e praseodimio; disprosio o terbio, quando presenti, variano secondo il grado del materiale. Il trattamento può partire da demagnetizzazione e preparazione meccanica della carica, proseguire con lisciviazione e rimozione delle impurità, quindi separare e precipitare i singoli elementi. Altre rotte impiegano una fase termica e producono un intermedio da raffinare. La minore necessità di scavare e macinare roccia non elimina l'energia, i reagenti, i residui né la difficoltà di ottenere nuovamente ossidi qualificati.

Per vedere come si riduce il contenuto lungo la catena, si considerino per ipotesi 1.000 tonnellate di magneti già separati e caratterizzati con il 30% di REO equivalente: il contenuto iniziale è 300 tonnellate. Supponendo recuperi del 90% nel pretrattamento, del 92% nella lisciviazione, del 95% nella separazione e del 98% nella calcinazione, l'uscita è 300 × 0,90 × 0,92 × 0,95 × 0,98 = circa 231,3 tonnellate REO. È il 77,1% del contenuto iniziale, non il 77,1% della massa dei magneti. Il tenore del 30% e le rese servono soltanto a seguire questo bilancio ipotetico, non a descrivere l'industria mondiale. Le 1.000 tonnellate rappresentano una carica selezionata, non rifiuti indifferenziati raccolti.

Un recupero tecnico in un circuito non determina il tasso di riciclo di un'economia. Quest'ultimo dipende anche da quanta materia diventa disponibile a fine vita, viene individuata, raccolta, separata e inviata a un impianto, e da quanto prodotto conforme ne esce. Un caso industriale di recupero dell'80% da batterie al nichel-metallo idruro citato dall'USGS mostra una possibilità tecnica, non la quota globale riciclata. Per neodimio,

praseodimio, disprosio e terbio manca qui una serie mondiale comparabile di tassi effettivi. Fra impiego e ritorno passano inoltre anni: il riciclo può integrare la produzione primaria, ma la disponibilità di cariche e la qualità dei flussi impediscono di trattarlo come una sostituzione immediata e completa della miniera.

I residui di produzione che tornano rapidamente nello stesso circuito sono un'altra cosa rispetto ai magneti giunti a fine vita: composizione e proprietario possono essere noti fin dall'origine, mentre un flusso post-consumo richiede identificazione e separazione. Tenerli distinti aiuta a valutare sia la qualità della carica sia il contributo effettivo del recupero alla domanda futura.

Le mappe della miniera e della separazione

La produzione mineraria mondiale stimata dall'USGS per il 2025 è 390.000 tonnellate di ossidi equivalenti contenuti nei concentrati, contro 380.000 nel 2024. La definizione statistica della voce esclude i concentrati di monazite dalla riga considerata. Non si tratta di 390.000 tonnellate di metalli pronti per la vendita e nemmeno della massa totale di minerale scavato. La Cina figura con 270.000 tonnellate REO, circa il 69% del totale mondiale arrotondato; gli Stati Uniti con 51.000, l'Australia con 29.000 e il Myanmar con 22.000. Il loro ordine aiuta a leggere la concentrazione dell'estrazione, ma non dà una classifica della capacità di produrre ossidi puri di ogni elemento.

Dietro quelle quantità si trovano materie diverse. Il Myanmar occupa una posizione importante per i flussi di terre rare pesanti verso la catena cinese, ma la stima mineraria richiede cautele; gli Stati Uniti e l'Australia mostrano che esistono poli estrattivi fuori dalla Cina, senza che il loro concentrato rappresenti per forza una filiera nazionale completa di separazione e metallurgia. La destinazione della carica dopo la miniera conta quanto la sua origine.

Una raffineria deve ricevere materiale compatibile, aprirlo chimicamente, separare i singoli elementi e consegnare prodotti qualificati. Capacità e competenze accumulate lungo queste fasi non si deducono dalle quote minerarie. La Cina combina un'importante estrazione nazionale con una posizione centrale nella separazione e nelle trasformazioni successive. La Commissione europea afferma che il 100% delle terre rare utilizzate per magneti permanenti nell'Unione è raffinato in Cina. Il perimetro è quello della

specifica catena di materiali per magneti: la frase non attribuisce alla Cina ogni ossido, lega o prodotto di terra rara consumato in Europa. Una miniera aggiuntiva altrove può modificare la mappa dell'estrazione senza cambiare nello stesso momento quella degli ossidi separati.

Le statistiche di produzione, commercio e consumo raccontano altre mappe ancora. Un paese può estrarre concentrato e importare metallo; un altro può trasformare un carbonato misto importato e riesportare ossidi. Nel 2025 l'USGS stima per gli Stati Uniti 8.900 tonnellate REO di produzione di composti e metalli e 27.000 tonnellate REO di consumo apparente degli stessi prodotti, con dipendenza netta dalle importazioni stimata al 67%. Questa base è diversa dalle 51.000 tonnellate REO di concentrati minerari attribuite alla produzione statunitense: sottrarre i due valori per inventare un export o una perdita di processo ignorerebbe scorte, trasformazioni e categorie statistiche. La distinzione non è una cautela ornamentale; individua il punto in cui l'approvvigionamento può interrompersi.

Questa geografia produce anche scambi di valore diversi. La miniera sostiene l'estrazione e la preparazione del concentrato; la separazione richiede impianti chimici, competenze di processo e un portafoglio di acquirenti per più elementi. Le entrate di una fase non remunerano automaticamente chi sostiene i costi e i rischi dell'altra. Per le comunità minerarie contano uso del territorio e gestione dei residui; presso le raffinerie si concentrano invece reagenti, effluenti e lavoro specializzato. Localizzare ogni pressione consente di discutere la filiera senza attribuire ogni effetto al solo paese che compare nella statistica mineraria.

Europa e Italia: progetti, non tonnellate già prodotte

La risposta europea non consiste nel cercare una sola nuova miniera. Il regolamento sulle materie prime critiche stabilisce per il 2030 riferimenti di capacità interna corrispondenti almeno al 10% del fabbisogno annuale nell'estrazione, al 40% nel trattamento e al 25% nel riciclo. Mira inoltre a non ricevere più del 65% del fabbisogno di una materia prima strategica, in una fase pertinente, da un singolo paese terzo. Questi sono obiettivi di politica industriale riferiti alle materie strategiche, non quote già raggiunte dalle terre rare né una promessa che ogni elemento seguirà lo stesso percorso.

Un progetto di estrazione produce un concentrato; un separatore trasforma un intermedio in ossidi distinti; una metallurgia successiva arriva a metalli e leghe; un riciclatore ha bisogno di una carica secondaria effettivamente disponibile. Se manca uno dei raccordi, aumentare la capacità di una fase può spostare il collo di bottiglia alla successiva. Il riconoscimento come progetto strategico ai sensi del regolamento indica rilevanza e criteri di selezione, non attesta che lo stabilimento sia in esercizio. Fra progetto, autorizzazione, finanziamento, cantiere e qualificazione del prodotto trascorrono tempi che le tabelle di capacità nominale non misurano.

A Puławy, in Polonia, il catalogo dei progetti strategici indica un impianto di separazione di carbonati misti con avvio previsto nel 2027. La scheda riporta 1.018 tonnellate annue di ossido misto NdPr, una miscela commerciale degli ossidi di neodimio e praseodimio destinata anche alla filiera dei magneti, e, nelle righe dedicate ai prodotti separati, 805 di ossido di neodimio e 212 di ossido di praseodimio. Queste voci descrivono capacità progettuali e prodotti collegati: sommarle tutte come se fossero uscite indipendenti gonfierebbe il totale. Il dato non dimostra produzione commerciale nel 2025 o nel 2026, né specifica la resa lungo ogni passaggio.

Per l'Italia il catalogo ufficiale include INSPIREE, a Frosinone, dedicato al recupero di terre rare da magneti permanenti provenienti da hard disk e motori elettrici. La scheda indica il 2027 come data prevista di produzione, senza una capacità annua puntuale nel riepilogo esaminato. Il progetto colloca dunque un'attività italiana nella filiera secondaria, ma non prova una miniera nazionale, una produzione corrente di ossidi o un volume di metallo già venduto. Laboratori, impianti pilota, recupero e raffinazione commerciale vanno descritti per lo stadio effettivamente raggiunto.

Anche la statistica disponibile impone misura. Per gli ossidi, i metalli e le leghe di terre rare non emerge qui una serie corrente che consenta di ricostruire un bilancio omogeneo e verificato di produzione e scambi per Italia e UE-27. Le voci doganali possono inoltre aggregare composti e composizioni diverse, mentre una rilevazione di produzione interna risponde a un'altra domanda. In assenza di quantità riconciliate non è possibile attribuire all'Italia un saldo commerciale; un dato non rilevato nelle tabelle non dimostra una produzione nulla. La sua posizione si capisce meglio indicando con esattezza quale fase è documentata, quale è progettata e quale resta senza misura pubblicabile.

Il caso europeo mostra perché gli obiettivi percentuali devono diventare catene materiali. Una capacità di separare ossidi avrebbe bisogno di concentrati o carbonati misti con qualità costante, contratti di fornitura e sbocchi per tutte le frazioni. Un riciclatore avrebbe bisogno di magneti selezionati in quantità sufficienti e di una fase capace di trasformare l'intermedio nel prodotto che il mercato richiede. La data indicata in una scheda di progetto è una tappa prevista; il contributo ai benchmark si misura soltanto quando esiste output conforme e continuativo.

Dove si sposta il collo di bottiglia

La geologia determina la miscela iniziale; la chimica decide se quella miscela può diventare una gamma di ossidi puri; la metallurgia e le specifiche contrattuali stabiliscono quali prodotti arrivano davvero al cliente. È questo collegamento che rende lunga una diversificazione industriale. La scoperta di una risorsa precede studi, autorizzazioni, finanziamento, costruzione, avviamento e prove ripetute di qualità. Un impianto appena inaugurato non utilizza necessariamente tutta la capacità nominale; un ossido prodotto una volta non è ancora una fornitura stabile. Possedere concentrato senza capacità adeguata di separazione conserva una dipendenza, pur cambiandone il luogo.

Le restrizioni commerciali mostrano la sensibilità di una catena concentrata. La scheda USGS del 2026 descrive controlli cinesi all'esportazione introdotti nell'aprile 2025 per un gruppo di elementi comprendente terbio, disprosio e ittrio, un'estensione nell'ottobre e una successiva sospensione delle misure di ottobre nel novembre dello stesso anno. Si tratta di provvedimenti di licenza datati e differenziati, non di un embargo universale o di una fotografia automaticamente valida in ogni momento successivo. Il loro effetto potenziale nasce dal fatto che un acquirente può disporre di minerale o di ossido misto e dipendere ancora da una fase di separazione esterna.

Riciclo, sostituzione e nuove capacità possono ridurre singole vulnerabilità, ma ciascuno incontra vincoli propri. Il riciclo ha bisogno di cariche realmente disponibili e prodotti conformi; sostituire un elemento cambia prestazioni e progetto a valle; aprire una miniera richiede anche sbocchi per ogni frazione recuperata. Il punto decisivo è quindi materiale: gli acquirenti richiedono pochi elementi in forme precise, ottenibili solo attraverso una sequenza di

trasformazioni. La sicurezza dell'approvvigionamento dipende dalla continuità fra tutte queste fasi.

La prova concreta di una filiera più robusta non sarà quindi il numero dei progetti annunciati, ma la possibilità di seguire il materiale senza salti: concentrato disponibile, reagenti e impianti adatti, ossidi separati con resa documentata, metalli o leghe conformi e clienti che li qualificano. Un progetto può migliorare una sola di queste condizioni; insieme, progetti diversi possono costruire una capacità che oggi non emerge dal mero conteggio delle miniere. È in questo intervallo fra potenziale geologico e prodotto consegnato che si formano tempi, costi e dipendenze.

Fonti e riferimenti

U.S. Geological Survey – Mineral Commodity Summaries 2026, Rare Earths

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-rare-earths.pdf

U.S. Geological Survey – Rare Earths Statistics and Information

https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information

U.S. Geological Survey – Professional Paper 1802-O, Rare Earth Elements

https://pubs.usgs.gov/pp/1802/o/pp1802o.pdf

U.S. Geological Survey – Fact Sheet 2014-3078, Rare Earth Elements

https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3078/pdf/fs2014-3078.pdf

Commissione europea – European Critical Raw Materials Act

https://commission.europa.eu/topics/competitiveness/green-deal-industrial-plan/european-critical-raw-materials-act_en

Unione europea – Regolamento (UE) 2024/1252

https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj

Commissione europea – Selected strategic projects under CRMA

https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/strategic-projects-under-crma/selected-projects_en

04.17 – Metalli per leghe e applicazioni speciali

Una proprietà richiede una forma precisa

Un acciaio che deve resistere alla corrosione, una parte che lavora contro una superficie abrasiva e un componente elettronico molto piccolo hanno bisogno di materiali diversi. In ciascun caso può bastare una quantità relativamente contenuta di un elemento per ottenere la proprietà cercata. Quella quantità, però, deve arrivare nella forma giusta: una ferrolega da aggiungere a un bagno di acciaio, una polvere da trasformare in carburo oppure un materiale dalla purezza e dalla struttura controllate. Dal nome dell'elemento occorre dunque risalire al prodotto effettivamente disponibile.

Manganese, cromo, vanadio, molibdeno, tungsteno, tantalio e niobio sono spesso accostati come metalli per leghe o applicazioni speciali. L'etichetta raccoglie filiere con problemi industriali differenti. Il manganese entra in grandi quantità nella siderurgia; il tantalio può raggiungere un condensatore sotto forma di polvere qualificata; il tungsteno può arrivare a un produttore di materiali duri come carburo. Anche quando due elementi si trovano nello stesso minerale, i loro percorsi commerciali possono separarsi molto prima dell'utilizzatore finale.

Per seguire questi percorsi occorre distinguere alcune masse. Il minerale comprende l'elemento desiderato e il resto della roccia; il concentrato è un prodotto arricchito, ancora lontano dalla purezza del metallo. Un ossido pesa anche l'ossigeno legato all'elemento. Una ferrolega contiene ferro e altri componenti oltre al metallo che interessa all'acciaieria. La produzione mineraria espressa come «contenuto di manganese» non può perciò essere confrontata direttamente con tonnellate di ferromanganese vendute. Trasformazioni e perdite collegano queste grandezze e ne cambiano il valore.

Un calcolo ipotetico chiarisce il punto. Se un'acciaieria volesse introdurre 1.000 tonnellate di manganese contenuto con una ferrolega al 75% di manganese, avrebbe bisogno di circa 1.333 tonnellate di lega prima di considerare le perdite del processo. Le 333 tonnellate restanti comprenderebbero ferro e altri costituenti. Il 75% è scelto per l'esempio, non rappresenta una media mondiale:

una composizione commerciale reale andrebbe specificata, come pure la frazione di manganese che resta effettivamente nell'acciaio. La miniera, il produttore della ferrolega e l'acciaieria potrebbero quindi registrare tre masse differenti per una stessa catena di fornitura.

La domanda del capitolo nasce da questa distanza. Se una proprietà richiede una forma industriale precisa, dove può interrompersi la catena che la rende possibile? La risposta cambia molto fra un forno per ferroleghe, una miniera che vive del rame, un impianto di chimica del tungsteno e una produzione di polveri per elettronica.

Il vincolo del forno

Manganese e cromo permettono di partire da due grandi flussi legati all'acciaio. Il primo contribuisce a controllare l'ossigeno e lo zolfo e a ottenere proprietà meccaniche richieste da molti gradi; il secondo è essenziale per la resistenza alla corrosione di numerosi acciai inossidabili. Il ruolo dell'elemento nel materiale finale non coincide tuttavia con la forma in cui esce dalla miniera. Il produttore di acciaio acquista una carica dalla composizione prevedibile, spesso ferromanganese, silicomanganese o ferrocromo, anziché versare roccia non trattata nel bagno.

I minerali di manganese comprendono ossidi e carbonati in depositi dalle caratteristiche diverse. Dopo estrazione e frantumazione, vagliatura, lavaggio o concentrazione possono aumentare la qualità della carica. Contano il tenore di manganese, la presenza di ferro, fosforo e silice, l'umidità e la dimensione dei pezzi. Per produrre ferromanganese, la carica entra con riducenti carboniosi e fondenti in un forno elettrico ad arco sommerso: gli ossidi vengono ridotti, la lega liquida si separa dalla scoria e ciascun flusso esce con una propria composizione. Il silicomanganese richiede anche una sorgente di silicio e risponde a una specifica distinta dal ferromanganese.

La cromite segue una logica apparentemente simile: estrazione, preparazione del minerale, riduzione in forno e produzione di ferrocromo. Cambia però la qualità che occorre ottenere. Il rapporto fra cromo e ferro nel concentrato, le impurità e il tenore di ossido di cromo influenzano il grado di ferrolega producibile. Ferrocromo ad alto carbonio e prodotti raffinati non sono intercambiabili in ogni acciaio. Una carenza del minerale adatto, della capacità

di forno o della qualità richiesta può contare anche quando esistono giacimenti di cromite altrove.

Il legame con l'acciaio non obbliga a collocare la ferrolega accanto alla miniera o all'acciaieria. Minerale e riducente devono raggiungere il forno, e la sua posizione risente anche del costo e dell'affidabilità dell'elettricità, dell'accesso ai trasporti e della possibilità di gestire scorie e polveri. A valle, un'acciaieria può acquistare una lega con granulometria, carbonio e impurità definiti. La continuità della fornitura dipende dal grado richiesto, oltre che dalla massa complessiva del metallo. Il prezzo remunera quindi più della massa dell'elemento: incorpora trasformazione e capacità di consegnare una composizione ripetibile.

Le statistiche mostrano sia la scala sia la trappola del confronto. Nelle schede dello United States Geological Survey, abbreviato USGS, il totale minerario mondiale stimato per il 2025 è di 20 milioni di tonnellate di manganese contenuto. Per il cromo è di 51 milioni di tonnellate di minerale di cromite commerciabile in peso lordo. Questa è la massa del prodotto minerario, con ossigeno, ferro e altri componenti: per confrontare i due elementi servirebbe prima riportare entrambe le serie a contenuto metallico. Per arrivare dalle loro masse alla ferrolega disponibile servirebbero tenori, recuperi e bilanci degli impianti.

Il forno introduce anche costi e pressioni ambientali propri. Richiede elettricità di potenza elevata, riducenti, movimentazione di cariche e gestione di metallo e scoria caldi. Polveri e fumi vanno captati e trattati; le scorie e i materiali raccolti nei filtri devono essere caratterizzati prima di un eventuale recupero. La scheda europea sulle migliori tecniche disponibili per i metalli non ferrosi include esplicitamente le ferroleghe e individua emissioni in aria, acque e uso efficiente delle risorse fra i problemi da governare. Il consumo elettrico e la quantità di scoria vanno invece riferiti al grado del minerale, all'impianto, al riducente e al prodotto.

Anche il rischio per le persone è localizzato nel processo, non nell'etichetta «metallo». Miniere e concentratori espongono a mezzi mobili e polveri; un forno aggiunge alte temperature, metallo liquido, gas e interventi di manutenzione. Il codice dell'Organizzazione internazionale del lavoro sui metalli non ferrosi tratta questi pericoli, la formazione e il controllo dell'esposizione. Nel caso del cromo occorre inoltre evitare un'equivalenza

tossicologica: il cromo presente in una lega metallica non è automaticamente cromo esavalente. Quest'ultimo riguarda specifici composti e condizioni di formazione o esposizione, che vanno identificati prima di discutere un rischio sanitario.

Una tonnellata di minerale in un paese, un forno in un altro e un'acciaieria in un terzo possono appartenere alla stessa filiera. Il luogo dell'estrazione non coincide necessariamente con quello in cui si ottiene la ferrolega richiesta. Esistono però metalli per i quali il problema precede persino la scelta del forno: la loro offerta nasce come parte del processo produttivo di un'altra materia.

Il vincolo del coprodotto

La molibdenite, un solfuro di molibdeno, può accompagnare i minerali di rame nei grandi depositi porfirici. Nel concentratore il minerale viene frantumato, macinato e sottoposto a flottazione. Se la mineralogia e il circuito lo consentono, un passaggio separa il concentrato di molibdenite da quello di rame. Il concentrato di molibdeno viene poi tostato per ottenere un ossido tecnico; da lì possono nascere ferromolibdeno per gli acciai o prodotti chimici con altre specifiche. Esistono anche miniere primarie di molibdeno, ma la produzione come coprodotto introduce un legame economico particolare.

Una miniera di rame non aumenta automaticamente il molibdeno recuperato quando cresce il suo prezzo. Deve trattare un minerale che lo contenga, disporre del circuito di separazione, controllare la qualità e trovare un compratore. Al contrario, una riduzione dell'attività nel rame può comprimere la disponibilità del coprodotto anche se la domanda di molibdeno resta forte. Il circuito condiviso non lo rende gratuito: aggiunge impianti, reagenti, energia, personale e residui. La disponibilità geologica è solo una delle condizioni della sua offerta.

Nella tostatura della molibdenite cambia il materiale stesso. Il solfuro viene ossidato; gas e polveri richiedono captazione e controllo, mentre l'ossido ottenuto ha un contenuto e una qualità differenti dal concentrato iniziale. Attribuire all'intero molibdeno estratto il costo di aprire una miniera autonoma trascurerebbe l'infrastruttura condivisa con il rame; trattarlo come prodotto senza costo trascurerebbe separazione e trasformazione. Il confine del calcolo economico cambia il risultato tanto quanto il prezzo.

Il vanadio presenta un'altra combinazione. La titanomagnetite vanadifera è la sua principale fonte geologica: nella rotta siderurgica, il ferro viene lavorato per ottenere acciaio e una parte del vanadio si concentra in una scoria da trattare ulteriormente. Altrove può provenire da minerali dedicati o da residui di attività industriali, fra cui catalizzatori esausti, ceneri e materiali petroliferi. Per recuperarlo occorre conoscere la composizione della carica, rendere solubile l'elemento quando necessario, separarlo dalle impurità e ottenere un composto commerciabile, come il pentossido di vanadio, oppure ferrovanadio. La produzione mineraria, il recupero dalla scoria e quello dai residui industriali descrivono perciò flussi distinti.

Una scoria metallurgica e un catalizzatore esausto richiedono trattamenti adatti alle rispettive composizioni. Possono avere tenori diversi e accompagnarsi a ferro, nichel, zolfo o altre sostanze da separare. Per trasformare i residui disponibili in produzione recuperata servono analisi della carica, un processo adatto e una specifica del prodotto finale. Il recupero può ridurre la richiesta di materia primaria per una certa applicazione, ma produce anch'esso flussi da trattare e non cancella il lavoro minerario che ha originato il materiale.

Il numero mondiale USGS per il 2025, stimato in 110.000 tonnellate di vanadio contenuto nella produzione mineraria, dà un ordine di grandezza alla riga statistica che misura. Non rappresenta da solo tutta la produzione secondaria da catalizzatori o residui. Una scoria che contiene vanadio non equivale inoltre a vanadio già recuperato: occorre misurare quanto contenuto entra nel circuito, quanto ne esce in un prodotto accettato dal cliente e che cosa rimane negli altri flussi. Il tasso di raccolta di un residuo, la resa metallurgica e la quota di materia seconda usata da un'industria sono indicatori differenti.

Nel materiale finale vanadio e molibdeno possono contribuire alla resistenza o al comportamento ad alta temperatura di alcuni acciai e leghe. Questo non significa che siano sempre sostituibili l'uno con l'altro: il grado richiesto, il trattamento termico e il costo cambiano insieme alla composizione. Per il vanadio esiste anche la destinazione delle batterie a flusso, che richiede un circuito e una qualità diversi dalla ferrolega siderurgica. Una previsione di crescita delle batterie non è una quantità già sottratta agli acciai.

Il coprodotto sposta il collo di bottiglia dentro un'attività altrui; il recupero secondario lo sposta nella qualità di un residuo e nella capacità di trasformarlo. Il tungsteno mostra un'altra situazione: anche dopo aver estratto un minerale

dedicato e ottenuto un concentrato, la forma richiesta dal mercato resta lontana.

Il vincolo della trasformazione chimica

Wolframite e scheelite sono due famiglie principali di minerali da cui si ricava tungsteno. Un impianto minerario frantuma e macina la roccia, poi sfrutta differenze di densità, proprietà magnetiche o comportamento nella flottazione per separare la frazione utile. Il concentrato viene valutato per contenuto di ossido di tungsteno, impurità e umidità. Questa misura commerciale non equivale a tonnellate di tungsteno puro, e il concentrato non può ancora diventare direttamente la polvere o il carburo di cui ha bisogno un fabbricante di materiali duri.

La trasformazione passa normalmente da una fase chimica in soluzione. Il tungsteno del concentrato viene portato in composti solubili; purificazione e precipitazione conducono al paratungstato d'ammonio, chiamato APT dalle iniziali inglesi. La calcinazione produce ossidi, e la loro riduzione può dare una polvere di tungsteno metallico. Facendo reagire la polvere metallica ad alta temperatura con carbonio, per esempio in forma di nerofumo, si ottiene il carburo di tungsteno (WC). Il carburo può poi essere unito a un legante metallico, spesso cobalto, e sinterizzato per realizzare un materiale duro: la fabbricazione dell'inserto o dell'utensile finito appartiene alla fase industriale successiva, non alla produzione della materia prima qui descritta.

Fra concentrato e APT si selezionano impurità che potrebbero seguire il tungsteno nelle fasi successive. Non basta che il minerale abbia un tenore elevato: la sua composizione determina reagenti e separazioni necessari, e un prodotto fuori specifica può non essere accettato dal trasformatore. APT, ossido, polvere e carburo possono essere venduti a clienti diversi; contarli tutti come «produzione di tungsteno» e sommarne le masse conterebbe più volte l'elemento che passa da una fase all'altra.

Il punto di fusione eccezionalmente alto del tungsteno aiuta a comprendere l'importanza della metallurgia delle polveri, ma non spiega da solo l'intera sequenza. La chimica serve prima a separare il tungsteno dagli altri componenti del minerale e a controllare impurità che renderebbero inadatto il prodotto. Dopo la riduzione contano anche dimensione e distribuzione dei granuli,

ossigeno residuo e composizione del carburo. La fabbrica di APT svolge quindi una funzione diversa dagli impianti che producono polveri e carburi. Un cliente che compra un prodotto per resistere all'usura non può sostituire un'interruzione della fornitura di carburo con un carico di concentrato minerario.

Il totale minerario mondiale USGS stimato per il 2025 è 85.000 tonnellate di tungsteno contenuto. Nella scheda la testata della produzione mineraria porta l'indicatore di stima, anche se la colonna riporta semplicemente «2025». Quel valore misura il tungsteno attribuito al prodotto della miniera, non la capacità degli impianti chimici né le tonnellate di carburo disponibili. Per comprendere una dipendenza commerciale bisognerebbe seguire separatamente concentrati, APT, ossidi, polveri e carburi, ciascuno con geografia e capacità proprie. Per quantificare la dipendenza in ogni fase servirebbero anche dati comparabili sulla capacità effettiva degli impianti di trasformazione.

Questo percorso lascia pressioni differenti da quelle del forno per ferroleghe. La concentrazione del minerale consuma energia e può produrre residui fini da gestire; dissoluzione e purificazione richiedono reagenti, acqua di processo e controllo delle correnti di scarto; riduzione e produzione di polveri aggiungono altre richieste energetiche e di sicurezza. Senza un bilancio riferito a uno stabilimento e a un prodotto precisi, non si può confrontare una tonnellata di APT con una tonnellata di ferrocromo dichiarando semplicemente quale sia «più inquinante». Anche l'acqua prelevata, quella consumata e quella scaricata dopo trattamento rispondono a domande diverse.

La qualità della polvere è dunque una parte della disponibilità, non un dettaglio che compare soltanto alla fine. Lo stesso principio conduce al tantalio, ma con un mercato molto più piccolo e una destinazione in cui la struttura della polvere può essere decisiva. Accanto al tantalio compare spesso il niobio nei nomi dei minerali; le loro filiere maggiori, tuttavia, divergono.

Il vincolo della specifica e il bivio dei mercati

La denominazione columbite-tantalite indica minerali che possono contenere tantalio e niobio in proporzioni variabili. Sarebbe facile immaginare due flussi paralleli usciti dalla stessa miniera e separati soltanto all'ultimo passaggio. Le due filiere principali seguono però geografie diverse: il tantalio può provenire

anche da pegmatiti e da altri circuiti minerari, mentre la produzione di niobio è fortemente legata al pirocloro di carbonatiti, con una geografia commerciale dominata dal Brasile. Una parentela mineralogica non basta a descrivere la scala della fornitura.

Per il tantalio, il concentrato passa attraverso attacchi chimici e separazioni che rimuovono altri metalli e portano a composti purificati, fra cui il pentossido di tantalio. Una parte della filiera prosegue verso metallo e polveri. Nell'anodo di un condensatore, la polvere di tantalio viene sinterizzata in una struttura porosa: la grande superficie interna permette di ottenere elevata capacità elettrica in poco spazio. Purezza, dimensione dei granuli e porosità contano quindi quanto il contenuto di metallo. Un lingotto della stessa massa offre una superficie e una struttura diverse. Qui il collo di bottiglia può stare nella raffinazione, nel controllo granulometrico, nella qualificazione per un cliente o nella provenienza documentabile del concentrato.

Il totale minerario mondiale stimato dall'USGS per il 2025 è 2.500 tonnellate di tantalio contenuto. La cifra è piccola rispetto ai grandi flussi di manganese e misura una fase a monte della polvere qualificata, la cui disponibilità richiede una misura distinta. Una domanda di elettronica o di apparecchiature resistenti alla corrosione può interessare soltanto una parte delle forme ottenute dal tantalio: non è corretto attribuire l'intero totale minerario a un unico uso finale.

La provenienza richiede una cautela aggiuntiva. Nella regione africana dei Grandi Laghi alcuni flussi di minerali contenenti tantalio sono legati a estrazione artigianale e a rischi di abuso, finanziamento di gruppi armati o condizioni di lavoro difficili. Non significa che ogni miniera africana o ogni tonnellata proveniente dalla regione abbia la stessa storia. Le raccomandazioni dell'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico chiedono alle imprese di riconoscere e gestire i rischi lungo la catena di fornitura; il regolamento europeo 2017/821 stabilisce obblighi di dovuta diligenza per determinati importatori e prodotti di stagno, tantalio, tungsteno e oro, con soglie indicate nei suoi allegati. La tracciabilità documenta passaggi e controlli: non sostituisce una valutazione delle condizioni effettive di lavoro e non rende un paese intero una categoria di rischio uniforme.

Il niobio porta il confronto in un'altra direzione. Dal pirocloro concentrato si possono ottenere ossidi e soprattutto ferroniobio, una ferrolega che consente piccole aggiunte controllate agli acciai microlegati. In questi acciai il niobio

influisce sulla microstruttura e, insieme a composizione e lavorazione, permette di ottenere resistenza e tenacità richieste. Il cliente compra una lega con composizione e granulometria prevedibili, non una tonnellata astratta di elemento nella roccia. Altri sbocchi, come superleghe e materiali per magneti superconduttori, richiedono forme e purezze differenti e non esauriscono il mercato principale.

Il rapporto fra un piccolo dosaggio e un grande effetto non è una proprietà magica del niobio. Il risultato dipende anche dalla temperatura di lavorazione dell'acciaio, dalla velocità di raffreddamento e dagli altri elementi presenti. Cambiare fornitore o tipo di ferrolega richiede dunque verificare resa e impurità, non soltanto pareggiare i chilogrammi nominali di niobio nella carica. È la stessa grammatica introdotta con il manganese, applicata a una scala produttiva e a un rischio geografico diversi.

L'USGS stima per il 2025 112.000 tonnellate di niobio contenuto nella produzione mineraria mondiale. Il confronto con le 2.500 tonnellate di tantalio usa in questo caso la stessa famiglia di unità, contenuto dell'elemento nella produzione mineraria, e mostra due ordini di grandezza diversi. Non prova però, da solo, che il niobio sia più facile da sostituire o che la sua offerta sia meno concentrata. Dai medesimi dati dell'USGS emerge che il Brasile produce 104.000 delle 112.000 tonnellate mondiali stimate: circa il 93% del niobio minerario. Questa concentrazione a monte accompagna una filiera che unisce giacimenti, concentrazione e ferroniobio.

Il percorso ha riportato il lettore vicino all'acciaieria da cui era partito, ma con un'altra forma di dipendenza. Nella prima sezione contavano grandi masse di minerali e forni; qui un prodotto di basso volume come il tantalio può richiedere una polvere specifica, mentre il niobio arriva spesso come ferrolega da una catena geograficamente concentrata. Né la parola «critico» né il peso della miniera, presi da soli, descrivono quale prodotto mancherebbe a un utilizzatore.

La dipendenza cambia lungo la catena

Per un'impresa europea, la domanda concreta raramente è «esiste questo elemento nel sottosuolo?». Un'acciaieria deve sapere se potrà acquistare ferrocromo con una composizione compatibile con il proprio grado; un

trasformatore di tungsteno può aver bisogno di APT, ossido o polvere; un produttore di componenti elettronici richiede un materiale qualificato per un processo preciso. Lo stesso paese può esportare minerale e importare il semilavorato ottenuto altrove. Se manca una fase intermedia, la presenza di risorse e la capacità di fabbricare il prodotto finale non bastano a collegare le due estremità.

Le liste europee delle materie prime critiche e strategiche tentano di esprimere una parte di questo rischio, ma vanno lette con le loro definizioni. Nel sistema informativo del Centro comune di ricerca della Commissione europea, la lista 2023 comprende fra le materie critiche manganese, vanadio, tungsteno, tantalio e niobio; non comprende cromo e molibdeno. La lista strategica comprende il tungsteno e, specificamente, il manganese di grado batteria, non tutto il manganese impiegato in siderurgia. «Critico» non significa che il metallo sia raro in assoluto, e «strategico» non equivale a una misura del tonnellaggio estratto. La classificazione serve a una valutazione europea secondo criteri e periodi propri; non sostituisce la domanda su quale prodotto debba raggiungere uno stabilimento. Per un'affermazione giuridica sullo stato vigente delle liste occorre inoltre leggere gli allegati aggiornati del regolamento europeo sulle materie prime critiche.

L'Italia occupa soprattutto una posizione a valle delle miniere in queste catene. Acciaierie, produttori di acciai speciali, fonderie e lavorazioni metallurgiche possono utilizzare ferroleghe o rottami di composizione controllata; altre attività impiegano polveri, carburi e semilavorati per costruire utensili e componenti. Ma un utensile finito importato contiene già materia e trasformazioni avvenute altrove. La produzione nazionale di acciaio non quantifica il consumo italiano di niobio o vanadio, così come la vendita di un utensile non misura le importazioni di concentrato di tungsteno. Per arrivare a una percentuale di dipendenza servirebbero voci doganali, forme del prodotto e bilanci coerenti. Senza serie omogenee e sufficientemente disaggregate sul commercio delle diverse forme, una quota numerica unica della dipendenza italiana sarebbe fuorviante.

Una filiera secondaria può modificare questa dipendenza, purché il materiale raccolto diventi una carica utile. Il rottame di un acciaio speciale può conservare parte degli elementi di lega, ma il suo valore dipende da composizione, contaminanti e grado del nuovo acciaio. Se una carica viene

diluita per rientrare nella specifica, non si può dire che ogni chilogrammo del suo elemento di lega sia stato recuperato come prodotto equivalente. Catalizzatori esausti, polveri di processo, carburi usati e residui di superleghe possono alimentare circuiti dedicati; ciascuno richiede analisi, separazione e un cliente per il materiale ottenuto. La raccolta e il trattamento generale dei rifiuti appartengono a un altro capitolo. Qui conta il punto in cui il residuo torna una materia prima con qualità dichiarata.

Questo ritorno comporta a sua volta energia, reagenti, scorie, effluenti e lavoro. La possibilità di recuperare un metallo in laboratorio non dimostra che un impianto possa trattare grandi flussi eterogenei con la stessa resa. Un tasso di «riciclo del metallo» deve dunque specificare se misura la raccolta, l'ingresso nel forno, il recupero effettivo o il ritorno a un prodotto con la medesima funzione. Le differenze sono decisive per le imprese che devono acquistare una ferrolega o una polvere entro una specifica, e per i territori che ospitano gli impianti di trattamento.

Anche i possibili sostituti vanno valutati alla scala dell'applicazione. In alcuni acciai si possono modificare composizione e lavorazione per usare un diverso elemento di lega; la sostituzione cambia però prestazioni, prezzo o processo. Un condensatore realizzato con un'altra tecnologia non è un chilogrammo di tantalio rimpiazzato da un chilogrammo di un altro metallo. Un materiale duro alternativo può richiedere diversa durata o geometria dell'utensile. La sostituibilità non appartiene all'elemento in astratto: dipende dal risultato che il cliente vuole ottenere e dalla capacità di qualificarne un altro.

La lettura per fasi impedisce infine un equivoco economico. Concentrato, ossido purificato, ferrolega e polvere hanno prezzi propri; la capacità annunciata va distinta dalla produzione osservata e la geografia delle miniere da quella della raffinazione. Energia disponibile, competenze chimiche, autorizzazioni, controlli ambientali e contratti di qualità possono spostare valore e rischio lungo la catena. Un confronto serio deve indicare sempre quale materiale, in quale anno e in quale punto del percorso sta misurando.

La piccola aggiunta iniziale può nascondere filiere di grande scala o di elevata complessità. Per il manganese può richiedere grandi flussi minerari e forni; per il molibdeno dipendere dall'attività di una miniera di rame; per il tungsteno attraversare più trasformazioni prima di diventare carburo; per il tantalio fermarsi davanti a una specifica di polvere o a una provenienza da verificare;

per il niobio dipendere da pochi nodi produttivi. Non c'è un'unica risposta alla domanda «quanto ne abbiamo?». Conta quale prodotto utilizzabile può arrivare, con quale continuità e a quali costi materiali e umani. È questa sequenza, dalla proprietà richiesta alla forma acquistabile, che rende comprensibile la dipendenza nascosta in una lega o in un componente.

Fonti e riferimenti

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Manganese.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-manganese.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Chromium.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-chromium.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Vanadium.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-vanadium.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Molybdenum.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-molybdenum.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Tungsten.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-tungsten.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Tantalum.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-tantalum.pdf

USGS — Mineral Commodity Summaries 2026: Niobium.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-niobium.pdf

Commissione europea, JRC-RMIS — More on Critical Raw Materials, liste 2023.

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/eu-critical-raw-materials

Commissione europea, JRC — Best Available Techniques Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries, scheda editoriale e perimetro.

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107041

International Labour Organization — Safety and health in the non-ferrous metals industries, codice di pratica e descrizione.

https://www.ilo.org/resource/other/safety-and-health-non-ferrous-metals-industries

OECD — Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas, terza edizione.

https://www.oecd.org/en/publications/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-supply-chains-of-minerals-from-conflict-affected-and-high-risk-areas_9789264252479-en.html

Unione europea — Regolamento (UE) 2017/821 sulla dovuta diligenza per gli importatori delle materie prime indicate, testo consolidato.

https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/821/2020-11-19/eng

U.S. Geological Survey — Vanadium, capitolo U di Critical Mineral Resources of the United States; titanomagnetiti vanadifere come fonte principale.

https://pubs.usgs.gov/publication/pp1802U

A.L.M.T. Corp. — Manufacturing processes of tungsten carbide, descrizione della carburizzazione della polvere.

https://www.allied-material.co.jp/en/techinfo/tungsten_carbide/process.html

KYOCERA AVX — High-Reliability Solid Tantalum Capacitors, struttura porosa e superficie dell'anodo.

https://www.kyocera-avx.com/resources/high-reliability-solid-tantalum-capacitors/

Unione europea — Regolamento (UE) 2024/1252 dell'11 aprile 2024, che istituisce un quadro per garantire un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche, GU L, 2024/1252, 3 maggio 2024.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=oj%3AL_202401252

Sandvik Coromant — R&D and Production planning, composizione esemplificativa dei materiali duri a base di carburo di tungsteno e cobalto.

https://videos.sandvik.coromant.com/rd-and-production-planning

04.18 – Oro, argento e metalli del gruppo del platino

Quando pochi grammi devono uscire dalla roccia

Un grammo d'oro in una roccia e un grammo d'oro in un lingotto hanno la stessa massa, ma occupano posizioni molto diverse nella filiera. Nel primo caso il metallo è disperso in un materiale che deve essere estratto, frantumato e trattato; nel secondo ha una purezza dichiarata e può essere scambiato o impiegato. Tra i due stati stanno impianti, reagenti, energia, acqua, perdite di processo e un sistema di controllo. Parlare della disponibilità di un metallo prezioso richiede di specificare a quale punto di questo percorso ci si riferisce.

L'oro rende visibile la distanza perché spesso è presente in pochi grammi per tonnellata di minerale. Il tenore misura quella concentrazione iniziale, non la quantità che un impianto consegnerà sotto forma di metallo raffinato. Una parte del minerale scavato è roccia senza valore economico sufficiente per entrare nel trattamento; quello selezionato contiene a sua volta molti altri componenti. La scelta del giacimento e del processo dipende dalla distribuzione delle particelle d'oro, dalla mineralogia e dalla possibilità di liberarle. Due depositi con lo stesso tenore medio possono chiedere circuiti differenti e dare recuperi differenti.

Un modello teorico chiarisce il bilancio di massa. Se un milione di tonnellate di minerale contiene in media 2 grammi d'oro per tonnellata, nel materiale alimentato all'impianto sono presenti 2 tonnellate d'oro. Se si ipotizza, soltanto per questo esempio, un recupero dell'88%, l'uscita recuperata è 1,76 tonnellate prima di considerare le ulteriori specifiche della raffinazione. Il calcolo non descrive un giacimento reale né una resa media del settore. Mostra perché tonnellate di roccia, contenuto metallico e metallo finale vanno tenuti separati: ciascun passaggio ha un denominatore diverso.

Dopo frantumazione e macinazione, il percorso dipende dalla forma in cui l'oro è presente. La separazione per gravità sfrutta le differenze di densità quando una parte del metallo può essere liberata come particella. In altri casi, una soluzione alcalina contenente cianuro scioglie l'oro accessibile, che viene poi recuperato dalla soluzione e trasformato in un prodotto metallico. La

lisciviazione può avvenire in vasche oppure per percolazione attraverso materiale disposto su piazzole progettate per raccogliere le soluzioni. Non basta nominare un reagente per conoscere il rischio di un sito: contano la preparazione del fondo, i circuiti di raccolta, la gestione dei bacini, il monitoraggio e ciò che accade quando l'impianto si ferma o le strutture perdono tenuta. Il rapporto tecnico dell'Agenzia statunitense per la protezione ambientale descrive questi passaggi per la lisciviazione in cumulo; è una fonte sul funzionamento e sui controlli, non una misura di tutti gli impianti odierni.

In alcune attività aurifere artigianali e su piccola scala si usa invece il mercurio per formare un amalgama con l'oro presente nel minerale. Il riscaldamento dell'amalgama libera vapori di mercurio, mentre una parte del metallo può disperdersi nei materiali e nelle acque. La Convenzione di Minamata tratta questa via estrattiva separatamente: tecniche e rischi per i lavoratori differiscono dalla lisciviazione industriale con cianuro.

Il volume fisico continua a pesare dopo che l'oro è stato separato. Sterili di estrazione e residui del trattamento occupano spazio e richiedono gestione distinta. L'acqua serve a macinare, trasportare e trattare il minerale, e può essere ricircolata in misura diversa da impianto a impianto. L'energia alimenta scavo, frantumazione, macinazione, pompaggio e trattamento. Non esiste un consumo universale per grammo d'oro ricavabile dal solo tenore: profondità, durezza della roccia, distanza, mineralogia e recupero cambiano il bilancio. Anche le persone incontrano il processo in luoghi diversi, dalla miniera ai bacini e agli impianti chimici; contenimento, manutenzione e sicurezza sono parti della produzione, non correzioni successive.

Anche il momento in cui si misura il tenore conta. Un campione del minerale nella roccia, il materiale effettivamente inviato al mulino e il concentrato ottenuto dopo il trattamento possono avere concentrazioni diverse. Lo scavo selettivo può lasciare materiale sotto una soglia economica; nel materiale alimentato possono entrare porzioni meno ricche. Per questo la parola «risorsa» indica una stima geologica, la «riserva» una parte estraibile secondo condizioni tecniche ed economiche dichiarate, e la produzione mineraria un flusso osservato o stimato in un periodo. Le riserve mondiali riportate dal Servizio geologico degli Stati Uniti (USGS) non sono la somma dei lingotti ancora da estrarre a ogni costo: possono cambiare quando cambiano conoscenze, prezzi e tecnologie. Il tenore dell'esempio precedente rimane una

proprietà dell'alimentazione ipotetica, non un'etichetta valida per ogni tonnellata di roccia nel giacimento.

Nell'esercizio reale il recupero non è un singolo interruttore. Una parte dell'oro può restare nella roccia non trattata, una nei residui del circuito di concentrazione e un'altra nelle soluzioni e nei materiali intermedi. Misurare quelle uscite permette all'operatore di capire se il metallo è stato recuperato e dove si accumulano i residui da gestire. Un miglioramento della resa può richiedere più macinazione, più tempo di contatto o un trattamento diverso; dunque anche il recupero ha un costo materiale. Il rendimento metallico, la quantità di residui e la sicurezza dell'impianto sono legati alla stessa scelta di processo.

Il metallo recuperato può essere fuso in una lega grezza detta *doré*, composta soprattutto da oro e argento in proporzioni variabili. La sua massa non coincide con quella dell'oro puro che contiene. La raffinazione separa i componenti e porta l'oro a una purezza commerciale definita; barre, granuli o altre forme possono allora avere specifiche e acquirenti diversi. Il doré è già un risultato industriale importante, ma l'acquirente di oro fino domanda una fase ulteriore. Una miniera può trovarsi lontano dal luogo in cui questa fase avviene.

Secondo la scheda *Mineral Commodity Summaries 2026* dell'USGS, la produzione mineraria mondiale del 2025 è stimata in 3.300 tonnellate di contenuto d'oro. Si tratta dell'elemento stimato nella produzione mineraria, non di 3.300 tonnellate di lingotti usciti dalle raffinerie e neppure della quantità complessiva di oro offerta sul mercato in quell'anno. Il numero dà la scala del nuovo metallo ottenuto dalla terra. Non dice ancora quanta parte dell'oro disponibile sia stata estratta molti anni prima.

L'oro può essere il motivo principale per aprire una miniera; altri grammi preziosi percorrono invece miniere e impianti che sono stati progettati per produrre un altro metallo. Qui il passaggio non è dal doré aurifero a un altro nome per lo stesso prodotto. L'argento può essere ancora racchiuso in un concentrato polimetallico o concentrarsi, molto più avanti, nei fanghi della raffinazione elettrolitica di un metallo di base.

Quando l’estrazione segue un altro metallo

L’argento esce anche da miniere in cui è il prodotto principale. Una parte sostanziale della produzione mondiale, però, accompagna piombo, zinco, rame e oro. In questi impianti l’argento ha un valore proprio, ma l’estrazione della roccia e la capacità del circuito rispondono spesso soprattutto all’economia del metallo dominante. La scheda USGS sull’argento descrive esplicitamente la coproduzione da miniere di piombo-zinco, rame e oro. Il Silver Institute indica che, nel 2025, quelle di piombo e zinco sono rimaste la maggiore fonte per tipo di miniera, mentre la produzione associata a rame e oro è aumentata. Questa classificazione riguarda l’origine mineraria: non misura il numero di lingotti venduti da ciascun settore.

Il materiale viene frantumato e macinato perché i minerali utili possano entrare nei concentrati appropriati. La flottazione separa frazioni che seguiranno impianti metallurgici diversi; il concentrato è una massa arricchita, non argento puro. Quando un concentrato di rame arriva alla fusione e alla successiva raffinazione elettrolitica, una parte dell’argento può raccogliersi nei fanghi anodici insieme ad altri elementi preziosi. Quei fanghi diventano una carica per ulteriori separazioni. Nei circuiti del piombo e dello zinco, l’argento segue altri percorsi di fusione e raffinazione fino al suo recupero come metallo. Per capire la filiera dell’argento basta seguire dove l’elemento si concentra e quando si separa; la produzione generale di catodi di rame, piombo e zinco appartiene alle rispettive filiere.

In un contratto di concentrato l’argento può essere riconosciuto come metallo pagabile, ma il valore che la miniera riceve dipende da analisi, tenore, recupero atteso, costi di trattamento e condizioni commerciali. Una tonnellata di concentrato spedita a uno stabilimento non va quindi registrata come una tonnellata d’argento. Lo stesso vale per il fango anodico: può essere una carica ricca di metalli preziosi rispetto al materiale di partenza, senza essere ancora un prodotto puro. La concentrazione raccoglie l’elemento in una massa più piccola; la raffinazione gli assegna una specifica vendibile. Se una parte del contenuto sfugge al circuito o resta in un residuo per cui non esiste un processo economico, la statistica del contenuto e la disponibilità commerciale divergono.

La coproduzione ha anche un effetto sulla contabilità degli impatti. Elettricità, acqua e residui di una miniera di rame che produce argento servono prima di

tutto un'operazione comune. Attribuire all'argento tutta l'energia consumata dalla miniera falserebbe il confronto con una miniera primaria d'argento; attribuirla interamente al rame renderebbe invece invisibile il trattamento aggiuntivo necessario a recuperare l'argento. Un confronto ambientale richiede di dichiarare confini e criterio di allocazione, per massa, valore economico o altra regola esplicita. Senza questa scelta è più onesto descrivere le fasi materiali e i rischi, invece di proporre un'intensità universale per oncia.

Questa dipendenza modifica il significato del prezzo. Se aumenta la domanda d'argento, un produttore di rame non può moltiplicare a piacimento la roccia estratta solo per ottenere più argento: deve trovare, trattare e vendere anche il rame, impegnare la capacità del concentratore e sostenere i costi dell'intera operazione. Una miniera primaria d'argento risponde più direttamente ai ricavi del proprio metallo, ma anche per essa nuovi volumi richiedono risorse, autorizzazioni e impianti. Nel caso del coprodotto, la capacità di recupero può inoltre stare in una raffineria distante dalla miniera. Il prezzo di un'oncia d'argento agisce su più decisioni industriali, non su una sola leva.

La scheda USGS stima per il 2025 una produzione mineraria mondiale di 26.000 tonnellate di contenuto d'argento. Il *World Silver Survey 2026*, elaborato per il Silver Institute, presenta una propria stima settoriale di 846,6 milioni di once troy, pari a circa 26.330 tonnellate mediante conversione delle unità. La cifra in tonnellate è un'elaborazione arrotondata della stima di settore. Le due fonti misurano lo stesso ordine di grandezza attraverso serie autonome; il loro scarto non va corretto facendo una media. La cifra USGS descrive la scala mineraria in questa ricostruzione, mentre il rapporto di settore aiuta a leggere la struttura dell'offerta e della domanda. Le miniere dedicate all'argento sono una parte della produzione; il peso dei coprodotti si comprende già seguendo i metalli ospiti, senza attribuirgli una percentuale non consolidata in questa sede.

La domanda d'argento è diversa da quella dell'oro pur esistendo in entrambi i casi barre, monete e gioielli. Il Silver Institute stima in 657,4 milioni di once troy l'impiego per fabbricazione industriale nel 2025. Elettronica, connessioni elettriche, fotovoltaico e altre lavorazioni richiedono il metallo come materiale con proprietà determinate, in quantità e forme adatte a processi diversi. L'asimmetria riguarda la materia prima: utilizzatori industriali possono modificare specifiche e ordini, mentre gran parte del nuovo argento arriva da impianti la cui produzione principale è un altro metallo.

Anche le statistiche del riciclo cambiano significato con il confine geografico. La scheda USGS stima circa 1.000 tonnellate d'argento recuperate da nuovo e vecchio rottame negli Stati Uniti nel 2025. È una produzione secondaria statunitense, non la quota mondiale di riciclo. Una barra d'argento fine, un concentrato che dà diritto a un pagamento per il suo argento e un fango anodico da trattare sono tutti portatori di valore, ma richiedono acquirenti e impianti diversi. La disponibilità del contenuto minerario può quindi crescere senza che ogni utilizzatore abbia subito la forma che gli serve.

Se l'argento mostra come un metallo sia subordinato a una miniera ospite, i metalli del gruppo del platino aggiungono un altro vincolo. Più elementi possono uscire dallo stesso materiale e avere destinazioni differenti. La loro separazione rende visibile perché una statistica collettiva sulla famiglia non basta a descrivere l'offerta del singolo metallo.

Separare elementi vicini, distinguere geografie lontane

Platino, palladio, rodio, rutenio, iridio e osmio formano il gruppo dei metalli del platino, noto anche con la sigla internazionale PGM (dall'inglese *Platinum-Group Metals*). Tendono a trovarsi associati, spesso in materiali solfuri che contengono anche nichel e rame, ma hanno impieghi, prezzi e volumi diversi. Il concentrato porta insieme più componenti; fusione, trattamento della *matte* — un prodotto intermedio ricco di solfuri metallici — e successiva raffinazione concentrano e separano i metalli. Una tonnellata di concentrato, un chilogrammo di platino contenuto e un chilogrammo di platino raffinato descrivono momenti differenti. La somiglianza chimica degli elementi e le impurità della matrice rendono necessario un circuito di separazione selettiva prima di vendere metalli con specifiche definite.

I PGM esemplificano un problema di resa condivisa. Se il minerale porta più elementi, la sua composizione condiziona ciò che la raffineria può ottenere prima ancora che si considerino le richieste dei singoli clienti. Aumentare l'estrazione per un elemento significa alimentare anche gli altri prodotti e i metalli di base associati; aumentare la capacità di una sola separazione non aumenta automaticamente la quantità di tutti i componenti nella miniera. Una variazione nel rapporto fra platino e palladio nel materiale alimentato cambia il mix prodotto da un impianto pur lasciando invariata la massa di roccia trattata.

Questa è la ragione per cui un prezzo elevato di un singolo PGM può incentivare il recupero e il riciclo senza produrre subito più minerale della composizione desiderata.

La produzione mineraria permette di vedere una geografia che il nome collettivo nasconde. Nel 2025 l'USGS stima 170.000 chilogrammi di platino e 190.000 di palladio contenuti nella produzione mondiale. Nella stessa scheda, il Sudafrica figura con 120.000 chilogrammi di platino e 70.000 di palladio; la Russia con 20.000 di platino e 84.000 di palladio. Il confronto usa la stessa unità, lo stesso anno e la stessa fase mineraria. Mostra che il Sudafrica pesa molto di più sul platino e la Russia sul palladio. Non attribuisce ai due paesi quelle quantità di metallo raffinato disponibile per l'esportazione nello stesso anno.

Il contrasto nasce da filiere minerarie differenti. Nel complesso sudafricano di Bushveld i PGM sono al centro dell'economia di molte operazioni; estrazione sotterranea, concentrazione, fusione e raffinazione formano una lunga catena industriale. Nei grandi sistemi russi di nichel e rame i PGM sono associati a un insieme polimetallico e il palladio assume un peso particolare. Anche Zimbabwe e Canada contribuiscono, ma non trasformano la mappa del platino in quella del palladio. Per valutare una dipendenza occorre quindi indicare l'elemento e la fase: contenuto estratto, concentrato, prodotto intermedio o metallo raffinato. La localizzazione di una miniera non rivela da sola dove si trovano tutte le capacità di trattamento.

Una miniera profonda del Sudafrica porta nel prezzo e nella continuità della fornitura problemi concreti: ventilazione, sicurezza dei lavoratori, disponibilità di elettricità, acqua per il trattamento e manutenzione dei sistemi di estrazione. Le interruzioni in una di queste fasi possono rallentare più metalli insieme, ma non nella stessa proporzione. In una filiera in cui i PGM accompagnano nichel e rame, il volume trattato dipende anche dal destino commerciale di quei metalli. L'offerta del palladio, per esempio, non si capisce guardando soltanto al suo prezzo. Energia e residui vanno attribuiti a processi condivisi senza assegnare arbitrariamente l'intero impatto della miniera a ciascun elemento che ne esce.

I catalizzatori dei veicoli e di impianti industriali sono importanti destinazioni di alcuni PGM. Rodio, iridio, rutenio e osmio hanno funzioni proprie. La scheda USGS usata per quantificare l'estrazione mondiale riporta separatamente platino e palladio; il suo totale della famiglia non misura la produzione di

ciascuno degli altri quattro metalli. La questione materiale è che un produttore o un acquirente chiede un metallo preciso, con purezza e forma adatte, mentre la miniera mette in circolazione una miscela da separare. L'effetto delle sostituzioni fra elementi dipende poi dalla funzione richiesta e dalla possibilità tecnica di qualificare un materiale diverso; non basta che appartengano alla stessa famiglia.

Gli impianti di separazione trasformano così la coproduzione in una scelta di flussi. Metalli minori possono restare nei residui o richiedere ulteriori passaggi prima di diventare prodotti vendibili. Fanghi, matte e concentrati possono attraversare frontiere prima che il metallo assuma la sua forma finale. La quantità mineraria stimata dall'USGS indica la base materiale del sistema, mentre la consegna al cliente dipende dalla sequenza successiva. A quella sequenza si affianca una fonte che non parte più dalla roccia: componenti, gioielli e residui industriali già contenenti metallo.

Il metallo che ritorna

Oro, argento e PGM non cessano di esistere quando finisce la prima vita del prodotto che li contiene. Restano però in luoghi e forme differenti: un gioiello, una barra, un catalizzatore esausto, uno scarto di lavorazione o un fango di raffinazione hanno contenuti, impurità e tempi di recupero propri. Lo stock sopra terra è l'insieme materiale di ciò che è stato estratto e non è andato disperso irreversibilmente; non coincide con una scorta immediatamente offerta ai compratori. Una parte è trattenuta, una parte è incorporata in beni ancora in uso, una parte entra in un circuito di raccolta. La velocità con cui queste masse tornano disponibili dipende da prezzo, decisioni dei proprietari, durata dei prodotti e capacità degli impianti.

Nel bilancio del World Gold Council (WGC), l'oro riciclato nel 2025 è stimato in 1.404,3 tonnellate. È una componente dell'offerta della sua serie, distinta dalla produzione mineraria, e comprende metallo rientrato nel mercato dopo un uso precedente. La cifra rende concreto il ruolo della superficie terrestre: anche in un anno in cui le miniere continuano a produrre, molto oro può arrivare da oro già estratto. Per confrontare l'ordine di grandezza con quello delle miniere nella medesima contabilità, il WGC stima 3.671,6 tonnellate di produzione mineraria 2025. L'USGS, nella propria serie mineraria, ne stima 3.300. Le due stime della miniera non sono riconciliate in queste fonti; non si può sostituire

una con l'altra dentro un rapporto aritmetico senza dichiarare il cambio di metodo. La cifra WGC serve qui soltanto a collocare il riciclo dentro il bilancio WGC.

L'oro detenuto come riserva o investimento aggiunge un'altra temporalità. Il World Gold Council registra 863,3 tonnellate di acquisti netti di banche centrali e altre istituzioni nel 2025. È una voce di domanda: informa sulla destinazione economica di una parte del metallo, senza tracciare l'origine di ogni lingotto o dimostrare che la stessa massa sia stata sottratta a una fabbrica. Un metallo conservato può essere fisicamente presente per decenni e non essere offerto; in altre circostanze può essere venduto, trasferito o rifuso. "Stock" descrive una massa esistente, "riciclo" un flusso di ritorno e "acquisto istituzionale" un flusso di domanda. Confonderli produrrebbe un'abbondanza soltanto contabile.

Per l'argento, la distanza tra oggetto e metallo recuperato è spesso diversa. Lo scarto di una lavorazione industriale può essere raccolto e preparato con composizione conosciuta. Una piccola quantità dispersa in molti dispositivi richiede invece raccolta, selezione e trattamento, e una parte può non rientrare nel circuito. La domanda industriale del 2025, pur elevata nella misura del Silver Institute, non è un inventario dei prodotti ancora utilizzabili né una misura del materiale destinato al recupero nello stesso anno. Occorre seguire il tempo di vita del bene e la resa della separazione prima di parlare di offerta secondaria.

Per platino e palladio il ritorno dei catalizzatori è una filiera materiale distinta dall'estrazione. Il dispositivo esausto deve essere ritirato, identificato, trattato e inviato a un processo capace di recuperare i metalli dalla sua matrice. Il ritiro dei veicoli e la logistica condizionano la quantità disponibile: l'immatricolazione di un'auto oggi non produce un catalizzatore esausto domani. Anche catalizzatori industriali, residui di raffinazione e scarti di produzione possono alimentare il recupero, ma ciascuna carica richiede controlli e contratti specifici. La concentrazione del metallo in un materiale selezionato può essere molto diversa da quella nella roccia; un confronto quantitativo ha senso soltanto specificando quale roccia e quale parte del catalizzatore si stanno misurando.

Il materiale raccolto passa inoltre per una verifica di composizione. Due rottami che sembrano uguali dall'esterno possono contenere quantità diverse di platino, palladio e rodio, mentre un lotto misto include supporti e rivestimenti che non diventano metallo recuperato. Le analisi servono a stabilire pagamenti

e percorso di trattamento; la preparazione separa e concentra le parti utili. Soltanto alla fine del circuito si può parlare di quantità raffinata. Questo intervallo spiega perché un alto prezzo quotato non equivale alla disponibilità immediata dell'intero contenuto teorico di tutti i catalizzatori in circolazione. La capacità di trattare la carica, la durata della raccolta e i costi della separazione decidono quale quota torna davvero all'offerta.

La scheda USGS stima circa 140.000 chilogrammi di platino e palladio complessivamente recuperati nel mondo da rottami nuovi e vecchi nel 2025. Il numero non è 140.000 chilogrammi per ciascun elemento. Neppure identifica la massa dei catalizzatori raccolti, perché misura metallo recuperato e include altre cariche. Letto accanto ai 170.000 chilogrammi di platino e ai 190.000 di palladio contenuti nella produzione mineraria, mostra la rilevanza del flusso secondario senza autorizzare un rapporto elementare fra le serie: il dato del riciclo aggrega due metalli, quello minerario li separa. Non sappiamo da quella riga quanti chilogrammi secondari siano platino e quanti palladio.

Fra il conferimento di un residuo e la vendita del metallo si trovano concentrazione, analisi, fusione o trattamento chimico, raffinazione e certificazione della purezza. I costi e i rischi dei reagenti, delle emissioni, delle scorie e dei residui appartengono anche a questa filiera. Chiamare un catalizzatore «miniera urbana» può dare un'immagine utile, purché non cancelli queste operazioni né trasformi il contenuto teorico in recupero garantito. La produzione secondaria amplia le fonti di approvvigionamento, ma resta legata ai prodotti che tornano e alla capacità di separarne il contenuto.

La forma che si può acquistare

Alla fine di queste catene, la disponibilità dipende dalla domanda posta all'impianto. Un concentrato contenente argento può avere un valore pagabile nel contratto di vendita, ma non entra direttamente nella macchina che richiede argento fino. Un doré porta oro e argento alla raffineria, mentre una barra raffinata è già definita dalla sua purezza. Una matte di nichel-rame con PGM è un intermedio da separare, non una consegna di palladio. Spugne, granuli, polveri e sali hanno specifiche diverse perché sono destinati a lavorazioni diverse. Il peso dell'elemento da solo non descrive tutte le capacità disponibili fra miniera e acquirente.

Le forme commerciali riflettono contratti e competenze. Il compratore di un concentrato accetta una matrice da trattare e negozia quali elementi siano pagabili; il compratore di metallo fino chiede composizione certificata; chi impiega una polvere o un sale richiede caratteristiche adatte alla lavorazione successiva. Anche un raffinatore può acquistare materiale da più paesi, mescolarlo e vendere il metallo in una terza geografia. Una mappa dei soli paesi estrattori mostra quindi dove nasce il contenuto, ma può lasciare fuori la capacità che trasforma quel contenuto nella forma richiesta. È qui che si manifesta una dipendenza industriale: un paese può avere accesso al minerale e dipendere da altri per raffinarlo, oppure disporre di lavorazioni avanzate e dipendere da cariche e metalli importati.

Per l'Italia questa distinzione conta più di una quota mineraria nazionale. La filiera nazionale comprende lavorazioni orafe e manifatturiere nei distretti di Arezzo, Vicenza e Valenza e utilizzatori industriali di metalli preziosi. Queste attività generano domanda di forme raffinate e scarti che possono rientrare in circuiti di recupero. La presenza di un distretto, però, non misura automaticamente quanto oro o quanti PGM vi siano raffinati, né prova che ogni fase del recupero avvenga nel medesimo territorio. L'origine di una spedizione commerciale può a sua volta differire dall'origine della miniera. Senza serie italiane disaggregate e verificabili per estrazione, raffinazione, recupero e commercio, attribuire una percentuale nazionale a una di queste fasi creerebbe una precisione apparente.

La disponibilità assume così un significato fisico. Dalla roccia a basso tenore occorre recuperare un elemento disperso; in una miniera polimetallica occorre riconoscere e concentrare il metallo che accompagna un altro prodotto; per i PGM occorre separare elementi associati; dai beni già esistenti occorre raccogliere e raffinare ciò che può tornare in uso. Ognuno di questi verbi indica un impianto, una capacità e un tempo. La disponibilità di oro, argento e platino non è una sola quantità depositata nel sottosuolo: è la possibilità di far arrivare un metallo preciso, nella forma richiesta, attraverso tutti i passaggi che lo rendono acquistabile.

Fonti e riferimenti

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Gold, produzione mineraria e riserve.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-gold.pdf

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Silver, produzione mineraria, coproduzione e riciclo statunitense.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-silver.pdf

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Platinum-Group Metals, produzione mineraria per elemento e paese, riciclo aggregato.

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-platinum-group.pdf

World Gold Council — Gold Demand Trends: Q4 and Full Year 2025, bilancio di offerta, riciclo e domanda istituzionale.

https://www.gold.org/goldhub/research/gold-demand-trends/gold-demand-trends-full-year-2025

The Silver Institute — Comunicato del 15 aprile 2026 sul World Silver Survey 2026, dati e struttura delle fonti minerarie.

https://silverinstitute.org/elevated-lease-rates-regional-liquidity-tightness-and-robust-investor-interest-resulted-in-record-silver-prices-in-2025/

U.S. Environmental Protection Agency — Gold/Silver Heap Leaching and Management Practices That Minimize the Potential for Cyanide Releases, descrizione tecnica dei circuiti e delle misure di gestione.

https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=9100R183.TXT

Agenzia ICE — I distretti orafi italiani di Vicenza, Arezzo, Valenza e Torre del Greco nel quadro della partecipazione fieristica.

https://www.ice.it/it/area-clienti/eventi/dettaglio-evento/2026/%40%40/244

U.S. Geological Survey — Platinum-group elements, geologia, associazione dei sei elementi e processi di approvvigionamento.

https://pubs.usgs.gov/publication/pp1802N

Convenzione di Minamata sul mercurio — Articolo 7 e allegato C, uso dell’amalgamazione nell’estrazione artigianale e su piccola scala dell’oro.

https://minamataconvention.org/en/about/convention-text

04.19 – Grafite, silicio e materiali ad alta purezza

Un blocco di quarzite può alimentare un forno che produce silicio metallico. Un quarzo diverso, selezionato per impurità e comportamento al calore, può servire per fabbricare il crogiolo impiegato nella crescita di un cristallo di silicio. Il secondo non è semplicemente una versione più costosa della stessa carica: assolve una funzione differente. Anche una polvere di grafite e un fiocco di grafite naturale possono contenere soprattutto carbonio, ma cambiano per struttura, dimensioni, impurità e impiego possibile.

Carbonio e silice sono disponibili in grandi quantità. Questo non garantisce che si possa comprare grafite con una determinata distribuzione granulometrica, quarzo adatto a un crogiolo o polisilicio con le impurità richieste da un cliente. La disponibilità nasce dall'incontro fra una materia prima appropriata, un processo capace di trasformarla e una specifica che qualcuno è in grado di certificare. Occorre quindi seguire sia la roccia sia i passaggi che le conferiscono una forma industriale. L'espressione «alta purezza» indica un insieme di limiti e proprietà riferiti a un uso: percentuali uguali del componente principale possono nascondere impurità diverse e prestazioni incompatibili.

La selezione comincia nella roccia

La grafite naturale contiene carbonio organizzato in strati cristallini. Si trova in depositi con caratteristiche differenti: grafite a fiocchi, detta *flake*, forme finemente disseminate e corpi più concentrati producono materiali commerciali diversi. La massa della roccia estratta comprende minerali associati e parti prive di grafite. Il tenore indica quanto materiale utile vi si trova; la dimensione dei fiocchi descrive invece una proprietà che può determinare il prezzo e la destinazione. Una roccia relativamente ricca, sottoposta a una macinazione che spezza i fiocchi, può dare un prodotto meno adatto a certi usi di quello ricavato da una roccia più povera lavorata con maggiore attenzione.

L'estrazione è seguita dalla frantumazione e dalla macinazione necessarie a liberare la grafite dagli altri minerali. Nella flottazione, l'affinità della grafite per le bolle d'aria aiuta a separarla dalla ganga, la frazione rocciosa priva di grafite

utile, in presenza di acqua e reagenti. Più stadi di pulizia possono innalzare il tenore del concentrato, ma ogni passaggio introduce perdite, consuma risorse e modifica la distribuzione delle dimensioni. Il concentrato che esce dall'impianto ha una massa propria, un contenuto di carbonio dichiarato e una gamma di particelle: nessuna di queste tre misure coincide necessariamente con le altre. La grafite purificata o lavorata per una specifica applicazione richiede ancora operazioni successive.

Secondo la scheda *Mineral Commodity Summaries 2026* del Servizio geologico degli Stati Uniti (USGS), la produzione mineraria mondiale di grafite naturale è stimata in 1,8 milioni di tonnellate nel 2025. La cifra identifica la grafite naturale nella statistica mineraria, non carbonio elementare perfettamente puro, grafite sintetica o materiale già qualificato per un anodo. Un impianto che produce polvere sintetica da un precursore carbonioso non aumenta quella riga statistica; una linea che purifica un concentrato ne cambia la qualità senza riaprire una miniera. La riserva geologica, la produzione mineraria annuale e la capacità di lavorazione descrivono tre quantità diverse.

La selezione del quarzo risponde a un'altra domanda. La silice, SiO_2, è presente in sabbie, quarziti e cristalli, ma la composizione nominale non rivela la distribuzione delle inclusioni, degli elementi in traccia né la stabilità del materiale durante il riscaldamento. Una sabbia industriale può essere adeguata per filtrazione o fonderia e inadatta a un impiego che tollera pochissime contaminazioni. L'USGS definisce in generale quarzo ad alta purezza, o HPQ, il quarzo naturale con meno di 100 parti per milione di impurità complessive, circa il 99,99% di SiO_2. Anche entro questo limite resta decisivo *quali* impurità sono presenti: il medesimo totale può corrispondere a comportamenti diversi nel processo del cliente.

Le statistiche statunitensi fanno vedere quanto sia facile sbagliare denominatore. L'USGS stima per il 2025 circa 120 milioni di tonnellate di sabbia e ghiaia industriale vendute o usate negli Stati Uniti: vi entrano categorie con destinazioni molto varie. In una scheda distinta riporta 100.000 tonnellate di quarzo macinato ad alta purezza venduto o usato, valore stimato e arrotondato al più vicino centinaio di migliaia di tonnellate per proteggere dati proprietari. La seconda cifra ha una precisione molto grossolana e una definizione merceologica specifica. Dividerla per la prima per calcolare una «quota di HPQ» darebbe un rapporto dall'apparenza esatta fra categorie e misure che non lo

sono. La grande disponibilità della sabbia industriale non permette di inferire la quantità di quarzo qualificabile per crogioli.

La qualità viene conservata o perduta anche durante l'estrazione. Frantumazione, vagliatura e movimentazione della silice cristallina possono generare polveri respirabili. Il National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) documenta il rischio di silicosi e i controlli di esposizione nelle operazioni minerarie, fra cui captazione, ventilazione e contenimento. Le tonnellate di sabbia di una statistica commerciale non misurano quanta polvere respiri una persona: contano dimensioni delle particelle, postazione, manutenzione e durata dell'esposizione. Il controllo della polvere appartiene dunque alla stessa scelta di processo con cui si preserva la qualità del materiale e si proteggono i lavoratori.

Nel quarzo, il confine fra risorsa geologica e riserva commercialmente utile dipende anche dalla capacità di dimostrare una qualità ripetibile. Analizzare un campione particolarmente pulito non basta a descrivere l'intero corpo minerario: durante l'estrazione cambiano la composizione e la distribuzione delle inclusioni. Un cliente che fabbrica componenti di processo ha bisogno di lotti con impurità controllate e comportamento prevedibile, non soltanto di un valore massimo ottenuto in laboratorio. La selezione può lasciare una parte del materiale a impieghi meno esigenti; ciò non trasforma automaticamente quel materiale in uno scarto, ma modifica il bilancio economico del giacimento. Anche la separazione magnetica o la lisciviazione aggiungono operazioni e residui prima della vendita. Questa sequenza spiega perché un deposito di silice abbondante possa fornire poca materia prima per uno specifico grado di quarzo senza che manchi silice per gli usi comuni.

Selezionare la roccia crea una possibilità industriale, non ancora il prodotto finale. Per trasformare silice in silicio o un precursore carbonioso in grafite sintetica occorrono forni che perseguono risultati fisici molto differenti.

Il forno trasforma, ma non nello stesso modo

La carica di un forno che produce silicio metallurgico richiede una fonte di silice, spesso quarzite selezionata per granulometria, tenuta meccanica e comportamento termico nel letto di reazione, insieme a riducenti carboniosi. Il quarzo ad alta purezza destinato a componenti di processo non è un requisito

di questa riduzione. Un forno potrebbe fisicamente riceverlo, ma impiegare un materiale selezionato per un'altra funzione sarebbe una scelta economicamente sproporzionata. Nel percorso verso il silicio ci sono quindi due rami: silice idonea alla riduzione per ottenere metallo e quarzo dalle caratteristiche adatte, per esempio, alla fabbricazione di crogioli. Un crogiolo può servire più avanti nella crescita cristallina senza che il quarzo di cui è fatto sia il materiale da cui proviene il silicio cresciuto al suo interno.

Nel forno elettrico ad arco sommerso il carbonio sottrae ossigeno alla silice. La reazione globale si può descrivere come $SiO_2 + 2\ C \rightarrow Si + 2\ CO$; nel forno reale si formano anche intermedi, gas, fumi e residui che richiedono controllo. L'elettricità alimenta il calore necessario alla riduzione, mentre la pezzatura e la permeabilità della carica condizionano il passaggio dei gas e la continuità del processo. La tonnellata di quarzite alimentata comprende ossigeno e impurità; la tonnellata di silicio metallico che esce ha una composizione diversa. Per conoscere la resa servirebbe un bilancio di alimentazione e recupero dell'impianto, non la sola massa della roccia.

La distinzione fra silicio metallico e ferrosilicio è visibile già nella carica. Per produrre la lega ferro-silicio si introduce deliberatamente una fonte di ferro, come rottame ferroso o minerale di ferro, insieme alla silice e al riducente. La descrizione industriale di Elkem indica proprio questo apporto. Nella produzione di silicio metallico, invece, il ferro è una delle impurità da limitare in rapporto al grado venduto. Anche all'interno del ferrosilicio esistono gradi diversi: il nome della lega dice quali elementi principali vi sono, mentre la percentuale di silicio dice quanto elemento utile contiene ogni tonnellata di prodotto. Il resto della massa comprende soprattutto ferro e componenti minori entro limiti contrattuali.

Questo dettaglio cambia la lettura dei grandi numeri. L'USGS usa per la propria tabella sul silicio migliaia di tonnellate di contenuto di Si, salvo diversa indicazione. Per il 2025 stima 5,0 milioni di tonnellate di silicio contenuto nel ferrosilicio e 4,6 milioni di tonnellate di silicio contenuto nel silicio metallico. I due totali mondiali escludono la produzione degli Stati Uniti, trattenuta per riservatezza nella scheda; non sono una misura completa dell'intero mondo. Inoltre, 5,0 milioni di tonnellate di silicio nel ferrosilicio non equivalgono a 5,0 milioni di tonnellate lorde di lega. Per passare dall'una all'altra bisognerebbe

conoscere la combinazione effettiva dei gradi prodotti, senza attribuire a tutto il settore una sola composizione.

Il calore svolge una funzione ancora diversa nella grafite sintetica. Qui il punto di partenza è un precursore carbonioso, per esempio coke di petrolio, la cui struttura e le cui impurità influenzano il risultato. Una rotta convenzionale comprende preparazione e calcinazione, eventuale miscelazione con leganti e formatura, cottura e grafitizzazione a temperatura elevata. Nella grafitizzazione gli atomi di carbonio acquistano un ordine cristallino più vicino a quello della grafite. Il prodotto può essere poi purificato, frantumato, classificato o trasformato in forme compatte. A differenza della grafite naturale, la sua massa commerciale nasce da un processo termico industriale, non dalla concentrazione di un minerale di grafite.

La parola «sintetica» copre prodotti con densità, porosità, cristallinità e dimensione delle particelle molto differenti. Un elettrodo, un blocco e una polvere non diventano intercambiabili perché condividono il carbonio come componente principale. Anche il precursore ha una storia materiale: il coke di petrolio proviene dalla raffinazione, ma attribuire al prodotto tutta l'energia e le emissioni di quella raffineria, o ignorare completamente il contributo del precursore, darebbe bilanci fuorvianti. La grafitizzazione richiede elettricità e alte temperature; l'intensità per tonnellata dipende da precursore, impianto, grado e confine del calcolo. Un processo catalitico descritto dal National Energy Technology Laboratory mostra che esistono rotte tecniche differenti, senza fornire per questo un valore rappresentativo di tutta la produzione commerciale.

Nei forni al silicio e al ferrosilicio calore, potenza elettrica, gas e metallo liquido impongono controlli sui fumi, sulle polveri e sulle operazioni di manutenzione. Negli impianti di grafite sintetica il profilo cambia con cottura, leganti, volatili e trattamento dei gas. Non esiste un unico numero energetico o emissivo valido per «il silicio» o «la grafite»: perfino la stessa unità, una tonnellata di prodotto, può riferirsi a metallo, lega, concentrato o polvere qualificata. I forni portano materiali a una prima forma commerciabile. Quando il cliente richiede impurità molto più basse o una morfologia particolare, il percorso continua.

La purezza diventa un processo distinto

Un concentrato di grafite può essere sufficientemente ricco per un impiego e inadeguato per un altro. La purificazione termica sfrutta il calore per rimuovere determinate impurità; quella chimica tratta il materiale con reagenti, seguiti da lavaggio e neutralizzazione. La scelta dipende da quali elementi devono diminuire, dove si trovano nelle particelle e quali proprietà della grafite devono rimanere intatte. La parola «purificata» non identifica da sola una resa né un metodo: occorre conoscere il contenuto delle singole impurità, il prodotto in uscita e i residui della rotta effettiva.

Per le polveri destinate alla successiva produzione di anodi conta anche la geometria delle particelle. Nella sferonizzazione, macinazione e classificazione modellano la grafite naturale e selezionano una distribuzione di forma e dimensione. Il rapporto tecnico dell'Argonne National Laboratory registra frazioni fini come uscita distinta dalla grafite sferica nel processo che esamina. Quelle frazioni possono trovare altri impieghi, ma non entrano tutte nel prodotto sferico qualificato. La perdita di resa della polvere utile nasce nella preparazione meccanica, prima che qualcuno fabbrichi un elettrodo; non indica un difetto di quest'ultimo. Un'eventuale purificazione e un rivestimento successivo cambiano ancora il materiale. La polvere qualificata resta una materia prima: la fabbricazione dell'anodo e della cella appartiene alla fase seguente.

Il caso studiato da Argonne descrive inoltre una purificazione acida della grafite sferica con acido fluoridrico, cloridrico e nitrico e una successiva neutralizzazione. L'acido fluoridrico appartiene a quella rotta documentata, con esigenze proprie di contenimento, protezione dei lavoratori e gestione degli effluenti. Altri impianti possono scegliere processi chimici o termici differenti. Le soluzioni esauste, i sali ottenuti dalla neutralizzazione e il prodotto scartato vanno contati insieme alla polvere vendibile quando si valuta il processo; non basta misurare il carbonio iniziale o la purezza finale. Lo stesso principio vale per l'acqua usata nella flottazione, nel lavaggio e nel trattamento: il volume prelevato, quello ricircolato e l'effluente sono quantità diverse.

Per il quarzo ad alta purezza la selezione continua in cava e durante la preparazione. Alcune impurità sono in superficie e possono essere rimosse con lavaggio e separazione; altre stanno in inclusioni o nella struttura del cristallo e

sono molto più difficili da eliminare. Frantumare il materiale può liberarle, ma può anche introdurre contaminazioni o danneggiare caratteristiche utili. Un crogiolo di quarzo fuso destinato alla crescita del silicio deve resistere alle condizioni termiche del processo e limitare la contaminazione del materiale che contiene. Per questo un certificato con la sola percentuale globale di SiO_2 non esaurisce la prova di idoneità. La stessa scheda USGS distingue il quarzo naturale macinato ad alta purezza da altre materie per cristallo coltivato: denominarle tutte «quarzo» cancellerebbe percorsi e acquirenti diversi.

Il silicio metallurgico incontra un'altra soglia. È silicio elementare ottenuto dal forno, ma le impurità compatibili con alcuni impieghi metallurgici o chimici possono impedire l'uso per un materiale destinato alla crescita di cristalli. Una rotta industriale converte il silicio in composti volatili, li purifica e deposita nuovamente silicio ad alta purezza. La documentazione dell'Occupational Safety and Health Administration (OSHA) sui rischi professionali descrive una rotta in cui il silicio reagisce con acido cloridrico per formare triclorosilano; il composto viene purificato e usato per la deposizione di silicio policristallino con idrogeno. Il risultato, il polisilicio, è un nuovo prodotto commerciale: il salto dal forno alla sua consegna richiede impianti chimici, analisi e qualificazione.

La chimica introduce rischi differenti da quelli della cava e del forno. Acido cloridrico, clorosilani e gas infiammabili richiedono controllo delle perdite, sistemi e procedure adatti, oltre a gestione dei sottoprodotti. Descrivere la possibilità tecnica di ricircolare reagenti non dimostra che ogni impianto abbia identica configurazione o identici consumi. L'energia necessaria alla deposizione e alla purificazione, il recupero dei composti e i residui dipendono dalla rotta. Un confronto di emissioni con il silicio metallurgico richiederebbe lo stesso confine di processo e un prodotto definito con la medesima precisione.

Il grado solare e il grado destinato ai semiconduttori impongono controlli diversi sulle impurità e sulla qualificazione, senza che una singola soglia percentuale valga per tutte le tecnologie. Il polisilicio è qui il limite della filiera: la crescita del cristallo, il taglio dei wafer e la costruzione di celle e dispositivi sono fasi successive. Il quarzo del crogiolo e il silicio depositato possono incontrarsi in una di esse, ma hanno seguito fino a quel punto due rami materiali distinti. Una fabbrica capace di purificare una piccola quantità non garantisce ancora una fornitura della scala richiesta dal mercato: occorre guardare a capacità, produzione e geografia.

La capacità ha una geografia diversa dalla miniera

La carta delle miniere di grafite naturale mostra il luogo in cui entra nuovo materiale minerario nella catena. La carta degli impianti di grafitizzazione mostra dove altri precursori carboniosi acquistano la struttura richiesta. Una terza carta sarebbe necessaria per sapere dove si purifica e si sferonizza il concentrato naturale. La prima non permette di dedurre automaticamente le altre due. Nel 2025 l'USGS stima 1,4 milioni di tonnellate di grafite naturale estratta in Cina sui 1,8 milioni mondiali. Questa concentrazione riguarda la fase mineraria definita dalla fonte; non è una quota cinese della grafite sintetica né delle polveri già qualificate.

L'estrazione può crescere senza che aumentino in pari misura linee di purificazione disponibili, operatori formati o clienti che abbiano approvato un grado specifico. Viceversa un paese può lavorare concentrati importati senza comparire fra i grandi produttori minerari. Le distanze contano anche per acqua, elettricità, trasporto e trattamento dei residui: collocare una fase altrove modifica la catena logistica, non cancella le operazioni richieste. Una statistica di commercio che registra grafite in fiocchi o polvere, senza indicare con precisione purificazione e rivestimento, lascia aperta la domanda sulla forma che arriva davvero al compratore.

Per il silicio la mappa deve cominciare dalla composizione della carica e dagli impianti metallurgici. L'USGS distingue nella produzione nazionale e mondiale ferrosilicio e silicio metallico. La quota di una geografia nella prima categoria non è una misura della sua capacità di fornire polisilicio; la tonnellata statistica è inoltre contenuto di Si, mentre il polisilicio è un prodotto successivo.

Una fonte diversa illumina la fase successiva. Nel rapporto *Trends in Photovoltaic Applications 2025*, IEA PVPS stima che nel 2024 siano stati prodotti nel mondo circa 1,96 milioni di tonnellate di polisilicio per fotovoltaico e semiconduttori, di cui circa 1,9 milioni destinati al fotovoltaico. La produzione cinese nel 2024 è stimata in circa 1,82 milioni di tonnellate. Sono cifre settoriali relative a un prodotto raffinato e a un anno preciso; non si possono sottrarre ai 4,6 milioni di tonnellate di contenuto di Si nel silicio metallico stimati dall'USGS per il 2025 per ottenere una resa industriale. Cambiano prodotto, data e copertura statistica.

Lo stesso rapporto indica una capacità mondiale di produzione del polisilicio di 3,25 milioni di tonnellate all'anno alla fine del 2024. La produzione di 1,96 milioni è invece un flusso realizzato durante l'intero 2024. Una linea completata negli ultimi mesi pesa sulla capacità a fine anno ma ha potuto produrre solo per una parte del periodo; altre linee possono essere ferme, in avvio o impegnate a qualificare il prodotto. Il rapporto fra quei due numeri non è dunque il tasso di utilizzo degli impianti per l'intero 2024. E gli annunci di nuovi progetti indicano una possibilità condizionata a costruzione, messa in funzione, forniture e vendite, non produzione già consegnata.

La capacità nominale stabilisce quanto un impianto potrebbe produrre nelle condizioni dichiarate. La produzione effettiva misura ciò che è uscito durante un periodo. Il volume vendibile di un grado particolare richiede anche che una parte dell'uscita rispetti la specifica e sia accettata dall'acquirente. Queste tre quantità possono divergere in un settore in rapida espansione, e divergono anche quando un impianto cambia tecnologia o prodotto. Una notizia su nuova capacità non risolve da sola la dipendenza di chi deve acquistare polisilicio con determinate impurità o quarzo adatto a un crogiolo.

L'Europa illustra la necessità di distinguere le fasi. Nella scheda USGS figurano produttori europei di silicio metallico o ferrosilicio, fra cui Francia, Germania e Norvegia; il rapporto IEA PVPS registra anche produzione di polisilicio in Germania nel 2024. La presenza di attività lungo la catena non equivale a una filiera completa né a un bilancio europeo ricostruibile da queste due fonti. Un paese può disporre di quarzite, di un forno o di un impianto chimico e dipendere da altre località per materiale, energia, lavorazioni intermedie o forme qualificate. Quando la catena attraversa frontiere, il punto in cui un prodotto viene classificato e venduto diventa essenziale per capire la dipendenza.

La forma acquistabile e la posizione italiana

Un acquirente di grafite naturale può ordinare un concentrato specificando contenuto di carbonio, ceneri, umidità e dimensione dei fiocchi. Un altro chiede polvere purificata con una distribuzione stretta delle particelle, limiti per certi elementi e comportamento controllato nella lavorazione. Il prezzo del primo prodotto non consente di valutare direttamente il costo del secondo: fra i due

ci sono rese, energia, reagenti, classificazione e responsabilità sui residui. La parola «grafite» in un contratto funziona soltanto insieme a una specifica.

Per il silicio, il compratore della lega ferro-silicio indica contenuto di Si e limiti di impurità; chi compra silicio metallico richiede una composizione diversa; chi acquista polisilicio specifica requisiti molto più severi e una forma adatta alla fase seguente. Anche il quarzo si vende in gradi e forme differenti, dal materiale per usi industriali ampi al prodotto qualificato per componenti di processo. Una tonnellata di SiO_2 nella sabbia, una di silicio contenuto nel ferrosilicio e una di polisilicio hanno masse nominalmente uguali ma ruoli, trattamenti e prezzi non intercambiabili. Per capire se una filiera può soddisfare una domanda bisogna nominare il punto di consegna.

La stessa necessità di una specifica rigorosa si applica alla materia prima che torna dal riciclo. Residui di lavorazione della grafite, materiali refrattari usati e sfridi di silicio possono contenere componenti recuperabili; la raccolta, la contaminazione e il trattamento decidono quali di essi rientrino come cariche industriali. La scheda USGS sulla grafite naturale non offre una quantità o un valore globale del suo riciclo: citare il riuso possibile come se fosse una quota misurata altererebbe il bilancio. Analogamente il silicio recuperato da un prodotto finito non diventa per definizione polisilicio di grado solare; deve percorrere le operazioni necessarie a raggiungere di nuovo il grado richiesto. Il recupero è una fonte di alimentazione da qualificare, non una scorciatoia attraverso tutte le trasformazioni. Raccolta e trattamento dei prodotti a fine vita appartengono a una filiera più ampia; qui interessa il momento in cui una carica secondaria torna a essere acquistabile e lavorabile.

Le classificazioni statistiche aiutano, entro i loro limiti. Una voce doganale ampia può aggregare quarzo di gradi diversi; la scheda USGS sull'HPQ segnala proprio che le voci commerciali disponibili non permettono di ricavare con affidabilità un bilancio separato per quella qualità. Anche una descrizione di grafite naturale in fiocchi e polvere non specifica sempre se il materiale sia stato purificato o sferonizzato. Nell'indagine statistica europea sulla produzione industriale (Prodcom), inoltre, «produzione venduta» e «produzione effettiva» hanno significati distinti: la prima si riferisce a quanto prodotto e fatturato nel periodo secondo le definizioni Eurostat, la seconda comprende anche produzione destinata ad altre lavorazioni interne o a scorte. Occorre scegliere codice, unità e indicatore prima di costruire una quota nazionale.

La scheda USGS sulle sabbie e ghiaie industriali stima per l'Italia 13 milioni di tonnellate nel 2025. Descrive una categoria industriale ampia, che non si può ribattezzare «sabbia da costruzione» né trasformare in produzione italiana di HPQ. Non misura quanti crogioli si possano fabbricare, quanto silicio metallurgico sia disponibile o se esista una linea nazionale di polisilicio. La presenza di materia silicea sul territorio è un punto di partenza; mineralogia, qualità della carica, impianti, energia e qualificazione del cliente stabiliscono le fasi successive.

Per il lettore italiano la domanda pratica riguarda le forme acquistate dalle imprese che lavorano materiali e componenti: servono concentrati o polveri con proprietà dichiarate, leghe conformi a un grado, silicio metallico per una determinata lavorazione oppure polisilicio già qualificato. Descrivere questa domanda non richiede di attribuire all'Italia una produzione o una dipendenza percentuale per grafite sintetica, HPQ e polisilicio che le serie qui consultate non isolano. L'assenza di una cifra leggibile può dipendere dalla classificazione, dall'aggregazione, dalla riservatezza o dalla disponibilità dei dati; senza un esame dei codici e delle serie non si può stabilire quale spiegazione valga per ogni materiale. Il passaggio dal dato ampio alla forma richiesta resta il problema industriale, non un vuoto da colmare con una stima intuitiva.

Dove nasce la disponibilità

Per acquistare una materia prima non basta sapere quanto carbonio o quanta silice esistano nella crosta terrestre. La grafite naturale va liberata dalla roccia senza perdere le caratteristiche utili; la grafite sintetica dipende dal precursore e dal processo termico; il quarzo per un componente deve superare prove che una percentuale globale di purezza non esaurisce. Il silicio metallurgico nasce da una carica e da un forno specifici, mentre il polisilicio richiede un'ulteriore filiera chimica.

Ogni passaggio ha una propria capacità, una propria resa e un luogo. Il totale minerario indica il materiale entrato nella catena; la capacità nominale indica una possibilità dell'impianto; la produzione e la qualifica commerciale indicano quanto prodotto e quale grado sono arrivati più vicino all'acquirente. Confonderli produce una disponibilità apparente che può sparire proprio dove serve il materiale. Davanti a un grande tonnellaggio, la prima domanda è quindi concreta: quale grafite, quale quarzo o quale silicio, in quale forma e in quale

fase? La risposta permette di distinguere l'abbondanza della materia dalla possibilità di consegnarla con la specifica richiesta.

Fonti e riferimenti

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Graphite (Natural), produzione mineraria e geografia.
https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-graphite.pdf

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Silicon, produzione di ferrosilicio e silicio metallico in contenuto di Si e nota sull'esclusione degli Stati Uniti.
https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-silicon.pdf

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Quartz (High-Purity and Industrial Cultured Crystal), definizioni e dati statunitensi sul quarzo macinato ad alta purezza.
https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-quartz.pdf

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026: Sand and Gravel (Industrial), produzione e usi delle sabbie industriali.
https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-sand-industrial.pdf

IEA Photovoltaic Power Systems Programme — Trends in Photovoltaic Applications 2025, pagina 54, produzione e capacità mondiale del polisilicio nel 2024.
https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/10/IEA-PVPS_Trends_2025-.pdf

Argonne National Laboratory — Updated Production Inventory for Lithium-Ion Battery Anodes, 2022, sezione sulla sferonizzazione e sulle frazioni fini della grafite naturale.
https://publications.anl.gov/anlpubs/2022/10/178668.pdf

Elkem — What is ferrosilicon?, composizione della carica del forno per la ferrolega.
https://www.elkem.com/products/silicon/ferrosilicon/

National Institute for Occupational Safety and Health — Best Practices for Dust Control in Metal/Nonmetal Mining, esposizione alla silice cristallina e controllo della polvere.
https://www.cdc.gov/niosh/engcontrols/ecd/detail81.html

Occupational Safety and Health Administration — Semiconductor: Substrate Manufacture, rotta del triclorosilano e pericoli professionali.
https://www.osha.gov/semiconductors/substrate-manufacture2

U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory — Descrizione del processo catalitico per grafite sintetica.
https://www.netl.doe.gov/node/15056

Eurostat — Prodcom information and data, definizioni di produzione venduta ed effettiva.
https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/information-data

04.20 – Petrolio e gas come materie prime

Una raffineria può separare dal petrolio una frazione liquida chiamata nafta. Un impianto di trattamento del gas può invece recuperare etano. Entrambi i prodotti possono arrivare a uno steam cracker, l'impianto che spezza le molecole degli idrocarburi per ottenere sostanze di base della chimica. All'uscita, però, le due cariche non danno lo stesso assortimento: l'etano favorisce l'etilene, mentre la nafta fornisce anche quantità importanti di propilene e correnti da cui recuperare altri composti. Sapere che un paese dispone di petrolio o gas dice quindi poco su quali molecole può consegnare a un'altra industria.

Etilene e propilene sono punti di partenza per molti materiali plastici; gli aromatici alimentano altre catene chimiche, comprese quelle delle fibre; dal metano si può ottenere una miscela reattiva destinata, fra l'altro, alla produzione di ammoniaca e metanolo. Qui il percorso si ferma alle cariche e alle prime molecole commerciabili. La loro disponibilità dipende dalla composizione iniziale, dalle unità che le separano e trasformano, dall'energia che alimenta quelle unità e dalle infrastrutture che le collegano ai clienti. Petrolio e gas diventano materie prime industriali attraverso una serie di scelte: una corrente destinata al forno chimico segue una via diversa da quella inviata alla combustione.

Separare una carica dal petrolio e dal gas

Il greggio è una miscela di idrocarburi e di componenti da rimuovere o controllare, fra cui acqua, sali e composti dello zolfo. Nella raffineria viene trattato e riscaldato; la distillazione separa gruppi di sostanze in base all'intervallo di temperatura a cui evaporano e condensano. Ne escono gas, frazioni leggere come la nafta e frazioni più pesanti. Non esce una quota fissa di ciascuna per ogni barile: contano il greggio impiegato e la configurazione degli impianti successivi. Alcune unità trasformano ulteriormente le frazioni, altre ne modificano la qualità prima della vendita o dell'uso interno.

La nafta è una miscela liquida, non il nome di una singola molecola. Due partite possono avere intervalli di ebollizione simili e composizioni diverse di paraffine,

nafteni, aromatici e impurità. La stessa famiglia di frazioni può alimentare uno steam cracker, un reformer catalitico o la preparazione di carburanti. Occorrono dunque una quantità sufficiente e una qualità adatta alla destinazione scelta. Una raffineria può produrre nafta senza avere accanto un cracker; un cracker può acquistare una carica trasportata da altrove. La presenza di una delle due unità non prova l'esistenza dell'altra.

Nel rapporto *The Future of Petrochemicals*, pubblicato nel 2018, l'Agenzia internazionale dell'energia (IEA) descrive per il 2017 una resa media mondiale delle raffinerie in nafta di circa il 7%. La percentuale aiuta a capire perché il sistema della raffinazione, che muove grandi volumi, sia una fonte importante di cariche chimiche. È una media di raffineria in un anno determinato: applicarla alla massa di greggio lavorata da un impianto italiano per ricavarne la sua nafta, e poi la sua produzione di etilene, scavalcherebbe differenze di greggio, configurazione e destinazione dei prodotti. Ogni passaggio avrebbe una propria misura.

Il gas naturale richiede un'altra separazione. Il metano ne costituisce di norma la parte principale, ma il gas grezzo può contenere etano, propano, butani, frazioni più pesanti, acqua, anidride carbonica e sostanze indesiderate. Il trattamento rende la corrente conforme alle specifiche di trasporto e di impiego; il recupero dei liquidi del gas naturale, indicati dalla sigla inglese NGL, può isolare etano, propano e altri componenti. Il gas di petrolio liquefatto, o GPL, designa soprattutto propano e butani come prodotto commerciale: è una categoria diversa dall'intera famiglia degli NGL. Una quota di GPL proviene anche dalle raffinerie.

Recuperare etano dipende dal tenore presente nel gas, dall'impianto di separazione e dalla possibilità di venderlo o trasportarlo. Se resta nella corrente di gas, contribuisce al suo contenuto energetico; se viene separato, frazionato e consegnato a un cracker, diventa una carica chimica distinta. Neppure un giacimento ricco di gas garantisce quindi da solo una fornitura di etano: servono impianti di trattamento e collegamenti commerciali. Per il propano le alternative comprendono l'impiego energetico, lo steam cracking e la deidrogenazione mirata alla produzione di propilene. Queste destinazioni concorrono per una materia che deve prima essere resa disponibile in forma appropriata.

La scala complessiva aiuta a collocare queste scelte. Secondo l'IEA, nel 2017 circa 12 milioni di barili al giorno di prodotti petroliferi entravano nella chimica come carica, pari al 12% della domanda mondiale di petrolio. La cifra riguarda il petrolio incorporato nei processi chimici; la combustione necessaria a fornire energia è una voce distinta. Per il gas, la differenza fra materia ed energia emerge con particolare chiarezza nel reforming del metano.

Questi ordini di grandezza sono una fotografia storica della relazione fra settore energetico e settore chimico. Nel rapporto *Oil 2025*, l'IEA prevede che nel 2030 la produzione di polimeri e fibre sintetiche richieda 18,4 milioni di barili al giorno di petrolio. Si tratta di una proiezione per una destinazione definita, non della lettura aggiornata della stessa riga statistica del 2017. Il confronto utile per questo capitolo è materiale: i volumi di petrolio e gas diventano forniture chimiche solo dopo che una parte delle miscele iniziali è stata separata e scelta come carica. Da quel momento, il forno stabilisce quali molecole nascono insieme.

La carica decide il portafoglio del forno

Nello steam cracking una corrente di idrocarburi viene miscelata con vapore e attraversa rapidamente tubi riscaldati in una fornace. Il calore rompe parte dei legami nelle molecole. Il vapore abbassa la pressione parziale degli idrocarburi e aiuta a limitare reazioni indesiderate; subito dopo il forno, il raffreddamento rapido arresta in gran parte la trasformazione. Una miscela di prodotti deve ancora essere compressa, lavata, asciugata e separata con una successione di apparecchiature, comprese colonne che operano a bassa temperatura. All'uscita del forno non c'è già etilene puro pronto per un contratto industriale.

Questa sequenza richiede una fornace, scambiatori di calore, compressori e sistemi di separazione progettati per determinati volumi e composizioni. Il gas combustibile alimenta il calore della fornace; la carica contiene invece atomi che possono finire nelle molecole vendibili, nei coprodotti, nel gas utilizzato internamente o nei residui. Alcune correnti prodotte dal cracker possono essere bruciate nell'impianto, ma la loro origine materiale va tenuta distinta dalla funzione energetica che assumono dopo la separazione. Una cifra unica di “idrocarburi consumati” lascerebbe invisibile questa differenza.

L'etano, molecola formata da due atomi di carbonio, è una carica relativamente semplice. Il cracking produce soprattutto etilene, una molecola anch'essa a due atomi di carbonio con proprietà chimiche diverse. L'etilene può alimentare, nelle fasi successive, la produzione di polietilene e altre sostanze. La relativa selettività della rotta non significa che tutta la massa dell'etano diventi etilene: esistono altre correnti, energia incorporata nei gas usati come combustibile e perdite. Significa soprattutto che il ventaglio dei coprodotti è più stretto di quello ottenuto da molte cariche liquide.

La nafta contiene molecole di dimensioni e strutture differenti. Nel suo cracking si formano etilene e propilene, ma anche frazioni a quattro atomi di carbonio dalle quali può provenire butadiene, gas leggeri, idrogeno e una corrente liquida detta benzina di pirolisi, o Pygas dall'inglese *pyrolysis gasoline*. La Pygas contiene composti da trattare e separare, fra cui aromatici. Per un impianto e per chi acquista le molecole, dunque, “una tonnellata di prodotto del cracker” è un'informazione insufficiente: conta come quella massa si ripartisce e quali unità successive riescono a ottenere i gradi richiesti.

L'IEA stima per il 2017 circa 255 milioni di tonnellate annue di etilene e propilene prodotti complessivamente nel mondo. È la somma di due molecole, non la massa dei polimeri che se ne ricaveranno e neppure la quantità di nafta o etano alimentata ai forni. L'ordine di grandezza mostra il peso delle prime trasformazioni, mentre la composizione del totale mostra il limite di un numero aggregato: un compratore di propilene non può usare al suo posto etilene. Anche quando cresce la capacità di cracking, la disponibilità delle due molecole può seguire traiettorie differenti.

Un sistema che privilegia cariche ricche di etano può accrescere l'offerta di etilene riducendo, rispetto a una rotta con nafta, la quantità relativa degli altri prodotti. Il vincolo non si risolve chiedendo genericamente “più petrolchimica”: occorrono nuove fonti di propilene o aromatici, oppure cambiamenti nelle unità esistenti entro i loro limiti tecnici. Il propano offre un esempio. Può essere trattato in uno steam cracker con un proprio portafoglio di prodotti, ma può anche entrare in una unità di deidrogenazione del propano, indicata con la sigla PDH. Quest'ultima rimuove idrogeno dal propano per ottenere propilene in modo mirato. Richiede una fornitura adeguata di propano, energia, catalizzatori e una via per gestire l'idrogeno prodotto: una molecola desiderata non emerge gratuitamente da un cambio di impianto.

La distribuzione geografica della capacità segue la disponibilità delle cariche. Nel quadro IEA riferito al 2017, gli Stati Uniti ospitavano circa il 40% della capacità petrolchimica mondiale basata su etano. La cifra descrive un sottoinsieme di impianti, non il 40% di tutta la petrolchimica e nemmeno il 40% dell'etilene effettivamente prodotto nel mondo. Ha senso qui perché collega una risorsa recuperata dal gas alle unità costruite per valorizzarla. Contare il gas estratto negli Stati Uniti, da solo, non avrebbe identificato questa capacità.

Anche il rendimento ha un perimetro. Nella figura di processo dell'IEA compare un rapporto indicativo di circa 1,2 tonnellate di etano alimentato per tonnellata di sostanze chimiche di elevato valore, dette HVC nella sigla inglese *high-value chemicals*. In questo rapporto il gruppo comprende etilene, propilene e aromatici BTX: il denominatore somma prodotti di base diversi, mentre l'ingresso è etano. Il valore dipende dal confine del processo e appartiene alla rotta indicata, perciò non descrive la resa di un cracker a nafta o di un impianto specifico.

Il forno e le separazioni concentrano inoltre calore, sostanze infiammabili e apparecchiature in pressione. Durante l'esercizio e la manutenzione occorre gestire possibili perdite, l'arresto o l'avvio delle unità e il coke che si deposita nei tubi e deve essere rimosso. Le emissioni di combustione della fornace, quelle da sfiati e fiaccole e gli idrocarburi dispersi da altre parti del sito hanno origini diverse. Anche i lavoratori incontrano rischi diversi a seconda della fase. Attribuire a una tonnellata generica di “petrolchimica” un solo consumo energetico o un solo profilo di esposizione cancellerebbe proprio la differenza fra cariche e processi che determina i prodotti.

Il bilancio del cracker pone una domanda ulteriore: da dove arrivano il propilene e gli aromatici quando una carica leggera ne produce meno? Una parte nasce in altri circuiti che rispondono anche alle esigenze della raffinazione dei carburanti.

Quando una molecola dipende da un altro prodotto

Oltre alla distillazione che fornisce nafta, la raffineria può avere unità che trasformano frazioni più pesanti o cambiano la struttura delle molecole leggere. Nel cracking catalitico fluido, noto come FCC dall'inglese *fluid catalytic cracking*, una carica pesante entra in contatto con un catalizzatore e viene

convertita in prodotti più leggeri. L'assetto dell'impianto e le condizioni operative possono favorire la produzione di propilene, ma il circuito resta inserito in una raffineria che deve bilanciare più prodotti, compresi carburanti. Come documenta il Dipartimento dell'Energia statunitense, la corrente di composti a tre atomi di carbonio (C3) recuperata contiene anche propano: la distillazione deve portare il propilene alla purezza richiesta dall'uso chimico, più severa per la polimerizzazione. La capacità di separazione aggiunge così un vincolo a quello della produzione nel reattore.

Il reforming catalitico lavora invece su una nafta preparata. Riorganizza le molecole per produrre una corrente a più alto numero di ottano, utile nella formulazione delle benzine, e genera idrogeno. Il riformato risultante può essere ricco di composti aromatici. Non è però benzene puro: contiene una miscela che può essere avviata a estrazione e separazioni successive. Il reforming catalitico della nafta è anche diverso dal reforming con vapore del metano, che produce gas di sintesi. La somiglianza dei nomi non identifica la stessa carica, lo stesso processo o lo stesso prodotto.

Gli aromatici principali considerati qui sono benzene, toluene e xileni, spesso indicati insieme dalla sigla BTX. Gli xileni comprendono molecole con gli stessi atomi disposti in modo differente, che possono richiedere separazioni ulteriori. Il benzene può essere una materia iniziale per diverse catene di polimeri; gli xileni alimentano, fra l'altro, la produzione di intermedi per fibre e imballaggi. Sono richiami alla domanda industriale: la sintesi dei derivati e la fabbricazione dei materiali appartengono ai passaggi successivi. Una corrente chiamata BTX contiene più componenti; una tonnellata di riformato o di Pygas non equivale a una tonnellata di benzene acquistabile.

La Pygas costituisce un secondo ingresso possibile agli aromatici. Nasce soprattutto dove un cracker utilizza nafta o altre cariche più pesanti e deve essere trattata prima di separare prodotti utilizzabili. Se cresce la capacità a etano, non cresce necessariamente questa corrente. Se una raffineria decide come destinare il proprio riformato in base anche al mercato della benzina, la disponibilità di aromatici separabili può cambiare senza che sia cambiato il volume di petrolio estratto. La chimica dipende così da decisioni e capacità situate in impianti che vendono anche altri prodotti.

Fra la corrente mista e una molecola vendibile ci sono operazioni con una propria capacità. La Pygas può richiedere idrogenazione per stabilizzare

componenti reattivi; l'estrazione separa poi gli aromatici dagli altri idrocarburi e la distillazione distingue parte delle singole sostanze. Alcuni xileni richiedono ancora una selezione fra isomeri. Anche il riformato della raffineria deve essere indirizzato alle unità adatte se l'obiettivo è ottenere BTX per la chimica. La massa che entra in una di queste unità comprende altri componenti: pesarla e chiamarla “benzene prodotto” anticiperebbe un recupero che non è ancora avvenuto. La capacità di separazione può perciò limitare le vendite anche quando riformato e Pygas esistono in quantità.

Nel quadro mondiale ricostruito dall'IEA per il 2017, la produzione di benzene, toluene e xileni ammontava complessivamente a circa 110 milioni di tonnellate all'anno. Nello stesso riferimento oltre il 40% del propilene e circa l'80% degli aromatici BTX provenivano dai circuiti delle raffinerie. Le percentuali sono quote dell'offerta delle sostanze definite in quel rapporto, non rese per tonnellata di greggio, né quote garantite in ogni paese e in ogni anno successivo. Collocate accanto al funzionamento degli impianti, mostrano perché un cambiamento della raffinazione può incidere su materie prime chimiche anche quando il motivo immediato della decisione riguarda i carburanti.

La disponibilità finale dipende ancora da estrazione, idrogenazione quando necessaria, frazionamento e specifiche. Si può disporre di riformato senza avere localmente una capacità sufficiente di separare benzene; si può vendere una corrente aromatica mista e importare una molecola pura richiesta da un cliente. Il prezzo e il volume di quelle due merci non descrivono lo stesso mercato. Anche i rischi seguono la fase: serbatoi, tubazioni, valvole e operazioni di separazione possono generare esposizioni a benzene e rilasci di composti organici; la misura utile per lavoratori e ambiente riguarda le condizioni e i controlli effettivi, non le tonnellate totali di greggio raffinato.

La subordinazione è anche economica. Un aumento del prezzo di una molecola può rendere più interessante recuperarla da una corrente già disponibile o orientare un investimento in separazione; non garantisce che un impianto nato per una combinazione di carburanti produca subito più carica adatta. Nella raffineria quantità e composizione delle frazioni dipendono dal greggio e dalle unità installate. Nel cracker dipendono dalla carica e dalle condizioni ammesse dal forno. Per aumentare una fornitura si può quindi dover intervenire in una fase diversa da quella in cui il cliente osserva la scarsità.

Il portafoglio delle olefine e degli aromatici dipende quindi dal modo in cui due sistemi, cracker e raffineria, si incontrano. Il gas recuperato all'inizio del percorso apre anche una strada diversa. Una volta separati gli idrocarburi più pesanti, la corrente ricca di metano può fornire calore oppure diventare essa stessa un reagente.

Il metano fra reagente e combustibile

Il metano è la molecola principale del gas naturale trattato. Il suo impiego più comune come combustibile libera energia attraverso la combustione, ma nella chimica può anche entrare come materia prima in una reazione. Una via è il reforming con vapore: gas depurato e vapore attraversano un impianto riscaldato e, in forma semplificata, la reazione $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ produce monossido di carbonio e idrogeno. Il risultato, chiamato gas di sintesi o syngas, è una miscela, la cui composizione effettiva dipende dall'unità e dai trattamenti. Non è gas naturale purificato né una partita di idrogeno puro.

Il calore richiesto dalla reazione impone un secondo uso del gas o di un altro combustibile nell'impianto. Una parte del metano reagisce e contribuisce alle molecole della corrente in uscita; una parte di combustibile può essere bruciata per scaldare il reformer. Se a valle si vuole aumentare la quota di idrogeno, parte del monossido di carbonio può reagire con altro vapore secondo $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$. L'anidride carbonica può dunque provenire sia dalla fornace sia da questa trasformazione della carica, e i due flussi richiedono bilanci distinti. Il consumo totale di gas di un sito non indica da solo quanto gas sia diventato materia chimica.

L'IEA stimava per il 2017 circa 105 miliardi di metri cubi di gas naturale impiegati come carica per la chimica primaria mondiale nel suo complesso. La stessa fonte indicava circa 300 miliardi di metri cubi di consumo complessivo di gas del settore, pari all'8% della domanda mondiale e comprensivo dell'energia di processo. Il primo valore non misura soltanto i reformer a metano né la quantità di gas di sintesi ottenuta; il secondo include funzioni che non diventano prodotto. La distanza fra i due confini rende visibile, su scala settoriale, la necessità di contare separatamente reazione e calore.

Un acquirente o un impianto a valle ha bisogno di una miscela con un rapporto appropriato fra idrogeno e monossido di carbonio e con impurità entro limiti

dichiarati. Una descrizione generica di “capacità di syngas” non soddisfa quella richiesta. Pressione, idrogeno infiammabile e monossido di carbonio tossico richiedono contenimento, controllo e procedure di lavoro specifiche; il vapore e il raffreddamento richiedono acqua e gestione dei flussi. La sintesi di ammoniaca, metanolo o altri prodotti apre un'altra filiera e non è necessaria per capire il bivio materiale del metano. Qui interessa il punto in cui la miscela diventa una carica definita per la trasformazione successiva.

Olefine, aromatici e gas di sintesi hanno dunque origini e specifiche diverse. La domanda finale è dove si trovino le unità capaci di produrli e come una molecola raggiunga effettivamente il suo compratore.

La capacità ha una geografia, la molecola un punto di consegna

La carta dei pozzi di petrolio non coincide con quella delle raffinerie, e nessuna delle due coincide necessariamente con quella dei cracker. Per l'etano serve anche una carta degli impianti che recuperano liquidi dal gas e dei collegamenti verso le unità chimiche. Per il benzene occorre sapere dove il riformato o la Pygas sono trattati e separati. Un paese può importare greggio e raffinarlo, importare nafta e trasformarla oppure acquistare direttamente etilene o un suo derivato. Sono dipendenze collocate in punti diversi della catena; non si ricavano da un solo totale nazionale di “petrolio”.

Una capacità nominale indica quanto un impianto potrebbe produrre alle condizioni dichiarate. La produzione effettiva registra quanto è uscito in un periodo; il prodotto venduto misura un altro passaggio, che può essere influenzato da uso interno, scorte e contratti. Fermate per manutenzione, modifiche della carica e mercato cambiano lo scarto fra queste quantità. Quando la statistica pubblica misura una categoria più ampia, come prodotti petroliferi o produzione chimica aziendale, non si può estrarre per semplice proporzione la quantità di etilene o benzene effettivamente disponibile. La specifica di purezza, lo stato fisico e il luogo di consegna restringono ulteriormente ciò che un cliente può acquistare.

Il rapporto IEA *Oil 2025* collega la crescita della domanda petrolchimica anche alla disponibilità crescente di liquidi del gas naturale e segnala una forte espansione della capacità in Cina e negli Stati Uniti, a svantaggio dell'Europa e

di altre economie asiatiche. I due paesi seguono configurazioni diverse: negli Stati Uniti la disponibilità di NGL ha sostenuto gli impianti basati su cariche leggere; in Cina l'espansione della capacità risponde anche alla domanda manifatturiera e utilizza più rotte e cariche. È una prospettiva formulata nel 2025 sul periodo fino al 2030, anziché un censimento delle unità operative nel 2026. Sviluppare separazione, trasporto e impianti compatibili modifica la geografia delle molecole; la sola presenza di greggio o gas non basta a collocare sul territorio tutte le trasformazioni successive.

Le statistiche europee consentono di vedere una parte della catena con buona precisione e di riconoscerne il limite. Eurostat registra per il 2024 una produzione interna dell'Unione europea di 15,5 milioni di tonnellate di greggio e importazioni di 471,3 milioni di tonnellate. Il divario descrive la scala degli approvvigionamenti esterni di greggio, non la quota di etilene importata. Nello stesso anno le raffinerie dell'Unione hanno prodotto 543,7 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio, abbreviate Mtoe, di prodotti petroliferi; nella loro produzione la nafta compare per 41,6 Mtoe. La tonnellata equivalente di petrolio misura contenuto energetico convenzionale: quei 41,6 Mtoe non sono 41,6 milioni di tonnellate fisiche di nafta e non possono essere trasformati direttamente in tonnellate di olefine.

Eurostat calcola inoltre per il 2024 una dipendenza dalle importazioni del 96,6% per l'insieme di greggio e prodotti petroliferi, come rapporto fra importazioni nette ed energia lorda disponibile. La percentuale riguarda un aggregato energetico definito, non la sola nafta e nemmeno l'intera petrolchimica. L'Unione può disporre di notevole capacità di raffinazione alimentata da greggio importato e dipendere allo stesso tempo da correnti specifiche, da impianti chimici o da prodotti intermedi provenienti da altri territori. È possibile anche l'opposto per una particolare molecola: una produzione chimica interna non dimostra l'origine europea della sua carica.

L'Italia rende concreta la distinzione. Nel 2024 produceva 4,2 milioni di tonnellate di greggio e 68,8 Mtoe di prodotti petroliferi secondo Eurostat. La seconda cifra la collocava fra i maggiori paesi raffinatori dell'Unione, ma non indica quanta nafta italiana sia stata destinata ai cracker, quante olefine siano uscite dagli impianti né quante ne siano state acquistate dall'estero. Per rispondere occorrerebbero bilanci di prodotto e codici statistici riferiti alle singole molecole. Nell'indagine europea Prodcom sulla produzione industriale,

per esempio, “produzione effettiva” e “produzione venduta” non coincidono necessariamente: un intermedio fabbricato e consumato nello stesso sito può essere presente in una misura e avere un ruolo diverso nell'altra.

Il cambiamento di una catena locale si osserva nel piano di trasformazione di Versalis. Nell'ottobre 2024 Eni annunciò la cessazione degli impianti di cracking di Priolo e Brindisi e del polietilene di Ragusa. Presentò un investimento previsto di circa 2 miliardi di euro e un obiettivo di riduzione di circa un milione di tonnellate di CO_2, indicato come il 40% delle emissioni di Versalis in Italia. Quelle cifre descrivevano il piano, non capitale già speso o emissioni già evitate. Il comunicato Eni del 30 luglio 2026 porta gli investimenti previsti a 2,5 miliardi e descrive un programma in attuazione: a Brindisi un cantiere avviato e impianti in conservazione oggetto di ricerca di acquirenti; a Priolo demolizioni di impianti dismessi avviate nel febbraio 2026 e lavori preparatori per la bioraffineria.

Questo caso non dà una serie nazionale di produzione di etilene o propilene. Mostra però dove può spostarsi la dipendenza: se cessa un'unità che produce localmente le prime molecole, le attività a valle eventualmente mantenute hanno bisogno di altre forniture, di una diversa configurazione produttiva o entrambe. Quali molecole arrivino, in che quantità e con quale mezzo ai singoli siti richiederebbe dati aggiuntivi. La riconversione non è neppure una quantità uniforme di “capacità chimica” trasferita a nuove tecnologie: cracking, bioraffinazione, riciclo e attività specialistiche acquistano cariche e vendono prodotti differenti. Per valutare lavoro e comunità locali occorrerebbe distinguere occupazione nelle singole unità, appalti, nuove attività avviate e tempi effettivi dei cantieri, senza equiparare obiettivi aziendali a risultati già osservati.

Il punto di consegna chiarisce infine la dipendenza del compratore. Un contratto per nafta specifica una miscela; quello per etano una corrente trattata e trasportabile; un ordine di etilene o propilene richiede una molecola separata con caratteristiche dichiarate. Pygas e riformato sono correnti contenenti aromatici, mentre il benzene purificato è un'altra merce. Nei dati di commercio occorrono codice, descrizione, massa netta, anno, territorio e direzione dello scambio; nei dati di produzione occorre sapere se la molecola è stata effettivamente fabbricata, venduta o usata nello stesso complesso. Senza queste righe validate per l'Italia, un indice di autosufficienza petrolchimica

costruito dalla massa del greggio o dai Mtoe raffinati sarebbe un numero privo del denominatore necessario.

La materia prima è la molecola consegnabile

Le due cariche dell'inizio arrivano entrambe a un forno, ma aprono portafogli di prodotti diversi. A monte, greggio e gas devono fornire una frazione recuperabile nella qualità richiesta; nel cracker la composizione della carica condiziona le proporzioni fra le molecole; a valle separazione e logistica stabiliscono quale di esse può essere venduta. Propilene e aromatici dipendono anche da impianti di raffineria orientati a più mercati. Il metano mostra un ulteriore bivio: può fornire energia oppure partecipare alla reazione che produce gas di sintesi.

Queste differenze spiegano perché la disponibilità industriale non si misuri con il volume di idrocarburi nel sottosuolo o con la sola capacità di raffinarli. La domanda operativa è quale sostanza, con quali specifiche, possa uscire da una catena di impianti e arrivare a un cliente in un luogo e in un periodo definiti. Quando una fase locale cambia o scompare, può restare la domanda a valle ma muta il percorso necessario a soddisfarla. Da qui cominciano le filiere dei prodotti chimici e dei materiali che useranno quelle prime molecole.

Fonti e riferimenti

International Energy Agency — The Future of Petrochemicals, 2018

https://www.iea.org/reports/the-future-of-petrochemicals

International Energy Agency — The Future of Petrochemicals, rapporto integrale

https://iea.blob.core.windows.net/assets/bee4ef3a-8876-4566-98cf-7a130c013805/The_Future_of_Petrochemicals.pdf

International Energy Agency — Oil 2025, Executive summary

https://www.iea.org/reports/oil-2025/executive-summary

U.S. Department of Energy — Energy and Environmental Profile of the U.S. Chemical Industry, capitolo 3

https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/chemicals/pdfs/profile_chap3.pdf

Eurostat — Oil and petroleum products: a statistical overview

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Oil_and_petroleum_products_-_a_statistical_overview

Eurostat — Prodcom: information on data

https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/information-data

Eni/Versalis — Piano di trasformazione, 24 ottobre 2024

https://www.versalis.eni.com/it-IT/news/comunicati-stampa/2024/eni-piano-versalis.html

Eni — Aggiornamento sul programma Versalis, 30 luglio 2026

https://www.eni.com/it-IT/media/news/2026/07/eni-programma-trasformazione-versalis-in-piena-attuazione-previsti-investimenti.html

04.21 – Elio

Un ospedale che deve mantenere freddo un magnete per la risonanza magnetica non ordina una quota di risorsa sotterranea. Chiede elio con una purezza precisa, spesso in forma liquida, consegnato in un contenitore capace di limitare l'ingresso del calore. Il fornitore può sapere che nel mondo esistono grandi quantità di elio intrappolate nei giacimenti e, nello stesso tempo, avere difficoltà a rispettare una consegna. Fra quei due fatti si trovano pozzi, impianti di trattamento del gas, separatori, purificatori, liquefattori e una rete di trasporto specializzata.

L'elio è un elemento chimico molto leggero e poco reattivo. Il suo isotopo commerciale principale, l'elio-4, ha una caratteristica decisiva per questo percorso: a pressione atmosferica diventa liquido soltanto vicino a 4,2 kelvin, circa 269 gradi sotto zero. La temperatura rende possibili applicazioni criogeniche difficili da ottenere con altri fluidi, ma impone anche un costo alla produzione e alla conservazione. In altre applicazioni l'elio viene acquistato come gas compresso. Forma, qualità e luogo di consegna cambiano quindi il significato pratico della parola «disponibile».

Il capitolo segue la materia prima fino all'utilizzatore. La domanda è quale parte dell'elio presente nel sottosuolo possa essere intercettata, trasformata e consegnata, e che cosa accada al gas dopo l'uso. Gli impieghi medici, scientifici e industriali entrano nella storia solo quando spiegano una specifica richiesta al fornitore o una possibilità di recupero.

La concentrazione deve incontrare un flusso

L'elio-4 nasce lentamente nel sottosuolo. Quando uranio e torio decadono, emettono particelle alfa che, acquistando elettroni, diventano atomi di elio. Su tempi geologici una parte del gas migra attraverso le rocce e può restare intrappolata sotto strati impermeabili. Molti giacimenti che lo contengono ospitano anche gas naturale; l'elio vi rappresenta una componente minoritaria di una miscela formata soprattutto da altre molecole. La sua presenza non basta, da sola, a far nascere una filiera commerciale.

Il primo vincolo è la concentrazione, ma bisogna leggerla insieme al flusso. Un tenore modesto in un volume enorme e costante di gas può alimentare un

impianto di recupero. Un tenore più alto in un giacimento remoto, privo di trattamento o di collegamenti, può restare soltanto una possibilità geologica. Contano anche la composizione delle impurità, i costi energetici, il tempo durante il quale il gas sarà estratto e la distanza dagli acquirenti. Non esiste una soglia percentuale valida per ogni giacimento: un progetto deve dimostrare che i metri cubi recuperabili pagheranno gli impianti e la distribuzione.

Il legame con il gas naturale crea una dipendenza industriale particolare. Il gestore può sviluppare un campo per vendere metano o alimentare un impianto di gas naturale liquefatto e decidere se aggiungere il recupero dell'elio. Se la corrente viene lavorata senza una sezione capace di intercettarlo, la presenza dell'elemento nel giacimento non genera prodotto commerciale. Se invece il progetto comprende separazione e sbocchi di vendita, lo stesso flusso può fornire due prodotti distinti. Prezzi, contratti e continuità dell'attività principale influenzano dunque anche l'offerta di elio. Del gas naturale interessa qui una componente rara della miscela e il destino che le viene riservato durante il trattamento.

Il linguaggio delle statistiche aiuta a non confondere i passaggi. Una risorsa è una stima dell'elio presente in formazioni conosciute e valutate, con il perimetro geologico dichiarato dalla fonte. Una riserva richiede invece una valutazione della recuperabilità economica alle condizioni specificate. La produzione annuale misura un flusso effettivo o stimato, ottenuto con impianti esistenti. Ciascuna grandezza risponde a una domanda diversa: quanto potrebbe esserci, quanto si giudica sfruttabile e quanto è entrato nella filiera in un certo anno.

La scheda statunitense *Mineral Commodity Summaries 2026* stima circa 8,49 miliardi di metri cubi di risorse di elio recuperabile nei giacimenti di gas naturale conosciuti degli Stati Uniti e 31,3 miliardi fuori dagli Stati Uniti. I due valori sono stime di risorse nei rispettivi perimetri, non quantità pronte per il mercato. I paesi indicati nella stessa documentazione hanno situazioni assai diverse: la voce delle riserve per il Qatar è descritta come «Large», mentre per altri paesi compare una cifra o manca un valore comparabile. Convertire quelle parole in zeri, o sommare risorse e riserve come se fossero due depositi distinti, cambierebbe il significato dei dati.

La tentazione di dividere la risorsa mondiale per la produzione di un anno è forte. Il risultato aritmetico avrebbe l'aspetto di un numero di anni rimasti, ma

ignorerebbe le condizioni che trasformano il gas geologico in merce. I giacimenti entrano e escono dall'attività, i flussi cambiano, la parte recuperabile dipende dagli impianti e una quota può attraversare il trattamento senza essere catturata. La scala geologica dice che esiste una possibilità; il volume annuale e la rete industriale dicono quale parte di quella possibilità viene utilizzata.

Il primo filtro della disponibilità è dunque un incontro: l'elio deve trovarsi in una corrente abbastanza grande, regolare e accessibile da giustificare il recupero. Una volta portato il gas in superficie, però, l'elemento resta ancora mescolato ad altre sostanze. La questione si sposta dalla concentrazione naturale alla separazione industriale.

La separazione produce una qualità

Il gas estratto può contenere acqua, idrocarburi più pesanti, anidride carbonica, azoto e altri componenti. Un impianto rimuove o controlla le sostanze che disturberebbero i trattamenti successivi, soprattutto quelle che potrebbero condensare o solidificare in una sezione fredda. I passaggi precisi variano con la composizione del giacimento e con i prodotti che l'impianto deve vendere. Questa variabilità impedisce di disegnare un'unica macchina universale per «estrarre elio».

In una configurazione rappresentativa, la lavorazione del gas comprende una separazione criogenica dell'azoto. Raffreddando la miscela, diversi componenti si condensano a temperature differenti; l'elio tende a rimanere nella corrente che non condensa alle condizioni adottate. Una parte della sua concentrazione deriva perciò dalla rimozione delle altre sostanze. L'impianto ottiene elio grezzo, una corrente arricchita che deve ancora essere trattata prima di soddisfare le specifiche commerciali più severe. Linde Engineering descrive impianti che collegano recupero criogenico, purificazione per adsorbimento a oscillazione di pressione, liquefazione e stoccaggio. La descrizione illustra una famiglia di soluzioni industriali; non attribuisce gli stessi apparecchi e le stesse rese a ogni produttore mondiale.

La differenza fra corrente grezza e prodotto raffinato è ampia. Nelle definizioni riportate dall'USGS, l'elio grezzo si colloca normalmente fra il 50 e l'80% di elio; l'elio di grado A contiene almeno il 99,997% dell'elemento. La scheda USGS del

2025 distingue anche il gas generalmente superiore al 98%. Sono denominazioni e soglie della fonte, utili per vedere il salto di qualità; non sostituiscono la specifica che un compratore concorda per il proprio impianto. Due partite con la stessa percentuale complessiva di elio possono differire per umidità, idrogeno, azoto, olio o particolato residuo.

Per arrivare alla qualità richiesta bisogna togliere le impurità compatibilmente con la corrente in ingresso. L'adsorbimento a oscillazione di pressione, spesso indicato con la sigla inglese PSA, usa materiali che trattengono alcuni gas quando la pressione cambia e li rilasciano durante la rigenerazione. In altre configurazioni intervengono trattamenti catalitici e ulteriori separazioni. La scelta dipende da ciò che il gas contiene, dalla purezza desiderata e dal volume da trattare. La sezione che concentra elio grezzo e quella che lo purifica svolgono funzioni diverse: il fatto di possedere la prima non garantisce automaticamente la seconda.

La specifica cambia anche con la destinazione. Un gas usato come atmosfera protettiva in una lavorazione e un gas destinato a un sistema molto sensibile alla contaminazione non vengono qualificati sulla sola base del nome dell'elemento. Il cliente può chiedere limiti su tracce particolari, pressione di consegna, forma gassosa o liquida e continuità del rifornimento. La concentrazione minima del grado A è un riferimento definito dall'USGS, mentre il contratto industriale decide quali controlli siano indispensabili in quel punto della catena. Inventare una scala universale di «purezza per risonanza magnetica» o «purezza per semiconduttori» nasconderebbe proprio questa differenza.

Ogni separazione richiede materia ed energia. Compressori, scambiatori, refrigerazione, adsorbenti e manutenzione hanno costi; una corrente più diluita impone di trattare più gas per ottenere la stessa quantità di elio, a parità delle altre condizioni. La lavorazione del gas ospite può richiedere a sua volta energia. Attribuire un'unica intensità energetica o emissiva a ogni metro cubo di elio sarebbe ingannevole senza conoscere l'impianto, l'elettricità usata e il modo in cui si ripartiscono gli oneri fra prodotti. Il dato decisivo per questo capitolo è il vincolo: la presenza di elio nel gas e la capacità di venderlo come prodotto qualificato sono due stadi distinti.

La decisione di installare il recupero ha anche una dimensione temporale. L'operatore valuta la vita residua del campo e la stabilità della portata, mentre

chi compra elio può richiedere forniture per anni. Un'apparecchiatura aggiunta tardi alla vita del giacimento deve recuperare il proprio costo in meno tempo; una linea di purificazione sovradimensionata rispetto al flusso futuro rischia di restare inutilizzata. Viceversa, un contratto affidabile può dare al produttore una ragione per trattenere una componente che altrimenti passerebbe attraverso la lavorazione del gas. Il collo di bottiglia non si riduce dunque a una reazione chimica: comprende la coincidenza fra tempi del giacimento, dell'investimento e della domanda.

Anche le persone incontrano rischi specifici nel trattamento a monte. Le apparecchiature lavorano a pressione e separano correnti di gas dalla composizione variabile: controllo degli impianti, manutenzione e procedure di arresto proteggono gli operatori oltre a preservare la qualità del prodotto. Le temperature estreme e il comportamento dell'elio rilasciato diventano particolarmente importanti nella catena criogenica che segue.

Alla fine della purificazione un produttore può avere gas di grado commerciale. Per alcuni clienti la catena è ancora incompleta: il prodotto deve arrivare liquido, a una temperatura di pochi gradi sopra lo zero assoluto. La qualità chimica diventa allora una questione di infrastruttura termica.

Il freddo diventa infrastruttura

L'elio bolle a circa 4,2 kelvin alla pressione atmosferica. In gradi Celsius la temperatura è prossima a meno 269. È molto più bassa di quella richiesta per liquefare il gas naturale, e il processo comporta compressione, scambio termico, espansione e refrigerazione progettati per condizioni estreme. La liquefazione concentra una grande quantità di elio, misurata come volume di gas, in un volume assai più piccolo di liquido da trasportare. Riduce una difficoltà logistica e ne crea un'altra: preservare il freddo lungo l'intero viaggio.

Un contenitore per elio liquido limita l'ingresso di calore con isolamento, vuoto e geometrie adatte. Una parte del liquido evapora per effetto del calore residuo, fenomeno chiamato *boil-off*. Il gas prodotto aumenta la pressione se viene trattenuto; secondo il progetto del contenitore e la durata del viaggio, va gestito, raccolto o sfiatato in sicurezza. Il volume caricato alla partenza e quello che il cliente può utilizzare all'arrivo dipendono quindi anche dal tempo, dal contenitore e dall'organizzazione della consegna. Il tasso di evaporazione varia

con apparecchiatura e percorso: una percentuale presa da un singolo contenitore criogenico non descriverebbe l'intera rete.

Trasportare gas compresso in bombole o in rimorchi con tubi ad alta pressione è un'altra soluzione. La scelta fra gas e liquido dipende dalla quantità, dalla distanza, dalle attrezzature dell'utilizzatore e dalla frequenza dei rifornimenti. Per un grande impiego criogenico, il liquido può rendere gestibili volumi che come gas richiederebbero molti viaggi. Per un uso limitato e non criogenico, pagare la liquefazione e movimentare un contenitore freddo può essere poco conveniente. Un impianto che produce elio raffinato, un liquefattore e una flotta di contenitori rappresentano capacità industriali differenti.

Il trasporto del liquido comprende anche il ritorno delle attrezzature. I contenitori devono essere disponibili, caricati, spediti, scaricati e riportati nel circuito. Un ritardo nel rientro può ridurre la quantità di prodotto distribuibile anche se il separatore continua a funzionare. Il cliente, dal canto suo, ha bisogno di spazio, collegamenti e procedure per ricevere il prodotto e trasferirlo. La continuità di fornitura nasce da una coordinazione fra impianti e logistica, non dal solo volume prodotto al pozzo.

Questa catena introduce un altro limite alla lettura delle capacità nominali. Un liquefattore può essere progettato per trattare una certa portata annua, ma le sue fermate, la disponibilità di gas purificato e il parco contenitori determinano quanto liquido potrà effettivamente raggiungere i clienti. Allo stesso modo, la capacità di un serbatoio indica quanto può contenere in condizioni definite, mentre il servizio richiede anche una velocità di riempimento e prelievo. Capacità installata, produzione effettiva e consegne sono misure successive, ciascuna con il proprio vincolo.

La parola «scorta» copre oggetti diversi. Una risorsa in una formazione geologica è una stima del sottosuolo. L'elio grezzo conservato in un deposito collegato a un gasdotto è materiale raccolto ma ancora da portare alla qualità finale. Una bombola di gas raffinato, un serbatoio di liquido e il buffer operativo di un impianto sono stock fisici situati più avanti nella filiera, con funzioni e tempi diversi. Sommarli come se fossero tutti elio immediatamente consegnabile a un ospedale produrrebbe una cifra senza utilità pratica. La disponibilità a breve termine dipende dalla posizione e dalla forma delle scorte.

Il freddo impone anche regole di sicurezza. Il contatto con parti criogeniche può causare lesioni; la rapida evaporazione libera molto gas e può aumentare la pressione o ridurre l'ossigeno in un locale poco ventilato. Una perdita deve essere descritta con precisione: il liquido che evapora e viene catturato resta recuperabile, mentre il gas scaricato nell'aria si disperde. Le operazioni di carico, travaso e manutenzione determinano quale dei due destini prevale. Queste condizioni contano per le persone e per il bilancio della materia.

La liquefazione aggiunge un onere elettrico che varia con la tecnologia e la taglia dell'impianto. Il materiale può essere prezioso proprio perché consente un raffreddamento estremo; produrlo e mantenerlo a quella temperatura richiede a sua volta un sistema tecnico. Questo spiega perché due luoghi con accesso allo stesso volume geologico possano avere accesso molto diverso al prodotto liquido.

Si può ora leggere la geografia dell'elio con una domanda più precisa. Dove si trovano le correnti di gas recuperate, e dove si trovano gli impianti e i contenitori capaci di trasformarle in forniture? La carta dei giacimenti dà solo la prima parte della risposta.

Pochi poli e molti punti in cui manca il prodotto

Secondo la scheda USGS del 2026, la produzione mondiale di elio nel 2025 è stimata in 190 milioni di metri cubi, come volume di gas e con un totale arrotondato. Gli Stati Uniti figurano con 81 milioni, il Qatar con 63, la Russia con 18 e l'Algeria con 11. I quattro valori sommano a 173 milioni di metri cubi, circa il 91% del totale arrotondato. La quota è un calcolo su quella tabella, non una misura della capacità di liquefazione, delle esportazioni disponibili o della concentrazione proprietaria delle aziende. Anche i produttori più piccoli contano per gli acquirenti che possono raggiungerli, ma la scala dei primi poli rende visibile quanto una fermata industriale possa pesare sul flusso annuo.

Il numero mondiale serve come fotografia di un anno stimato. La produzione commerciale è concentrata in pochi sistemi di trattamento del gas. Anche all'interno di un paese, la disponibilità dipende da unità specifiche: estrazione, separazione, purificazione, eventuale liquefazione e uscita verso la rete di distribuzione. Un fermo di uno di questi anelli può ridurre il prodotto vendibile senza cambiare di un solo metro cubo le risorse geologiche stimate. La tabella

per paese non indica quale parte dell'elio sia già in forma liquida, vincolata da contratti o pronta a essere spedita verso una destinazione specifica. La stessa quantità nazionale può quindi avere significati diversi per un cliente locale e per uno che attende un container oltre confine.

La posizione degli Stati Uniti comprende una storia particolare di stoccaggio. Il vecchio Federal Helium System collegava il deposito sotterraneo del Bush Dome, vicino ad Amarillo in Texas, a un impianto e a un gasdotto per elio grezzo. La General Services Administration descriveva nel 2023 un gasdotto di 423,24 miglia, circa 681 chilometri, e il deposito come parte degli asset federali allora messi in vendita. Erano infrastrutture per gas grezzo, distinte dalla conservazione dell'elio liquido nei contenitori criogenici descritti sopra. Quei numeri raccontano l'estensione storica del sistema; non misurano quanto prodotto raffinato possa essere spedito oggi a un cliente.

Il Bureau of Land Management ha annunciato il completamento della vendita del sistema a Messer nel 2024. Il passaggio ha cambiato proprietà e gestione dell'infrastruttura, non la quantità di elio presente nelle rocce. Anche qui la distinzione fra stock e flusso è concreta: disporre di gas grezzo immagazzinato richiede ancora accesso alla rete, trattamento e una via commerciale verso la forma richiesta. Il caso è utile perché mostra che disponibilità fisica, asset industriali e controllo istituzionale sono piani collegati ma differenti. Non è una prova, da solo, di maggiore o minore produzione dopo la vendita.

Il Qatar illustra un altro assetto, legato alla lavorazione di grandi correnti di gas naturale e alla filiera del gas naturale liquefatto. Russia e Algeria sono altri poli importanti nella tabella USGS, con geografie industriali e rotte commerciali proprie. Per un compratore lontano, l'elio contenuto o prodotto in uno di questi luoghi diventa offerta accessibile quando esistono separazione, prodotto qualificato, disponibilità contrattuale e trasporto. Le riserve dichiarate non descrivono questi passaggi. Nella stessa scheda, per esempio, la voce di riserva del Qatar è qualitativa, «Large»: non può essere trattata come un volume numerico da confrontare direttamente con quello di un altro paese.

Anche il prezzo richiede un punto di osservazione definito. L'USGS stima per il 2025 circa 12 dollari per metro cubo come prezzo base statunitense dell'elio di grado A, prima dei supplementi applicati dal produttore e delle spese di trasporto. La cifra non è il prezzo mondiale dell'elio né il costo dell'elio liquido consegnato a un piccolo laboratorio. Forma, quantità, distanza, contenitore,

purezza e continuità del servizio entrano nel prezzo pagato dal singolo cliente. Un aumento del costo locale può riflettere un vincolo logistico anche quando la produzione mondiale resta invariata.

La continuità è una parte del prodotto acquistato. Un laboratorio può rinviare alcune operazioni quando la consegna slitta; un impianto che deve mantenere freddo un apparato non dispone sempre della stessa flessibilità. I contratti e le scorte locali rispondono a questa differenza, ma richiedono spazio, capitale e contenitori. Se un'interruzione colpisce un polo produttivo, spostare un ordine verso un altro paese presuppone che vi siano gas qualificato disponibile, una rotta praticabile e attrezzature libere. Il prezzo base misura solo una parte di questo servizio. La vulnerabilità commerciale nasce dalla difficoltà di ricomporre rapidamente tutti gli anelli, non necessariamente dall'esaurimento di un giacimento.

Le grandezze statunitensi mostrano poi quanto sia importante nominare l'operazione misurata. La scheda indica per il 2025 81 milioni di metri cubi venduti o utilizzati dai produttori statunitensi, importazioni per 8 milioni ed esportazioni per 38 milioni. Il consumo apparente risultante è 51 milioni: 81 più 8 meno 38. È un bilancio contabile di flussi, non il volume misurato all'uscita di ogni apparecchio, né la quantità che si è dispersa. Il confronto fra questi valori serve a separare produzione o vendite, commercio e disponibilità apparente interna. Usare gli 81 milioni come consumo statunitense attribuirebbe al mercato interno anche il materiale esportato.

La posizione europea si legge alla fine di questa catena. Il sistema informativo del Centro comune di ricerca della Commissione europea elenca l'elio fra le materie prime critiche del quadro europeo e non fra le 17 strategiche della stessa classificazione. Le due liste descrivono uno status regolatorio, non quantificano da sole l'estrazione europea o la dipendenza di un singolo paese. Per stimare flussi commerciali occorrerebbero codici doganali verificati, forme del prodotto, unità, partner e periodi coerenti. Una percentuale ricavata dividendo la produzione di un paese per il totale mondiale non sarebbe una quota delle importazioni europee.

L'Italia non figura tra i paesi produttori della tabella mondiale USGS esaminata. Questo dato circoscrive ciò che possiamo dire sull'estrazione primaria; lascia aperta la questione delle attività di distribuzione, lavorazione e recupero presenti sul territorio. Ospedali, laboratori e industrie acquistano elio con

requisiti diversi e dipendono da chi è in grado di consegnarlo nella forma richiesta. Le statistiche qui disponibili non separano per l'Italia produzione, importazioni, esportazioni e consumo secondo grado e stato fisico: una quota nazionale di autosufficienza sarebbe quindi priva del denominatore necessario. Il caso italiano rende invece concreta la domanda di partenza: l'accesso a una fornitura non è leggibile nella sola carta dei giacimenti mondiali.

Alla consegna la filiera cambia ancora scala. Il fornitore ha portato gas o liquido qualificato fino al cliente; da quel momento conta ciò che l'apparecchio ne fa. Una parte può essere trattenuta e riportata nel circuito, un'altra si disperde nell'aria. Questa scelta operativa modifica la necessità delle consegne successive.

L'ultimo anello è trattenere il gas

L'elio usato in un sistema criogenico stazionario può evaporare pur restando all'interno di un circuito progettato per raccoglierlo. Il gas passa allora a un serbatoio o a una sacca di raccolta, viene compresso, pulito dalle contaminazioni e riutilizzato come gas o riportato alla forma liquida. Gli apparecchi e le dimensioni variano; ciò che li accomuna è la necessità di intercettare la corrente prima che si mescoli all'aria. Un circuito di ricondensazione locale e un sistema che invia il gas raccolto a un trattamento esterno sono due soluzioni differenti, con costi energetici e logistici propri.

Una perdita avvenuta durante un travaso, uno scarico o un evento improvviso ha un destino diverso dal *boil-off* catturato. Nell'atmosfera l'elio si diluisce a concentrazioni bassissime, dalle quali il recupero commerciale ordinario è impraticabile. La perdita economica avviene già quando il gas si disperde al punto da non poter più essere raccolto con mezzi ragionevoli. Un evento come il *quench* di un magnete, in cui il sistema perde rapidamente la condizione superconduttrice, può liberare gas in tempi che il recupero ordinario dell'impianto non riesce a gestire completamente. La risposta dipende dal progetto concreto.

Altri usi nascono invece come circuiti aperti. L'elio impiegato per sollevare un pallone o un dirigibile può essere conservato finché il sistema resta integro, ma fughe, sfiati e fine dell'uso rendono più difficile raccogliere tutto il gas. Nella ripartizione stimata dall'USGS per il consumo apparente degli Stati Uniti nel

2025, il gas di sollevamento pesa il 17% e la risonanza magnetica il 15%. Le percentuali descrivono categorie d'impiego nel mercato statunitense; non sono quote mondiali né tassi di recupero. Servono a mostrare che una stessa materia prima entra in dispositivi con possibilità molto diverse di trattenerla.

Recuperare richiede investimenti, energia e manutenzione. Un gas contaminato deve essere purificato prima di rientrare in un'applicazione sensibile; un piccolo utilizzatore potrebbe non avere volumi sufficienti per giustificare un liquefattore proprio. Magneti progettati per contenere una carica ridotta o per limitare l'evaporazione possono ridurre la vulnerabilità dell'installazione, ma hanno ancora bisogno di una carica iniziale e di procedure di manutenzione. La sostituzione dell'elio è possibile in alcuni usi, per esempio con altri gas protettivi in certe lavorazioni, e molto più difficile dove sono richieste le sue proprietà criogeniche. Sono decisioni locali, non un'unica percentuale di domanda cancellabile.

L'USGS osserva che il riciclo resta raro nelle applicazioni di grande volume e che aumentano i sistemi di raccolta del gas evaporato e i circuiti chiusi. Il materiale disponibile non quantifica una quota mondiale omogenea di elio effettivamente recuperato. Descrivere un impianto che potrebbe raccoglierne quasi tutto non autorizza a estendere la sua resa all'intero mercato. La differenza fra potenziale tecnico e volume riciclato conta quanto quella fra risorsa geologica e produzione commerciale. In entrambi i casi serve un'infrastruttura funzionante nel luogo in cui passa la materia.

La disponibilità si misura alla consegna

L'ospedale dell'apertura riceve elio soltanto quando una corrente geologica è stata intercettata, separata, portata alla qualità richiesta e, se necessario, liquefatta e conservata durante il trasporto. La produzione mondiale di un anno indica la scala del flusso; le risorse nel sottosuolo descrivono possibilità future; nessuna delle due grandezze garantisce, da sola, una consegna puntuale. Purezza, forma, quantità, contenitore e tempo sono caratteristiche della materia prima acquistabile.

Anche il cliente fa parte del bilancio. Il gas raccolto dopo l'uso può sostituire una parte delle forniture successive, pagando il costo dei sistemi di recupero. Quello disperso nell'aria esce invece dal circuito commerciale ordinario. Il

recupero non annulla la necessità di nuovi impianti o di nuove cariche, ma cambia la velocità con cui una risorsa difficile da produrre deve essere reintegrata. L'elio mostra così un vincolo che attraversa l'intera filiera: la disponibilità industriale non coincide con la presenza dell'elemento, bensì con la capacità di farlo arrivare nella forma giusta e di trattenerlo dove può ancora servire.

Fonti e riferimenti

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2026, Helium and Rare Gases

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-helium.pdf

U.S. Geological Survey — Mineral Commodity Summaries 2025, Helium

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-helium.pdf

Bureau of Land Management — BLM completes sale of Federal Helium System, 2024

https://www.blm.gov/press-release/blm-completes-sale-federal-helium-system

General Services Administration — GSA Announces Sale of Federal Helium System Assets, 2023

https://www.gsa.gov/about-gsa/newsroom/former-gsa-regional-news-archive/region-7-newsroom/greater-southwest-feature-stories-and-news-release/gsa-announces-sale-of-federal-helium-system-assets-06222023

Linde Engineering — Helium Recovery and Liquefaction Plants

https://www.linde-engineering.com/products-and-services/process-plants/natural-gas-processing/helium-recovery-and-liquefaction-plants

European Commission Joint Research Centre — RMIS, Critical and Strategic Materials

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/critical-and-strategic-materials

04.22 – La chimica di base

Una fabbrica che compra soda caustica non ordina semplicemente «NaOH». Deve precisare quanto prodotto vuole, a quale concentrazione, con quali impurità ammesse e con quale regolarità può riceverlo. Dall'altra parte della fornitura può esserci un elettrolizzatore che, per produrre quella soda, genera anche cloro e idrogeno. Se manca uno sbocco per uno dei tre, il problema non si risolve chiedendo all'impianto di produrre soltanto gli altri due. Il rapporto nasce nella reazione, prima che i prodotti arrivino sul mercato.

Lo stesso genere di vincolo attraversa sostanze molto diverse. L'aria viene separata in ossigeno, azoto e argon; l'azoto può incontrare l'idrogeno in un impianto per ammoniaca. Una corrente ricca di monossido di carbonio e idrogeno può diventare metanolo. L'ammoniaca alimenta l'acido nitrico, mentre un gas contenente anidride solforosa può essere trasformato in acido solforico. In ogni caso una formula chimica nomina il prodotto, ma lascia da spiegare da dove arrivino le cariche e in che forma il prodotto esca.

La domanda di questo capitolo è come materie abbondanti quali sale, aria, acqua, gas naturale e zolfo diventino sostanze di base disponibili per altre industrie. Per rispondere occorre seguire le reazioni, le separazioni e le correnti che gli impianti sono obbligati a gestire insieme. Poi bisogna arrivare al punto di consegna: una tonnellata di soda pura e una di soluzione acquosa, oppure un gas prodotto e consumato nello stesso stabilimento e uno venduto in bombola, sono quantità commerciali differenti.

Una reazione vincola più mercati

Il sale è una materia prima comune, ma una salamoia destinata a una cella cloro-soda deve avere una composizione controllata. Calcio, magnesio e altre impurità possono danneggiare le membrane o accumularsi nel circuito; perciò dissoluzione, depurazione e ricircolo precedono l'elettrolisi. Anche la qualità dell'acqua conta. Il processo non consiste nel versare sale in una vasca e raccogliere tre prodotti già commerciabili: la carica attraversa trattamenti, la cella separa le correnti e i prodotti richiedono ulteriori controlli.

Nella cella a membrana la salamoia entra dal lato in cui si libera cloro. Gli ioni sodio attraversano la membrana verso il compartimento dove si formano soda

caustica e idrogeno. La separazione impedisce, nelle condizioni previste di funzionamento, che le correnti si mescolino liberamente. Cloro e idrogeno formerebbero una miscela pericolosa; il contatto fra cloro e soluzione alcalina cambierebbe inoltre la composizione del prodotto. Membrana, elettrodi, pressione e purezza della salamoia sono quindi parti della qualità commerciale oltre che della sicurezza.

Il bilancio teorico si scrive 2 NaCl + 2 H_2O → Cl_2 + 2 NaOH + H_2. Immaginiamo di produrre una tonnellata di cloro: dalle masse delle molecole risultano circa 1,128 tonnellate di NaOH puro e 28 chilogrammi di idrogeno. Se tutta quella soda venisse preparata come soluzione al 50% in massa, il prodotto peserebbe circa 2,26 tonnellate; la differenza è acqua. Questo modello stechiometrico fissa le proporzioni ideali. Per passare al consuntivo di fabbrica servono la salamoia effettivamente circolata, la quota conforme alle specifiche e la destinazione dell'idrogeno.

Il documento tecnico europeo sul cloro-soda distingue infatti il rapporto ideale dal rapporto effettivo. Riferisce 1,070–1,128 tonnellate di NaOH al 100% per tonnellata di Cl_2, perché reazioni secondarie agli elettrodi e, nelle celle a membrana o a diaframma, diffusione di ioni idrossido attraverso il separatore influiscono sulla quantità ottenuta. La sua «unità elettrochimica» convenzionale, o ECU, è definita con una tonnellata di cloro, 1,128 di soda pura e 0,028 di idrogeno. La convenzione rende confrontabili i bilanci; l'intervallo operativo ricorda che l'impianto non è un'equazione senza perdite.

Il mercato, però, non ordina necessariamente cloro e soda nello stesso rapporto. Una domanda forte di soda impone di trovare uno sbocco anche per il cloro che nasce insieme. Una fabbrica può usarlo in un processo vicino, trasformarlo in un derivato o organizzare stoccaggio e trasporto secondo requisiti severi. Le soluzioni dipendono da quantità, distanze e contratti. L'idrogeno coprodotto può a sua volta alimentare un uso interno o essere purificato come gas industriale. Le tre correnti diventano vendite distinte soltanto quando incontrano specifiche e clienti.

Anche l'energia va letta al confine giusto. Il documento europeo di riferimento sulle migliori tecniche disponibili per il cloro-soda, detto BREF (*Best Available Techniques Reference Document*), registra nel 2014 per le celle a membrana un intervallo di circa 2.300–3.000 kWh di elettricità per tonnellata di cloro prodotta, con una mediana intorno a 2.600 nel campione considerato. È il

consumo della fase elettrolitica: preparare la salamoia, concentrare la soda, trattare i gas, raffreddare e movimentare i prodotti aggiunge altri fabbisogni. La soluzione di soda in uscita da una membrana è tipicamente meno concentrata del prodotto al 50% considerato nell'esempio; togliere acqua per arrivare a quella concentrazione è un'operazione industriale distinta.

La cella rende visibili anche rischi e residui. Il cloro è tossico; le fughe richiedono rilevazione, contenimento e procedure di emergenza. La soda è corrosiva, mentre l'idrogeno è infiammabile. Depurare e ricircolare la salamoia genera spurghi e materiali da trattare. Un dato BREF di refluo per tonnellata di cloro non equivale al prelievo idrico totale dell'impianto: la stessa acqua può entrare, circolare, evaporare o uscire in correnti differenti. Le vecchie tecnologie al mercurio e con diaframmi contenenti amianto appartengono anche alla storia delle bonifiche e dei residui; un riferimento tecnico pubblicato nel 2014 non fotografa da solo gli impianti in esercizio oggi.

La cloro-soda mostra dunque un primo vincolo: prodotti diversi nascono dalla stessa reazione, mentre specifiche e clienti li separano. Un vincolo simile compare quando i prodotti non sono creati da una reazione, ma ottenuti dividendo una miscela che respiriamo continuamente.

Separare una miscela e distribuire più gas

L'aria contiene soprattutto azoto e ossigeno, insieme a una piccola quota di argon e ad altre componenti. Un grande impianto di separazione dell'aria, o ASU (dall'inglese *Air Separation Unit*), la filtra e comprime. Prima del raffreddamento profondo rimuove acqua e anidride carbonica, che solidificherebbero nelle parti fredde. Nelle colonne di distillazione i componenti vengono separati sfruttando il loro diverso comportamento alla liquefazione e all'ebollizione. La materia prima è una miscela gratuita nell'ambiente circostante; compressione, freddo, macchine e continuità di esercizio trasformano quella miscela in prodotti industriali.

Ossigeno, azoto e argon escono dallo stesso sistema ma non hanno sempre gli stessi acquirenti. Una grande utenza può ricevere ossigeno gassoso attraverso una condotta da un impianto vicino; un'altra acquista liquido in serbatoio. L'azoto può entrare direttamente in un processo integrato, essere usato per creare un'atmosfera inerte oppure essere venduto con una specifica particolare

sulle tracce di ossigeno e umidità. L'argon richiede ulteriore rettifica prima di diventare un gas commerciabile per le lavorazioni che lo richiedono. Rese di separazione, purezza e destinazione di ogni corrente determinano i volumi vendibili.

La scala modifica la logistica. Linde Engineering descrive nel proprio portafoglio ASU da poche centinaia fino a 5.500 tonnellate al giorno: il dato illustra la taglia di unità che l'azienda progetta, non la capacità mondiale installata. Per una grande domanda continua può convenire collocare la separazione accanto al cliente e fornire gas tramite condotta. Per utilizzatori piccoli o dispersi entrano in gioco liquefazione, autocisterne, serbatoi e bombole, ciascuno con costi di compressione, evaporazione, manutenzione e distribuzione. A parità di formula, pressione e modalità di consegna cambiano il servizio acquistato.

Anche la sicurezza segue la forma. L'ossigeno arricchisce la combustione e impone materiali e procedure compatibili; in un locale chiuso una perdita di azoto può ridurre l'ossigeno respirabile senza introdurre un gas tossico. Liquidi criogenici, contenitori pressurizzati e travasi aggiungono rischi di freddo, sovrapressione ed esposizione per chi lavora. Non esiste un generico rischio dei «gas industriali» uguale in tutte le operazioni: l'impianto deve controllare la sostanza, la pressione e il luogo della possibile fuga.

Fra i prodotti separati, l'azoto apre il passaggio successivo. Nell'ammoniaca diventa reagente, ma da solo non basta: deve incontrare idrogeno di qualità adatta. L'idrogeno può anche essere venduto come gas industriale; quando viene prodotto e consumato nello stesso complesso chimico, invece, misurarlo come offerta commerciale autonoma conterebbe due volte un flusso interno. La stessa attenzione vale per l'anidride carbonica separata, che può essere purificata per un cliente, inviata a un'altra sintesi o rilasciata secondo la configurazione dell'impianto.

Reagente ed energia nella stessa fabbrica

L'ammoniaca contiene soltanto azoto e idrogeno. La sua formula, NH_3, non rivela però quanta energia sia servita per ottenere i reagenti. L'azoto arriva dall'aria con un'adeguata separazione e depurazione. Nella rotta oggi prevalente, l'idrogeno viene ricavato da una carica fossile, soprattutto gas naturale; esistono anche rotte basate sul carbone e percorsi che ottengono

idrogeno mediante elettrolisi dell'acqua. Il gas naturale ha quindi due possibili funzioni nel complesso convenzionale: una parte entra nella trasformazione chimica che fornisce idrogeno, un'altra può essere bruciata per dare calore al processo. La distinzione serve a capire dove vada il carbonio.

Nelle rotte da idrocarburi il gas preparato per la sintesi attraversa trattamenti che regolano la quantità di idrogeno e rimuovono sostanze incompatibili con il catalizzatore. Il carbonio della carica viene separato in gran parte come CO_2 prima del circuito dell'ammoniaca; il combustibile bruciato nei forni produce a sua volta CO_2. Le due correnti possono richiedere tecniche differenti per essere intercettate. Al reattore arrivano dunque reagenti purificati: per valutarne il bilancio contano la qualità della carica e la distinzione fra carbonio del reagente e carbonio del combustibile.

Nel reattore azoto e idrogeno reagiscono secondo $N_2 + 3\ H_2 \rightarrow 2\ NH_3$. Pressione, temperatura e catalizzatore permettono alla reazione di procedere a velocità industriale. Una parte del gas non si converte al primo passaggio: l'ammoniaca viene separata e i reagenti residui ricircolano, mentre gli inerti richiedono spurghi controllati. La massa ideale di azoto e idrogeno fissata dall'equazione è utile a comprendere il prodotto, ma non descrive compressori, perdite, produzione di idrogeno, calore o consumo di acqua dell'impianto completo. Anche un impianto con capacità nominale elevata può produrre meno in un anno, per fermate o condizioni economiche.

La scala mondiale dà una misura del peso di questa infrastruttura. Nell'*Ammonia Technology Roadmap*, l'IEA ricostruisce per il 2020 una produzione di circa 185 milioni di tonnellate di ammoniaca e 8,6 exajoule di energia finale attribuita alla filiera. Nel mix mondiale di impianti a gas naturale e a carbone, circa il 40% dell'energia contabilizzata è associato all'uso della materia prima come carica e circa il 60% all'energia di processo; le quote variano secondo la tecnologia e il confine del bilancio. L'IEA indica inoltre circa 450 milioni di tonnellate di CO_2 diretta per la produzione di ammoniaca nello stesso quadro. Rapportando i due ordini di grandezza si ottengono circa 2,4 tonnellate di CO_2 per tonnellata di NH_3; un impianto specifico richiede però il proprio bilancio emissivo.

Le prestazioni tecniche europee citate nel BREF e la media globale IEA rispondono a domande diverse. Il BREF descrive intervalli per configurazioni e condizioni di esercizio specifiche; l'IEA rappresenta l'insieme di impianti, cariche

e tecnologie effettivamente presenti nel mondo nel 2020. Un numero in gigajoule per tonnellata ha senso soltanto con il suo confine: potere calorifico adottato, inclusione della carica come energia, vapore importato o esportato, marcia dell'impianto. Accostare un intervallo delle migliori tecniche alla media mondiale come se i denominatori fossero identici produrrebbe una differenza apparente priva di interpretazione sicura.

L'ammoniaca alimenta molte attività. La produzione di fertilizzanti ne assorbe una parte dominante nel bilancio IEA; quella filiera prosegue però oltre il confine di questa materia prima. Il prodotto può essere venduto anidro o in soluzione e può passare subito a un processo integrato. Una corrente concentrata di CO_2 separata nella preparazione dell'idrogeno può alimentare, per esempio, la sintesi dell'urea insieme all'ammoniaca. Il carbonio resta allora nel prodotto fino alle trasformazioni successive: per valutarne la permanenza occorre seguire l'intero ciclo d'uso. Il destino del fertilizzante dopo l'uscita dallo stabilimento appartiene a un altro bilancio.

La sicurezza accompagna la catena. L'ammoniaca anidra richiede serbatoi e apparecchiature adatti a pressione e temperatura; una fuga può esporre le persone a un gas tossico. La soluzione acquosa ha concentrazione e rischi diversi. A monte del reattore, idrogeno e gas contenenti monossido di carbonio sono infiammabili o tossici secondo composizione e condizioni. Il controllo delle impurità protegge il catalizzatore, ma protegge anche i lavoratori durante avviamenti, manutenzioni e arresti. Impianti molto automatizzati concentrano la sorveglianza e la risposta alle anomalie in operazioni che non si leggono nel dato annuo di tonnellate prodotte.

L'idrogeno incontra una seconda grande sintesi di base quando la carica contiene anche carbonio destinato a restare nel prodotto: il metanolo. Il suo punto di ingresso è un gas di sintesi con proporzioni controllate di H_2, CO e CO_2. Zolfo, particolato e altre impurità possono avvelenare il catalizzatore; perciò la composizione utile non si deduce dalla sola etichetta «syngas». Anche la fonte del gas cambia: gas naturale, carbone, biomassa oppure una combinazione di CO_2 e idrogeno conducono a bilanci materiali ed energetici differenti. All'ingresso del reattore conta una corrente qualificata, non la generica disponibilità di carbonio e idrogeno.

Le due rappresentazioni essenziali della sintesi sono $CO + 2\ H_2 \rightarrow CH_3OH$ e $CO_2 + 3\ H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$. La seconda forma anche acqua; entrambe mostrano

che il carbonio entra nella molecola commercializzata. Nell'ammoniaca convenzionale da idrocarburi, invece, il carbonio della carica deve essere allontanato prima che azoto e idrogeno reagiscano. Questa differenza modifica il senso della separazione della CO_2. Nel primo caso essa può essere una corrente da gestire o utilizzare altrove; nel metanolo da CO_2 è uno dei reagenti, ma il fatto che entri temporaneamente nel prodotto non dice da solo quale sarà il bilancio climatico dell'intera filiera.

Nel circuito industriale i gas vengono compressi e fatti reagire su un catalizzatore. Il metanolo grezzo che condensa contiene acqua e altre sostanze; gas non convertiti possono essere riciclati e la distillazione porta il liquido alla qualità richiesta. Purezza, acqua residua e contaminanti determinano quale cliente possa usarlo. Anche qui i rapporti ideali di CO, CO_2 e H_2 per tonnellata di prodotto sono una guida alla chimica, mentre resa, spurghi, riciclo ed energia della distillazione appartengono all'impianto reale. Dire che una fabbrica «produce metanolo da CO_2» non elimina la domanda sulla provenienza dell'idrogeno e sull'elettricità utilizzata.

Un percorso basato su gas naturale può servirsi di infrastrutture esistenti per ottenere la carica e il calore, pur generando emissioni lungo il processo. Una rotta con idrogeno elettrolitico e CO_2 recuperata sposta fabbisogni verso elettricità, acqua, separazione e disponibilità di una sorgente di carbonio idonea. Le emissioni associate dipendono dalla provenienza dell'elettricità, dalla fonte della CO_2 e dal destino successivo del metanolo; la stessa formula CH_3OH non certifica una prestazione ambientale. Le rotte da carbone o biomassa richiedono a loro volta controlli su composizione del gas e impurità. La scelta della carica cambia gli impianti necessari prima e dopo il reattore, pur lasciando invariato il nome del prodotto.

La scala del metanolo emerge da una serie dedicata: il Methanol Institute indica 94 milioni di tonnellate di offerta mondiale nel 2024. È una stima settoriale dell'offerta, da mantenere distinta dalla capacità nominale e dagli aggregati di più sostanze. Il metanolo qualificato esce quindi verso altre lavorazioni organiche; solventi, formaldeide e derivati finiti hanno ulteriori passaggi industriali che appartengono alla fase successiva.

La diramazione del carbonio arriva qui al suo primo prodotto standardizzato. Restano aperte altre correnti già incontrate: ammoniaca e ossigeno possono reagire per dare acido nitrico; cloro e idrogeno possono diventare acido

cloridrico. Un terzo acido porta nella storia lo zolfo di una filiera diversa. La parola «acido» accomuna prodotti corrosivi, ma le loro origini industriali non formano un'unica catena.

Tre acidi e tre provenienze

L'acido nitrico continua materialmente la storia dell'ammoniaca. Nella via Ostwald l'NH_3 viene ossidata con aria su un catalizzatore; gli ossidi di azoto ottenuti attraversano ulteriori ossidazioni e vengono assorbiti in acqua. Una parte delle correnti ritorna nel circuito. Il prodotto esce come soluzione alla concentrazione richiesta, eventualmente destinata a una lavorazione integrata. L'acido al 100% equivalente, unità frequente nei documenti tecnici, misura il contenuto di HNO_3: una tonnellata di soluzione diluita pesa più della quantità di sostanza attiva che contiene.

Il processo genera rischi differenti da quelli della sintesi dell'ammoniaca. Ossidi di azoto nel gas di coda e protossido di azoto, N_2O, richiedono controllo del catalizzatore, assorbimento e abbattimento. Il BREF europeo del 2007 riporta per nuovi impianti un intervallo di emissione associato alle migliori tecniche disponibili, le BAT (*Best Available Techniques*), di 0,12–0,6 chilogrammi di N_2O per tonnellata di acido nitrico al 100% equivalente. È un riferimento di prestazione tecnica per un perimetro definito. La massa annuale emessa da uno stabilimento richiede produzione effettiva, misure e condizioni operative. Fermarsi all'acido significa anche lasciare la trasformazione in nitrati e fertilizzanti alla filiera successiva.

L'acido cloridrico riporta alla cella cloro-soda. Cloro e idrogeno possono reagire secondo $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2\ HCl$; il gas ottenuto può essere assorbito in acqua per vendere una soluzione. Ma HCl compare anche come corrente di altre reazioni, soprattutto nelle lavorazioni che impiegano cloro, e allora il produttore deve scegliere se recuperarlo, purificarlo e trovare un cliente oppure neutralizzarlo. La sua disponibilità non dipende sempre da un impianto costruito per fabbricare esclusivamente HCl. La stessa formula può designare gas anidro, soluzione concentrata o soluzione più diluita, con masse trasportate e rischi di corrosione diversi.

Una corrente recuperata non acquista valore commerciale per il solo fatto di contenere HCl. Impurità organiche o altre tracce possono renderla inadatta a

un acquirente; assorbimento, materiali resistenti alla corrosione e controllo della concentrazione costano. La distanza dal cliente incide perché si sposta anche l'acqua della soluzione e perché il trasporto richiede contenitori appropriati. Senza una serie che distingua le origini e le concentrazioni del prodotto, il peso mondiale dell'HCl fabbricato intenzionalmente rispetto a quello recuperato rimane indeterminato.

L'acido solforico introduce un'origine diversa. Un produttore può acquistare zolfo elementare, bruciarlo per ottenere anidride solforosa, SO_2, ossidarla cataliticamente a SO_3 e produrre acido. In una fonderia di metalli non ferrosi, invece, il SO_2 può essere già presente nel gas generato trattando minerali solforati. Per immetterlo in un impianto per acido occorre ripulire quella corrente da polveri e impurità compatibilmente con il processo. La stessa sostanza venduta alla fine deriva così da una carica acquistata appositamente oppure dalla cattura di una componente che il processo metallurgico deve comunque governare.

L'ossidazione può essere scritta $2\ SO_2 + O_2 \rightarrow 2\ SO_3$. La formula finale dell'acido comprende acqua, ma assorbire direttamente SO_3 in acqua come semplice istruzione operativa nasconderebbe il calore e la formazione di nebbia acida. Negli impianti industriali l'assorbimento avviene con acido concentrato, ricircoli e controllo delle condizioni; il prodotto può essere consegnato a concentrazioni diverse oppure come oleum, che contiene SO_3 disciolto in acido. Una tonnellata di SO_2 in ingresso non è una tonnellata di H_2SO_4 in uscita, perché ossigeno e acqua partecipano al bilancio di massa.

Il legame con la fonderia modifica anche l'economia e il territorio. Se l'attività metallurgica rallenta, il gas da cui ricavare acido diminuisce indipendentemente dalla domanda di acido. Un sistema di raccolta e trattamento ben funzionante evita la dispersione di SO_2 e può creare un prodotto vendibile, ma richiede un mercato capace di assorbirlo e una rete di movimentazione adatta. Quando lo zolfo viene bruciato appositamente, la programmazione parte invece dalla carica acquistata e dal prodotto ricercato. Dire «produzione di acido solforico» senza precisarne l'origine mette insieme due meccanismi d'offerta diversi.

Gli impatti seguono i punti di processo. SO_2 residuo e nebbia di acido solforico interessano gas di coda, torri e manutenzione; l'acido concentrato impone materiali resistenti e procedure di travaso. L'acido nitrico unisce corrosività e controllo degli ossidi di azoto. Per HCl contano il contenimento del gas e la

concentrazione della soluzione. I valori di conversione o di concentrazione al camino associati alle BAT misurano prestazioni tecniche in condizioni precisate; le emissioni annuali di una fabbrica si calcolano con portate, ore di funzionamento e misure effettive. La protezione delle persone dipende da come ciascuna corrente viene mantenuta dentro l'impianto.

Gli acidi mostrano così prodotto principale, derivato da un'altra sostanza di base e recupero di una corrente altrui. Sono tutti scambiabili sul mercato soltanto entro le rispettive specifiche. Per sapere se una regione può procurarseli, occorre capire quali impianti vi operino, che cosa usino internamente e quale prodotto esca davvero dai cancelli.

Misurare il prodotto al punto di consegna

Un impianto dichiara una capacità nominale: quanto potrebbe produrre in un periodo sotto le condizioni assunte. La produzione effettiva di un anno può essere minore. Una parte può essere consumata nella stessa area industriale, un'altra venduta. Importazioni ed esportazioni attraversano ancora un confine statistico diverso; il consumo apparente richiede serie coerenti di produzione e commercio, e può non descrivere i flussi interni fra unità integrate. La capacità di una cella non è il consumo nazionale di cloro; la quantità di azoto separato e usato sul posto non è necessariamente una vendita di gas industriale.

La forma commerciale rende più difficile il confronto. Le tonnellate di soda al 100% non si sommano senza conversione a quelle di una soluzione al 50%; la stessa cautela vale per l'acido nitrico espresso come equivalente puro, per l'ammoniaca anidra o acquosa e per l'HCl in soluzione. Ossigeno, azoto e argon possono essere misurati come massa o volume in condizioni di riferimento, consegnati gassosi o liquidi, venduti da una condotta oppure in contenitori. In una statistica di prodotti chimici, due righe con la medesima unità «tonnellate» possono rappresentare merci di contenuto e concentrazione diversi.

Le serie pubblicate per la chimica europea hanno perimetri differenti. Per il cloro-soda, il riferimento europeo riporta 12,2 milioni di tonnellate all'anno di capacità di cloro e 75 impianti nel 2012 nell'insieme UE-27 ed EFTA, l'Associazione europea di libero scambio che comprende anche Norvegia e Svizzera. È capacità installata storica, distinta dalla produzione effettiva. Per l'ammoniaca, l'IEA collocava la sola Unione europea intorno all'8% della

produzione mondiale nel 2019. Anni, aree e grandezze differiscono: ciascun numero descrive il proprio segmento industriale nel periodo indicato, senza offrire una misura aggiornata della marcia degli impianti nel 2026.

Per l'Italia la concretezza viene prima dalla forma del servizio. Un grande consumatore di cloro deve valutare la vicinanza all'elettrolisi, un collegamento di sito, la trasformazione in un derivato e le condizioni di sicurezza di un eventuale trasporto. Contenimento, distanze e continuità pesano sulla scelta senza imporre un'unica soluzione per tutti gli impianti. Un'utenza che chiede ossigeno in grandi volumi continuativi può riceverlo da una ASU dedicata o da una rete di condotte; consumi più dispersi possono richiedere liquido trasportato, serbatoi e bombole. Produzione del gas e sua distribuzione sono capacità industriali distinte.

Ammoniaca e metanolo dipendono da cariche, energia e impianti di sintesi. Un acquirente italiano può avere un prodotto fabbricato in un polo integrato, acquistato da un altro stabilimento o importato. Per una sintesi alimentata da gas, prezzo e continuità della fornitura incidono sulla convenienza della marcia. Durante la crisi energetica del 2022 l'IEA registrò in Europa riduzioni dell'attività in industrie ad alto consumo di gas, compresa l'ammoniaca: l'episodio illustra la sensibilità degli impianti alle condizioni della fornitura. Una fabbrica che trasforma ammoniaca acquistata a valle partecipa alla filiera, mentre la produzione primaria di NH_3 resta attribuita all'impianto che la sintetizza.

Le statistiche aiutano se la domanda è definita. L'indagine Prodcom rileva prodotti industriali secondo codici e indicatori che possono distinguere produzione effettiva e venduta; le statistiche doganali classificano merci che attraversano confini. Per confrontarle occorrono anno, codice, unità, concentrazione e trattamento delle quantità riservate. Una serie italiana allineata per tutte le sostanze e le forme commerciali trattate richiederebbe di estrarre e riconciliare quelle righe prodotto per prodotto. Senza tale bilancio, una percentuale di autosufficienza italiana per cloro, soda, ammoniaca, acidi, metanolo o gas dell'aria sarebbe costruita senza i numeratori e denominatori necessari. Gli impianti e i contratti restano realtà materiali anche dove manca una quota nazionale confrontabile.

La sostanza acquistabile

La fabbrica che ordinava soda nell'apertura può ricevere una soluzione al 50% soltanto se qualcuno ha purificato la salamoia, fatto lavorare la cella, trovato un destino per cloro e idrogeno e concentrato il prodotto. Il nome chimico resta NaOH, ma la fornitura comprende acqua, purezza, energia, contenitore e continuità. La stessa logica collega l'azoto separato dall'aria all'ammoniaca, il syngas qualificato al metanolo e le correnti di ammoniaca, cloro o SO_2 agli acidi.

Le cifre diventano utili quando dicono quale anello misurano. Un rapporto stechiometrico vincola le molecole; la resa operativa registra le perdite e le separazioni; la capacità indica un potenziale, la produzione un flusso avvenuto, la vendita una partita uscita dall'impianto. Una tonnellata di sostanza pura e una di soluzione non sono la stessa quantità di principio attivo. Per l'industria, la disponibilità di una materia prima chimica si verifica alla specifica e al punto di consegna, dopo che le relazioni fra tutte le correnti sono state rese praticabili.

Fonti e riferimenti

Commissione europea, Centro comune di ricerca — Best Available Techniques Reference Document for the Production of Chlor-alkali, 2014.

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CAK_BREF_102014.pdf

Commissione europea, Centro comune di ricerca — Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals — Ammonia, Acids and Fertilisers, 2007.

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-03/LVIC-AAF.pdf

International Energy Agency — Ammonia Technology Roadmap, 2021, dati di base relativi al 2020.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf

Methanol Institute — 2025 Milestones, dato sull'offerta mondiale di metanolo nel 2024, pp. 8–9.

https://methanol.org/wp-content/uploads/2025/06/2025-Milestones-Yearly-Publication_V5.pdf

International Energy Agency — How to Avoid Gas Shortages in the European Union in 2023, sezione sulla domanda e l'offerta europea di gas nel 2022.

https://www.iea.org/reports/how-to-avoid-gas-shortages-in-the-european-union-in-2023/baseline-european-union-gas-demand-and-supply-in-2023

Linde Engineering — Air Separation Plants.

https://www.linde-engineering.com/products-and-services/process-plants/air-separation-plants

Istat — Indagine annuale della produzione industriale Prodcom, metodologia.

https://www.istat.it/informazioni-sulla-rilevazione/prodcom/

Eurostat — Prodcom database.

https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/database

04.23 – Plastiche e resine

Le plastiche si comprano con un nome, una quantità e una scheda tecnica. «Polietilene» identifica una famiglia di materiali, ma non dice ancora se un lotto può alimentare la linea di un trasformatore. Occorre conoscerne la fluidità quando fonde, la densità, l'umidità, gli additivi, la presenza di particelle estranee e la regolarità delle consegne. La stessa domanda vale per un granulo recuperato dai rifiuti: dopo il trattamento, possiede le caratteristiche richieste per sostituire una materia prima in una lavorazione precisa? La disponibilità industriale comincia dove composizione e comportamento del materiale diventano ripetibili e verificabili.

Nella stima preliminare Fast Facts 2025, Plastics Europe valutava la produzione mondiale di plastiche del 2024 in 430,9 milioni di tonnellate. Il totale comprende materiali di origine fossile e diverse forme di produzione circolare secondo le definizioni dell'associazione. È una misura della scala del sistema, non un magazzino da cui qualsiasi compratore possa prelevare il grado desiderato. Tra la molecola di partenza e una resina vendibile si trovano reattori, separazioni, controlli di qualità e scelte di formulazione. Ognuno di questi passaggi può limitare la quantità effettivamente offerta. La parola «plastica» raccoglie così materie prime che condividono la natura polimerica, ma possono avere condizioni di produzione e mercati molto diversi.

La continuità prima del reattore

Una resina nasce da molecole capaci di unirsi in catene o reti. Il produttore deve riceverle in quantità e purezza sufficienti, spesso senza interruzioni prolungate. Per il polietilene e il polipropilene, le molecole di partenza sono rispettivamente etilene e propilene. La loro disponibilità dipende dalle correnti della petrolchimica e della raffinazione: uno steam cracker può fornire diverse molecole in proporzioni condizionate dalla materia prima idrocarburica alimentata, mentre altri impianti di raffineria contribuiscono al propilene. Per il polimerizzatore la conseguenza è diretta: possedere capacità nominale nel reattore non basta se il monomero richiesto arriva in quantità insufficiente o con caratteristiche incompatibili con il processo.

La purezza agisce direttamente sulla reazione. Acqua, ossigeno o altre tracce possono interferire con catalizzatori e iniziatori, modificare la crescita delle catene o peggiorare colore e proprietà della resina. Gli impianti purificano e controllano le correnti prima dell'ingresso nel reattore. La continuità della fornitura conta altrettanto: un arresto può imporre lo svuotamento di linee, la pulizia, il recupero di materiale non conforme e un riavvio graduale. Una tonnellata di monomero consegnata dopo una lunga fermata non restituisce automaticamente la produzione che avrebbe alimentato durante il funzionamento regolare. Questa dipendenza favorisce i poli integrati, dove monomero e polimero sono prodotti nello stesso complesso o collegati da condotte, pur lasciando spazio a imprese che acquistano il monomero da altri fornitori.

L'integrazione risponde anche alla natura delle sostanze. Etilene e propilene si movimentano come gas compressi o liquefatti, con apparecchiature e misure contro incendi e fughe. Lo stirene, usato per polistirene e copolimeri, è invece un liquido da conservare e trasportare controllando stabilità e condizioni di stoccaggio. Dire che tutti sono «monomeri acquistabili» nasconde esigenze logistiche differenti. L'impresa che compra il prodotto finito della polimerizzazione può ricevere sacchi o cisterne di granuli; chi alimenta il reattore gestisce spesso correnti pericolose e sistemi chiusi. La scelta del luogo in cui costruire l'impianto dipende anche da questa distanza materiale fra molecole e resina.

Il PVC rende particolarmente visibile il vincolo di sito. Il suo monomero è il cloruro di vinile, indicato come VCM. La catena comprende il cloro prodotto nell'industria cloro-soda e intermedi clorurati prima di arrivare alla polimerizzazione. Il cloro richiede gestione e movimentazione rigorose; integrare più fasi riduce trasferimenti e scorte intermedie e consente di coordinare la produzione con gli utilizzatori vicini. Il PVC finito viaggia come polvere o come materiale formulato, mentre la gestione del monomero appartiene a un sistema industriale con contenimento, recupero e trattamento delle correnti. La capacità di produrre PVC dipende quindi anche dal funzionamento di una filiera chimica che non si legge nel nome della resina.

Un'altra dipendenza compare quando servono due reagenti in un rapporto funzionale. Il polietilene tereftalato, o PET, nasce principalmente da acido tereftalico purificato e glicole etilenico. Un impianto che dispone dell'uno ma

non dell'altro non può compensare la mancanza semplicemente aumentando la marcia del reattore. La qualità di entrambi influenza poi la crescita delle catene e la stabilità del prodotto. Le poliolefine chiedono correnti continue e adatte ai catalizzatori; il PVC lega la resina a una catena clorochimica integrata; il PET richiede disponibilità congiunta e purezza dei precursori. Solo dopo che queste condizioni sono soddisfatte comincia il problema della reazione.

Il prezzo della resina risente di questi vincoli, ma non esiste un prezzo medio della «plastica» che li rappresenti. Un contratto per un grado preciso ha un periodo, un luogo di consegna, una formula e una quantità. Il costo delle materie prime, dell'energia e dei trasporti pesa in modo diverso secondo la tecnologia e l'integrazione del sito. La capacità nominale è il massimo tecnico dichiarato entro certe condizioni; la produzione effettiva dipende da forniture, manutenzioni e domanda; la produzione venduta è ancora un'altra grandezza. Confonderle farebbe apparire disponibile sul mercato anche la parte che l'impianto non produce o che usa internamente.

Anche il modo di programmare la fabbrica segue il rapporto fra alimentazione del reattore e domanda. Una polimerizzazione continua tende a trarre vantaggio da alimentazioni regolari e da campagne abbastanza lunghe per limitare transizioni fra gradi. Cambiare catalizzatore, temperatura o composizione non equivale a cambiare l'etichetta su un sacco: il materiale che passa fra due condizioni operative può richiedere una destinazione differente. Un impianto flessibile può offrire più gradi, ma deve distribuire il tempo disponibile fra essi; uno molto specializzato può produrre un grado in grandi quantità e avere meno alternative quando cambia la domanda. Ogni cambio di campagna occupa tempo d'impianto e può generare materiale da declassare. Le scorte di monomero e di prodotto finito assorbono oscillazioni brevi, mentre un'interruzione prolungata della fornitura o della logistica cambia la produzione effettiva.

Il reattore impone separazioni

Nella polimerizzazione per addizione, i monomeri si legano formando catene senza che la crescita richieda in generale l'eliminazione di una piccola molecola a ogni passaggio. Etilene e propilene forniscono esempi familiari. Pressione, temperatura, catalizzatore e tempo di permanenza influenzano la lunghezza delle catene, la loro distribuzione e, per alcuni processi, le ramificazioni. Questi

caratteri diventano proprietà del materiale: ne modificano il comportamento quando viene fuso e la resistenza una volta raffreddato. Produrre una massa di polimero non basta; bisogna mantenere la reazione in una finestra che porti al grado desiderato, separando ciò che non ha reagito e limitando il materiale fuori specifica.

La reazione libera calore, che deve essere rimosso in modo controllato. Un aumento locale della temperatura può accelerarla e cambiare il prodotto o le condizioni di sicurezza. Scambiatori, ricircoli e regolazione dell'alimentazione fanno quindi parte della produzione della qualità, non di un servizio accessorio. A seconda della tecnologia, dal reattore può uscire una sospensione di particelle in un liquido, una corrente in fase gas, una soluzione o un fuso. Monomero non reagito, solvente o diluente possono essere recuperati e reimmessi, mentre altre correnti richiedono trattamento. Le rese e i consumi cambiano fra impianti: una cifra per tonnellata presa da una tecnologia non può essere trasferita a tutta la famiglia delle poliolefine.

Il PET illustra un vincolo chimico diverso. Nella rotta con acido tereftalico e glicole etilenico, la formazione del poliestere passa attraverso esterificazione e policondensazione. Si formano piccole molecole che devono essere rimosse per favorire l'avanzamento della reazione e la crescita della massa molecolare. Temperatura e vuoto hanno perciò una funzione produttiva precisa. Nella rotta storica che usa dimetil tereftalato cambia anche il sottoprodotto da separare. La somma delle masse dei reagenti alimentati non dà direttamente la massa della resina uscita: intervengono molecole rimosse, eccessi di reagenti e ricircoli. Il bilancio reale richiede il confine dell'impianto, non una semplice uguaglianza fra tonnellate acquistate e tonnellate di PET.

L'acqua può compromettere la stessa qualità che il vuoto ha aiutato a costruire. Se il PET resta umido durante una successiva lavorazione a caldo, l'idrolisi può accorciare le catene e modificare viscosità e proprietà. L'essiccazione e il controllo dell'umidità seguono quindi il prodotto fino alla consegna. Alcuni gradi richiedono inoltre una polimerizzazione allo stato solido dopo la fase nel fuso, che aumenta ulteriormente la massa molecolare. Non è un nuovo materiale con un nome differente, ma un trattamento necessario per raggiungere una proprietà commerciale. La destinazione a fibre, film o contenitori aiuta a comprendere perché le specifiche differiscano, senza anticipare qui la fabbricazione di quegli oggetti.

La separazione diventa anche una questione di salute e sicurezza nel PVC. Nella polimerizzazione in sospensione, il VCM è disperso in acqua e il prodotto si forma in particelle. Al termine occorre recuperare il monomero non reagito, separare l'acqua, essiccare e classificare la polvere. La quantità di VCM residuo nella resina, quella emessa dal processo e l'esposizione degli addetti sono misure diverse, con punti di osservazione differenti. Il documento europeo di riferimento sulle migliori tecniche disponibili per la produzione dei polimeri (BREF, dall'inglese Best Available Techniques Reference Document) descrive sistemi di recupero e trattamento e distingue processi in sospensione, emulsione e massa. Pubblicato nel 2007, spiega configurazioni e vincoli impiantistici, senza misurare la prestazione media di tutte le fabbriche oggi operative.

Pressione, refrigerazione, vapore, vuoto, pompaggio ed essiccazione consumano energia nelle rispettive fasi. Il trattamento delle acque porta con sé carichi organici, particelle e residui da gestire; recupero del monomero, sfiati e apparecchiature di contenimento influenzano le emissioni di composti organici volatili. Questi flussi appartengono all'unità di polimerizzazione e finitura. La produzione del monomero ha un altro bilancio, più a monte; la combustione che genera energia ne ha un altro ancora. Per assegnare un'impronta climatica a un chilogrammo di resina occorrerebbe dichiarare quali impianti, fonti energetiche e trattamenti sono inclusi. I valori tecnici del BREF non autorizzano da soli una graduatoria ambientale fra PE, PVC e PET.

La sicurezza riguarda anche le operazioni ordinarie. Una fuga di monomero, il contatto con il materiale caldo, le polveri durante lo scarico e il funzionamento di pompe e apparecchiature sotto pressione espongono a rischi differenti. Contenimento, ventilazione, manutenzione e procedure di arresto devono corrispondere alla sostanza e alla fase. Il polimero finito non porta automaticamente il medesimo rischio del suo monomero; viceversa, la forma solida non elimina i problemi di polvere, additivi o residui. Quando la reazione e le separazioni hanno prodotto un materiale stabile, resta ancora da trasformarlo in un grado che un cliente possa usare con regolarità.

Il grado si costruisce dopo la reazione

Un produttore di resine vende proprietà riproducibili, non soltanto un'identità chimica. La scheda tecnica traduce la struttura delle catene in caratteristiche

misurate con prove definite. Per molte poliolefine, l'indice di fluidità descrive quanto materiale fuso attraversa un'apertura standard in condizioni fissate. Aiuta a scegliere una resina adatta a una determinata lavorazione, ma non riassume da solo tenacità, resistenza e durata. La densità del polietilene riflette anche il modo in cui le catene sono disposte e ramificate; la distribuzione delle loro lunghezze influenza il comportamento del fuso. Due lotti chiamati «PE» possono quindi rispondere in modo diverso alla stessa macchina.

Per il PET si usa spesso la viscosità intrinseca come indicatore legato alla massa molecolare. Il valore richiesto dipende dall'impiego, e accanto a esso contano umidità, colore, acetaldeide e particelle estranee. Indice di fluidità e viscosità intrinseca sono due modi diversi di rendere contrattabile il comportamento di catene che il nome chimico da solo non descrive. Il trasformatore deve poter impostare temperature e tempi su lotti comparabili. Se una partita esce dai limiti dichiarati, può essere trattata, declassata o indirizzata a un'altra destinazione; la sua massa esiste fisicamente, ma non nel grado che il compratore aveva richiesto.

La resina di base può ricevere stabilizzanti per resistere a calore e ossigeno durante trasporto e lavorazione. Un compound aggiunge deliberatamente pigmenti, cariche minerali, fibre, plastificanti o altri componenti per ottenere una prestazione. La sua massa lorda include tutto ciò che è stato mescolato. Una tonnellata di compound non coincide quindi con una tonnellata di polimero di base, e una quota di riciclato riferita al compound ha un denominatore diverso dalla stessa quota riferita alla sola matrice. Cariche e fibre modificano densità e comportamento meccanico; pigmenti e additivi possono restringere o ampliare gli impieghi possibili. La formulazione crea valore industriale, ma rende insufficiente contare i sacchi di granuli per risalire alla massa di un singolo polimero.

La forma della consegna è parte della specifica. Molte resine e compound sono estrusi, raffreddati e tagliati in piccoli granuli che si possono dosare e trasferire con relativa regolarità. Il PVC può essere fornito come polvere; altri materiali arrivano in scaglie, dispersioni o componenti liquidi. Un pellet è una forma di trasporto e alimentazione, non una garanzia di purezza o di origine. Il passaggio dal fuso al granulo comprende filtrazione, controllo delle dimensioni, raffreddamento, asciugatura e insaccamento. Ogni operazione può generare

frazioni fini o materiale non conforme e richiede attenzione alle superfici e alle acque che entrano in contatto con i granuli.

Un granulo può viaggiare in sacchi, grandi contenitori o alla rinfusa, ma deve conservare pulizia, asciuttezza e identità del lotto. Materiali sensibili all'umidità richiedono imballaggi e stoccaggio appropriati; contaminare una partita durante un travaso può vanificare la purificazione eseguita in fabbrica. La verifica all'arrivo e la tracciabilità del lotto aiutano a distinguere un difetto di produzione da un problema di movimentazione. Forma commerciale e condizioni di trasporto diventano così parte della qualifica del materiale consegnato.

La perdita di pellet comincia dalla produzione e movimentazione dei granuli. Durante taglio, trasferimento, caricamento, scarico e pulizia, una parte può disperdersi all'esterno del circuito. Griglie, filtri, contenimento delle acque di piazzale, pulizia e recupero riducono la probabilità che raggiunga l'ambiente. Senza misure omogenee per impianto non si può attribuire una percentuale di perdita a ogni tonnellata prodotta. Si tratta comunque di materia che esce fisicamente dalla filiera prima di diventare un oggetto; va distinta dalle particelle che potranno derivare dall'usura del manufatto durante il suo uso. La forma granulare migliora la logistica industriale e introduce insieme un punto concreto di controllo ambientale.

La nozione di granulo ha però un limite. Per alcune resine termoindurenti e per i poliuretani, il cliente compra componenti reattivi o una formulazione che completerà la reticolazione più tardi. Prima della reazione finale contano viscosità, rapporto fra componenti, tempo utile di lavorazione, umidità e condizioni di conservazione. Dopo la reticolazione si forma una rete che non torna a fondere come un comune termoplastico. La materia prima venduta può essere dunque liquida o suddivisa in più componenti; il momento in cui diventa un oggetto è un'altra fase industriale. «Resina acquistabile» indica una categoria definita dalla specifica e dal punto di consegna, anche quando il prodotto fornito non è un pellet.

Qualificare un grado richiede prove e continuità dei lotti. Una variazione di colore può essere irrilevante per un impiego e decisiva per un altro; una piccola quantità di umidità o contaminante può cambiare la stabilità durante la fusione. Le possibili destinazioni industriali spiegano perché siano richieste misure diverse, senza creare una classifica universale di materiali migliori o

peggiori. Prezzo e sostituibilità dipendono proprio da queste condizioni. Un materiale meno costoso per tonnellata può non essere utilizzabile nella macchina o nella funzione che serve al compratore; un prodotto tecnicamente equivalente ma consegnato in quantità discontinue può imporre scorte o fermate. La disponibilità va misurata per grado, forma e continuità nello stesso mercato.

Nel PVC la formulazione rende evidente la differenza fra resina e compound. Una polvere di base può essere combinata con stabilizzanti, plastificanti, cariche e pigmenti in proporzioni adatte al prodotto che verrà fabbricato. Il PVC rigido e una formulazione flessibile non hanno la stessa composizione né lo stesso comportamento, benché condividano la matrice polimerica. La possibilità di assorbire un plastificante, la dimensione e porosità delle particelle e la stabilità termica sono caratteristiche della resina che il compoundatore considera prima di aggiungere gli altri ingredienti. Per chi misura quantità e scambi, una tonnellata di PVC in polvere, una tonnellata di compound e una tonnellata di articolo finito occupano posizioni diverse della catena. L'additivo può avere una propria filiera, un costo e requisiti di sicurezza; le sue proprietà diventano parte delle condizioni d'acquisto del compound, senza cambiare retroattivamente la quantità di polimero che lo stabilimento ha prodotto.

Il ritorno deve superare la stessa prova

Una resina ottenuta da materia recuperata incontra lo stesso acquirente e le stesse esigenze di lavorazione. Per capire quando torna disponibile, conviene partire dal risultato: una scaglia, un granulo o un compound di composizione e proprietà dichiarate. A ritroso, quel risultato richiede un materiale abbastanza riconoscibile da selezionare, trattamenti che eliminino contaminanti e un processo che preservi o ricostruisca le proprietà necessarie. La quantità raccolta a monte è quindi soltanto il primo dato di una catena più lunga. Il punto decisivo è quale materia prima esce dal recupero e se qualcuno può usarla.

Nel riciclo meccanico, il polimero resta in larga parte polimero. Si seleziona il flusso, lo si macina, si lavano e asciugano le frazioni quando serve, poi si fonde, filtra e taglia il materiale in granuli. Ogni passaggio trattiene una parte della massa e può produrre scarti. Carta, colle, residui alimentari, metalli e polimeri incompatibili possono rendere il lotto meno prevedibile; colore e odore

possono limitarne il mercato. Calore, ossigeno e taglio meccanico possono modificare la lunghezza delle catene. Nel PET l'umidità può favorire l'idrolisi, ma essiccazione, filtrazione e, per alcuni gradi, polimerizzazione allo stato solido permettono di riportare il materiale verso specifiche più esigenti. Il risultato dipende dal flusso di partenza e dalla lavorazione: «riciclato» non significa sempre inferiore né sempre sostituibile al vergine.

L'acqua di lavaggio e i fanghi, gli scarti trattenuti dai filtri, l'energia per asciugare e rifondere e l'esposizione degli addetti ai contaminanti vanno attribuiti a queste operazioni. Un flusso relativamente omogeneo di scarti generati in produzione presenta sfide differenti da una miscela post-consumo. Anche l'etichetta «pre-consumo» non prova da sola che il materiale sia pulito, così come «post-consumo» non impedisce in assoluto una nuova qualifica. Conta la storia effettiva della materia. Il riciclatore può vendere macinato, scaglia, granulo o compound; il cliente deve sapere quale prodotto sta acquistando e su quale massa si calcola un eventuale contenuto riciclato.

Le stime di Plastics Europe per l'Europa nel 2022 illustrano tre soglie distinte: 32,3 milioni di tonnellate di rifiuti plastici post-consumo raccolti, 8,7 milioni avviate a riciclo e 7,7 milioni di produzione da riciclo meccanico. La prima cifra misura una raccolta, la seconda un flusso che entra nella contabilità del riciclo secondo il punto di misura del rapporto, la terza un output di produzione. Non sono tre fasi identificate della stessa partita seguita nel medesimo anno. Perimetri, scambi e tempi di trattamento impediscono di dividere semplicemente l'ultima per la seconda e chiamare il risultato «resa europea degli impianti». La fonte è un rapporto di associazione industriale e segnala un cambiamento del punto di conteggio del riciclo rispetto ad alcune serie precedenti. La cautela serve a interpretare il flusso, non a nascondere che fra raccolta e nuova materia prima si perdono quantità e possibilità d'impiego.

Un quarto numero possibile sarebbe il contenuto recuperato incorporato in nuovi prodotti. Misura una fase successiva, perché il granulo qualificato deve ancora essere comprato e trasformato. Si può produrre materia seconda che non entra nell'applicazione desiderata oppure impiegare granuli fabbricati in un altro periodo o luogo. Per questo le percentuali di raccolta, riciclo e contenuto riciclato non condividono automaticamente lo stesso denominatore. La distinzione conta anche economicamente: una capacità autorizzata o

annunciata non assicura che gli impianti ricevano il flusso giusto, producano a pieno regime e trovino clienti per ogni grado.

La parola «riciclo chimico» raccoglie rotte con uscite molto diverse. Alcuni trattamenti del PET possono spezzare il polimero in monomeri o intermedi che, dopo purificazione, tornano alla sintesi. La prova è concreta: il reagente recuperato raggiunge la purezza necessaria e la nuova resina supera i controlli di grado. La pirolisi di miscele ricche di poliolefine può invece produrre un olio idrocarburico. Quell'olio richiede ulteriori trattamenti nelle filiere chimiche a monte; non è un granulo riciclato né un monomero che il polimerizzatore possa usare tal quale. Il nome della tecnologia, senza indicare l'output e le rese di ciascuna tappa, non misura quanta resina secondaria sia disponibile.

Nelle reti industriali condivise può comparire una certificazione basata sul bilancio di massa. Una quantità di carica recuperata o rinnovabile entra in un sistema, e una quota corrispondente viene attribuita contabilmente a determinati prodotti secondo regole dichiarate. L'attribuzione può sostenere tracciabilità e acquisti, ma non dimostra che ogni singolo pellet contenga fisicamente la medesima quota di molecole provenienti da quella carica. Lo stesso vale per le etichette «biologico» o «circolare» quando mescolano origine del carbonio, metodo contabile e prestazione ambientale. Per confrontare gli impatti occorrono confini comuni, energia, reagenti, residui e destinazione del prodotto. Per comprare la resina occorre comunque la specifica. Il ritorno della materia nel mercato è un risultato tecnico e contrattuale, non una conseguenza automatica dell'ingresso del rifiuto in un impianto.

La geografia arriva al punto di consegna

La scheda preliminare Fast Facts 2025 di Plastics Europe attribuiva alla Cina il 34,5% della produzione mondiale stimata per il 2024. Per l'area UE27+3 riportava 54,6 milioni di tonnellate; il successivo rapporto europeo del 2026 indica 54,9 milioni per lo stesso anno, nel proprio perimetro di produzione e compounding. Le due edizioni vanno identificate separatamente, anche per le differenze nella copertura dei flussi circolari. Queste cifre descrivono una geografia aggregata, senza misurare la capacità di fornire ogni grado di PE, PP, PVC o PET. Un territorio può trasformare grandi quantità di resina senza produrre i monomeri o i polimeri di base corrispondenti; un altro può produrre

granuli e importarli per specifici usi. L'origine del lotto e la disponibilità presso il trasformatore seguono quindi mappe diverse.

Neppure la parola «Europa» è un'unità statistica innocente. UE27+3 comprende Norvegia, Svizzera e Regno Unito oltre agli Stati membri dell'Unione. I riallineamenti fra edizioni e le differenze di perimetro contabile richiedono di indicare sempre fonte e anno: accostare i totali delle varie pubblicazioni come una serie uniforme produrrebbe una crescita apparente non riconciliata. Il dato aggregato conserva comunque una funzione: colloca l'industria europea nella scala mondiale e mostra che le decisioni sui singoli impianti, sull'energia e sulle materie prime si svolgono in un mercato internazionale.

La struttura italiana rende particolarmente importante distinguere le fasi. Nel Paese operano attività di chimica primaria, formulazione dei compound, recupero di materiali e una vasta industria che trasforma resine acquistate in beni intermedi e finiti. Il numero di imprese che fabbricano articoli in plastica non misura le tonnellate di polimero prodotte in Italia. Un compoundatore può acquistare resina, aggiungere cariche e vendere un granulo formulato; un trasformatore può lavorare una materia importata senza aver mai prodotto il monomero. Descrivere tutte queste imprese come «produttori di plastica» confonde peso industriale, origine della materia e grado di dipendenza. L'Italia ha quindi un ruolo materiale nella filiera, ma non se ne può ricavare una quota di autosufficienza per ogni resina dai soli indicatori generali.

Per misurare le quantità servirebbero righe compatibili della statistica industriale Prodcom, che distingue produzione totale e produzione venduta, e del commercio estero Comext, che registra importazioni ed esportazioni secondo codici merceologici. Occorrerebbe controllare anno, unità, forme primarie, compound, movimenti all'interno e all'esterno dell'Unione e riservatezza delle singole voci. Le serie per le resine italiane non sono state ricostruite in modo verificato: attribuire un saldo commerciale o una percentuale di consumo coperto dalla produzione nazionale sarebbe una precisione fittizia. Questa lacuna non cancella i meccanismi osservabili. Un utilizzatore italiano dipende dal grado che può acquistare con continuità, dalla rete logistica che lo consegna e dalle alternative effettivamente qualificate per il proprio processo.

Le interruzioni si manifestano a punti diversi. Una carenza di monomero può rallentare il polimerizzatore; una fermata di finitura può lasciare polimero grezzo senza forma commerciale; un lotto fuori specifica può richiedere declassamento; un riciclatore può avere materiale raccolto ma non abbastanza omogeneo per il grado richiesto. Scorte di granuli e fornitori alternativi attenuano alcune interruzioni, a patto che il materiale sostitutivo superi le prove e sia disponibile nei tempi necessari. Il mercato non confronta soltanto tonnellate e prezzi: confronta specifiche, luogo e condizioni di consegna. Le trasformazioni a valle iniziano proprio su questa soglia, quando la materia prima entra in una linea che la farà diventare film, contenitore, componente o altro bene.

La massa geologica di carbonio, il volume di monomero prodotto o il totale statistico delle plastiche non indicano da soli quanta resina utile arriverà a quella linea. Ogni passaggio deve fornire continuità, controllare la reazione, separare ciò che resta, costruire un grado e consegnarlo. Il materiale recuperato percorre una prova analoga prima di tornare materia prima. Il nome del polimero permette di riconoscere una famiglia; sono qualità ripetibile, quantità e punto di consegna a trasformarla in un'offerta industriale.

Fonti e riferimenti

Plastics Europe – Plastics the Fast Facts 2025, dati preliminari 2024 e definizioni di produzione mondiale e UE27+3

https://plasticseurope.org/de/wp-content/uploads/sites/3/2025/10/PE_TheFacts_25_digital-A4.pdf

Plastics Europe – The Circular Economy for Plastics: A European Analysis 2026, sintesi esecutiva, stima UE27+3 per il 2024

https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2026/05/CER26-SINGLEPAGE-Executive-Summary.pdf

Commissione europea e JRC – Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers, agosto 2007

https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf

Plastics Europe – The Circular Economy for Plastics A European Analysis, sintesi 2024 con stime riferite al 2022

https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2024/05/Circular_Economy_report_Digital_EXEC_light_FINAL.pdf

Istat – Indagine annuale Prodcom, definizioni e perimetro della produzione industriale

https://www.istat.it/informazioni-sulla-rilevazione/prodcom/

Eurostat – Banca dati Prodcom, classificazione dei prodotti industriali

https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/database

04.24 – Gomma naturale e sintetica

Acquistare gomma significa chiedere un materiale che si lasci lavorare e conservi, dopo le trasformazioni previste, un comportamento ripetibile. Una guarnizione deve tollerare il fluido con cui entrerà in contatto; una membrana deve limitare il passaggio dei gas; un componente sottoposto a deformazioni continue deve resistere alla fatica. Elasticità, impermeabilità e resistenza agli oli possono richiedere polimeri diversi, oppure combinazioni diverse degli stessi ingredienti. La disponibilità industriale comincia quindi da una domanda precisa sulla prestazione.

Le origini della materia sono due: il lattice raccolto da un albero e il polimero costruito in un reattore. Il primo porta con sé tempi biologici, acqua e variabilità agricola; il secondo dipende dai monomeri e dal controllo della struttura molecolare. Entrambi arrivano alla formulazione di una mescola, dove riempitivi e altri ingredienti modificano profondamente il risultato. Una terza origine, il recupero di prodotti usati, deve affrontare anche i legami creati durante la vulcanizzazione.

La domanda a valle cambia più rapidamente di molte di queste capacità. Secondo l'associazione europea dei produttori di pneumatici e gomma, ETRMA, le vendite di pneumatici sostitutivi dei propri membri nel segmento Consumer erano nel 2024 inferiori del 3,5% al 2019. È un indicatore di quel mercato, espresso in pneumatici venduti. Per capire come una variazione della domanda raggiunga la materia prima occorre invece seguire la gomma, dall'origine alla partita ordinabile.

Il tempo dell'albero

La principale fonte della gomma naturale è l'Hevea brasiliensis. La raccolta sfrutta i vasi laticiferi presenti nella corteccia: un'incisione apre una parte di questi canali e il lattice defluisce in una coppetta. La profondità del taglio è decisiva. Occorre raggiungere i tessuti produttivi preservando il cambio, lo strato che permette la crescita del tronco. Un taglio eccessivo può danneggiare l'albero e compromettere raccolte future; uno insufficiente limita il flusso. La materia nasce da una successione di interventi accurati, ripetuti sulla stessa pianta.

Prima di poter cominciare, però, l'albero deve crescere. La descrizione tecnica storica della FAO, l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura, dedicata anche all'utilizzazione del legno di gomma, indica in pratica 5–7 anni dalla messa a dimora all'avvio della tappatura, cioè dell'incisione produttiva. La raccolta può poi proseguire per 25–30 anni, secondo condizioni e gestione. Questi intervalli mostrano la distanza fra una decisione economica e la risposta della risorsa: investire oggi in nuove piante prepara una produzione che arriverà dopo anni.

Nel frattempo la continuità dipende dagli alberi già maturi. Il rinnovo della piantagione sostituisce piante meno produttive, ma introduce un periodo senza raccolta sulle superfici reimpiantate. Anche il calendario annuale incide sul flusso: caduta e ricostituzione delle foglie modificano l'attività della pianta, piogge intense possono interrompere la tappatura e le malattie possono ridurre la resa. Per un coltivatore la scelta del momento di reimpianto collega reddito immediato e capacità futura. Per l'acquirente industriale collega la fornitura corrente a decisioni agricole prese molto prima dell'ordine.

La raccolta richiede lavoro manuale, spesso prima dell'alba, quando le condizioni favoriscono il flusso. Il raccoglitore percorre le file, incide la corteccia e raccoglie il contenuto delle coppette. Utensili da taglio, posture ripetute e movimentazione espongono a rischi di infortunio e affaticamento. La tutela riguarda quindi formazione, ergonomia e organizzazione del lavoro nel luogo di coltivazione. Le differenze fra piccoli produttori e grandi proprietà contano anche nella possibilità di conservare il lattice, acquistare attrezzature e raggiungere rapidamente il centro di trasformazione.

La scala agricola è descritta da FAOSTAT, la banca dati della FAO. Per il 2023 la voce «gomma naturale in forme primarie» riporta circa 14,632 milioni di tonnellate di produzione mondiale e 13,229 milioni di ettari di superficie raccolta. Sono grandezze riferite al prodotto agricolo classificato e alla relativa area raccolta, con componenti nazionali di qualità statistica diversa. Il totale produttivo riguarda forme primarie della gomma; la massa del lattice fresco, che comprende acqua, richiede una misura distinta.

La geografia rende concreta questa scala. Nella stessa serie del 2023 la Thailandia produce circa 4,81 milioni di tonnellate, l'Indonesia 2,24 milioni e la Costa d'Avorio 1,62 milioni. L'offerta è legata a territori tropicali, mentre una parte degli utilizzatori opera molto lontano. Per l'industria europea il calendario

dell'albero si combina con trattamento all'origine, trasporto e scorte. L'organizzazione dei coltivatori ANRPC, Association of Natural Rubber Producing Countries, nel comunicato di dicembre 2024 prevedeva per quell'anno un aumento mondiale del 2,8% della produzione e dell'1,8% della domanda rispetto al 2023. Erano previsioni congiunturali di settore, appartenenti a una serie autonoma rispetto a FAOSTAT.

La superficie coltivata ha inoltre una storia ambientale. La conversione di un habitat naturale, il reimpianto su terreno già agricolo e un sistema agroforestale producono conseguenze differenti per biodiversità, suolo e acqua. La presenza di alberi, da sola, lascia aperta la domanda su ciò che hanno sostituito e su come vengono gestiti. La documentazione FAO descrive anche coltivazioni associate ad altre specie: la struttura e le funzioni di questi sistemi differiscono sia dalle piantagioni uniformi sia dalle foreste naturali.

La gestione del suolo collega questi effetti alla produzione nel tempo. Coperture vegetali, sostanza organica e interventi contro l'erosione influenzano la conservazione del terreno; strade e accessi necessari alla raccolta possono modificarlo. La resa agricola emerge dall'insieme di pianta, condizioni locali e pratiche di gestione. A parità di ettari, raccolti differenti possono quindi avere cause molto diverse. Espandere la superficie e migliorare la continuità delle piante già produttive sono risposte distinte a una maggiore domanda.

L'origine entra infine nella commerciabilità. La Commissione europea include la gomma fra le materie interessate dal regolamento sui prodotti senza deforestazione, noto come EUDR. La pagina ufficiale indica l'entrata in applicazione al 30 dicembre 2026 per operatori grandi e medi, con scadenze successive per alcune categorie di piccoli operatori. La preparazione della conformità richiede di seguire l'origine agricola lungo la fornitura. Alla prova della qualità fisica si affianca così la documentazione della provenienza. Ma, anche quando l'albero produce e l'origine è documentata, il liquido raccolto deve ancora diventare una partita commerciale.

Il lattice deve diventare una partita

Il lattice è una dispersione di particelle di gomma in una fase acquosa. Pesarlo significa includere entrambe. Il parametro che permette di separare i due significati è il contenuto di gomma secca, indicato con DRC, dall'inglese dry

rubber content: la massa di gomma secca determinata sul campione, rapportata alla massa del lattice campionato. Varia con condizioni della raccolta, diluizione e gestione. L'acquirente deve conoscere quel contenuto prima di attribuire al peso consegnato un valore come elastomero.

Un unico modello ipotetico chiarisce il bilancio. Se 1.000 chilogrammi di lattice avessero un DRC del 32%, conterrebbero 320 chilogrammi di gomma secca. Il 32% è un valore scelto per l'esempio, senza rappresentare un tenore medio universale. I 320 chilogrammi sono contenuto prima delle perdite e del trattamento, non la produzione finale di fogli o balle. Il passaggio successivo deve ancora separare impurità, controllare l'acqua residua e ottenere la forma richiesta.

La prima decisione è conservare la dispersione liquida oppure trasformarla in gomma solida. Il lattice fresco può alterarsi per attività microbica e coagulare durante l'attesa. Quando è destinato a restare liquido, consegna rapida e stabilizzazione proteggono questa forma. La centrifugazione concentra le particelle di gomma separando parte del siero, la fase acquosa con componenti solubili. Il prodotto concentrato conserva quindi una struttura colloidale: particelle disperse che devono rimanere stabili durante stoccaggio e lavorazione.

La sua qualifica riguarda stabilità meccanica della dispersione, viscosità del fluido, pH e controllo microbiologico. Il sistema di conservazione, compresa l'ammoniaca quando impiegata, fa parte della specifica. Una concentrazione elevata di gomma deve accompagnarsi a un comportamento liquido compatibile con l'uso successivo. Coaguli indesiderati o variazioni della dispersione possono rendere problematico un lotto anche quando il suo contenuto secco corrisponde a quello richiesto. Il trasporto e il tempo di permanenza diventano perciò condizioni di qualità, oltre che voci di costo.

Nel percorso verso il solido si provoca invece la coagulazione. Un acido organico può destabilizzare la dispersione e riunire le particelle in una massa che viene lavata e passata fra rulli, riducendo acqua e spessore. I fogli possono essere essiccati e affumicati: la sigla RSS, ribbed smoked sheets, identifica i fogli rigati affumicati. Colore, macchie, bolle e altri difetti partecipano alla classificazione visiva. Il trattamento deve ottenere un materiale conservabile evitando che umidità e alterazioni compromettano il prodotto.

La produzione in blocchi segue una classificazione fondata maggiormente su prove analitiche. La gomma tecnicamente specificata, TSR da technically specified rubber, può partire da lattice oppure da coaguli raccolti in campo. Riduzione in pezzi, lavaggio, lavorazione meccanica, essiccazione e pressatura portano alle balle. Terra, corteccia e contaminanti devono essere separati; il grado dipende anche da ceneri, sostanze volatili e comportamento del polimero. L'età e la pulizia dei coaguli in ingresso condizionano ciò che la lavorazione riesce a ottenere.

L'organizzazione della raccolta influisce così sulla qualità prima dell'impianto. Un coagulo rimasto in campo porta una storia diversa dal lattice consegnato rapidamente e stabilizzato. Lavarlo e triturarlo rimuove alcune frazioni estranee, ma il trattamento deve anche confrontarsi con alterazioni già avvenute. I costi di pulizia, asciugatura e selezione dipendono dalla materia in ingresso. La classificazione commerciale separa quindi lotti che possono condividere l'origine vegetale e differire per il lavoro necessario a renderli utilizzabili.

Per la gomma solida la viscosità Mooney esprime la resistenza alla deformazione nelle condizioni della prova e aiuta a valutare consistenza e lavorabilità. La plasticità descrive un altro aspetto del comportamento meccanico. Dove previsto dalla specifica, il PRI, plasticity retention index, misura la ritenzione della plasticità dopo un trattamento termico di prova e offre informazioni sulla stabilità all'ossidazione. Questi controlli appartengono al solido; il lattice concentrato viene valutato attraverso le proprietà della sua dispersione liquida.

Acqua ed energia entrano materialmente in queste operazioni. Lavaggio e separazione producono reflui con materia organica e residui dei trattamenti; l'essiccazione richiede calore; l'affumicatura aggiunge fumo e necessità di ventilazione. Acidi, conservanti e movimentazione meccanica del coagulo richiedono tutela degli operatori. Il contenuto secco spiega la quantità di gomma, mentre il percorso scelto spiega una parte dei costi e degli impatti necessari a consegnarla. L'uscita è una forma definita, liquida o solida, con controlli pertinenti. La sintesi industriale raggiunge lo stesso punto attraverso un controllo diverso: quello della costruzione delle catene.

La sintesi sposta il vincolo

Un elastomero è un polimero capace, nelle condizioni d'impiego appropriate, di grandi deformazioni e recupero elastico. La sintesi permette di scegliere le molecole iniziali e governare il modo in cui si uniscono. I monomeri devono arrivare all'impianto con qualità adeguata; catalizzatori o iniziatori avviano la formazione delle catene; temperatura e composizione del mezzo influenzano la reazione. La disponibilità si sposta dal calendario agricolo alla continuità dell'alimentazione e alla capacità di riprodurre una determinata architettura molecolare.

La scelta del mezzo di reazione mostra quanto questo controllo sia concreto. La gomma stirene-butadiene, SBR da styrene-butadiene rubber, combina i due monomeri che le danno il nome. Nella via in emulsione essi sono dispersi in acqua con tensioattivi, sostanze che favoriscono la dispersione, e iniziatori. Il processo forma un lattice sintetico dal quale si recuperano monomeri residui e si separa il polimero mediante coagulazione, lavaggio ed essiccazione. La via in soluzione usa invece un solvente e sistemi di reazione che consentono di regolare più finemente diversi aspetti della struttura.

Cambiano la distribuzione delle catene e il modo in cui le unità di butadiene vi sono inserite. Questo influenza la mobilità molecolare e la risposta alle deformazioni. L'isteresi, ossia la parte di energia dissipata durante un ciclo di deformazione e ritorno, collega struttura e calore sviluppato sotto sollecitazione. In una mescola sottoposta a movimenti ripetuti contano quindi sia la resistenza sia il modo in cui il materiale restituisce o dissipa energia. La scelta del polimero lavora insieme alla formulazione, che può modificare ulteriormente quel comportamento.

La microstruttura conta anche quando il monomero è uno solo. Nel polibutadiene, BR da butadiene rubber, i sistemi catalitici regolano le proporzioni delle configurazioni cis, trans e vinile, modi diversi di incorporare il butadiene nella catena. Cambiano flessibilità al freddo, resilienza e resistenza all'abrasione. La resilienza esprime la capacità di restituire energia dopo la deformazione. Un grado può essere scelto per queste proprietà e poi combinato con altri elastomeri per ottenere anche la lavorabilità richiesta. Il nome della famiglia lascia quindi spazio a una scelta interna di strutture e gradi.

La sintesi permette inoltre di cambiare la proprietà dominante. La gomma butilica, ottenuta soprattutto da isobutilene con una piccola quota di isoprene, è scelta per la bassa permeabilità ai gas. Un polimero di etilene, propilene e un diene, EPDM, offre invece una catena principale satura, senza i doppi legami che in altre gomme favoriscono l'attacco dell'ozono. Il diene lascia siti utili alla reticolazione. Se il problema è il contatto con oli, la gomma nitrilica NBR, nitrile-butadiene rubber, combina acrilonitrile e butadiene; modificare la composizione può cambiare il compromesso fra resistenza agli oli e flessibilità al freddo. Queste differenze impongono una verifica funzionale della sostituzione.

Il controllo della struttura richiede anche separazioni. Monomero non reagito e solvente devono essere recuperati o trattati; nella produzione in soluzione il controllo di acqua e ossigeno protegge la reazione. Il calore liberato dalla polimerizzazione deve essere asportato. Il documento europeo sulle migliori tecniche disponibili per la produzione dei polimeri, il POL BREF del 2007, descrive recupero dei monomeri, contenimento degli sfiati, controllo delle fughe e trattamento delle acque. BREF significa Best Available Techniques Reference Document. È un riferimento tecnologico storico: i consumi e le emissioni effettivi dipendono dal processo e dal singolo impianto.

Fra le pressioni considerate vi sono i composti organici volatili, indicati come VOC, volatile organic compounds, solventi residui e carichi organici nelle acque. I circuiti di recupero possono riutilizzare correnti interne, mentre perdite e residui richiedono controllo. Avviamenti e arresti alterano la regolarità del processo; il BREF richiama la loro incidenza su energia, monomero ed emissioni per unità prodotta. Gli impianti dipendono così dalla rete chimica dei monomeri e dai servizi industriali, oltre che dalla capacità del reattore. La produzione effettiva di un grado comprende disponibilità delle materie, tempi di cambio e continuità operativa.

Il sommario del BREF colloca indicativamente gli impianti di polimeri descritti nel quadro europeo storico fra 10.000 e 300.000 tonnellate annue di capacità. È un riferimento alla taglia industriale di un insieme ampio di produzioni, distinto dalle quantità effettive di una specifica gomma. Per l'acquirente conta quale parte della capacità sia in grado di fornire il grado richiesto. La gomma naturale conserva, per esempio, proprietà di resistenza allo strappo e alla fatica che devono essere verificate nel sistema formulato quando si cambia base

polimerica. La sostituzione collega disponibilità del grado e prestazione ottenibile.

All'uscita il polimero viene consegnato in forme definite, fra cui balle e gradi estesi con olio, detti oil-extended. Questi ultimi contengono già olio di processo: il peso della balla comprende entrambe le componenti. Un masterbatch è invece un premiscelato con composizione dichiarata. Per la sala mescole occorre ricostruire quanta base elastomerica e quali ingredienti siano già presenti, evitando un doppio dosaggio. Il controllo della sintesi arriva dunque fino alla forma acquistata; da quel punto comincia la costruzione del compound, la mescola commerciale.

La mescola cambia il materiale e il denominatore

La formulazione parte dalla massa degli elastomeri. Nelle ricette il sistema PHR, parts per hundred rubber, esprime ciascun ingrediente in parti in massa per cento parti di gomma. La base può comprendere un solo polimero oppure una combinazione. Il dosaggio dei riempitivi, degli oli e del sistema di cura viene riferito a quella base, anche quando la materia consegnata contiene già parte degli ingredienti. Una ricetta in PHR descrive rapporti di formulazione; le percentuali sul peso totale della mescola richiedono invece di considerare tutte le componenti.

Questo cambio di denominatore modifica la lettura dei flussi industriali. Le tonnellate di elastomero misurano la base polimerica; quelle di compound comprendono anche riempitivi e altri ingredienti. Il valore aggiunto della mescolazione consiste nel combinarli in un materiale lavorabile e ripetibile. Una quantità maggiore di mescola può derivare da una diversa formulazione, oltre che da maggiore impiego di polimero. Anche il confronto commerciale deve quindi indicare la composizione e il punto di consegna: elastomero, premiscelato o compound pronto.

I riempitivi partecipano alle proprietà. Il nerofumo, un materiale carbonioso in particelle e aggregati, rinforza la gomma e modifica resistenza all'usura, rigidità e comportamento dinamico. Dimensione, superficie e struttura degli aggregati distinguono i gradi. La silice precipitata offre un'altra superficie e altre interazioni con la matrice polimerica. La dispersione è essenziale: un ingrediente concentrato in agglomerati può avere un effetto diverso dallo

stesso ingrediente distribuito nel materiale. Il produttore acquista quindi caratteristiche dei riempitivi e deve riuscire a conservarne l'utilità durante la lavorazione.

La superficie disponibile rende visibile una parte della differenza fra gradi. La brochure Evonik riporta, per silici ULTRASIL selezionate, aree superficiali specifiche tipiche da 35 a 235 metri quadrati per grammo, misurate con il metodo BET, dai nomi Brunauer, Emmett e Teller. Il metodo valuta la superficie accessibile attraverso l'adsorbimento di gas. Sono valori di quei prodotti, che mostrano quanto possa cambiare l'interfaccia offerta alla matrice anche a uguale massa di silice. La scelta deve accompagnarsi al dosaggio e alla capacità di disperdere il grado acquistato.

Un silano di accoppiamento può migliorare il collegamento fra silice e polimero. La sua funzione chimica permette di interagire con la superficie della silice e con la matrice, secondo il sistema di formulazione e cura. La brochure tecnica Evonik indica, per articoli in gomma meccanici nel proprio perimetro, un dosaggio di 2–6 phf. Qui phf significa parts per hundred filler, parti per cento parti di riempitivo: la base è la carica rinforzante, anziché l'elastomero usato nel PHR. Il dosaggio è una guida del produttore per i sistemi trattati, non una proporzione generale di ogni mescola.

Gli altri ingredienti rispondono a problemi altrettanto concreti. Gli oli di processo modificano viscosità e flessibilità, facilitando anche la dispersione; la compatibilità con il polimero condiziona il risultato. Gli antidegradanti contrastano alterazioni dovute a ossigeno e ozono. Il sistema di cura prepara la futura reticolazione: nelle gomme adatte lo zolfo crea ponti fra le catene, mentre acceleranti e attivanti regolano la reazione. Altri elastomeri richiedono sistemi differenti. La composizione deve tenere insieme lavorabilità iniziale e comportamento del materiale dopo la cura, il trattamento che sviluppa la rete di legami.

Nel mescolatore l'azione dei rotori incorpora gli ingredienti e rompe gli agglomerati, distribuendo i riempitivi nella gomma. Il lavoro meccanico genera calore; temperatura, durata e sequenza delle aggiunte influenzano dispersione e reazioni. La gomma deve deformarsi abbastanza da accogliere le polveri, e la massa deve ricevere una lavorazione sufficientemente uniforme. Aumentare l'intensità della miscelazione può migliorare un aspetto e compromettere un

altro, attraverso surriscaldamento o degradazione. La capacità del mescolatore diventa utilizzabile soltanto entro condizioni compatibili con la formulazione.

L'accoppiamento silice-silano illustra questa finestra. Evonik indica un avvio generale della reazione intorno a 120 °C e, per il prodotto Si 69, raccomanda di mantenere la temperatura sotto 165 °C per evitare il prescorch, l'inizio prematuro della reticolazione. La soglia superiore riguarda quel prodotto e quel riferimento tecnico. Serve a mostrare perché il calore sia contemporaneamente una condizione utile alla reazione e un rischio per la lavorabilità. Il sistema di cura viene introdotto nelle condizioni appropriate, spesso in una fase distinta, per preservare il tempo disponibile alle operazioni successive.

La movimentazione di nerofumo, silice e altri ingredienti concentra inoltre il problema delle polveri nelle fasi di dosaggio e incorporazione. Contenimento, aspirazione e pulizia proteggono gli operatori e limitano dispersione e contaminazione. Oli, additivi ed emissioni della lavorazione richiedono controlli coerenti con le sostanze impiegate. Questi oneri appartengono alla produzione della mescola: si aggiungono agli impatti della coltivazione o della sintesi, senza poter essere riassunti da un'intensità universale per qualsiasi gomma.

Il compound può essere venduto ancora lavorabile. Nella fase successiva la vulcanizzazione crea una rete permanente fra le catene, rendendo stabile il comportamento elastico del materiale. Il semplice riscaldamento di una gomma così reticolata non restituisce la mescola originaria: la rete impedisce la normale rifusione. Quando un articolo vulcanizzato arriva al recupero, questo cambiamento chimico decide le possibilità della materia seconda. Ridurre le dimensioni conserva la rete; intervenire sui legami può recuperare lavorabilità, con il rischio di danneggiare anche le catene.

Il ritorno supera un'altra prova

La gomma recuperata entra nella formulazione con una storia materiale già compiuta. Un pneumatico fuori uso contiene elastomeri, riempitivi e altri ingredienti, insieme a metalli e materiali tessili. La separazione deve ottenere frazioni con destinazioni distinte. Per la nuova mescola interessa l'uscita del trattamento: una gomma caratterizzata e dosabile, dopo che contaminanti e componenti estranee sono stati rimossi nelle condizioni richieste. Il peso dell'articolo raccolto descrive invece l'inizio del percorso.

La posizione congiunta di EuRIC, la confederazione europea delle industrie del riciclo, ed ETRMA riferisce circa 3,9 milioni di tonnellate di pneumatici fuori uso raccolti e resi disponibili al trattamento in Europa nel 2024. Secondo questa fonte industriale circa metà del flusso è destinata al riciclo di gomma, acciaio e tessile considerati insieme; l'altra metà al recupero energetico mediante co-incenerimento nell'industria del cemento. La quota di riciclo include dunque più materiali. Per quantificare gomma riutilizzabile in nuovi compound servono quantità e qualità delle singole uscite, oltre al loro effettivo impiego.

Anche il luogo del trattamento conta. La stessa posizione, richiamando una stima AECOM del 2021, segnala che fino a un terzo del trattamento può svolgersi fuori dall'Europa. Quel richiamo ha un riferimento temporale diverso dal totale raccolto nel 2024. Illustra una separazione geografica possibile fra raccolta e lavorazione, lasciando aperte le destinazioni commerciali delle frazioni ottenute. Una raccolta europea può alimentare impianti esterni; l'output può poi essere venduto su mercati diversi. La disponibilità locale va seguita fino alla consegna della materia recuperata.

La granulazione e la macinazione producono granulo o polverino. Le particelle conservano la struttura vulcanizzata e gli ingredienti della mescola precedente. Possono diventare riempitivi, modificatori o componenti di una nuova formulazione, secondo dimensione, pulizia, superficie e compatibilità. La loro funzione differisce da quella del polimero lavorabile che forma la nuova matrice. Il dosaggio deve quindi essere verificato sul compound: introdurre una particella recuperata cambia anche interfacce e comportamento meccanico del materiale risultante.

La rigenerazione cerca di rendere la gomma più lavorabile mediante calore, azione meccanica e, secondo il processo, sostanze chimiche. La devulcanizzazione mira a intervenire sul reticolo; nelle gomme curate con zolfo cerca di rompere selettivamente parte dei ponti di zolfo preservando le catene. La selettività è il vincolo decisivo. Se la lavorazione spezza anche il polimero, il recupero di deformabilità può accompagnarsi a una perdita di proprietà. Origine, sistema di cura e storia dell'articolo condizionano il risultato, che deve essere caratterizzato prima della nuova formulazione.

Il mercato richiede anche un passaggio giuridico. I criteri di cessazione della qualifica di rifiuto, detti End-of-Waste, stabiliscono le condizioni perché un materiale recuperato possa essere trattato come prodotto. EuRIC ed ETRMA

chiedono criteri europei armonizzati nella loro posizione industriale. È una richiesta di settore, distinta dalla disciplina vigente nei singoli ordinamenti. La conformità legale permette lo scambio entro le condizioni applicabili; la specifica tecnica stabilisce quale funzione quella materia possa svolgere nella mescola.

Il recupero aggiunge così possibili ingredienti, ciascuno con una prova diversa da affrontare. La distribuzione delle dimensioni di un polverino, la lavorabilità di un rigenerato e il comportamento di un devulcanizzato sono informazioni necessarie all'acquirente. La ripetibilità dell'output dipende anche dalla regolarità dei materiali usati in ingresso e dalla capacità di mantenerli separati quando le composizioni differiscono. L'origine secondaria deve diventare una caratteristica documentata del lotto e della sua prestazione, fino a incontrare il medesimo problema commerciale della materia vergine: ricevere con continuità ciò che il processo è in grado di usare.

La qualifica del lotto

Le prove seguono la materia lungo il processo. All'ingresso la gomma solida viene valutata per consistenza e lavorabilità, attraverso viscosità Mooney, plasticità e gli altri parametri previsti dal grado. Per il lattice liquido rimangono pertinenti i controlli sulla dispersione. Il certificato del lotto collega un risultato a una forma fisica e a un metodo di prova: questa corrispondenza permette di accettare la materia prima prima che entri nella formulazione.

La mescola fresca viene poi esaminata al reometro, uno strumento che misura la risposta del materiale sottoposto a deformazione in condizioni controllate. Durante la prova di cura se ne segue l'evoluzione, ricavando il tempo di induzione allo scorch, la reticolazione prematura, e l'andamento della vulcanizzazione. Il primo informa sul margine di lavorazione prima che la rete si sviluppi; il secondo sul comportamento del sistema di cura. Le prove su un provino reticolato completano la verifica con la tensione necessaria a raggiungere un allungamento prefissato, la resistenza alla rottura e la risposta a sollecitazioni ripetute. Nel lessico della gomma quella tensione, ossia la forza rapportata alla sezione iniziale del provino, viene spesso chiamata «modulo»: il valore descrive la risposta a quell'allungamento nelle condizioni di prova.

La materia seconda richiede controlli d'ingresso coerenti con il suo ruolo. Granulo e polverino vengono caratterizzati per distribuzione granulometrica, quota di polimero residuo, riempitivi e ceneri, odore e contaminanti, comprese fibre tessili e particelle metalliche. Per rigenerato e devulcanizzato contano anche lavorabilità e comportamento viscoelastico, che combina risposta elastica e dissipazione. Questi risultati vanno interpretati insieme a reticolazione residua ed eventuale degradazione delle catene; la viscoelasticità, da sola, lascia indeterminato un grado univoco di devulcanizzazione. La prova nella nuova mescola stabilisce infine se il materiale svolge il compito previsto al dosaggio scelto.

Il contratto traduce queste verifiche in condizioni di fornitura: grado, tolleranze, composizione, forma di consegna, quantità e regolarità. Fra due lotti entrambi accettabili resta importante la costanza del comportamento, perché oscillazioni rilevanti possono richiedere aggiustamenti di formulazione o processo. Imballaggio e conservazione devono proteggere dalle contaminazioni e dalle alterazioni pertinenti alla forma acquistata. Il confronto di prezzo riguarda quindi un materiale identificato, nel luogo e nelle condizioni di consegna pattuiti, insieme ai costi di qualifica e di eventuale adattamento.

Le interruzioni hanno cause e tempi diversi. Una piantagione compromessa richiede un recupero biologico; un'interruzione dei monomeri ferma l'alimentazione della sintesi; una manutenzione limita la marcia dell'impianto; un lotto fuori tolleranza può essere presente in magazzino e restare inutilizzabile per la destinazione prevista. Scorte e fornitori alternativi aiutano soltanto se le partite disponibili superano la qualifica. La sostituzione si decide quindi lungo il percorso completo, dalla proprietà del polimero alla prova del compound, anziché mediante una semplice equivalenza di peso.

Tempo biologico, tempo industriale e tempo della consegna devono incontrarsi: l'albero deve maturare, il reattore riprodurre la struttura richiesta e il lotto arrivare con proprietà sufficientemente costanti anche nella partita successiva. Naturale e sintetica offrono possibilità che la formulazione combina entro limiti tecnici; il recupero amplia le origini disponibili portando con sé composizione e reticolazione della vita precedente. Seguire la materia fino alla qualifica permette di localizzare una scarsità nella raccolta, nella sintesi, negli ingredienti o nella conformità della fornitura. Ciascun punto richiede una

risposta coerente con il proprio tempo e il proprio vincolo, fino a consegnare ciò che il processo è in grado di usare.

Fonti e riferimenti

FAO — The Utilization, processing and demand for Rubberwood as a source of wood supply, sezione 2: coltivazione, tappatura e ciclo produttivo

https://www.fao.org/4/y0153e/Y0153E04.htm

FAOSTAT — Crops and livestock products, dati normalizzati: Natural rubber in primary forms, produzione e superficie raccolta 2023

https://bulks-faostat.fao.org/production/Production_Crops_Livestock_E_All_Data_(Normalized).zip

ANRPC — Monthly NR Statistical Report, December 2024, comunicato di rilascio dell'outlook

https://www.anrpc.org/newsla/anrpc-releases-monthly-nr-statistical-report%2C-december-2024

Commissione europea — Regulation on Deforestation-free Products: perimetro delle materie e calendario applicativo

https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation/regulation-deforestation-free-products_en

Commissione europea/JRC — Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers, POL BREF, agosto 2007

https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf

Evonik — Solutions for the Rubber Industry, pp. 3–4: silice, silani, basi di dosaggio e indicazioni di miscelazione

https://products.evonik.com/assets/43/53/Solutions_for_the_Rubber_Industry_EN_EN_244353.pdf

Tyres Europe/ETRMA — Fourth quarter replacement tyre volumes increase, full year performance generally positive, 30 gennaio 2025

https://tyreseurope.org/fourth-quarter-replacement-tyre-volumes-increase-full-year-performance-generally-positive/

EuRIC/ETRMA — Harmonised End-of-Waste criteria for End-of-Life Tyres, posizione industriale con dati sul trattamento e richiamo ad AECOM 2021

https://euric.org/images/Position-papers/EuRIC_ETRMA_Joint_Position_-_Harmonised_EoW_criteria.pdf

ISO — ISO 37:2024, Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties: tensione a un allungamento prefissato

https://www.iso.org/standard/86892.html

04.25 – Fibre tecniche e materiali compositi

Una fibra è un filamento sottile e allungato. La forma è familiare nei fili di un tessuto, ma trova impiego anche in materiali destinati a sostenere carichi: lo scafo di una barca, una pala eolica o un componente aeronautico possono contenere fibre che contribuiscono alla loro resistenza. In questi impieghi le fibre vengono scelte per le proprietà che devono dare al materiale finito, come leggerezza e capacità di resistere alla trazione.

Questo capitolo segue tre famiglie di fibre tecniche usate come rinforzo: vetro, carbonio e aramidi. Il vetro viene trasformato in filamenti a partire da una miscela minerale fusa; la fibra di carbonio si ottiene convertendo un filamento precursore attraverso trattamenti termici; le aramidi sono fibre sintetiche, tra le quali rientra il Kevlar. Dietro la stessa forma sottile si trovano quindi materie di partenza e processi produttivi differenti.

Per realizzare un pezzo, le fibre vengono spesso unite a un altro materiale, per esempio una resina, che le avvolge e le tiene insieme. Questa parte è chiamata matrice. Il materiale risultante è un composito: nella vetroresina, per esempio, fibre di vetro e resina collaborano a sostenere gli sforzi. Le fibre costituiscono il rinforzo; la matrice trasferisce il carico fra loro, le protegge e dà forma al pezzo. La prestazione dipende anche da come le fibre sono disposte e da quanto bene aderiscono alla matrice.

L'industria può acquistare questi rinforzi in forme diverse: bobine di filamenti, tessuti da impregnare, materiali già impregnati o miscele contenenti fibre corte. Ogni forma richiede lavorazioni e controlli propri. Per capire come diventi disponibile una materia prima utilizzabile, seguiremo il percorso dalla produzione del filamento alla sua superficie, alla disposizione delle fibre e alla conservazione del materiale consegnato.

La continuità si costruisce

La prima difficoltà è ottenere un filamento che conservi la propria continuità mentre viene prodotto, trasformato e avvolto. Per un rinforzo di vetro il percorso comincia da una miscela minerale destinata a diventare un liquido

omogeneo. Qui interessa la fibra continua trafilata attraverso boccole, distinta dalla lana di vetro per isolamento e dal vetro piano: ciascuna filiera ha una formatura e un prodotto differenti.

Silice, composti di calcio, alluminosilicati e altri ingredienti vengono dosati secondo la composizione richiesta. Gli ossidi modificano la viscosità del fuso e le proprietà del vetro. Per questo la preparazione deve controllare anche ciò che potrebbe interrompere la filatura: inclusioni solide, bolle e variazioni della miscela. Il forno rende possibile la trasformazione soltanto se consegna alla fase successiva un vetro sufficientemente uniforme.

Il fuso attraversa boccole, elementi forati generalmente realizzati con leghe di platino e rodio. La trazione assottiglia il vetro che esce dai fori, formando filamenti poi raffreddati e avvolti. Il documento di riferimento sulle migliori tecniche disponibili per la produzione del vetro, il BREF del 2012 del Centro comune di ricerca della Commissione europea, indica velocità di attenuazione nell'intervallo di 5–70 metri al secondo. Il numero descrive il movimento durante la filatura: una variazione di temperatura o di viscosità deve essere gestita mentre il materiale continua a scorrere.

La continuità dipende quindi dall'accordo fra fuso, fori e trazione. Una boccola deteriorata o un'alimentazione irregolare può generare rotture e materiale fuori specifica. Prima dell'avvolgimento viene applicato un rivestimento superficiale; il filamento passa così alla fase nella quale protezione e compatibilità diventano parte del prodotto. La composizione del rivestimento avrà un ruolo distinto da quello della miscela minerale.

Il bilancio della materia comincia ancora prima della bobina. Per la fibra continua il BREF riporta un intervallo indicativo del 55–80% di prodotto finito rispetto alla materia prima alimentata. Il denominatore è la miscela iniziale, non il solo vetro fuso. Una parte della massa viene persa durante le trasformazioni chimiche, fra cui il rilascio di anidride carbonica dai carbonati; altre perdite dipendono dalla lavorazione e dagli scarti. La quota che manca alla fine comprende dunque fenomeni differenti e va interpretata attraverso il processo.

Anche l'energia cambia significato secondo il punto misurato. Il medesimo riferimento storico indica 7–18 gigajoule per tonnellata di vetro fuso per la fusione e 10–25 gigajoule per tonnellata di prodotto per il processo

complessivo. Il secondo intervallo comprende attività oltre il forno e ha un denominatore diverso. Tecnologie, combustibili, composizioni e condizioni degli impianti spiegano l'ampiezza degli intervalli; questi valori descrivono il quadro tecnico del documento, non una media corrente di ogni linea.

L'uso complessivo d'acqua è indicato in 4–20 metri cubi per tonnellata di prodotto, comprendendo flussi che diventano scarichi. Per comprendere l'impatto locale occorre seguire raffreddamento, lavaggi e trattamento dei reflui, distinguendo l'acqua che attraversa l'impianto da quella consumata o ricircolata. Per chi lavora alla linea contano inoltre calore, manutenzione del forno, movimentazione delle bobine e contatto con filamenti e sostanze di finitura.

La continuità assume un'altra forma quando il rinforzo deve essere ottenuto trasformando una fibra già esistente. Il poliacrilonitrile, indicato con la sigla PAN, viene filato e orientato prima di diventare precursore della fibra di carbonio. La struttura deve sopravvivere a una conversione chimica e termica che modifica profondamente il materiale e ne rimuove una parte della massa.

La stabilizzazione avviene in aria. Le reazioni trasformano il precursore in una struttura capace di affrontare il trattamento successivo senza fondere. L'ossigeno deve raggiungere l'interno del filamento: il percorso dalla superficie al centro pone un vincolo alla velocità del trattamento e può produrre differenze fra esterno e nucleo. La tensione e le condizioni termiche devono accompagnare la trasformazione preservando la forma orientata.

Segue la carbonizzazione in atmosfera inerte, che rimuove elementi e frazioni volatili e lascia una struttura carboniosa. Per determinati gradi ad alto modulo, cioè con elevata rigidezza lungo la fibra, si aggiunge la grafitizzazione. La scelta del trattamento dipende dalla proprietà da ottenere. Il passaggio dal precursore alla fibra finale richiede perciò una linea con tempi, atmosfere e condizioni coerenti con il grado prodotto.

Una presentazione del Dipartimento dell'Energia statunitense e dell'Oak Ridge National Laboratory, firmata da Felix Paulauskas nel 2009, attribuisce al precursore il 43% e alla stabilizzazione il 18% del costo nella configurazione esaminata. È un modello storico, utile a mostrare quanto pesino le fasi che preparano la carbonizzazione. Prezzi attuali e altre configurazioni richiedono

misure proprie; il costo industriale nasce anche dal tempo durante il quale la fibra occupa gli impianti.

Il limite di diffusione lega la produttività alle dimensioni e alla struttura del precursore. Accelerare il passaggio può lasciare una trasformazione disuniforme; prolungarlo occupa più a lungo la linea. La regolazione deve ottenere un materiale adatto alla carbonizzazione, mantenendo insieme uniformità e continuità del fascio.

Un terzo percorso costruisce il filamento attraverso una soluzione nella quale le catene possono orientarsi. La documentazione Teijin descrive per la para-aramide Twaron, appartenente alla stessa famiglia di fibre del Kevlar, una sequenza di polimerizzazione, dissoluzione in acido solforico, filatura, lavaggio, neutralizzazione e trattamento. L'organizzazione delle catene nella soluzione e durante la filatura contribuisce al comportamento del rinforzo. Le meta-aramidi hanno invece un ruolo soprattutto di protezione termica e dalla fiamma, distinto dal rinforzo a trazione delle para-aramidi.

Nella filatura da soluzione contano anche la purezza e la gestione del mezzo di filatura. Acidi, lavaggi e neutralizzazione richiedono contenimento e trattamento degli effluenti; gli operatori affrontano rischi legati alle sostanze e alle apparecchiature.

La superficie decide l'incontro

I filamenti vengono raccolti in fasci, svolti, guidati e talvolta intrecciati. Durante questi passaggi il contatto fra fibre e attrezzature può danneggiare il materiale. Un fascio deve conservare coesione sufficiente per essere movimentato e insieme permettere alla matrice di raggiungere le superfici quando comincia l'impregnazione. La finitura deve rispondere a entrambe le esigenze.

Il rivestimento chiamato sizing svolge funzioni di protezione, lubrificazione, coesione e compatibilità con la matrice. Queste funzioni sono ripartite fra ingredienti diversi: il formatore di film protegge il fascio e contribuisce a mantenerlo coeso; fra le sostanze citate nella documentazione sul vetro compare il poliacetato di vinile, abbreviato PVAc. L'agente di accoppiamento, per esempio un silano nel caso del vetro, favorisce l'interazione fra la superficie minerale e la matrice organica, mentre lubrificanti e altri componenti facilitano le operazioni meccaniche. La formulazione viene calibrata per il prodotto e per

le lavorazioni previste. La quantità applicata e la sua distribuzione entrano nella specifica del rinforzo consegnato.

La compatibilità cambia ciò che un utilizzatore può fare con una bobina. Un fascio destinato a una matrice epossidica può essere qualificato con una finitura diversa da quella richiesta per un polipropilene rinforzato. L'identità del vetro resta una parte della specifica; la superficie stabilisce come quella fibra può incontrare il materiale che dovrà avvolgerla. Sostituire un grado richiede perciò di controllare anche il trattamento, oltre alle proprietà del filamento.

Sulle fibre di carbonio il trattamento superficiale e il sizing sono fasi distinguibili. Il primo modifica la superficie per favorire l'adesione; il secondo aggiunge un rivestimento utile alla movimentazione e all'incontro con la resina. L'intensità del trattamento va controllata perché una modifica eccessiva può compromettere la fibra. Per le aramidi, chimica e struttura richiedono soluzioni proprie: le funzioni generali dell'interfaccia restano comuni, mentre la ricetta dipende dal sistema.

La matrice deve entrare nel rinforzo e distribuirsi fra i filamenti. La sua viscosità, cioè la resistenza allo scorrimento, influenza la facilità con cui attraversa i passaggi disponibili. Contano anche la disposizione dei fasci e la forma del semilavorato. Una zona secca, rimasta senza matrice, oppure un vuoto interrompe la continuità del sistema che dovrebbe trasferire gli sforzi.

Il composito lavora attraverso questa collaborazione. Le fibre portano soprattutto il carico nella direzione in cui sono disposte; la matrice trasferisce sforzi fra fibre e protegge il rinforzo. L'adesione permette alle due parti di agire insieme. Un materiale può quindi avere filamenti con buone proprietà e offrire una prestazione insoddisfacente quando impregnante, superficie e geometria non sono compatibili.

Le matrici termoindurenti formano una rete mediante reazione chimica. Quelle termoplastiche diventano lavorabili attraverso il rammollimento o la fusione. Per l'impregnazione questa differenza comporta condizioni di viscosità, temperatura e reattività diverse. La scelta riguarda tanto il modo di preparare il semilavorato quanto il trattamento che esso potrà ricevere in seguito.

La qualità dell'interfaccia entra così nella qualifica del materiale. Cambiare sizing o matrice può rendere necessarie nuove prove perché modifica il trasferimento del carico e il comportamento durante la lavorazione. Per un

acquirente, una sostituzione apparentemente limitata può richiedere la verifica del sistema che aveva già imparato a usare. Questo costo di qualifica si aggiunge al costo della fibra e alla continuità delle forniture.

La finitura produce inoltre flussi che devono essere gestiti: acque di lavaggio, residui delle formulazioni e materiale fuori specifica. Contenimento e tutela degli operatori dipendono dalle sostanze effettivamente impiegate. Nella movimentazione e nel taglio occorre valutare filamenti e polveri nella loro forma concreta: la sola rottura di una fibra non consente di dedurre quanto materiale respirabile venga generato.

La direzione cambia la prestazione

Un filamento continuo offre una direzione privilegiata. Quando molti filamenti vengono riuniti, il fascio deve distribuire il carico e conservare la propria integrità durante le lavorazioni. Il tow, termine usato soprattutto per la fibra di carbonio, identifica un fascio di filamenti: indicazioni come 3K o 12K si riferiscono convenzionalmente a migliaia di filamenti, ma il prodotto richiede anche massa lineare, proprietà, finitura e tolleranze.

Il nastro unidirezionale concentra il rinforzo lungo una direzione. Un tessuto intreccia fili e introduce orientamenti differenti; le fibre tagliate vengono consegnate con lunghezze definite per essere distribuite in una matrice. La forma commerciale stabilisce quindi quali orientamenti sono già presenti e quali saranno introdotti nella lavorazione successiva. Comprare fibra significa anche scegliere quanta di questa organizzazione si riceve già preparata.

La scheda Hexcel del sistema epossidico HexPly 8552, con copyright 2023, permette di osservare quanto conti la direzione. Per un laminato unidirezionale AS4/8552, secco e provato a 25 °C, riporta una resistenza a trazione di 2.207 megapascal lungo le fibre, a 0°, e di 81 megapascal trasversalmente, a 90°. Il megapascal esprime una forza riferita a una superficie; qui la stessa grandezza viene misurata lungo due direzioni dello stesso sistema.

Nella direzione longitudinale il carico trova le fibre allineate. Nella direzione trasversale assumono un ruolo diverso matrice e interfaccia. Il confronto rende leggibile l’anisotropia, cioè la dipendenza delle proprietà dalla direzione. Non basta quindi indicare una resistenza senza spiegare come il provino è orientato e in quali condizioni viene misurato.

I valori appartengono al laminato consolidato ottenuto dal sistema fibra-resina, non al filamento AS4 isolato e neppure al rotolo di prepreg ancora da trasformare. Il prepreg è il rinforzo consegnato già impregnato; il laminato è il materiale sul quale vengono svolte le prove nelle condizioni dichiarate. Le prove sul laminato caratterizzano il sistema ottenibile dalla materia di partenza e accompagnano la qualifica del semilavorato consegnato.

La condizione secca del provino è parte del dato. Temperatura e umidità appartengono alle condizioni attraverso le quali viene caratterizzato il sistema: confrontare due valori richiede che queste informazioni accompagnino la direzione e il tipo di prova. Anche la parola resistenza va collegata alla sollecitazione misurata; un risultato a trazione risponde a una domanda diversa da una prova di urto o di tolleranza al danno.

La quantità di fibra richiede un'altra precisazione. Una percentuale può essere espressa in massa oppure in volume. Quando fibra e resina hanno densità diverse, a pari massa occupano volumi differenti; per questo le due percentuali descrivono rapporti diversi. La frazione volumica aiuta a comprendere quanta parte del materiale sia occupata dal rinforzo, mentre la frazione massica segue il peso dei costituenti consegnati. Se la fibra è più densa della matrice, la sua quota in peso risulta maggiore della quota in volume: occupa una parte minore dello spazio pur contribuendo maggiormente alla massa.

Anche grammatura e massa lineare rispondono a domande distinte. La prima indica il peso per unità di superficie di un tessuto o di un nastro; la seconda il peso per unità di lunghezza di un fascio. Servono per dosare e organizzare il materiale, ma devono accompagnarsi a contenuto di resina, orientamento e difetti ammessi quando si acquista un sistema impregnato. Un peso uguale può nascondere disposizioni del rinforzo differenti.

La fibra corta trasferisce il problema dalla continuità del fascio alla distribuzione della lunghezza e dell'orientamento. Il compound, una miscela pronta per un'ulteriore trasformazione, incorpora rinforzo e matrice. Durante la miscelazione la fibra può accorciarsi: la lunghezza consegnata all'ingresso va distinta da quella che rimane nel materiale lavorato. La disponibilità di un grado comprende dunque il comportamento della fibra lungo il percorso previsto.

Questa logica di fornitura si ritrova nei semilavorati pronti per la formatura. SMC, dall'inglese Sheet Moulding Compound, è un materiale in foglio con

resina, fibre tagliate e altri ingredienti; BMC, Bulk Moulding Compound, è una massa dosabile per la formatura. Entrambi incorporano già una formulazione, con requisiti propri di omogeneità, lavorabilità e reattività. La disposizione finale delle fibre dipenderà anche dal flusso del materiale nella lavorazione successiva.

Il contenuto di resina deve restare entro la tolleranza del semilavorato. Una zona con troppo materiale impregnante e una zona con fibre rimaste secche distribuiscono diversamente il rinforzo, anche se il lotto consegnato nel complesso pesa quanto previsto. Per questo il controllo del solo peso deve essere accompagnato dalle misure di uniformità e difetto pertinenti. La geometria venduta rende riproducibile il dosaggio soltanto quando la distribuzione dei costituenti è sufficientemente regolare.

Il collaudo segue lo stadio fisico del prodotto: diametro e resistenza del filamento, coesione del fascio, geometria del tessuto e proprietà del sistema impregnato richiedono controlli differenti. I risultati vanno registrati insieme al rapporto fra costituenti e alle condizioni di prova.

Un materiale pronto ha anche un tempo

Un prepreg termoindurente contiene una matrice reattiva la cui evoluzione viene rallentata attraverso la conservazione. Il prodotto è pronto per una lavorazione successiva, ma la sua disponibilità dipende anche dalla storia termica. La bobina porta con sé un lotto, una data e condizioni entro le quali il materiale mantiene le caratteristiche previste.

La cura è la reazione mediante la quale la matrice termoindurente raggiunge il suo stato consolidato. Prima di questa trasformazione, per il sistema HexPly 8552 la scheda Hexcel distingue tre limiti temporali. La conservazione indicata è di 12 mesi a −18 °C dalla fabbricazione, in confezione protetta dall'umidità. L'outlife, il tempo cumulativo fuori congelatore fino alla cura, è di 30 giorni a 23 °C. La tack life, il periodo nel quale si conserva la lavorabilità adesiva dichiarata, è di 10 giorni a 23 °C.

Questi tempi rispondono a esigenze diverse. La durata in congelatore riguarda il materiale conservato nelle condizioni prescritte. Il tempo cumulativo segue l'esposizione fuori congelatore; deve quindi accompagnare le movimentazioni e l'uso del lotto. La lavorabilità adesiva riguarda la capacità di mantenere

l'adesività utile alla manipolazione. Un limite non sostituisce gli altri e nessuno dei tre è una proprietà universale della fibra di carbonio.

La natura cumulativa dell'outlife chiarisce perché una nuova permanenza in congelatore non cancelli l'esposizione precedente. Conservare il materiale richiede di seguire il tempo già trascorso nelle condizioni considerate dalla scheda, anziché assegnare ogni volta un intervallo nuovo. Il dato del lotto e il registro delle movimentazioni permettono di conservare questa continuità di informazione anche quando la fornitura cambia magazzino o operatore.

La registrazione del tempo diventa parte della qualità commerciale. Un rotolo può essere presente nel magazzino e richiedere comunque il controllo della storia di conservazione prima di essere utilizzato. Identificazione del lotto, confezione e registri consentono di collegare il materiale consegnato alle condizioni nelle quali le sue proprietà sono state dichiarate. La massa in inventario acquista significato insieme a questa informazione.

La refrigerazione aggiunge apparecchiature, energia e vincoli alla distribuzione. Il servizio di consegna deve mantenere le condizioni richieste dal sistema, mentre gli operatori devono gestire confezioni e movimentazioni. Il suo costo fisico dipende dalle condizioni effettive di conservazione e trasporto; un consumo universale per chilogrammo di prepreg cancellerebbe le differenze fra impianti, distanze e durata dello stoccaggio.

Un tessuto secco evita di incorporare in anticipo una matrice reattiva e lascia l'impregnazione alla fase successiva. Un nastro termoplastico segue condizioni proprie, che possono comprendere il controllo dell'umidità prima della lavorazione. Si tratta di alternative che spostano operazioni e responsabilità lungo la filiera. La scelta va compresa insieme alle attrezzature e alle specifiche del processo che riceverà il materiale.

Il contratto e la documentazione di consegna identificano il sistema, lo stato della confezione e la storia termica del lotto, così che il magazzino ricevente possa continuare a seguirne i tempi di utilizzo.

La produzione si misura a un punto preciso

Il rapporto dell'associazione industriale AVK sul mercato europeo dei compositi, pubblicato nel marzo 2026, stima per il 2025 una produzione di 2,281 milioni di tonnellate. Il totale si divide in 0,952 milioni di tonnellate di

compositi termoindurenti e 1,329 milioni di tonnellate di termoplastici. È una misura del prodotto composito nel perimetro del rapporto, comprensivo di matrice e rinforzo.

Questa scala descrive un'attività a valle della produzione del filamento. Per risalire alla domanda di fibre occorrerebbe conoscere il contenuto di rinforzo e la composizione dei diversi prodotti. La ripartizione fra matrici aiuta a leggere il mercato, ma non fornisce da sola la quantità di vetro, carbonio o aramide impiegata. Inoltre l'area europea della fonte deve essere mantenuta distinta dalla sola Unione europea.

Per l'Italia AVK stima 134.000 tonnellate di compositi termoindurenti prodotti nel 2025. Il valore colloca il paese nel segmento considerato e rende visibile una scala industriale concreta. Riguarda però compositi: non è produzione italiana di fibre, né quantità di prepreg o capacità di fornire ogni grado di rinforzo. Il numero mostra attività di trasformazione entro il perimetro associativo, senza descrivere l'origine di tutti i costituenti.

Il segmento nazionale e il totale europeo rispondono a scale e coperture differenti. Per confrontare il dato italiano con l'insieme di cui fa parte occorre restare nel segmento dei termoindurenti; il totale dei compositi comprende anche i termoplastici. La stessa cautela vale quando una misura di prodotto viene usata per ragionare sugli ingredienti: la matrice inclusa nel peso deve restare visibile nel bilancio.

Il quadro statistico ufficiale richiede altre distinzioni. Prodcom, l'indagine europea sulla produzione industriale, separa produzione venduta e produzione effettiva, mentre le statistiche degli scambi Comext classificano i prodotti secondo nomenclature commerciali. Per misurare un flusso di rinforzi occorre verificare quali forme e unità siano comprese nella voce: una quantità aggregata può riunire prodotti che richiedono ulteriori qualificazioni.

La produzione venduta può comprendere materiale fabbricato in precedenza e commercializzato nel periodo. La produzione effettiva segue invece ciò che viene prodotto, anche se destinato a scorte o trasformazioni interne. Questi punti di osservazione servono a domande diverse. Per un approvvigionamento concreto occorre aggiungere la forma richiesta, il grado e la possibilità di consegna, informazioni che un aggregato statistico non descrive necessariamente.

La capacità presenta un problema analogo. Una linea di precursore PAN, una linea di carbonizzazione e una linea di impregnazione hanno prodotti e colli di bottiglia differenti. Aumentare una capacità a monte può lasciare invariato il volume di un sistema qualificato se manca la fase successiva. L'esistenza di un impianto va collegata a quello che esso può produrre, alle condizioni operative e al materiale che il cliente può effettivamente ricevere.

Un'interruzione può quindi manifestarsi in punti diversi. La continuità della filatura dipende dalla preparazione e dal funzionamento della linea; la disponibilità di un tessuto richiede la trasformazione del fascio; la consegna di un prepreg coinvolge impregnazione e conservazione. Il costo di una fornitura comprende queste attività e i controlli necessari a ripeterne il risultato. Confrontare prezzi per tonnellata richiede prima di stabilire il contenuto del prodotto e il punto di consegna.

Le forniture ai trasformatori italiani ed europei possono comprendere anche rinforzi recuperati. Le relative quantità vanno misurate dopo il trattamento e associate alla forma commerciale ottenuta, distinguendo la fibra separata dal materiale che conserva una parte della matrice.

Il ritorno cambia il rinforzo

La matrice termoindurente, quando reticola, forma una rete che non torna fluida mediante semplice riscaldamento. Questa trasformazione spiega perché il recupero di uno scarto di prepreg non curato e quello di un laminato consolidato seguano percorsi diversi. Nel primo caso rimane un sistema reattivo; nel secondo fibra e matrice fanno già parte di un materiale che richiede separazione o frammentazione.

La pagina CORDIS della Commissione europea, il servizio di informazione sui progetti di ricerca, descrive RECYCOMP come progetto per recuperare scarti non curati e ricomporli in materiale preimpregnato in rotolo. Il processo riconosce area e orientamento dello scarto, lo taglia e ne riposiziona gli elementi. Il risultato cercato riguarda la ricostruzione di una forma utile a partire da materiale che conserva una matrice ancora lavorabile.

Il progetto mostra il valore dell'informazione geometrica. Recuperare uno sfrido significa anche conoscere come sono disposte le fibre e dove possono essere collocate nel nuovo materiale. La ricomposizione deve mantenere

caratteristiche controllabili del semilavorato. La descrizione della soluzione tecnica non misura tuttavia la quantità di prodotto commerciale effettivamente consegnata dal riciclo.

Per un composito consolidato, la lavorazione meccanica frammenta il materiale. Può restituire particelle e fibre più corte, con una distribuzione di lunghezze e una quota di matrice residua. La forma ottenuta può trovare impiego come ingrediente di un compound o in un rinforzo discontinuo. Il suo valore dipende dal ruolo che potrà svolgere nella nuova formulazione, non soltanto dal peso separato.

Altre rotte cercano di rimuovere la matrice mediante trattamenti termici o chimici. La pirolisi usa il calore per decomporre materiale organico; la solvolisi impiega un mezzo chimico per separare o degradare la matrice. I trattamenti possono modificare sizing e superficie della fibra, rendendo necessario un nuovo rivestimento per ristabilire compatibilità con la matrice successiva. Lunghezza, contaminanti e proprietà residue devono essere misurati sul prodotto recuperato.

Queste operazioni comportano energia, effluenti e residui propri. La valutazione segue il trattamento effettivo, la massa che entra e la qualità che esce. Una matrice termoplastica offre la possibilità di rifusione, ma le lavorazioni possono comunque accorciare il rinforzo o modificarne l'orientamento. Recuperare la lavorabilità del polimero e conservare la struttura delle fibre sono risultati distinti.

La materia seconda viene qualificata attraverso forma di consegna, distribuzione delle lunghezze, contenuto di matrice, contaminanti, superficie e prestazione nel nuovo sistema. Una fibra corta recuperata può essere utile dove è richiesto un rinforzo distribuito e risultare inadatta a un nastro continuo. Questa differenza determina il mercato accessibile e impedisce di attribuire a ogni chilogrammo recuperato la stessa funzione del vergine.

La ripetibilità del recupero dipende anche dalla regolarità del materiale in ingresso. Scarti con matrici, finiture o geometrie differenti richiedono di essere riconosciuti e mantenuti distinguibili quando queste differenze cambiano il trattamento o la destinazione. Il lotto recuperato deve rendere conoscibili le caratteristiche pertinenti al nuovo impiego. La capacità di trattare un flusso

eterogeneo e quella di consegnare un rinforzo costante diventano così due compiti collegati, con controlli e costi propri.

Nel confronto economico fra rotte di recupero, al costo del trattamento si aggiungono separazione, eventuale nuova finitura e prove di accettazione del cliente. La resa utile riguarda la quota che supera questi controlli e può essere venduta per l'impiego previsto.

La disponibilità di fibre tecniche e compositi nasce dall'incontro fra trasformazioni e requisiti. Il filamento deve essere prodotto senza perdere la struttura richiesta; superficie e matrice devono trasferire gli sforzi; la geometria deve collocare il rinforzo dove serve; conservazione e documentazione devono mantenere il lotto conforme fino alla consegna. Il recupero può riaprire il percorso, con forme e proprietà che richiedono una nuova qualificazione.

Per localizzare una scarsità occorre seguire questi passaggi. Può mancare un precursore adatto, la continuità della linea, una finitura compatibile, una capacità di impregnazione o un lotto conservato correttamente. Le tonnellate prodotte aiutano a riconoscere la scala dell'attività; la disponibilità per l'utilizzatore dipende dal materiale che arriva al suo punto di consegna, con proprietà ripetibili e una forma utilizzabile.

Fonti e riferimenti

Commissione europea e JRC — Manufacture of Glass BREF, 2012, fibra di vetro continua, filatura, bilanci di materia, energia e acqua

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/GLS_Adopted_03_2012_0.pdf

U.S. Department of Energy e Oak Ridge National Laboratory — Felix Paulauskas, Advanced Oxidation and Stabilization of PAN Based Carbon Precursor Fibers, 20 marzo 2009

https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/lm_04_paulauskas.pdf

Teijin Aramid — Twaron product brochure, polimerizzazione, dissoluzione, filatura e trattamento

https://www.teijinaramid.com/en/brochure/products/Twaron%C2%AE%20product%20brochure

Arclin — What is Kevlar?, inquadramento della fibra nella famiglia delle para-aramidi

https://www.arclin.com/kevlar/what-is-kevlar/

Hexcel — HexPly 8552 Epoxy Matrix Product Data Sheet, copyright 2023, laminato AS4 e condizioni di conservazione

https://www.hexcel.com/wp-content/uploads/2025/12/HexPly_8552_eu_DataSheet1.pdf

AVK — The European Market for Fiber Reinforced Plastics Composites 2025, marzo 2026

https://www.avk-tv.de/wp-content/uploads/2026/03/Longversion_AVK_MarketReport_2026_final.pdf

Eurostat — Prodcom statistics by product, definizioni di produzione venduta ed effettiva

https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/information-data

Commissione europea CORDIS — RECYCOMP, Development of equipment for composite recycling process of uncured material

https://cordis.europa.eu/project/id/886967

04.26 – Legno e semilavorati

Ordinare tavole essiccate significa chiedere legno con una sezione, una lunghezza, un contenuto d'acqua e una qualità definiti. Ordinare pannelli significa chiedere superfici di spessore controllato, ottenute unendo fogli, particelle o fibre. Entrambe le richieste possono partire dagli alberi, ma richiedono materie e trasformazioni differenti. Che cosa deve accadere perché il legno presente in una foresta diventi un materiale che l'industria possa ricevere nelle condizioni richieste?

La crescita produce fusti diversi per specie, diametro, forma e difetti. La lavorazione deve scegliere quelli adatti, portarli agli impianti e trasformarli senza perdere le caratteristiche necessarie all'impiego. Una tavola conserva una parte riconoscibile del tronco; un pannello può ricostruire una superficie utilizzando elementi molto più piccoli. In entrambi i casi il compratore paga un materiale utilizzabile, con proprietà verificabili, e non una quantità indistinta di biomassa.

Questo passaggio collega il tempo della foresta al tempo dell'industria. Accesso, taglio, essiccazione e incollaggio decidono quanto legno diventi disponibile per una determinata richiesta e quando possa essere consegnato. Nelle stesse operazioni si formano i costi di movimentazione, i consumi di energia, i coprodotti e i rischi per chi lavora. La disponibilità commerciale dipende quindi dalla successione concreta delle trasformazioni, fino alla misura e all'accettazione del lotto.

Il volume deve diventare un assortimento

La superficie forestale misura un'estensione; il volume in piedi descrive il legno presente negli alberi prima del taglio. L'incremento netto annuo riguarda la crescita che resta dopo la mortalità e gli aggiustamenti previsti dalla rilevazione, mentre il prelievo misura il materiale rimosso. Sono informazioni complementari: permettono di osservare una risorsa, la sua evoluzione e un'attività produttiva, ma non individuano da sole i tronchi che una segheria può acquistare. La collocazione degli alberi e le caratteristiche dei fusti devono ancora essere tradotte in un approvvigionamento.

Un bosco su un pendio ripido richiede operazioni diverse da una piantagione raggiungibile con mezzi forestali. La presenza di una strada, la distanza dal piazzale e le condizioni del terreno cambiano attrezzature, tempi e costi. Anche il calendario conta: un volume teoricamente prelevabile può non essere raggiungibile nel periodo in cui l'impianto ne ha bisogno. Le scorte attenuano questa discontinuità, ma richiedono spazio e conservazione. La foresta fornisce una risorsa distribuita; l'industria richiede consegne organizzate.

Il prelievo deve inoltre rispettare condizioni che vanno oltre la crescita annuale. Specie, età, capacità di rinnovazione, suolo e biodiversità influiscono sulla gestione, insieme ai vincoli applicabili al luogo. Prelevare meno dell'incremento complessivo non dimostra, da solo, che ogni intervento sia sostenibile: un totale può nascondere pressioni concentrate in alcune aree e crescita non accessibile in altre. La scelta di dove e come intervenire collega la fornitura materiale alla continuità delle funzioni della foresta.

Con l'abbattimento e l'allestimento, cioè la preparazione del fusto in pezzi destinati alla vendita, la variabilità biologica diventa una prima selezione commerciale. Un assortimento è una classe di legname individuata per caratteristiche e impiego. Diametro, lunghezza e rettilineità orientano la scelta insieme a nodi, fessure e condizioni del legno. Dalla stessa pianta possono uscire pezzi adatti alla sega, altri destinati alla produzione di fogli e porzioni utilizzabili dopo riduzione in elementi piccoli. Decidere dove tagliare influenza già ciò che sarà possibile ricavare in fabbrica.

Il legno tondo industriale comprende il legname prelevato per usi diversi dall'energia, anche quando la destinazione è la produzione di pasta di cellulosa o di pali anziché di tavole. Secondo la FAO, l'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura, nel 2024 i prelievi mondiali di questa categoria hanno raggiunto 1,96 miliardi di metri cubi. Il dato descrive il grande flusso che lascia le foreste per alimentare trasformazioni differenti: una parte soltanto è destinata alla segagione.

La continuità del rifornimento dipende anche dall'uniformità dei pezzi. Lotti con diametri e lunghezze relativamente regolari consentono una preparazione diversa da carichi molto variabili, che richiedono più selezione. La programmazione deve incontrare il materiale realmente acquistabile: la quantità presente nel bosco può essere ampia e tuttavia offrire pochi tronchi adatti a una determinata macchina o a una particolare richiesta di fogli.

La destinazione energetica cambia il perimetro. Eurostat, l'ufficio statistico dell'Unione europea, riportava per il 2022 una produzione UE stimata di 510 milioni di metri cubi di legno tondo, dei quali circa il 25% utilizzato come legna da combustibile. Qui il totale comprende quindi anche una quota energetica rilevante. Anno e definizione differiscono dal dato mondiale sul tondo industriale: le cifre aiutano a distinguere i flussi, ma non permettono di ricavare una quota europea confrontandole direttamente. La separazione fra materiale e combustibile comincia nella destinazione dei pezzi.

L'esbosco porta il legname dal punto di abbattimento alla strada o al piazzale. Trattori, verricelli, gru e teleferiche rispondono a pendenze e accessi diversi. Il passaggio dei mezzi, soprattutto su terreno bagnato, può compattare il suolo, favorire erosione e danneggiare la rinnovazione. Per i lavoratori, gli alberi da abbattere e i tronchi da movimentare comportano masse e direzioni di movimento da controllare. Organizzazione del cantiere e scelta delle attrezzature incidono insieme sulla sicurezza e sulla possibilità di portare a valle il materiale.

Nel piazzale, i pezzi vengono misurati e separati in lotti compatibili con le lavorazioni successive. La specie aiuta a prevederne il comportamento, ma non sostituisce l'esame del fusto: conifere e latifoglie comprendono assortimenti molto diversi. Un tronco regolare può consentire forme che un pezzo curvo dello stesso volume non offre. Quando il carico raggiunge l'impianto, questa selezione ha già delimitato le possibilità produttive; le macchine devono ora ricavare una geometria vendibile.

Il taglio decide la forma e i coprodotti

La segagione divide il tronco in sezioni: tavole e altri pezzi con dimensioni compatibili con la richiesta. La forma circolare del fusto deve incontrare forme generalmente rettangolari, mentre nodi, curvatura e variazioni di diametro limitano le parti utilizzabili. Lo schema di taglio può privilegiare il volume, determinate larghezze o una qualità specifica. Questi obiettivi non coincidono sempre: ricavare più materiale non significa necessariamente ottenere più pezzi del grado che il cliente vuole acquistare.

La scortecciatura separa il rivestimento esterno prima di alcune lavorazioni. Quando si aprono le sezioni, le porzioni periferiche del tronco diventano

sciaveri, mentre la rifilatura elimina bordi per ottenere larghezze regolari. Le lame producono segatura e le successive lavorazioni generano altri trucioli e ritagli. Le quantità ottenute vanno misurate separatamente per ciascun prodotto e coprodotto: la tavola vendibile è un prodotto, ma il materiale rimasto ai lati o trasformato in particelle può avere ancora una destinazione industriale.

La resa della segheria dipende perciò da una combinazione di materia, macchine e specifica commerciale. Cambiano il risultato il diametro del tronco, lo spessore dei tagli, i difetti eliminati e le dimensioni richieste. Cambia anche il punto nel quale si misura il prodotto: segato fresco, segato essiccato e materiale classificato rappresentano stadi diversi della lavorazione. Una percentuale può essere utile per un impianto e un assortimento definiti; estenderla a ogni segheria cancellerebbe proprio le differenze che determinano la fornitura.

La classificazione separa i pezzi secondo le caratteristiche richieste. Nell'esame visivo contano nodi, direzione delle fibre e fessure; per impieghi che richiedono proprietà meccaniche definite si utilizzano anche misure o stime ottenute con apposite apparecchiature. Un pezzo escluso da un grado può essere venduto per un altro impiego. Questo spostamento cambia il valore del lotto senza significare che tutta la materia sia stata perduta. La qualità richiesta decide quale parte del legname lavorato risponda davvero all'ordine.

Il materiale disponibile per la vendita dipende inoltre dalla continuità delle lavorazioni. La capacità nominale descrive ciò che le macchine possono produrre in determinate condizioni; turni, manutenzione, fermi e assortimenti effettivamente ricevuti determinano la produzione effettiva. Quando manca il tronco adatto, una macchina disponibile non genera da sola segati conformi. Anche il confronto fra impianti deve conservare questa distinzione fra possibilità tecnica e risultato produttivo.

La FAO riporta una produzione mondiale di 445 milioni di metri cubi di segati nel 2024. Sono volumi di prodotti ricavati dal taglio, destinati a lavorazioni successive, non volumi di alberi prelevati. La grandezza rende visibile una fase industriale distinta dall'approvvigionamento forestale. Dividere questo totale per il prelievo mondiale non darebbe una resa di segagione: i tronchi alimentano anche altre trasformazioni e gli aggregati non seguono gli stessi lotti attraverso un processo unico.

Per ottenere un foglio sottile, invece, il rapporto fra utensile e tronco cambia. Nella sfogliatura il pezzo ruota contro un coltello che ne ricava un nastro, successivamente suddiviso in fogli. La continuità del nastro dipende dalla regolarità del tronco, dai difetti e dalla preparazione, che può comprendere un trattamento termico. Nella tranciatura il coltello ricava fogli dal tronco o da una sua porzione, con un diverso rapporto rispetto alla disposizione delle fibre. Le impiallacciature così ottenute sono superfici sottili destinate a essere utilizzate come semilavorati o unite a supporti.

Conservare una superficie continua richiede quindi materia diversa da quella sufficiente per produrre piccoli elementi. Un difetto che interrompe un foglio può avere meno importanza quando il legno viene ridotto in particelle. Analogamente, segatura e rifili puliti possono entrare nella produzione di pannelli, mentre altri flussi vengono destinati a combustibile. Il cippato, costituito da frammenti prodotti con una macchina di taglio, consente ulteriori impieghi secondo dimensioni e qualità. Il mercato dei coprodotti influisce sulla valorizzazione dell'intero tronco e sullo spazio necessario per conservare prodotti e coprodotti.

Questi flussi richiedono misure coerenti. Il volume solido del legno esclude gli spazi fra i pezzi, mentre quello apparente di un cumulo di cippato comprende anche aria. Per il tondo occorre inoltre sapere se la corteccia sia inclusa. Nelle operazioni di taglio e movimentazione si aggiungono rumore, parti mobili e polveri: protezioni delle macchine e aspirazione vicino ai punti che generano particelle devono accompagnare la produzione. Una volta ricavata la forma, rimane un problema che può modificarla dopo il taglio: l'acqua ancora contenuta nel materiale.

Togliere acqua significa controllare il materiale

Una tavola appena segata può avere le dimensioni corrette e cambiare successivamente. La perdita dell'acqua libera nelle cavità cellulari riduce soprattutto la massa. Il ritiro dipende invece dalla perdita dell'acqua legata alle pareti cellulari, sotto il punto di saturazione delle fibre: circa il 30% su base secca, con variazioni fra specie e pezzi. Una superficie può già ritirarsi mentre l'interno resta più umido. Le differenze di asciugatura possono così provocare deformazioni o fessure. L'essiccazione deve quindi ottenere un contenuto d'acqua adatto alla destinazione preservando la qualità del pezzo. La velocità

del trattamento è una scelta produttiva, perché ridurre il tempo non serve se aumenta il materiale che non può essere venduto nel grado richiesto.

Prima di interpretare una percentuale d'umidità bisogna conoscerne il denominatore. Nel legno si usa spesso la base secca: la massa dell'acqua viene rapportata alla sostanza completamente anidra, cioè priva d'acqua. Su base umida, invece, il denominatore comprende anche l'acqua presente. Un esempio ipotetico chiarisce la differenza. Un campione con 800 kg di sostanza anidra e 200 kg d'acqua pesa 1.000 kg. Su base secca l'umidità è 200 diviso 800, ossia il 25%; su base umida è 200 diviso 1.000, ossia il 20%. Il campione è identico: cambia soltanto la base della misura.

La massa anidra di questo calcolo presuppone l'eliminazione completa dell'acqua per determinarla. Un'ordinaria essiccazione commerciale conserva invece umidità residua. Confondere i due passaggi renderebbe errata sia la misura della materia sia l'interpretazione del trattamento. Anche confrontare schede che usano basi diverse può creare una differenza apparente. Il contratto deve specificare la convenzione perché da essa dipendono peso del carico, accettazione e possibilità di usare il legno nelle condizioni previste.

L'essiccazione naturale utilizza tempo e circolazione dell'aria. Impilaggio, protezione dalla pioggia e spazio fra i pezzi aiutano a governarla, ma stagione e condizioni atmosferiche influenzano il risultato. Le camere di essiccazione consentono invece di regolare aria calda, umidità e ricircolo. Il ciclo deve adattarsi a specie, spessore e contenuto d'acqua iniziale. Un trattamento troppo rapido può lasciare tensioni interne e provocare difetti; tempi lunghi impegnano piazzali, camere e capitale in materiale ancora in lavorazione, oltre a richiedere attenzione alla conservazione.

Lo stesso controllo assume una funzione diversa quando il legno viene preparato per un pannello. Particelle e scaglie devono arrivare alla pressatura con umidità compatibile con l'adesivo e il ciclo termico. Il documento europeo di riferimento sulle migliori tecniche disponibili per i pannelli a base di legno, indicato con la sigla BREF e pubblicato nel 2016 dal Centro comune di ricerca della Commissione europea, descrive valori del 2–3% su base secca per le particelle con resine a base di urea e formaldeide e del 5–10% per le scaglie destinate ai pannelli orientati con adesivo pMDI. Quest'ultima sigla identifica un adesivo isocianico, il diisocianato difenilmetano polimerico. L'acqua partecipa alle reazioni con cui questo legante indurisce: nelle rotte descritte si

possono utilizzare scaglie meno essiccate rispetto alle particelle con resine ureiche. Dosaggio e ciclo della pressa devono comunque essere compatibili con l'umidità presente. Sono condizioni del materiale preparato nelle rotte descritte, prima della pressatura, e non umidità finali universali dei pannelli.

L'acqua da evaporare richiede calore. Nel BREF, una raccolta di dati industriali del 2012 riporta per l'essiccazione nella produzione di pannelli di particelle un intervallo di 0,17–0,86 MWh termici per metro cubo di pannello finito. L'energia impiegata nella fase di essiccazione è quindi rapportata al volume del pannello finito. La sua ampiezza mostra quanto contino condizioni e configurazione degli impianti; non è una media attuale, un consumo complessivo di stabilimento o un valore trasferibile alle tavole essiccate in segheria.

Per confrontare due trattamenti occorre sapere quanta acqua venga eliminata e quale prodotto vendibile ne risulti. Un materiale inizialmente più umido chiede una lavorazione diversa da uno già parzialmente asciutto; recupero del calore, combustibile e condizioni dell'aria modificano a loro volta il consumo. La sola energia rapportata al volume non spiega queste differenze. Il controllo del processo deve tenere insieme il risultato sull'umidità e i difetti eventualmente introdotti per ottenerlo.

Il calore può provenire dalla combustione di residui legnosi o da altri combustibili, con possibilità di recupero secondo l'impianto. L'essiccatoio genera flussi d'aria e gas da trattare, mentre le frazioni secche richiedono controllo di accumuli e rischio d'incendio. L'acqua contenuta nel legno resta distinta dall'acqua prelevata per lavaggi, raffreddamento o altri servizi. Le acque di processo e quelle dei sistemi di abbattimento degli inquinanti seguono circuiti e trattamenti propri. Governata l'umidità, il materiale può conservare la forma ricavata dal tronco oppure essere unito ad altri elementi per costruirne una nuova.

Ricomporre richiede un'altra specifica

Unire legno significa decidere quali elementi debbano toccarsi, in quale direzione e attraverso quale legame. La qualità dell'insieme dipende da queste scelte oltre che dalla qualità dei singoli pezzi. Nel compensato, fogli d'impiallacciatura vengono sovrapposti con direzioni delle fibre generalmente

alternate e incollati. Il foglio sottile diventa così una superficie di maggiore spessore, nella quale disposizione degli strati, continuità delle facce e qualità dell'incollaggio partecipano al comportamento del pannello. Eventuali vuoti o irregolarità dei fogli restano problemi da controllare durante l'assemblaggio.

Con elementi più spessi, il legno lamellare incollato assembla lamelle classificate con fibre prevalentemente parallele. L'eliminazione di parti inadatte e la piallatura preparano superfici compatibili con il legame. I pezzi più corti possono essere uniti mediante giunti a dita: estremità fresate con profili che si incastrano e vengono incollati. La giunzione permette di ottenere lunghezze che quei pezzi separati non offrirebbero. Il prodotto venduto deve però essere qualificato attraverso i suoi elementi, l'adesivo e il controllo delle unioni; la sola lunghezza raggiunta non ne descrive la qualità.

Queste lavorazioni conservano elementi nei quali la struttura originaria rimane riconoscibile. Riducendo il legno in componenti più piccoli si ottengono altre possibilità, con requisiti diversi. Nel pannello di particelle, spesso chiamato truciolare, la materia viene classificata per dimensioni e distribuita in una materassina, cioè uno strato ancora non consolidato. Particelle più fini possono formare le facce e componenti più grandi il cuore. La distribuzione serve a costruire una superficie regolare senza richiedere un tronco capace di fornire un foglio continuo della stessa estensione.

La forma delle particelle non è un dettaglio intercambiabile. L'OSB, dall'inglese Oriented Strand Board, è un pannello di scaglie allungate orientate. Gli strati hanno direzioni controllate, così che l'orientamento partecipi alla costruzione del materiale. Nella rotta descritta dal BREF, queste scaglie si ricavano dal legno tondo: semplice segatura o frammenti di pannelli usati non offrono la geometria richiesta. Cambiare il materiale in ingresso può quindi impedire di ottenere il prodotto, anche quando la quantità di legno e la disponibilità della pressa restano uguali.

Se la riduzione prosegue fino alle fibre, cambia anche la preparazione. L'MDF, dall'inglese Medium Density Fibreboard, è un pannello di fibre a media densità. Il trattamento termico e meccanico separa la struttura fibrosa, che viene preparata per formazione e pressatura. Nella produzione a secco descritta dal BREF, l'adesivo viene usualmente dosato nella condotta di trasporto e trattamento delle fibre, chiamata blowline, prima dell'essiccazione; alcune linee utilizzano un dosaggio successivo. Essiccare e incollare non hanno quindi

un ordine identico in ogni processo: il dosaggio deve incontrare le condizioni della specifica rotta produttiva.

Nella pressa, pressione e ciclo termico consolidano la materia preparata. Perché il legame funzioni occorrono superfici di contatto, una distribuzione adeguata della resina e condizioni coerenti con l'acqua presente. L'adesivo e gli altri ingredienti partecipano alla massa del prodotto, che contiene anche umidità residua. Dopo la pressatura, taglio, raffreddamento e levigatura o calibratura portano il pannello alle dimensioni richieste. La calibratura uniforma lo spessore; la verifica finale controlla che la superficie ottenuta risponda al grado commerciale, anziché limitarsi a constatare che il materiale sia stato pressato.

La ricomposizione non rende dunque equivalenti le diverse famiglie. Un pannello costruito con fibre, uno con particelle e uno con scaglie orientate richiedono preparazioni differenti e devono essere scelti secondo proprietà dichiarate per il grado. Per chi effettua una lavorazione successiva, spessore regolare e superficie utilizzabile hanno un significato concreto: permettono di impostare le operazioni su un materiale definito. La denominazione generale «pannello di legno» non contiene tutte queste informazioni.

La FAO registra per il 2024 una produzione mondiale di pannelli a base di legno pari a 393 milioni di metri cubi. Il totale comprende famiglie prodotte attraverso lavorazioni differenti, accomunate dalla costruzione di una forma utilizzabile a partire da elementi legnosi. Il dato misura il volume dei pannelli prodotti. Sommarla ai volumi di tronchi come disponibilità nuova conterebbe due volte materia già registrata. Inoltre, secondo la famiglia e l'impianto, i pannelli possono incorporare legno tondo, residui di segheria e legno recuperato qualificato. Questa alimentazione mista impedisce di ricavare una resa complessiva dal solo volume dei tronchi prelevati.

L'incollaggio introduce anche sostanze da governare nel processo e nel prodotto. Il BREF descrive resine a base di urea e formaldeide, formulazioni con melammina o fenolo e adesivi come il pMDI. La scelta influenza requisiti di preparazione, pressatura e controllo. Essiccatoi, sfiati e presse possono generare polveri, formaldeide e composti organici volatili, ossia sostanze organiche che passano nell'aria. Aspirazione e trattamento devono seguire i punti che originano questi flussi. Nella finitura si aggiungono le polveri prodotte per regolare spessore e superficie.

Le emissioni dell'impianto, il rilascio dal pannello e l'esposizione dei lavoratori richiedono valutazioni distinte. Una concentrazione misurata nei gas di scarico dipende da portata e condizioni di misura e non descrive direttamente l'aria respirata da una persona. Allo stesso modo, non misura il rilascio successivo del semilavorato. Il BREF offre un riferimento tecnico storico per operazioni e controlli, senza attribuire una prestazione identica a tutti gli impianti odierni. La ricomposizione amplia dunque le forme realizzabili, ma chiede controlli nuovi proprio mentre permette di utilizzare origini della materia più varie.

La materia recuperata passa dal controllo d'ingresso

Un residuo pulito di segheria ha un'origine e una lavorazione note. Il legno proveniente da prodotti già usati porta invece la storia delle trasformazioni e dei trattamenti precedenti: rivestimenti, adesivi, impregnanti o parti estranee possono accompagnare la materia legnosa. La triturazione ne cambia le dimensioni, ma non cancella questa composizione. Per diventare una carica industriale, cioè materiale accettabile in ingresso a un processo, il recuperato deve incontrare requisiti di pulizia e caratteristiche fisiche definiti dall'impianto.

La preparazione comprende selezione, rimozione dei metalli e delle altre frazioni estranee, riduzione delle dimensioni e vagliatura. Quest'ultima separa i frammenti secondo la loro grandezza. Pietre e sabbia possono usurare le attrezzature; metalli e materiali plastici richiedono separazioni; rivestimenti e trattamenti pregressi possono influenzare emissioni e qualità. Umidità e dimensioni devono infine essere coerenti con la nuova lavorazione. I controlli stabiliscono se il lotto possa essere utilizzato, in quale processo e con quali condizioni, anziché attribuire un impiego al solo fatto che contenga legno.

Il pannello di particelle offre possibilità di incorporare residui e recuperato qualificati, ma ciò non rende ogni pannello ugualmente adatto a ogni origine. Le scaglie orientate richiedono una geometria che i frammenti usati non conservano; nella produzione di fibre, adesivi precedenti e impurità possono accompagnare il materiale nel raffinatore, la macchina che separa le fibre, e influenzare la nuova linea. La disponibilità di materia recuperata deve quindi essere valutata rispetto alla lavorazione concreta. Per quantificarla servono dati sul materiale effettivamente accettato, non soltanto sul legno raccolto.

Raccolta, preparazione, accettazione e incorporazione descrivono passaggi diversi. Una parte del materiale può essere separata prima dell'ingresso; altra materia può essere indirizzata a un uso differente. Le polveri si generano durante triturazione e vagliatura, mentre le frazioni estranee separate richiedono una destinazione propria. Per il compratore il lotto utile è quello che ha superato questi controlli. Per un bilancio materiale occorre seguire ciò che entra effettivamente nel prodotto e distinguere questa quantità da ciò che viene utilizzato come combustibile.

Quando un residuo alimenta una caldaia fornisce energia; quando entra nel pannello resta materia del nuovo semilavorato. Entrambe le destinazioni possono valorizzarlo, ma producono risultati e flussi differenti. Bruciare residui interni non annulla le emissioni, così come trattenere carbonio nel prodotto non determina da solo l'intero bilancio climatico della filiera. Origine, trasformazioni e destinazione devono rimanere riconoscibili. Il recuperato qualificato converge infine con le altre materie nella stessa esigenza commerciale: consegnare un lotto misurato, identificato e compatibile con l'ordine.

Il lotto si misura alla consegna

Alla consegna, la quantità deve essere accompagnata da ciò che la rende utilizzabile. Per i segati contano sezione, lunghezza, umidità e grado; per i pannelli, spessore, planarità e proprietà dichiarate per la categoria acquistata. Massa e volume rispondono a domande diverse. La prima comprende l'acqua presente nel carico; il secondo richiede una convenzione coerente con la forma del materiale. Convertirli senza conoscere densità e umidità può far apparire uguali forniture che contengono quantità diverse di sostanza legnosa.

Il trasporto incontra limiti di peso e di spazio. Un carico denso o umido può raggiungere il limite di massa prima di occupare tutto il volume disponibile. Il punto di consegna entra quindi nel costo insieme alla qualità: tronchi nel piazzale forestale e segati essiccati presso l'acquirente incorporano operazioni differenti. Anche la conservazione partecipa alla fornitura. Durante deposito e viaggio il contenuto d'acqua può cambiare e il materiale può subire danni; protezione, movimentazione e condizioni di stoccaggio devono preservare ciò che il produttore ha ottenuto.

Le frontiere possono essere attraversate in fasi diverse. La FAO riporta per il 2024 un commercio mondiale di 96 milioni di metri cubi di legno tondo industriale e di 90 milioni di metri cubi di pannelli. I volumi descrivono merci differenti: nel primo caso il compratore riceve materia da trasformare, nel secondo un prodotto che ha già incorporato preparazione, incollaggio e finitura. Sono scambi della produzione, non quantità da aggiungere a essa. La posizione delle trasformazioni determina dove si svolge il lavoro industriale e quali caratteristiche viaggiano con il materiale.

La stessa distinzione serve a collocare l'Italia. Il CREA, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, descrive nella Carta forestale riferita al 2020 una superficie nazionale che supera i 10 milioni di ettari. È un patrimonio esteso, ma il dato misura territorio cartografato. Per capire quale parte sostenga una fornitura di tavole o pannelli occorrono accessibilità, assortimenti e prelievi; per valutare l'approvvigionamento industriale servono inoltre produzione e scambi delle diverse forme. La superficie non permette di assegnare una percentuale di autosufficienza ai semilavorati.

Un paese può infatti comprare tronchi e vendere pannelli, oppure acquistare segati senza effettuare localmente la prima lavorazione. Il successo di un'industria che usa legno non dimostra automaticamente che la materia sia nazionale. Per ricostruire la dipendenza bisogna seguire gli stadi e conservare unità e categorie comparabili. Anche la continuità della consegna resta una proprietà distinta dal totale annuo: il lotto deve arrivare quando serve e nel grado previsto, mentre capacità dell'impianto e risorsa forestale descrivono soltanto alcune condizioni dell'offerta.

L'origine documentata aggiunge un'altra dimensione alla qualità commerciale. La certificazione della gestione forestale riguarda le pratiche nel bosco; la catena di custodia segue invece il materiale attraverso acquisto, trasformazione e vendita. FSC, Forest Stewardship Council, e PEFC, Programme for the Endorsement of Forest Certification, sono sistemi di certificazione volontaria. I loro strumenti collegano dichiarazioni e controlli a requisiti specifici. Nel sistema FSC, registrazioni e documenti commerciali sostengono le dichiarazioni sul materiale lungo la catena, con verifiche di organismi indipendenti. La presenza di una certificazione va interpretata secondo il suo ambito.

Questa documentazione non misura da sola il volume disponibile. Ettari certificati descrivono superfici, mentre la quantità venduta dipende da prelievi

e trasformazioni; il numero dei certificati descrive soggetti o ambiti verificati. Per l'acquirente è necessario che la dichiarazione pertinente accompagni il materiale e le operazioni interessate. La gestione della foresta e la custodia commerciale rimangono collegate ma distinte: un controllo all'origine non dimostra automaticamente che ogni passaggio successivo sia coperto dalla stessa certificazione.

La conformità normativa costituisce un terzo piano. L'EUDR, sigla del regolamento europeo sui prodotti a deforestazione zero, pone requisiti contro deforestazione e degrado forestale nel proprio campo di applicazione e richiede informazioni sull'origine e sulla legalità. La certificazione volontaria può contribuire alla documentazione, ma non assolve automaticamente gli obblighi previsti dal regolamento. Per un lotto, forma fisica e origine documentata devono quindi essere verificate con strumenti adatti a ciascuna domanda. Una fornitura può essere impedita da una misura incompatibile, una qualità diversa dall'ordine, un'umidità non accettabile o una documentazione insufficiente, anche quando il materiale esiste e può essere trasportato.

Dalla risorsa alla fornitura

Il legno diventa un semilavorato acquistabile quando una risorsa biologica variabile viene trasformata in una forma che soddisfa requisiti fisici e documentali. L'accesso seleziona ciò che può arrivare all'impianto; il taglio e la ricomposizione costruiscono le forme; la gestione dell'acqua permette di conservarne le caratteristiche nelle condizioni previste. La verifica del lotto collega queste trasformazioni alla richiesta concreta del compratore. È questa successione a rendere disponibile una fornitura, con tempi e qualità definiti.

Individuare il passaggio che la impedisce cambia anche la risposta possibile. Se manca un assortimento accessibile, aumentare la capacità della pressa non lo crea. Se il problema è la stabilità del segato, serve governare il trattamento e la conservazione. Se la materia recuperata è incompatibile, una maggiore quantità raccolta non basta a renderla accettabile. Anche un lotto fisicamente conforme può restare invendibile per la destinazione prevista se manca la documentazione necessaria.

La superficie forestale e il volume lavorato rimangono misure essenziali, ma acquistano significato seguendo la materia fino alla consegna. Si comprende

così quale operazione renda possibile la fornitura e dove occorrano accesso, preparazione, controllo o organizzazione. La domanda industriale trova risposta nel materiale che arriva utilizzabile, non soltanto negli alberi che possono crescere.

Fonti e riferimenti

FAO — Global forest products trade and production show signs of recovery in 2024. Pubblicazione 2025, dati 2024.

https://www.fao.org/newsroom/detail/global-forest-products-trade-and-production-show-signs-of-recovery-in-2024/

FAO — Global forest products facts and figures 2024, 2025. Produzione mondiale di segati, p. 6.

https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd8005en

Eurostat — Wood products — production and trade. Dati 2022, estrazione ottobre 2023.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood_products_-_production_and_trade

CREA — Monitorare le foreste italiane: l'inventario e la carta forestale. Carta forestale riferita al 2020.

https://creafuturo.crea.gov.it/14618/

Commissione europea, Centro comune di ricerca — Best Available Techniques Reference Document for the Production of Wood-based Panels, 2016. § 2.2.1–2.2.2 e tabella 3.2; dati energetici industriali 2012.

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/WBPbref2016_0.pdf

FSC — Chain of Custody Certification.

https://fsc.org/en/chain-of-custody

PEFC — What is sustainable forest management?

https://pefc.org/what-we-do/our-approach/what-is-sustainable-forest-management

Commissione europea — Regulation on Deforestation-free products.

https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation/regulation-deforestation-free-products_en

Glass, S. V.; Zelinka, S. L. — Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In Wood Handbook, USDA Forest Products Laboratory, 2010, capitolo 4. Saturazione delle fibre e ritiro.

https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/37428.pdf

Yelle, D. J. e altri — Delineating pMDI model reactions with loblolly pine via solution-state NMR spectroscopy. Part 2. Non-catalyzed reactions with the wood cell wall. Holzforschung, 2011. Ruolo dell’acqua nelle reazioni degli isocianati.

https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/37743.pdf

04.27 – Cellulosa, carta e cartone

Una bobina di carta viene ordinata per ciò che il foglio deve fare: resistere, assorbire, lasciarsi stampare o mantenere una forma. Il peso consegnato è soltanto una delle sue caratteristiche. Contano la massa per unità di superficie, chiamata grammatura, lo spessore, l'umidità e il comportamento della rete di fibre. Due bobine della stessa massa possono offrire superfici e prestazioni diverse, pur appartenendo entrambe alla grande categoria della carta.

La scala di questa trasformazione è mondiale. L'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura, FAO, registra per il 2024 una produzione di 423 milioni di tonnellate di carta e cartone. Dentro il totale convivono materiali con ricette differenti: cambiano le fibre, le sostanze aggiunte e il modo di preparare la superficie. La disponibilità di legno o di carta recuperata, da sola, non spiega quanto prodotto utilizzabile possa uscire dalle cartiere.

Per arrivare alla bobina bisogna ottenere fibre adatte, separare ciò che ostacola la lavorazione e costruire un foglio in acqua. Poi quell'acqua deve essere allontanata senza perdere la struttura appena formata. Resa, recupero dei reagenti ed essiccazione legano così la qualità del materiale al costo e al funzionamento dell'impianto.

Separare le fibre senza perdere la funzione

Il legno non è un deposito di cellulosa già pronta. Nelle pareti delle sue cellule la cellulosa, formata da lunghe catene di glucosio, è organizzata in strutture minute che contribuiscono alla resistenza. Le emicellulose, carboidrati con catene più corte e strutture diverse, partecipano al comportamento della parete in presenza d'acqua. La lignina irrigidisce il tessuto vegetale e contribuisce a tenere unite le cellule. Produrre pasta significa liberare le fibre conservando le proprietà necessarie alla rete del futuro foglio.

La pasta di cellulosa commerciale contiene quindi fibre trattate, con una composizione che dipende dal procedimento. Non è necessariamente cellulosa pura. Parte delle emicellulose rimane utile; la quantità di lignina conservata o rimossa cambia colore, stabilità ottica e possibilità di impiego. Quando la lignina resta in misura elevata, la pasta tende a essere più sensibile

all'ingiallimento provocato da luce e ossidazione. Togliere lignina può migliorare la stabilità del bianco, ma richiede lavoro e comporta anche perdite di altri componenti.

Prima ancora del trattamento, la specie vegetale contribuisce alla ricetta. Le conifere forniscono generalmente fibre più lunghe, utili alla resistenza; molte latifoglie danno fibre più corte, che aiutano a distribuire la materia con uniformità e a ottenere determinate proprietà della superficie. Lunghezza, flessibilità e struttura della parete interagiscono. Una miscela può servire meglio di una sola specie, perché il foglio deve raggiungere più prestazioni contemporaneamente. La fibra lunga non è superiore in ogni applicazione, così come la fibra corta non rappresenta una qualità inferiore.

Esistono anche materie non legnose. La bagassa è il residuo fibroso della lavorazione della canna da zucchero; paglia e bambù offrono altre fonti di fibre. La loro disponibilità segue filiere e stagioni differenti. La paglia può apportare silice, che complica alcuni trattamenti e il recupero chimico. Stoccaggio, impurità e continuità degli approvvigionamenti restano quindi parte della scelta industriale. Sostituire la fonte vegetale non significa poter mantenere invariata tutta la fabbrica.

La separazione meccanica conserva gran parte della materia del legno. Una mola o dischi raffinatori liberano fibre e frammenti consumando energia meccanica, fornita soprattutto dall'elettricità. La lignina resta largamente nella pasta. Il vapore può ammorbidire il materiale prima della raffinazione; trattamenti chimici moderati possono facilitarne la separazione. Il risultato comprende anche particelle fini, utili ad alcune proprietà del foglio ma differenti dalle fibre integre. L'elevata resa materiale si accompagna a caratteristiche meccaniche e ottiche proprie di questa via.

La via chimica interviene invece con reagenti che solubilizzano gran parte della lignina. La separazione meccanica può danneggiare le fibre e produrre frammenti; sciogliere la lignina che contribuisce a tenerle unite permette una separazione diversa, ma espone anche i carboidrati all'azione dei reagenti. In entrambi i casi occorre controllare quanto si interviene. La resistenza del futuro foglio dipende sia dalla fibra conservata sia dai contatti che potrà stabilire, mentre l'aspetto dipende anche dalle frazioni fini e dalle sostanze rimaste. Perciò il criterio industriale è ottenere una pasta adatta alla ricetta con una resa e consumi compatibili con il funzionamento dell'impianto.

Il documento europeo di riferimento sulle migliori tecniche disponibili per pasta, carta e cartone, pubblicato nel 2015 e indicato come BREF, dall'inglese Best Available Techniques Reference Document, riporta rese sul legno del 95–98,5% per pasta meccanica da mola. Per paste chimiche sbiancate descrive invece intervalli del 44–46% per conifere nordiche, 47–49% per latifoglie nordiche e 51–54% per *Eucalyptus globulus*. Sono riferimenti tecnici legati a specie e procedimenti, su base materiale secca, non medie mondiali attuali né percentuali sul peso dei tronchi umidi. Mostrano comunque il compromesso: conservare quasi tutto il legno aumenta la massa di pasta; rimuoverne alcuni componenti permette proprietà diverse.

I processi al solfito impiegano composti derivati dall'anidride solforosa e hanno propri schemi di recupero. Quelli semichimici uniscono un trattamento chimico parziale alla successiva separazione meccanica. Il kraft rende particolarmente chiaro il problema posto dalla resa più bassa: la materia uscita dalla fibra deve trovare un destino nel circuito industriale, con le sostanze impiegate per separarla.

La massa separata deve trovare un circuito

Nel kraft il legno scortecciato viene ridotto in cippato, piccoli pezzi di legno, e vagliato. Pezzi di spessore diverso assorbono il liquido di cottura con tempi diversi: quelli troppo grandi possono rimanere insufficientemente trattati, mentre le frazioni troppo piccole possono degradarsi o perdersi nelle separazioni. Una preparazione uniforme facilita il controllo della pasta. Corteccia e frazioni escluse possono alimentare una caldaia a biomassa; non vengono per questo trasformate in fibra cartaria.

Il cippato entra nel digestore, il recipiente di cottura, con una soluzione alcalina di idrossido di sodio e solfuro di sodio chiamata liquore bianco. Il trattamento scioglie gran parte della lignina e libera le fibre. In uscita si trovano però anche liquido residuo, nodi e materiale non cotto. I vagli eliminano le frazioni grossolane; i lavaggi separano dalle fibre il liquore carico di sostanze disciolte. Lavare bene recupera reagenti e materia organica e riduce ciò che sarà trascinato nelle fasi successive.

Nei lavaggi in controcorrente, acqua più pulita incontra pasta già più pulita e il liquido viene riutilizzato verso le fasi precedenti. Il percorso limita la diluizione inutile del liquore da recuperare, mantenendo efficace la separazione.

La qualità richiesta decide quanto proseguire nella delignificazione, cioè la rimozione della lignina, e nello sbiancamento. Una pasta per materiale bruno può conservare un colore incompatibile con una carta grafica bianca. Sbiancare significa rimuovere o modificare le sostanze responsabili del colore, proteggendo per quanto possibile i carboidrati utili. Le sequenze ECF, dall'inglese Elemental Chlorine Free, evitano il cloro elementare e possono impiegare biossido di cloro. Quelle TCF, Totally Chlorine Free, escludono reagenti contenenti cloro, ricorrendo per esempio a ossigeno, perossido o ozono. Le due denominazioni non definiscono da sole consumi e qualità degli effluenti: conta l'intera sequenza applicata.

Il liquore separato nei lavaggi, detto liquore nero, contiene sostanze organiche provenienti dal legno e sali. Prima di bruciarlo occorre concentrare questa corrente acquosa. Il BREF descrive un passaggio dal 14–18% di solidi disciolti dopo il lavaggio al 70–85% prima della combustione, secondo materia e configurazione. Le percentuali riguardano l'insieme dei solidi organici e inorganici nel liquore, non la concentrazione di fibre. Gli evaporatori allontanano acqua e preparano un combustibile che porta con sé anche sostanze da recuperare.

Nella caldaia di recupero la parte organica fornisce calore per produrre vapore. La parte minerale forma un fuso di sali, che viene sciolto per ottenere il liquore verde, contenente soprattutto carbonato di sodio e solfuro di sodio. La causticizzazione, cioè il trattamento con calce, trasforma il carbonato in idrossido di sodio; il solfuro è già presente. Si ricostituisce così il liquore bianco. Il carbonato di calcio separato viene scaldato nel forno di calce per rigenerare ossido di calcio, poi idratato e riutilizzato. Il circuito richiede reintegri, perché separazioni e recuperi non sono perfetti.

Questa sequenza collega il costo dei reagenti alla disponibilità di energia. La lignina sottratta alla pasta può sostenere la produzione di vapore, e il recupero riduce gli acquisti di sostanze chimiche. Occorrono però digestori, evaporatori, caldaia e forno, oltre ai sistemi di controllo e trattamento. Il loro capitale e la manutenzione entrano nel costo della pasta. Una fermata del recupero può

limitare la cottura anche se il legno è disponibile: le unità dipendono l'una dall'altra e la continuità non coincide con la capacità nominale di ciascuna.

Il personale opera vicino a liquori corrosivi, apparecchiature calde e circuiti in pressione. Contenimento delle perdite, dosaggio controllato e isolamento delle energie durante la manutenzione proteggono chi interviene. Un arresto del motore non elimina da solo pressione, calore o reagenti residui. Le operazioni di fermata e riavvio richiedono perciò controllo dell'intero circuito, oltre alle protezioni durante la marcia normale.

La pasta pronta può passare umida alla macchina cartaria di un impianto integrato oppure essere formata in fogli, pressata, essiccata e confezionata in balle. Questa seconda forma è la pasta destinata al mercato, o market pulp. Nell'area dei 19 paesi della Confederazione delle industrie cartarie europee, Cepi, che comprende anche Regno Unito e Norvegia, la produzione totale di pasta nel 2024 era 34,633 milioni di tonnellate; 15,451 milioni erano market pulp, già compresi nel totale. Sono dati associativi rivisti nel rilascio 2026. La distinzione rende visibile lo stadio commerciale. Per misurare la pasta, il BREF usa anche la tonnellata secca all'aria, ADt dall'inglese air dry tonne, normalizzata al 90% di sostanza secca: una ADt equivale a 0,9 tonnellate assolutamente secche. Esplicitare la base evita di pagare o confrontare come fibra una massa d'acqua diversa.

Recuperare carta significa rifare una materia prima

Alla pasta vergine si affianca la fibra proveniente da carta già prodotta. Anche questa deve essere preparata prima di entrare nell'impasto. Per il 2024 la FAO indica un consumo mondiale di carta recuperata di 243 milioni di tonnellate: una fonte industriale di grande scala, composta però da materiali che hanno già ricevuto trattamenti e incontrato altri usi. Il valore misura carta recuperata consumata, con le convenzioni statistiche della fonte; non è la massa di fibre pulite rimasta nei fogli nuovi.

La cartiera parte da materiale selezionato e accettato con requisiti di composizione, umidità e impurità. Balle di cartone bruno, carte grafiche e altre qualità forniscono impasti differenti. La presenza di fibre non basta a rendere adatto qualunque prodotto usato: sporco, accoppiamenti con altri materiali e trattamenti della carta possono complicarne la lavorazione. La scelta della

qualità in ingresso anticipa così una parte del lavoro che altrimenti ricadrebbe su separazioni e pulizia, e influenza il prodotto ottenibile.

Lo spappolamento rimette la carta in acqua e la agita per liberare le fibre. Queste si disperdono nella sospensione; non vengono dissolte come lo zucchero. L'operazione deve rompere la struttura del foglio senza ridurre inutilmente i contaminanti in frammenti sempre più difficili da separare. Il materiale liberato passa attraverso pulitori, che sfruttano differenze di densità per allontanare particelle come sabbia e metalli, e vagli con fori o fessure che trattengono frazioni incompatibili. Ogni separazione cerca un equilibrio fra pulizia della pasta e perdita di fibra utile.

Gli adesivi rappresentano un problema diverso da un pezzo di metallo. Possono frammentarsi e produrre particelle appiccicose che si depositano su tele, feltri e cilindri. Cere, plastiche e residui di rivestimenti hanno altri comportamenti ancora. Un materiale apparentemente uniforme nella balla può diventare una sospensione con contaminanti di dimensioni e proprietà differenti. La loro presenza può causare difetti del foglio, rotture del nastro e fermate per pulizia. Per questo il prezzo della carta accettata non descrive da solo il costo della fibra effettivamente utilizzabile.

Quando la specifica richiede un aspetto più chiaro, si può aggiungere la disinchiostrazione. Nella flottazione, aria e reagenti favoriscono l'adesione di particelle d'inchiostro alle bolle; la schiuma che sale le porta fuori dalla sospensione. Lavaggi e sbiancamento possono completare il trattamento. Non ogni cartone bruno richiede questa via, mentre una ricetta destinata a determinate proprietà ottiche può averne bisogno. La maggiore pulizia lascia una corrente di schiume e fanghi, con pigmenti, inchiostri e una parte delle frazioni fini: la materia separata resta nel bilancio del sito.

Una fibra pulita conserva inoltre gli effetti della propria storia. Dopo l'essiccazione la parete può perdere una parte della capacità di rigonfiarsi nuovamente in acqua e diventare meno flessibile. Questo irrigidimento della parete fibrosa dopo essiccazione, noto come hornification, riduce la possibilità di ristabilire i contatti fra fibre come prima dell'asciugatura. La modifica può persistere quando il materiale viene ribagnato; i suoi meccanismi dettagliati sono ancora discussi. Può interessare anche pasta vergine essiccata per il trasporto, quindi non equivale a un danno riservato al riciclo.

L’accorciamento prodotto da alcune lavorazioni meccaniche è un fenomeno distinto. Non avviene in misura fissa a ogni passaggio, e non esiste un numero universale di ricicli ammessi per tutte le fibre. Il produttore deve valutare la miscela disponibile, il trattamento e le proprietà richieste. La raffinazione può migliorare il legame; una quota di fibra vergine può reintegrare caratteristiche mancanti. La sua aggiunta dipende però dal grado prodotto: non è un obbligo tecnico identico per ogni cartiera alimentata da carta da riciclare.

Fra la balla ricevuta e l’impasto pulito cambiano dunque massa e qualità. Una parte esce come scarto, un’altra rimane nelle acque di processo, una parte utile arriva alla macchina. La quantità utilizzata all’ingresso non misura direttamente la fibra incorporata. Una volta controllata questa trasformazione, la via recuperata e quella vergine convergono nello stesso compito: distribuire fibre e altri componenti in una rete continua, usando acqua per formarla.

Costruire il foglio vuol dire governare l’acqua

L’impasto è una sospensione acquosa preparata secondo la ricetta del prodotto. Le fibre possono provenire da pasta fabbricata sul posto, balle acquistate o carta recuperata. Vengono dosate e, quando necessario, raffinate: passano fra superfici che ne modificano la parete e sviluppano fibrille, aumentando flessibilità e possibilità di contatto. Migliorare il legame può rendere il foglio più resistente, ma può anche rallentare il drenaggio. Il trattamento della fibra determina quindi una parte del lavoro successivo per togliere acqua.

Alla ricetta si possono aggiungere cariche minerali, come carbonato di calcio e caolino, per regolare opacità, bianco e superficie. Amidi e altri additivi intervengono su resistenza, comportamento verso i liquidi e trattenimento delle particelle. La scelta cambia anche costo e frazione fibrosa. Secondo Cepi statistics, nel 2024 l’area associativa utilizzava 9,341 milioni di tonnellate di materiali non fibrosi. Il dato rende concreta la distanza fra carta e cellulosa pura; è un dato aggregato sui materiali in ingresso, dal quale non si ricava la composizione di ogni foglio.

La sospensione raggiunge la cassa d’afflusso, che la distribuisce sulla tela della macchina continua. Questa superficie mobile lascia passare acqua e sostiene la rete nascente. Distribuzione delle fibre e drenaggio devono procedere insieme:

se la materia si addensa in modo irregolare, il foglio avrà zone differenti anche con una grammatura media corretta. Gravità e sistemi aspiranti aiutano l'acqua a defluire. Fibre fini, cariche e sostanze disciolte possono seguirla, formando le cosiddette acque bianche, che vengono in parte recuperate e ricircolate.

Trattenere le particelle fini è parte della formazione. Gli additivi di ritenzione aiutano a mantenerle nella rete, ma la regolazione deve anche preservare una distribuzione uniforme. Una perdita di cariche nelle acque bianche cambia la ricetta effettiva rispetto a quella dosata. Recuperarle e riportarle al processo riduce le perdite di materia; occorre però evitare che il ricircolo renda instabili concentrazione e composizione dell'impasto alimentato alla macchina.

Il foglio passa poi alle presse. Rulli e feltri lo sostengono e lo comprimono, favorendo l'uscita di altra acqua. La pressione deve rispettare la struttura desiderata: spremere di più può ridurre volume e alterare superficie o altre proprietà. Il BREF del 2015 indica, per la configurazione descritta, una secchezza dopo le presse normalmente del 45–50%. La secchezza è qui il rapporto fra solidi secchi e massa del nastro bagnato. È un riferimento tecnico, non la prestazione di ogni macchina o di ogni tipo di carta.

Anche dopo questa rimozione meccanica resta molta acqua. Nella sezione di essiccazione, cilindri riscaldati con vapore trasferiscono calore al foglio; ventilazione ed estrazione allontanano il vapore d'acqua prodotto. L'umidità finale deve essere controllata, perché troppa acqua o un'asciugatura eccessiva cambiano lavorabilità e stabilità. La macchina deve inoltre mantenere il nastro continuo mentre cambiano temperatura, tensione e resistenza del foglio. Una rottura interrompe questa continuità e comporta scarto e ripristino della marcia.

Un bilancio ipotetico permette di capire il rapporto fra presse ed essiccatoio. Seguiamo una tonnellata, cioè 1.000 kg, di solidi secchi conservati durante il passaggio. Con secchezza del 45%, il nastro pesa 2.222,2 kg: 1.000 kg sono solidi e 1.222,2 kg acqua. Al 50% pesa invece 2.000 kg, metà solidi e metà acqua. La migliore pressatura ha già spostato fuori dal foglio 222,2 kg d'acqua prima di scaldarlo nella sezione successiva.

Supponiamo che entrambe le vie debbano arrivare allo stesso prodotto al 90% di solidi, valore scelto per il calcolo e non specifica universale di consegna. Con i medesimi 1.000 kg secchi, il prodotto finale contiene 111,1 kg d'acqua.

Partendo dal 45%, l'essiccatoio deve quindi evaporare 1.111,1 kg d'acqua; partendo dal 50%, ne deve evaporare 888,9. I 222,2 kg rimossi in più dalle presse riducono del 20% la quantità da evaporare nel primo caso. Cinque punti percentuali di secchezza hanno così una conseguenza consistente sul carico termico successivo.

Il 20% riguarda l'acqua da evaporare, non un risparmio automatico del 20% di combustibile. Bisogna scaldare il materiale, compensare le perdite e gestire ventilazione, vapore e recupero di calore. Anche migliorare la pressatura richiede apparecchiature e regolazione. Il bilancio mostra però dove nasce il vantaggio: acqua eliminata come liquido invece che trasformata in vapore. Il margine disponibile dipende dalle proprietà che il foglio deve conservare e dalla macchina effettivamente utilizzata.

Le stesse operazioni spiegano rischi concreti per chi lavora. I punti di contatto fra rulli, feltri e nastro possono trascinare una persona; i cilindri e i circuiti di vapore introducono superfici calde e pressione. Ripari e dispositivi che impediscono accessi pericolosi devono accompagnarsi a procedure per pulizia e manutenzione. Prima di intervenire occorre isolare le energie e impedire il riavvio inatteso. Raggiungere un punto sporco durante la marcia non è equivalente a raggiungerlo con la macchina fermata e resa sicura.

L'acqua rimossa non sparisce tutta dalla fabbrica: una parte torna alla preparazione dell'impasto, una parte viene trattata, un'altra esce come vapore. La riduzione dell'acqua nel foglio e la riduzione del prelievo dal bacino sono perciò problemi collegati, ma richiedono bilanci diversi.

Un circuito chiuso resta un impianto con scambi

Le acque bianche possono riportare alla ricetta fibre fini e cariche che altrimenti andrebbero perse. La stessa acqua attraversa più volte preparazione e macchina, perciò il volume che circola internamente può superare di molto quello prelevato dall'esterno. Il prelievo misura quanto entra da fiume, falda o altra fonte; il consumo riguarda la parte non restituita allo stesso bacino nelle medesime condizioni di disponibilità, per esempio perché evapora. Lo scarico misura invece l'acqua restituita dopo trattamento. Chiamare tutti questi flussi «acqua usata» nasconde ciò che l'impianto fa davvero.

Ridurre il ricambio aumenta la concentrazione di sali, sostanze organiche e contaminanti. Possono crescere depositi, schiume e corrosione, oppure peggiorare qualità e continuità del foglio. La chiusura del circuito incontra quindi un limite nella qualità dell'acqua necessaria al processo. Spurghi e trattamento permettono di controllare l'accumulo; una buona separazione della materia può recuperare risorse senza riportare tutti i contaminanti alla macchina. La regolazione deve considerare insieme quantità e composizione delle correnti.

Gli effluenti vengono trattati con operazioni adatte ai carichi presenti: separazione di solidi, trattamento biologico e altre fasi secondo il sito. La domanda chimica di ossigeno è un indicatore dell'ossigeno equivalente necessario a ossidare chimicamente le sostanze presenti; non è una sostanza riversata nel fiume. Concentrazione e portata determinano insieme il carico restituito. Uno scarico diluito può trasportare una massa rilevante se il volume è grande, mentre uno scarico ridotto richiede comunque controllo della qualità. Temperatura e condizioni del corpo idrico completano la valutazione locale.

Per dare ordine di grandezza al punto di uscita, il BREF riporta intervalli di refluo dopo trattamento associati alle migliori tecniche disponibili del riferimento 2014–2015, come medie annue. Per cartiere da fibre recuperate senza disinchiostrazione indica 1,5–10 metri cubi per tonnellata di carta o cartone vendibile, prima delle successive trasformazioni; con disinchiostrazione, 8–15. Le carte igienico-sanitarie, dette tissue, disinchiostrate appartengono a una categoria distinta. Questi valori non misurano prelievo, evaporazione o circolazione interna e non sono medie osservate del settore. Rendono visibile il diverso insieme di operazioni, senza dimostrare una graduatoria ambientale fra fogli con funzioni differenti.

Il trattamento sposta una parte della materia nei fanghi. Quelli separati inizialmente possono contenere fibre e cariche; quelli biologici comprendono la biomassa del processo di depurazione. La disidratazione ne riduce il volume da movimentare, mentre destinazione e possibilità di recupero dipendono dalla composizione e dai trattamenti ammessi. Il loro peso umido include acqua: confrontarlo direttamente con la massa secca delle fibre farebbe apparire maggiore la perdita di materiale utile.

Anche l'energia entra con forme e destinazioni diverse. Pompe, raffinatori, aspirazione e azionamenti richiedono elettricità; evaporazione del liquore ed

essiccazione richiedono calore. Un sito kraft può produrre vapore ed elettricità dal liquore nero e utilizzare residui legnosi in altre caldaie. Una cartiera che acquista pasta riceve invece una materia già trattata, con una parte dei consumi avvenuta altrove. Confrontare soltanto i contatori dei due siti trasferirebbe fuori dal bilancio l'energia della pasta acquistata.

Per il 2024 Cepi statistics riporta un'intensità di energia primaria di 13,29 gigajoule per tonnellata, riferita insieme a market pulp e carta e cartone. Il sottoperimetro energetico esclude Grecia, Ungheria, Romania e Slovenia. L'energia primaria considera le fonti prima delle trasformazioni; il denominatore evita di contare nuovamente la pasta integrata consumata sul posto. Il valore descrive quell'insieme produttivo, non l'energia necessaria a qualunque tonnellata di carta. Nello stesso perimetro la biomassa forniva il 66% dell'energia dei combustibili consumati: la quota riguarda i combustibili, non tutta l'energia primaria, e non dimostra un impatto climatico nullo.

Combustione, recupero e depurazione producono emissioni e residui da controllare. Particolato e composti dello zolfo richiedono misure diverse da quelle dei gas serra; il loro controllo risponde a pressioni sull'aria differenti da quelle sul clima. Recuperare energia non elimina queste correnti. Le variazioni o fermate di un'unità possono ripercuotersi sulle altre, rendendo necessaria una gestione coordinata. Per lavoratori e comunità contano inoltre concentrazioni ed esposizioni nei luoghi interessati: una massa annuale al camino, o la presenza di un odore, non basta a quantificare un effetto sanitario.

La qualità rende possibile la consegna

Il foglio asciutto può richiedere altre lavorazioni prima della vendita. La patinatura applica pigmenti e leganti per modificare superficie e comportamento nella stampa; aggiunge materia e richiede a sua volta asciugatura. La calandratura fa passare il foglio fra rulli per regolarne lisciatura, brillantezza e spessore, senza aggiungere uno strato. Ridurre le irregolarità può migliorare una prestazione e alterarne altre: la finitura deve rispettare la struttura richiesta, oltre all'aspetto.

Il nastro viene avvolto e tagliato nelle bobine o nei fogli commerciali. Nella movimentazione delle bobine, il rischio di schiacciamento richiede sostegni, attrezzature e percorsi che impediscano spostamenti incontrollati.

L’identificazione del lotto accompagna il materiale fino alla consegna, insieme alle caratteristiche che ne rendono possibile la successiva lavorazione.

La grammatura esprime la massa del foglio per metro quadrato nelle condizioni di prova dichiarate. Comprende fibre, materiali aggiunti e umidità presente; non equivale alla massa delle sole fibre secche. Misurarla insieme a spessore e umidità consente di distinguere fogli apparentemente simili. Le prove pertinenti cambiano con la destinazione: la carta grafica richiede una superficie adatta alla stampa, il tissue bilancia morbidezza e assorbimento, i materiali per imballaggio devono raggiungere proprietà meccaniche coerenti con la trasformazione prevista. Le specifiche rendono confrontabili i lotti, ma non rendono intercambiabili tutti i gradi. Anche la stessa massa per superficie può accompagnarsi a diversa compattezza, porosità e risposta meccanica, secondo impasto e lavorazione.

Il caso italiano mostra quanto produzione del foglio e approvvigionamento della fibra siano distinti. Per il 2024 Eurostat stima 7,98 milioni di tonnellate di carta e cartone prodotti in Italia e registra importazioni di pasta di legno per 3,35 milioni di tonnellate. La produzione nazionale di pasta non è pubblicata in quella serie per riservatezza: l’assenza del valore non significa zero e non consente di calcolare un tasso di autosufficienza. Il flusso importato rende comunque concreta la necessità di ottenere dall’esterno una parte della materia da trasformare.

Assocarta, l’associazione italiana dei produttori di carta, cartoni e paste per carta, indica inoltre per il 2024 un utilizzo di carta da riciclare pari a 5,21 milioni di tonnellate, nelle proprie elaborazioni e stime sugli input. È materiale in ingresso, non fibra già incorporata nei prodotti. Le due fonti descrivono fasi e perimetri distinti: le cifre non formano un bilancio secco sommabile. Il sistema cartario può dunque combinare una forte base di recupero con acquisti di pasta, secondo le qualità da produrre.

Il materiale consegnato dipende infine dalla capacità effettivamente utilizzata. Nell’area Cepi, nel 2024, a 95,133 milioni di tonnellate annue di capacità cartaria corrispondevano 78,630 milioni di tonnellate prodotte, con un tasso operativo dell’82,7%. La capacità disponibile non garantisce da sola che ricetta, energia, domanda e funzionamento degli impianti permettano di trasformarla in bobine vendibili.

La disponibilità è una prestazione verificabile

Una fibra abbondante acquista utilità industriale quando può entrare in una ricetta capace di dare il foglio richiesto. Conservare più materia aumenta la resa, ma può lasciare caratteristiche incompatibili con il prodotto; separarne una parte cambia la qualità e richiede circuiti per recuperare sostanze ed energia. Anche la carta recuperata torna a essere materia prima attraverso una preparazione che deve controllare contaminanti e proprietà, con perdite da riconoscere.

La macchina cartaria collega queste scelte alla gestione dell'acqua. La rete viene costruita nella sospensione, consolidata dalle presse e portata all'umidità richiesta mediante calore. Ogni regolazione influisce su una fase successiva: il trattamento che favorisce il legame può ostacolare il drenaggio, mentre una migliore rimozione meccanica può alleggerire l'essiccazione. Il risultato utile è il materiale che conserva le prestazioni fino alla consegna.

Per questo produrre carta e disporre autonomamente della pasta restano capacità differenti. Scambi e recupero alimentano l'impasto; gli impianti gli danno una forma controllata. Il lotto commerciabile riunisce quantità misurata, superficie, umidità e proprietà verificabili. La disponibilità effettiva emerge da questa catena di trasformazioni: non coincide con la semplice somma delle fibre disponibili né con la potenzialità delle macchine installate.

Fonti e riferimenti

FAO — Global Forest Products Facts and Figures 2024, 2025. Produzione di carta e cartone e consumo di carta recuperata, pp. 17 e 19.

https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd8005en

Commissione europea, Joint Research Centre — Production of Pulp, Paper and Board, BREF, 2015. Rese p. 110 e tabella 5.1; kraft pp. 195–206; pressatura p. 755; reflui pp. 784–785; definizioni pp. 840 e 844.

https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/PP_revised_BREF_2015.pdf

Cepi statistics — Key Statistics 2025, pubblicato nel 2026. Colonna 2024 rivista: pasta, materiali non fibrosi e capacità pp. 4–5; energia pp. 29–30.

https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2026/07/Cepi-Key-Statistics-2025-FINAL.pdf

Eurostat — Produzione e commercio di prodotti forestali, dataset for_pp. Italia 2024: carta e cartone prodotti, pasta di legno importata e riservatezza della produzione di pasta. Consultazione 1 ottobre 2026.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/for_pp/default/table?lang=en

Assocarta — Materie prime 2024. Elaborazioni e stime sull'utilizzo di carta da riciclare; infografica Bio-circolarità cartaria.

https://www.assocarta.it/it/dati-di-settore/materie-prime.html

Sjöstrand, Karlsson, Barbier e Henriksson — Hornification in commercial chemical pulps: Dependence on drying temperature, BioResources 19(4), 7042–7056, 2024.

https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/hornification-in-commercial-chemical-pulps-dependence-on-drying-temperature/

ISO — ISO 536:2019, Paper and board — Determination of grammage. Scheda del metodo.

https://www.iso.org/standard/77583.html

04.28 – Mercati e prezzi delle materie prime

Una quotazione espressa in dollari per tonnellata sembra condensare un mercato in un solo numero. Per una fabbrica, tuttavia, quel numero lascia aperte le domande decisive: quale materiale è disponibile, in quale forma, dove si trova, quando arriverà e quali condizioni regolano il pagamento? La produzione richiede una fornitura utilizzabile, mentre la quotazione descrive un riferimento con un perimetro preciso. La distanza fra questi due oggetti spiega perché imprese che osservano lo stesso mercato possano sostenere costi diversi.

Come si forma il prezzo di una materia prima o di un semilavorato, e perché la quotazione pubblicata può essere diversa dal prezzo che paga una fabbrica? La risposta attraversa specifiche tecniche, formule contrattuali, trasporto, valuta e tempo. Richiede anche di distinguere il costo dell'acquisto dal rischio che quel costo cambi prima della consegna.

Il rame permette di seguire questi passaggi con unità riconoscibili e calcoli leggibili. Gli esempi riguarderanno però operazioni separate: la vendita di un concentrato, l'acquisto di metallo raffinato e la copertura di una fornitura futura. Legno, carta e materie seconde aiutano a riconoscere gli stessi problemi fuori dalla metallurgia. L'obiettivo è capire come un riferimento pubblico diventi una condizione concreta dello scambio industriale.

Il prezzo comincia dalla specifica

Una tonnellata di minerale, una di concentrato e una di metallo raffinato non rappresentano la stessa quantità di materiale utile. Nel minerale il componente ricercato è mescolato alla roccia; il concentrato aumenta la sua presenza, ma conserva altre sostanze; il raffinato risponde a requisiti di purezza e forma. Un semilavorato aggiunge una trasformazione che rende il materiale adatto a un impiego successivo. Confrontare i prezzi senza distinguere questi oggetti significa confrontare prodotti diversi usando soltanto un'unità di massa comune.

Anche all'interno della stessa categoria servono informazioni ulteriori. Per un concentrato contano tenore metallico, umidità e impurità. Il tenore indica quanto metallo è presente nella massa considerata; l'umidità distingue la massa spedita da quella secca sulla quale possono essere calcolati contenuto e corrispettivi. Un'impurità può rendere più costoso il trattamento o limitare gli impianti che accettano il lotto. La composizione modifica quindi sia il valore dei componenti recuperabili sia il costo dei servizi necessari per ottenerli.

La forma commerciale conta quanto la composizione. Una fabbrica che impiega vergella non risolve necessariamente il proprio fabbisogno acquistando catodi: occorre un passaggio di trasformazione, con costi, tempi e requisiti propri. Il relativo corrispettivo può apparire separatamente come *conversion charge*, cioè costo della trasformazione nella forma richiesta, oppure essere incorporato nel prezzo del semilavorato. Prima di aggiungerlo al riferimento bisogna capire che cosa comprende già l'offerta.

Il problema ricompare nel legno. Un tronco e un pannello non sono intercambiabili perché entrambi provengono da un albero; dimensioni, umidità, lavorazione e conformità definiscono prodotti commerciali differenti. Nella filiera della carta, pasta di cellulosa e carta pronta per la stampa hanno specifiche e funzioni diverse. Questi richiami non richiedono una quotazione unica della filiera: mostrano perché il prezzo deve essere associato al prodotto effettivamente scambiato.

Per le materie seconde diventano centrali selezione, contaminazione e omogeneità. Un rottame pulito può essere più utile a un impianto di un lotto con la stessa massa ma composizione incerta. Il prezzo inferiore di quest'ultimo può accompagnarsi a costi maggiori di controllo e preparazione. Neppure l'origine secondaria implica automaticamente uno sconto: disponibilità e qualità possono rendere prezioso un materiale conforme.

La specifica delimita così un insieme di sostituzioni possibili. Una differenza di qualità può produrre un aggiustamento di prezzo, ma una non conformità può escludere del tutto il lotto dall'impiego previsto. Quantità, tolleranze e certificati completano l'oggetto dell'acquisto. Soltanto dopo averlo identificato è possibile chiedersi se due offerte siano confrontabili.

La descrizione tecnica diventa quindi parte dell'accordo economico. Se venditore e compratore misurano diversamente umidità, contenuto o

conformità, possono attribuire valori diversi alla stessa spedizione. Stabilire come si campiona il materiale e come si accertano le caratteristiche limita questa incertezza. Il prezzo unitario richiede una quantità riconosciuta da entrambe le parti: prima ancora della negoziazione sul numero, occorre concordare a quale massa, forma e qualità quel numero si applicherà.

Un riferimento rende confrontabili gli scambi

La standardizzazione riduce il numero di caratteristiche da negoziare ogni volta. Il contratto principale della London Metal Exchange, la borsa dei metalli di Londra, riguarda rame Grade A in catodi di marchi approvati, con un lotto di 25 tonnellate e prezzi espressi in dollari per tonnellata. Queste caratteristiche, riportate nella scheda consultata il 1° ottobre 2026, definiscono il materiale consegnabile contro quel contratto. Non descrivono ogni forma di rame commercializzata né tutti i contratti della borsa. [1]

Una quotazione costruita entro questo perimetro offre un punto comune a compratori e venditori. Il riferimento *cash* riguarda la scadenza ravvicinata prevista dal mercato; la denominazione non significa pagamento informale in contanti. La metodologia LME stabilisce come sono determinati i prezzi ufficiali. Il numero pubblicato acquista significato attraverso regole, qualità e scadenza, e può essere richiamato anche in contratti fisici conclusi fuori dalla borsa. [2]

Non ogni materiale industriale coincide però con una specifica borsistica. Un prodotto con qualità, forma o consegna particolari può richiedere un altro riferimento. Le valutazioni di prezzo, spesso indicate come *price assessments*, raccolgono informazioni su transazioni, offerte e richieste per stimare un livello negoziabile entro una finestra definita. Fastmarkets descrive una procedura che acquisisce dati da compratori, venditori e intermediari e li valuta secondo specifiche e criteri dichiarati. [3]

Una valutazione non equivale necessariamente al prezzo di una singola transazione. La sua leggibilità dipende dal metodo: quali osservazioni sono ammesse, come sono trattati i dati anomali, quale località e quale condizione di consegna sono rappresentate? Questo tipo di riferimento può servire anche dove esiste una borsa, perché il mercato fisico osservato non coincide con il prodotto standard. Il metodo documentato da un rilevatore non va però attribuito automaticamente a tutti gli altri.

Per legno, carta o altri semilavorati la domanda utile rimane la stessa: il riferimento riguarda proprio il grado e la consegna dell'offerta? La comparabilità può derivare dalla descrizione del prodotto e da una formula bilaterale, senza che l'intera filiera abbia un unico prezzo. Due contratti possono usare il medesimo riferimento e differire per servizi, quantità, calendario o revisione del corrispettivo. Un prezzo negoziato fra imprese è più specifico e spesso meno osservabile dall'esterno, ma ciò non lo rende economicamente secondario.

Gli indici statistici rispondono a una domanda ancora diversa. Misurano il movimento dei prezzi nel tempo per un insieme di prodotti e transazioni, con ponderazioni e criteri di comparabilità. Gli indici industriali alla produzione e all'importazione distinguono inoltre il punto della filiera e il mercato osservato. Non indicano automaticamente quanto costi oggi una tonnellata di materiale acquistabile. [4]

Anche la finestra temporale del riferimento deve essere riconoscibile. Un contratto può richiamare il prezzo di un giorno oppure la media di un periodo. La media attenua il peso di una singola osservazione, ma descrive quell'intervallo; non coincide necessariamente con il prezzo della data di consegna. Confrontare offerte richiede quindi di leggere insieme specifica e regola di fissazione, senza trattare ogni numero pubblicato come immediatamente applicabile all'ordine.

Questi strumenti diventano utili quando si riconosce la domanda alla quale ciascuno risponde. La borsa permette di negoziare un contratto standard, mentre una valutazione descrive il livello di un mercato fisico secondo un metodo dichiarato. Il contratto porta il riferimento dentro le condizioni dell'operazione e l'indice consente di seguirne il movimento statistico nel tempo. Per arrivare al valore del lotto reale occorre quindi scegliere il riferimento pertinente e capire come applicarlo al materiale scambiato.

Il metallo contenuto non è il lotto pagato

Per un concentrato, il passaggio dalla quotazione al corrispettivo richiede almeno due valutazioni collegate: quanto vale il metallo pagabile e quanto costa il trattamento del materiale che lo contiene. Il compratore non acquista la massa totale come se fosse metallo puro. Analisi, umidità e regole

contrattuali determinano la quantità alla quale applicare il riferimento; trattamento, raffinazione e penalità modificano il risultato.

Un contratto storico rende visibile questa struttura. Il Copper Concentrate Sales Agreement fra Terrane Metals e Pan Pacific Copper, datato 15 ottobre 2014 e depositato presso la Securities and Exchange Commission statunitense, combina pagamenti per rame, oro e argento con deduzioni e possibili aggiustamenti. Per il rame richiama la media delle quotazioni ufficiali LME cash nel periodo stabilito. Le clausole includono trattamento, raffinazione e possibili penalità. Parte dei coefficienti è oscurata: il documento prova l'esistenza della formula, senza fornire parametri universali o condizioni commerciali attuali. [5]

Consideriamo quindi un esempio interamente ipotetico, distinto da quel contratto. Un lotto pesa 100 tonnellate e contiene il 10% d'acqua, misurato sulla massa umida. La massa secca è 90 tonnellate. Se il tenore di rame è il 25% sul secco, il contenuto metallico è 22,5 tonnellate. Queste tre quantità descrivono oggetti diversi: materiale spedito, materiale senza acqua e rame contenuto.

Supponiamo che il contratto riconosca come pagabile il 96% del contenuto di rame. Le tonnellate remunerate diventano 21,6: il 96% di 22,5. Questa percentuale è una condizione economica dell'esempio, non la resa tecnica di un impianto. Non autorizza a concludere che il resto del metallo sia necessariamente perso nel processo. A una quotazione ipotetica di 9.000 dollari per tonnellata pagabile, il valore lordo del rame è 194.400 dollari.

Il trattamento è fissato a 80 dollari per tonnellata secca: su 90 tonnellate comporta una deduzione di 7.200 dollari. La raffinazione è invece calcolata sul rame pagabile convertito in libbre. Una tonnellata corrisponde a circa 2.204,62 libbre: le 21,6 tonnellate pagabili equivalgono quindi a circa 47.620 libbre. Applicando 0,08 dollari per libbra si ottiene un costo di circa 3.809,6 dollari, calcolato prima di arrotondare la quantità convertita. Una penalità di 25 dollari per tonnellata secca aggiunge una deduzione di 2.250 dollari. Nell'ipotesi scelta non sono presenti crediti per coprodotti.

Sottraendo queste tre voci dal valore lordo si ottengono circa 181.140,4 dollari. Il risultato equivale a 2.012,7 dollari per tonnellata secca oppure a 1.811,4 dollari per tonnellata umida. Nessuno dei due valori è il prezzo di una tonnellata di rame raffinato: cambia il denominatore, mentre il lotto rimane lo

stesso. La quotazione di 9.000 dollari è stata applicata alle 21,6 tonnellate pagabili, non alle 100 spedite.

Il risultato è un valore contrattuale prima del trasporto e di altri aggiustamenti eventualmente previsti. Non è l'utile della miniera: non sono stati sottratti estrazione, concentrazione, investimenti, finanziamento e tutti gli altri costi dell'impresa. I coefficienti servono a rendere leggibile il meccanismo e non sono ricavati dal contratto Terrane.

Nella pratica il contratto può prevedere una fatturazione provvisoria e un conguaglio, collegati alle analisi e al periodo di quotazione concordato. Il valore riconosciuto inizialmente può così essere aggiornato quando diventano disponibili gli elementi necessari alla determinazione finale. Questo calendario riguarda l'accertamento commerciale e il pagamento: non implica che il prezzo venga sempre fissato dopo la raffinazione. Occorre distinguere il momento della spedizione, quello della misura del lotto e quello del riferimento utilizzato.

Il riferimento del metallo e il servizio metallurgico possono inoltre muoversi diversamente. Una maggiore disponibilità di concentrato rispetto alla capacità delle fonderie cambia le condizioni di trattamento, anche senza un movimento identico del prezzo del raffinato. Un aumento della quotazione non si trasferisce quindi necessariamente nella stessa proporzione al ricavo del venditore. Impurità e coprodotti aggiungono altre differenze: alcune sostanze generano un valore recuperabile, altre restringono le possibilità di lavorazione.

La formula commerciale collega una specifica analizzata a un riferimento e a un servizio. Chiarito il valore del lotto, resta però un passaggio ulteriore: chi lo acquista deve ottenere il materiale nel luogo e nel momento necessari, sostenendo le componenti di costo che il riferimento non comprende.

La quotazione deve arrivare alla fabbrica

Per un'impresa italiana che trasforma materiali acquistati sul mercato, il confronto fra offerte richiede di ricondurle a una fornitura utilizzabile. Il benchmark può riguardare metallo standard in un sistema di magazzini; l'ordine può richiedere una forma lavorata, consegna presso lo stabilimento e pagamento in una valuta diversa. Premio fisico, trasformazione, trasporto, assicurazione e condizioni finanziarie avvicinano il riferimento all'acquisto effettivo.

Il premio non è necessariamente una percentuale fissa. Può remunerare disponibilità immediata, qualità, certificazione o consegna in una località con poca offerta. Può cambiare mentre il benchmark rimane stabile. Anche uno sconto richiede interpretazione: il materiale meno caro potrebbe imporre selezione, controlli o preparazione aggiuntivi. Nella carta da macero e nei rottami la conformità del lotto può dunque incidere sul costo utile alla produzione quanto sul prezzo iniziale.

Le componenti devono essere sommate senza duplicazioni. Se il prezzo comprende già trasporto o trasformazione, aggiungerli di nuovo gonfia il costo. Le condizioni di consegna aiutano a individuare obblighi e rischi. Nelle regole marittime FOB e CIF il rischio passa quando la merce è a bordo al porto di spedizione; nella CIF il venditore paga però nolo e assicurazione fino al porto di destinazione indicato. Il punto fino al quale si paga un servizio non coincide necessariamente con quello del passaggio del rischio. Gli Incoterms non fissano da soli prezzo, pagamento o trasferimento della proprietà. [6]

Un secondo esempio ipotetico riguarda l'acquisto di 50 tonnellate di metallo raffinato, indipendente dal concentrato precedente. A un riferimento di 9.000 dollari per tonnellata si aggiungono 120 dollari di premio e 80 di trasporto e assicurazione. La fornitura costa così 9.200 dollari per tonnellata, ossia 460.000 dollari complessivi. Nell'esempio non si aggiungono altre voci.

Se un euro vale 1,10 dollari, occorrono 418.181,82 euro. Se vale 1,00 dollari, ne occorrono 460.000: 41.818,18 euro in più. Materiale, quantità, benchmark, premio e trasporto sono rimasti invariati; è cambiato soltanto il rapporto fra le valute. I tassi sono ipotetici. Non rappresentano cambi BCE osservati, condizioni bancarie o costi di conversione effettivi; i cambi di riferimento BCE hanno peraltro funzione informativa e non fissano automaticamente il tasso del contratto. [7]

L'esperimento isola una variabile. Per osservare gli acquisti italiani nel loro insieme bisogna invece passare a un paniere statistico. Nel rilascio Istat del 17 febbraio 2026, i prezzi all'importazione di dicembre 2025 per metallurgia e prodotti in metallo, esclusi macchine e impianti, aumentano su dicembre 2024 dell'1,7% per provenienze dall'area euro e del 5,9% dall'area non euro. I dati di dicembre sono provvisori in quella pubblicazione. [8]

L'indice considera prezzi di transazione in euro su base CIF alla frontiera italiana, con riferimento 2021=100. Il settore comprende prodotti diversi dal solo rame e la provenienza geografica non identifica la valuta di fatturazione. Il divario fra le due variazioni non misura quindi l'effetto del dollaro e non conferma quantitativamente l'esempio precedente. La frontiera statistica non coincide inoltre necessariamente con il porto indicato in un contratto CIF.

L'indice segue prezzi comparabili e tiene conto della qualità. Un valore medio unitario, ottenuto dividendo il valore delle importazioni per la quantità, risente invece anche della composizione dei flussi. Se cambiano prodotti e gradi importati, può cambiare senza un aumento equivalente dei prezzi confrontabili. [4] La statistica descrive così un movimento aggregato, mentre l'ordine stabilisce il costo di una fornitura precisa. Entrambi richiedono infine una data.

La disponibilità ha una data

Un materiale conforme ma disponibile dopo il momento necessario può non soddisfare il fabbisogno della fabbrica. La data entra nel valore economico perché separa il materiale utilizzabile subito da quello che richiede attesa. Pagare la disponibilità immediata può evitare un'interruzione; acquistare in anticipo può garantire continuità, ma immobilizza capitale e richiede spazio, assicurazione e gestione delle scorte. La stessa quantità assume quindi funzioni diverse secondo il calendario produttivo.

Le scorte osservabili non coincidono con tutte le scorte esistenti, e queste ultime non coincidono con tutte le quantità acquistabili. I magazzini di una borsa rappresentano un perimetro regolato: materiale idoneo alla consegna e registrato secondo determinate procedure. Produttori, commercianti e utilizzatori possono conservare quantità fuori da quel sistema. Anche all'interno dei magazzini il metallo appartiene a qualcuno e non è automaticamente offerto a ogni compratore.

Un *warrant* LME documenta il diritto a uno specifico lotto di metallo approvato. La distinzione fra materiale sotto warrant, fuori warrant e con warrant cancellato modifica la lettura delle informazioni pubblicate. In quest'ultimo caso il warrant è stato cancellato in vista del ritiro fisico, mentre il metallo si trova ancora nel magazzino: la cancellazione non prova che l'uscita sia già avvenuta o che il ritiro sia già programmato. Dal 1° aprile 2025 la LME ha

ampliato la visibilità del metallo fuori warrant nei magazzini autorizzati, con rapporti giornalieri e accesso pubblico ritardato di tre giorni lavorativi. Questo ampliamento riguarda il sistema osservato, non un censimento delle scorte mondiali. [9]

Anche una quantità visibile può trovarsi lontano dall'utilizzatore o avere caratteristiche diverse da quelle richieste. Viceversa, una scorta non visibile alla borsa può essere disponibile presso un fornitore. Per interpretare un dato bisogna distinguere registrazione, proprietà e possibilità di acquisto. Una variazione delle tonnellate registrate non basta da sola a dimostrare che tutte le fabbriche abbiano più o meno materiale utilizzabile.

Il prezzo del tempo compare anche nella curva a termine, cioè nell'insieme dei prezzi associati alle diverse scadenze. Quando quello per una scadenza futura supera il prezzo ravvicinato si parla normalmente di *contango*. La differenza può riflettere il costo di finanziare l'acquisto e conservare il materiale, inclusi stoccaggio e assicurazione. Possedere oggi una merce da utilizzare più avanti richiede infatti risorse durante l'intervallo. [10]

Quando il prezzo ravvicinato supera quello futuro si parla di *backwardation*. Il materiale pronto può avere un valore particolare perché consente di produrre immediatamente e soddisfare un bisogno che la consegna successiva non coprirebbe. Questa configurazione può essere collegata alla disponibilità immediata, ma non consente di dedurre una causa unica senza altre evidenze. Qualità, luogo e condizioni finanziarie continuano a delimitare ciò che la curva rappresenta.

La curva non è una previsione certa del prezzo che si osserverà alla scadenza. Riunisce condizioni di negoziazione presenti, costi del tempo, aspettative e distribuzione del rischio. Un prezzo futuro quotato indica a quali condizioni un contratto può essere negoziato in quel momento. Per l'impresa resta da valutare come collegarlo alla merce effettiva: la conservazione di un metallo standard non equivale a quella di un materiale deteriorabile o di un concentrato umido.

L'interesse per una scadenza futura nasce dunque dal calendario dell'utilizzatore. Se il fabbisogno è noto ma il prezzo può cambiare prima dell'acquisto, l'impresa può cercare di ridurre quella esposizione. Il contratto scelto determina quale parte del rischio viene trasferita e quale rimane.

Il contratto distribuisce il rischio

Un accordo per una consegna fisica futura e un future standardizzato non svolgono automaticamente la stessa funzione. Il primo riguarda una fornitura con qualità, quantità, calendario e obblighi concordati fra le parti. Può fissare il prezzo oppure indicizzarlo, lasciando condizioni di revisione. Il secondo è negoziato in borsa secondo regole comuni e può essere usato per compensare economicamente un movimento del riferimento. La consegna materiale dipende dalle caratteristiche del contratto e dalla posizione mantenuta fino alla scadenza.

Un utilizzatore che teme un aumento del riferimento può assumere una posizione lunga: il risultato del future migliora quando quel riferimento sale. Il maggiore costo del materiale può così essere compensato da un risultato sul derivato. La relazione rimane però imperfetta se il prezzo fisico riguarda una qualità, un luogo o una data diversi. La *base* è il differenziale fra il prezzo fisico locale e il future utilizzato; il rischio di base consiste nella possibilità che quel differenziale cambi. [11]

Il terzo esempio, anch’esso ipotetico e autonomo, riguarda 100 tonnellate da acquistare dopo tre mesi. Oggi il prezzo fisico locale è 9.300 dollari per tonnellata e il future è a 9.000. La base è quindi positiva per 300 dollari. L’utilizzatore assume una posizione lunga equivalente a 100 tonnellate: quattro lotti da 25 tonnellate se si impiega il contratto principale LME sul rame descritto in precedenza.

Alla conclusione delle operazioni, il prezzo fisico è salito a 10.100 dollari e il future a 9.700. Il materiale costa 800 dollari in più per tonnellata; il risultato positivo sul future è invece 700 dollari per tonnellata. Sottraendo questo risultato dal costo fisico si ottengono 9.400 dollari per tonnellata, ossia 940.000 dollari per l’intero acquisto. La copertura ha compensato gran parte dell’aumento, senza riportare il costo ai 9.300 dollari iniziali.

La differenza residua è leggibile nella base: da 300 è passata a 400 dollari per tonnellata. Il suo aumento lascia all’acquirente 100 dollari per tonnellata di aggravio, 10.000 dollari complessivi. Il risultato non è neppure un acquisto garantito a 9.000 dollari: il future protegge il riferimento, mentre il costo economico finale incorpora il differenziale fisico della scadenza.

Il calcolo assume quantità abbinate e conclusione coerente delle operazioni. Non include commissioni, finanziamento o cambio. Una fornitura diversa per forma, grado, quantità o data potrebbe introdurre altri scostamenti. La copertura del metallo non elimina inoltre il rischio che il fornitore ritardi, che il lotto risulti non conforme o che il premio locale aumenti. Gli strumenti contrattuali distribuiscono esposizioni specifiche; non rendono certa ogni dimensione dell'approvvigionamento.

Esiste poi un problema di liquidità. Il margine iniziale è una garanzia per mantenere la posizione, non un anticipo sulla merce. Se il mercato si muove contro il future, possono essere richiesti versamenti prima che la posizione fisica compensativa produca il relativo vantaggio monetario. Un'impresa può quindi aver ridotto l'incertezza economica complessiva e avere comunque bisogno di cassa nel breve periodo. [12]

La direzione della compensazione dipende dall'esposizione. Nell'esempio l'utilizzatore si protegge da un aumento; se il riferimento scendesse, la posizione lunga potrebbe perdere valore mentre l'acquisto fisico diventerebbe meno costoso. Il beneficio sull'acquisto successivo non fornisce però automaticamente il denaro richiesto oggi come garanzia. Questa differenza fra risultato economico e disponibilità monetaria spiega perché anche una copertura coerente debba essere compatibile con la tesoreria dell'impresa.

Le regole di regolamento contano. Le spiegazioni CME descrivono una rivalutazione giornaliera con trasferimenti monetari; per i contratti fisici sui metalli non ferrosi la LME distingue variazione realizzata e contingente, e gli utili di rivalutazione non sono automaticamente prelevabili prima del regolamento. [13] Il risultato dell'esempio riguarda operazioni concluse: non va letto come liquidità LME necessariamente disponibile durante tutti i tre mesi.

Ridurre l'esposizione al benchmark lascia dunque aperte due domande: come sostenere i flussi finanziari e come ottenere il materiale conforme. Anche una copertura efficace non aggiunge produzione. Per capire se l'offerta possa aumentare occorre passare dal calendario dell'acquisto e del contratto a quello degli impianti e degli investimenti.

L’offerta risponde con un altro calendario

Il prezzo può cambiare rapidamente mentre le condizioni che permettono di produrre richiedono tempo. Questo non significa che tutta l’offerta fisica sia immobile: disponibilità esistenti e utilizzo della capacità possono cambiare prima della costruzione di nuovi impianti. Bisogna però distinguere la possibilità di ottenere materiale dalle strutture già operative dall’espansione della capacità produttiva. La copertura di un acquisto agisce sull’esposizione monetaria, senza risolvere questo secondo problema.

Il prezzo di mercato non coincide con il costo di ogni produttore. Impianti con tecnologie, materie prime in ingresso, energia e investimenti diversi possono sostenere costi differenti. Un aumento del riferimento può migliorare il margine di una struttura esistente, ma il margine corrente non basta a giustificare un nuovo progetto. L’investitore deve confrontare costi iniziali e tempi di realizzazione con prezzi futuri incerti. Una fase favorevole potrebbe terminare prima che la nuova produzione inizi.

Anche la capacità nominale non equivale alla produzione disponibile. Manutenzione, energia, qualità delle materie prime in ingresso, personale e capitale circolante possono limitare l’attività. Una raffineria può non produrre il grado richiesto pur avendo capacità installata; una cartiera può disporre della macchina ma non delle condizioni economiche per usarla. Il segnale di prezzo incontra quindi vincoli diversi lungo la filiera, e la risposta dipende dal punto in cui si trova la limitazione.

I mercati non si muovono necessariamente insieme. Nei dati annuali World Bank aggiornati il 6 gennaio 2026, il benchmark del rame passa da una media di 9.142,14 dollari per tonnellata nel 2024 a 9.947,31 nel 2025, circa l’8,8% in più. Quello del nichel scende invece da 16.813,96 a 15.162,16 dollari per tonnellata, circa il 9,8% in meno. Sono medie nominali annue in dollari di riferimenti con qualità distinte, non prezzi degli acquisti italiani. [14]

La coppia mostra una divergenza, senza spiegarne le cause. Non misura la volatilità giornaliera e non autorizza a dedurre automaticamente scarsità, speculazione o investimenti insufficienti. Le medie possono nascondere movimenti interni all’anno. Per ricostruire una dinamica specifica servirebbero evidenze su domanda, offerta, scorte e condizioni produttive di ciascun mercato.

Un ordine di grandezza dei tempi lunghi viene dall'IEA. L'Agenzia internazionale dell'energia analizza i 35 maggiori progetti minerari entrati in produzione fra il 2010 e il 2019: dalla scoperta alla prima produzione la media supera 16 anni. [15] È un campione storico selezionato. Il dato comprende un percorso più ampio dei soli permessi e non rappresenta la durata di ogni miniera, raffineria o cartiera. Rende però concreta la distanza fra una variazione della quotazione e l'arrivo di nuova capacità estrattiva.

Nel frattempo gli effetti si distribuiscono lungo la filiera. Il produttore può beneficiare di un prezzo maggiore, mentre il trasformatore può perdere margine se non riesce a trasferire l'aumento. Scorte, indicizzazione e tempi di revisione fanno arrivare lo stesso movimento in momenti differenti. Anche il costo sociale e ambientale conserva un altro perimetro: energia e obblighi possono entrare nei costi commerciali, ma il prezzo non misura automaticamente tutti gli effetti su salute, acqua ed ecosistemi.

La quotazione è quindi una parte della risposta alla domanda iniziale. Definisce un riferimento utile per confrontare e negoziare; il prezzo della fabbrica nasce dal materiale conforme, dalla sua forma, dalle condizioni di consegna, dalla valuta e dal calendario. Nel concentrato è stato necessario separare massa spedita, contenuto e quota pagabile. Nell'acquisto consegnato il cambio ha modificato il costo in euro. Nella copertura il differenziale fisico ha lasciato una parte dell'esposizione aperta.

Questi passaggi mostrano perché il prezzo industriale non possa essere letto isolando una cifra dal contratto. La stessa quotazione può accompagnare forniture diverse; un indice può descrivere il movimento degli acquisti senza indicare il costo del singolo lotto; un derivato può compensare il riferimento senza garantire materiale o liquidità in ogni momento. La disponibilità utilizzabile resta legata a qualità, luogo e data.

Il mercato collega così tempi diversi: quello della decisione d'acquisto, quello della consegna, quello del regolamento finanziario e quello della capacità produttiva. Capire il prezzo significa riconoscere come questi calendari e queste condizioni si combinano nello scambio. Il numero pubblico diventa informazione industriale quando è ricondotto al materiale che può effettivamente entrare in produzione.

Fonti e riferimenti

[1] London Metal Exchange, Copper contract specifications, sezioni Futures e Physical; scheda consultata il 1° ottobre 2026.

https://www.lme.com/metals/non-ferrous/lme-copper/contract-specifications

[2] London Metal Exchange — Official Prices explained.

https://www.lme.com/market-data/lme-reference-prices/lme-official-price

[2] London Metal Exchange — Benchmark Methodology — Official Prices, versione 2.0, 20 maggio 2022, §§4.1 e 4.1.3.

https://www.lme.com/-/media/files/about/regulation/benchmark-regulation/lme-benchmark-methodology-official-prices.pdf

[3] Fastmarkets — Learn about our methodology.

https://help.fastmarkets.com/en_US/methodology-help

[3] Fastmarkets — Non-ferrous Metals — Methodology and price specifications, settembre 2022, pp. 4–8; riferimento metodologico storico.

https://www.fastmarkets.com/uploads/a3/cb/b5394daf4315b163e473a1ac109b/fm-mb-non-ferrous-methodology-specifications.pdf

[4] Eurostat — Industrial producer price index overview; definizioni dell’indice dei prezzi alla produzione.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Industrial_producer_price_index_overview

[4] Eurostat — Industrial import price index overview; definizioni dell’indice dei prezzi all’importazione e distinzione dai valori medi unitari.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Industrial_import_price_index_overview

[5] Terrane Metals Corp. / Pan Pacific Copper Co. Ltd., Copper Concentrate Sales Agreement, 15 ottobre 2014, SEC, exhibit 10.1, art. 7, §§7.1, 7.2(b) e 7.7. Contratto storico parzialmente oscurato.

https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1415020/000141502015000070/exhibit101ppcagreement.htm

[6] International Chamber of Commerce, Incoterms 2020, regole FOB e CIF, note esplicative e obblighi A2–A5.

https://library.iccwbo.org/content/tfb/BOOKS/BK_0049/BK_0049_05_RulesSea.htm

[7] Banca centrale europea, Euro foreign exchange reference rates, finalità informative dei cambi di riferimento.

https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/index.en.html

[8] Istat, Commercio con l'estero e prezzi all'import — Dicembre 2025, 17 febbraio 2026, figura 11 e commento pp. 8–9; metodologia pp. 25–26. Dati di dicembre provvisori nel rilascio citato.

https://www.istat.it/wp-content/uploads/2026/02/Commercio-con-lestero-e-prezzi-allimport_122025-2.pdf

[9] London Metal Exchange — LME warrants.

https://www.lme.com/sustainability-and-physical-markets/warehousing/lme-warrants

[9] London Metal Exchange — LME provides daily insight into off warrant stocks, 17 marzo 2025.

https://www.lme.com/News/Press-releases/2025/LME-provides-daily-insight-into-off-warrant-stocks

[9] London Metal Exchange — Discussion Paper on LME Warehouse Reform, 2019, §5.2, p. 20.

https://www.lme.com/-/media/Files/Physical-services/Warehousing/Warehouse-reform-2019-2020/Discussion-Paper-on-LME-Warehouse-Reform.pdf

[10] CME Group, What is Contango and Backwardation.

https://www.cmegroup.com/education/courses/introduction-to-precious-metals/what-is-contango-and-backwardation

[11] CME Group, Buying Futures for Protection Against Rising Prices. Fonte didattica sul principio della copertura e sul rischio di base, non sui parametri ipotetici del rame.

https://www.cmegroup.com/education/lessons/buying-futures-for-protection-against-rising-prices

[12] CME Group, Margin: Know What's Needed.

https://www.cmegroup.com/education/courses/introduction-to-futures/margin-know-what-is-needed

[13] CME Group — Money Calculations for Futures and Options, 10 novembre 2015.

https://www.cmegroup.com/education/articles-and-reports/money-calculations-for-futures-and-options

[13] London Metal Exchange — An introduction to LME margins.

https://www.lme.com/Education/Online-resources/LME-Digest/An-introduction-to-LME-margins

[14] World Bank, Commodity Price Data — Pink Sheet, file annuale aggiornato il 6 gennaio 2026, fogli Annual Prices (Nominal), Description e Definitions. Variazioni percentuali calcolate sui valori del file e arrotondate a un decimale.

https://thedocs.worldbank.org/en/doc/18675f1d1639c7a34d463f59263ba0a2-0050012025/related/CMO-Historical-Data-Annual.xlsx

[15] International Energy Agency, The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, 2021, sezione Reliable supply of minerals, tempi dei 35 maggiori progetti entrati in produzione nel 2010–2019.

https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/reliable-supply-of-minerals

04.29 – Trasporto e commercio dei materiali

Una tonnellata di rame raffinato in un deposito lontano e una tonnellata pronta a entrare in una fabbrica possono avere la stessa composizione, ma offrono possibilità diverse. Fra le due condizioni ci sono un viaggio, operazioni di carico e scarico, controlli, documenti e attese. Durante questo percorso il materiale occupa mezzi e spazi, può deteriorarsi e deve essere finanziato. La quotazione della materia prima fornisce un riferimento economico; la disponibilità industriale richiede che un lotto conforme arrivi dove e quando può essere utilizzato.

Come si costruisce questa disponibilità? La risposta comincia dalle proprietà del carico e attraversa una catena di impianti, persone e accordi commerciali. Nel 2024 i porti italiani hanno movimentato oltre 488 milioni di tonnellate di merci, secondo l'Istituto nazionale di statistica, Istat. Il totale comprende anche combustibili e prodotti finiti: dà la scala dell'interfaccia marittima, senza misurare soltanto le materie prime. Una parte delle merci prosegue per strada o ferrovia e ricompare nelle statistiche di quei trasporti. Sommare tutti questi volumi significherebbe contare più volte i passaggi della stessa partita. Per capire che cosa arriva davvero all'industria occorre seguire il materiale lungo il percorso. [1]

Il materiale determina il viaggio

Il trasporto comincia con la preparazione del lotto. Un concentrato minerario deve essere identificato, pesato e campionato; i catodi di rame devono essere raccolti in unità movimentabili; una bobina di carta richiede protezione e attrezzature che non ne danneggino superficie e bordi. La fabbrica che compra questi materiali cerca proprietà differenti. Il concentrato alimenta un processo di estrazione del metallo, i catodi possono entrare nella produzione di vergella (un semilavorato in rotoli da cui si ricavano fili e cavi), la carta deve conservare le caratteristiche necessarie alle lavorazioni successive. La forma commerciale incorpora già una destinazione industriale, dalla quale derivano le condizioni da mantenere durante il viaggio.

Massa e volume pongono vincoli distinti. Un materiale denso può raggiungere il peso massimo ammesso sul mezzo quando resta ancora spazio libero; un materiale leggero può riempire lo spazio prima di raggiungere quel peso. Per una rinfusa, cioè un materiale trasportato senza confezioni individuali, conta la densità apparente: il rapporto fra massa e volume del cumulo, inclusi gli spazi fra le particelle. La dimensione dei granuli influisce inoltre sulla formazione di polvere e sul comportamento durante carico e scarico. Cambiare forma al materiale può rendere possibile una movimentazione diversa, ma richiede preparazione e può introdurre nuovi costi.

Anche l'acqua fa parte della massa spostata. Consideriamo un esempio ipotetico: 10.000 tonnellate di concentrato umido con l'8% di acqua. La sostanza secca pesa 9.200 tonnellate, ottenute moltiplicando 10.000 per 0,92; le altre 800 tonnellate sono acqua. Quella sostanza secca comprende il componente ricercato e le altre sostanze presenti nel concentrato. Non equivale a 9.200 tonnellate di metallo. Una pesatura misura quindi qualcosa di diverso da un'analisi del contenuto utile, e una variazione dell'umidità può cambiare il peso senza aumentare la quantità del componente che interessa alla fabbrica.

Questa distinzione serve anche a interpretare le perdite. Se il peso diminuisce durante il viaggio, una parte della differenza potrebbe dipendere dall'acqua evaporata; se il materiale si disperde, diminuisce invece la sostanza trasportata. La contaminazione può rendere inutilizzabile una frazione che conserva il proprio peso. Occorre collegare pesature, campioni e specifiche, evitando di chiamare perdita ogni differenza fra due bilance. Un residuo del carico precedente può compromettere la qualità di una partita successiva: la pulizia di stive, serbatoi e attrezzature appartiene perciò alla continuità del processo industriale.

L'umidità può avere anche un significato di sicurezza. Alcuni carichi solidi fini, sottoposti ai movimenti della nave, possono perdere resistenza e comportarsi come una massa fluida, compromettendo la stabilità. Il codice internazionale per il trasporto marittimo dei carichi solidi alla rinfusa, noto come IMSBC, disciplina le condizioni di sicurezza secondo le caratteristiche del materiale. La valutazione richiede proprietà e prove pertinenti al materiale specifico: la sola percentuale d'acqua dell'esempio non basta a stabilire la sicurezza del carico. [2]

Anche la distribuzione del carico conta. Un semilavorato concentrato su una piccola superficie può richiedere appoggi e fissaggi diversi da una massa granulare distribuita nel vano. Il contenitore deve quindi essere compatibile con il peso totale e con il modo in cui quel peso grava sul pavimento. Per una bobina, prevenire il movimento durante il viaggio e non deformare il prodotto durante la presa sono esigenze collegate: il materiale deve arrivare nelle condizioni che permettono di svolgere la lavorazione per cui è stato acquistato.

La protezione deve infine seguire ciò che può essere danneggiato. I liquidi richiedono contenimento e compatibilità dei serbatoi; le bobine devono restare integre; legno e prodotti fibrosi richiedono condizioni coerenti con le specifiche di consegna. Proteggere tutto nello stesso modo sarebbe inefficiente. Prima di scegliere il mezzo bisogna sapere quale massa si sposterà, quanto spazio occuperà e quali condizioni dovranno accompagnarla fino al ricevimento.

Una catena di mezzi e passaggi

Dal produttore il lotto raggiunge un punto di carico, percorre la tratta principale e attraversa uno o più terminali prima di arrivare allo stabilimento. Ogni passaggio deve essere compatibile con quello successivo. Una rinfusa scaricata da un nastro richiede un impianto capace di riceverla; una cisterna deve potersi collegare alle tubazioni corrette; un carico di semilavorati richiede attrezzature adatte alla forma e alla distribuzione del peso. La scelta riguarda dunque una catena completa, anche quando il contratto viene concluso separatamente con più operatori.

Per grandi partite solide, le navi portarinfuse utilizzano stive nelle quali il materiale viene caricato con nastri, gru o benne, i recipienti meccanici che afferrano una porzione del cumulo. La loro portata è spesso espressa in DWT, dall'inglese *deadweight tonnage*: tonnellate di portata lorda. Comprende carico, combustibile, acqua e altri pesi trasportati. Non coincide con le tonnellate di merce effettivamente caricabili. Il volume delle stive, la distribuzione del peso e il pescaggio, cioè la profondità della parte immersa della nave, possono limitare ulteriormente il lotto.

Una nave grande può distribuire i costi del viaggio su più materiale, purché il carico e i porti consentano di sfruttarla. Richiede però partite adeguate e impianti che possano riceverle. Se il porto finale non è accessibile, può

occorrere trasferire il carico su una nave più piccola, aggiungendo un passaggio. La convenienza della tratta marittima deve quindi essere valutata insieme a ciò che accade alle sue estremità.

Per i liquidi, il terminale comprende bracci di collegamento alla nave, tubazioni, pompe, valvole e serbatoi. Il flusso può essere interrotto se il deposito ricevente non ha spazio oppure se manca una linea compatibile. La disponibilità del serbatoio deve essere coordinata con quella della banchina e con il consumo a valle. Anche in questo caso la capacità di trasporto della nave non risolve un limite del deposito: prima di iniziare il trasferimento occorre sapere dove la sostanza sarà contenuta.

Il container conserva una stessa unità di carico nei passaggi fra nave, treno e camion. Può proteggere merce confezionata e consentire di spedire lotti diversi da quelli di una nave intera. Restano i limiti di massa e volume, oltre ai costi di riempimento e svuotamento. Un carico denso non sfrutta necessariamente tutto lo spazio disponibile, mentre la standardizzazione dell'involucro non elimina la necessità di fissare e proteggere ciò che contiene.

La ferrovia può collegare direttamente porto e fabbrica quando esistono raccordi e impianti di ricezione. Altrimenti un terminale trasferisce il materiale sul camion per l'ultima tratta. La possibilità di formare un treno dipende anche da carri, locomotive e disponibilità di un percorso nella rete e di un orario in cui utilizzarlo. Nel 2024 la ferrovia ha movimentato sul territorio italiano 94,6 milioni di tonnellate di merci, considerando operatori nazionali ed esteri. Il lavoro di trasporto è stato di 22,9 miliardi di tonnellate-chilometro: ogni unità rappresenta una tonnellata spostata per un chilometro. A parità di massa, un percorso più lungo genera un valore maggiore. [3]

La strada raggiunge depositi e stabilimenti anche senza raccordo ferroviario e permette consegne compatibili con quantità più piccole o destinazioni disperse. Nel 2024 i vettori italiani con veicoli pesanti hanno trasportato 1.110,5 milioni di tonnellate, in Italia e all'estero, realizzando 152,7 miliardi di tonnellate-chilometro. Il perimetro è diverso da quello ferroviario, riferito al territorio nazionale: questi totali non permettono da soli di calcolare una ripartizione completa fra i mezzi di tutte le merci trasportate in Italia. [3]

Dove esistono vie navigabili e approdi compatibili, anche una chiatta può collegare nodi della catena. La disponibilità dipende dal livello dell'acqua e

dall'infrastruttura lungo il percorso. Per ogni mezzo la distanza conta insieme all'accessibilità. Una tratta breve può richiedere un trasferimento complesso, mentre una più lunga può collegare direttamente due impianti predisposti allo stesso tipo di carico.

Il porto deve conservare e far uscire il carico

All'arrivo, il materiale deve passare dalla nave a un sistema terrestre. Una gru preleva il carico, un nastro lo trasferisce oppure una pompa lo invia al serbatoio; controlli e registrazioni mantengono riconoscibile la partita. La sequenza si interrompe se manca un punto nel quale collocare ciò che viene scaricato. Il deposito permette di liberare la nave mentre si prepara la prosecuzione, ma deve avere spazio e condizioni adatte. Quando il materiale non esce con sufficiente rapidità, la congestione può risalire fino alla banchina.

Il funzionamento dipende inoltre dalla possibilità di arrestare e riavviare le operazioni senza perdere il controllo del materiale. Un guasto al nastro può fermare lo scarico anche con gru e spazio disponibili; una manutenzione richiede di rendere accessibili componenti che durante il lavoro sono attraversati dal carico. Programmare questi intervalli evita di trattare tutto il tempo di calendario come tempo produttivo. Il ritmo delle navi e delle consegne terrestri deve tenerne conto, perché un arresto locale può modificare gli appuntamenti delle fasi successive.

Per questo la capacità di un terminale richiede più misure. Una superficie di magazzino indica spazio; una capacità di movimentazione in tonnellate l'ora indica un ritmo; il traffico annuo registra quanto è stato effettivamente movimentato. La capacità nominale esprime ciò che l'impianto potrebbe fare nelle condizioni previste. Manutenzione, pioggia, pulizia, analisi e cambi di carico riducono il tempo disponibile rispetto a un funzionamento continuo. Da una grande superficie o dalla velocità dichiarata di un'attrezzatura non si può ricavare automaticamente il volume che passerà in un anno.

Livorno offre un caso italiano nel quale conservazione e collegamento industriale sono particolarmente visibili. Secondo l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale, nel 2024 il porto ha movimentato circa 1,97 milioni di tonnellate di prodotti forestali in carichi convenzionali non containerizzati, il 7,5% in più dell'anno precedente. È il flusso dell'intero porto

per quella categoria di carico: non riguarda soltanto cellulosa e non coincide con il traffico di una singola impresa. [4]

Il 28 maggio 2026 FHP ha annunciato l'inaugurazione, con MarterNeri, di due magazzini per oltre 17.000 metri quadrati, associati a un investimento di oltre 23 milioni di euro tramite NGI. Il comunicato descrive ricezione navale, deposito e distribuzione di prodotti forestali, carta e cellulosa. Lo spazio coperto permette di custodire materiale che deve conservare qualità e integrità prima delle lavorazioni industriali. [5] La scheda dell'operatore di Livorno indica un chilometro di binari interni e tre connessioni alla rete ferroviaria nazionale. Il dato descrive una possibilità di inoltro, senza dire quanta merce utilizzi effettivamente il treno. [6]

Il terminale deve anche impedire che lotti diversi si confondano. Identificazione, ubicazione e documenti permettono di trovare la partita corretta e associarla ai controlli svolti. Quando una specifica non è rispettata, un lotto presente in magazzino può restare indisponibile per l'utilizzatore. La capacità fisica di ricevere merci e la quantità effettivamente utilizzabile dalla fabbrica possono quindi divergere anche senza una perdita di peso.

Nelle rinfuse polverose, il trasferimento fra benna, tramoggia e nastro può disperdere particelle. Contenere il flusso e pulire gli impianti riduce dispersione e contaminazione; la protezione degli addetti deve considerare il materiale effettivamente movimentato. Per altri carichi prevalgono rischi differenti, come lo spostamento di unità pesanti o il danneggiamento durante la presa. La sicurezza appartiene all'organizzazione del lavoro, comprese manutenzione e separazione dei percorsi di persone e mezzi. Il codice di pratica dell’Organizzazione internazionale del lavoro sulla sicurezza nei porti tratta questi aspetti dell’attività, distinti dalla sicurezza del carico nella stiva. [11]

Conservare il carico permette di separare lo scarico della nave dalla consegna successiva. Questo margine di tempo funziona finché spazio, movimentazione e uscita restano coordinati. Il magazzino riempito diventa a sua volta un vincolo, dal quale dipende la possibilità di ricevere la prossima partita.

Dalla partita grande al ritmo della fabbrica

La consegna deve raccordare l'uscita dal terminale con l'ingresso negli stabilimenti. La domanda industriale si esprime infatti attraverso tempi di

consumo e quantità ricevibili, che possono essere diversi dalla dimensione della partita arrivata per mare.

Una fabbrica ha capacità di deposito, attrezzature di scarico e un programma produttivo. Ricevere un lotto troppo grande può saturare spazi e personale; riceverlo in ritardo può lasciare inutilizzato un impianto che dispone di macchine ed energia. Il deposito intermedio consente di frazionare la partita e organizzare le consegne secondo questi vincoli. Mantiene inoltre distinte qualità e destinazioni: la presenza di molto materiale della stessa famiglia non garantisce che ogni stabilimento possa utilizzare qualsiasi lotto.

Qui interviene l'organizzazione commerciale. Un produttore può preferire vendere partite compatibili con la propria produzione, mentre più utilizzatori richiedono quantità inferiori o consegne distribuite nel tempo. Un commerciante, spesso chiamato *trader*, può acquistare materiale a proprio nome, riunire ordini e organizzare trasporto e deposito. Un distributore può tenere una scorta vicina agli utilizzatori e preparare le unità di consegna. Le funzioni possono sovrapporsi o essere svolte su mandato, senza che l'intermediario compri necessariamente l'intero carico o ne finanzi sempre tutto il valore.

Il servizio consiste anche nel collegare informazioni che viaggiano separatamente dalla merce. Chi prepara il trasporto deve conoscere peso e ingombro; chi organizza il deposito deve conoscere protezioni e compatibilità; chi programma la fabbrica deve sapere quando il lotto sarà utilizzabile, comprese eventuali analisi e autorizzazioni. La data di arrivo della nave non coincide necessariamente con quella di disponibilità della materia prima. Se un controllo deve precedere l'impiego, la scorta fisicamente presente non può essere trattata tutta come pronta al consumo.

Il contratto distribuisce queste attività e i relativi rischi. Le regole di consegna Incoterms, predisposte dalla Camera di commercio internazionale, aiutano a definire obblighi di trasporto e punti di trasferimento del rischio fra venditore e compratore. Non sostituiscono però l'accordo su pagamento, proprietà e qualità. Chi paga una tratta può trovarsi in una posizione diversa da chi sopporta in quel momento il rischio di danneggiamento del materiale. Per seguire la fornitura occorre conoscere entrambe le condizioni. [8]

Anche le formalità possono determinare la data utilizzabile. Per gli scambi che le richiedono, procedure doganali e documenti accompagnano il materiale e devono essere coerenti con l'identità della partita. Una merce già scaricata può attendere un'autorizzazione o un risultato analitico prima di proseguire. Chi coordina la fornitura deve quindi distinguere almeno arrivo fisico, possibilità di ritiro e disponibilità per il processo. Anticipare soltanto il viaggio, lasciando irrisolto uno di questi passaggi, può spostare l'attesa dal mare al deposito.

La scorta raccorda arrivi e consumo, ma richiede decisioni sulla quantità e sulla collocazione. Materiale vicino alla fabbrica può ridurre il tempo necessario per alimentarla; materiale ancora in viaggio non offre la stessa protezione da un'interruzione immediata. Una riserva non conforme o irraggiungibile non compensa il mancato arrivo del lotto richiesto. Il valore della scorta dipende quindi dal punto della catena in cui si trova e dalla possibilità di usarla.

Produttore, commerciante e utilizzatore possono ripartirsi questi compiti in modi diversi. Il margine di un intermediario può remunerare organizzazione, spazio, finanziamento e rischi assunti, ma la sua misura richiede condizioni commerciali specifiche. Per valutarne il ruolo bisogna osservare quali operazioni rende possibili e quali obblighi si assume. Una consegna industriale coordinata richiede qualcuno che organizzi il passaggio dal ritmo del trasporto principale al ritmo del consumo, anche quando queste funzioni sono svolte direttamente dal produttore o dalla fabbrica.

Che cosa si paga per arrivare

Ogni operazione richiede risorse, che possono comparire in una fattura autonoma oppure essere comprese in un servizio più ampio. Il nolo remunera il trasporto marittimo alle condizioni pattuite; le tariffe del terminale riguardano le operazioni indicate; il trasporto terrestre porta il materiale al deposito o allo stabilimento. Controlli, assicurazione e preparazione possono aggiungere altri costi. Prima di confrontare due offerte occorre ricostruire quali passaggi comprendano e su quale quantità siano calcolate.

Il nolo dipende dalla tratta e dal periodo, ma anche dalla nave, dal carico e dalle condizioni di carico e scarico. La possibilità di trovare un impiego successivo per il mezzo e il tempo assorbito dagli scali incidono sull'organizzazione del servizio. Un prezzo per container, un indice espresso in punti e una tariffa per tonnellata

misurano oggetti diversi. Nessuno di questi valori si trasforma direttamente nel costo di consegna di un concentrato senza conoscere la partita e le operazioni necessarie. Anche sulla terraferma una quotazione per viaggio deve essere rapportata al carico utile effettivo e ai servizi inclusi.

Un listino reale rende visibile questa necessità. Il tariffario 2025 del Terminal Rinfuse Genova indica 14,91 euro per tonnellata per rinfuse bianche e prodotti siderurgici nel ciclo di operazioni descritto. Fra le rinfuse bianche rientrano materiali come cementi, soda e sale. [13] La tariffa comprende carico o scarico e messa a deposito; esclude riconsegna, pesatura, documenti di trasporto, soste oltre franchigia e altri oneri. La cifra remunera quindi una porzione della catena. Il listino documenta un prezzo pubblicato per quel terminale e per quell'anno; il costo della singola fornitura dipende dai servizi e dalle condizioni pattuite. [7]

La messa a deposito è il collocamento del materiale nello spazio previsto; la sua permanenza può generare un addebito distinto. Nel listino la franchigia, ossia il periodo iniziale per il quale non decorrono i diritti di deposito successivi indicati, è di cinque giorni. Per calcolare una sosta più lunga servono unità tariffarie e condizioni applicabili al lotto. Sapere soltanto che esiste un importo giornaliero non basta, se resta ambiguo a quale quantità o unità di carico si riferisca. [7]

Anche l'attesa della nave ha un regime distinto. Il contratto di noleggio può concedere un tempo per caricare o scaricare, chiamato *laytime*. Superarlo può far maturare controstallie, o *demurrage*, secondo la tariffa e le regole contrattuali. Il conteggio dipende dalle clausole su inizio, interruzioni ed eventi rilevanti: non ogni ora trascorsa in porto genera automaticamente lo stesso addebito. Si remunera il tempo aggiuntivo della nave, un servizio diverso dall'occupazione dello spazio nel deposito. [10]

Torniamo ora alla partita ipotetica di concentrato. Assumendo un servizio marittimo e di terminale pari a 25 euro per tonnellata umida, le 10.000 tonnellate comportano una spesa di 250.000 euro. Dividendo per le 9.200 tonnellate secche otteniamo circa 27,17 euro per tonnellata secca. L'importo totale è identico; cambia il denominatore con il quale si legge la spesa. Le altre eventuali voci della consegna restano da aggiungere. Il calcolo mostra perché il costo riferito alla sostanza secca possa superare quello riferito alla massa caricata, senza confonderla con il contenuto metallico.

Perdite e non conformità incidono attraverso un altro meccanismo. Se una parte della partita viene respinta o richiede ulteriori controlli, la spesa già sostenuta per trasportarla rimane, mentre cambia la quantità utilizzabile o il tempo necessario per impiegarla. L’eventuale costo di una nuova movimentazione va aggiunto al passaggio interessato. Per misurare l’incidenza occorrono quantità accertate e condizioni del contratto: una percentuale uniforme di perdita non descriverebbe allo stesso modo acqua evaporata, materiale disperso e prodotto contaminato.

Per confrontare alternative occorre dunque mantenere lo stesso punto di arrivo, la stessa qualità e lo stesso perimetro di servizi. Un'offerta può comprendere il trasporto terrestre, un'altra fermarsi alla banchina. Il materiale può costare poco da movimentare e richiedere molto tempo, oppure arrivare rapidamente con un servizio più caro. Oltre alle somme pagate agli operatori resta il valore del materiale che l'impresa finanzia durante quel tempo.

Il materiale fermo impegna capitale

Il capitale impegnato nella merce ha una durata, anche quando il carico è già stato acquistato a un prezzo definitivo. Se l'impresa paga prima di poterlo impiegare o rivendere, una somma rimane vincolata durante viaggio e deposito. Può essere finanziata con credito, che genera interessi, oppure con liquidità propria, che rinuncia ad altri impieghi. Questo costo si distingue dai servizi del terminale e del vettore. Due consegne con identiche fatture logistiche possono richiedere impegni finanziari diversi se cambiano le condizioni di pagamento e il tempo prima dell'utilizzo.

Consideriamo un secondo esempio ipotetico, indipendente dalla partita umida precedente. Un lotto di 50.000 tonnellate a 700 euro per tonnellata vale 35 milioni di euro. Supponiamo che l'intero valore sia finanziato per 45 giorni, senza credito del fornitore e senza prelievi intermedi di materiale. Con un tasso annuo semplice dell'8% e un anno di riferimento di 365 giorni, il costo si ottiene moltiplicando 35.000.000 per 0,08 e per 45/365. Il risultato è circa 345.205 euro.

Se il periodo si prolunga di 15 giorni, mantenendo invariati valore finanziato e tasso, il costo aggiuntivo è circa 115.068 euro: 35.000.000 × 0,08 × 15/365. L'aumento corrisponde a un terzo del periodo iniziale, e quindi a un terzo dei

suoi interessi. Si tratta del costo del finanziamento nelle condizioni assunte, distinto dai diritti di deposito e dalle controstallie.

Nella realtà il valore finanziato può variare. Se l'impresa consuma o vende progressivamente la partita, il capitale residuo diminuisce; se paga dopo la consegna, una parte del tempo è finanziata dal fornitore. Per un calcolo attendibile bisogna seguire gli importi impegnati nei diversi giorni. Applicare il valore dell'intero carico a tutta la permanenza produrrebbe un risultato diverso da quello di una scorta che si riduce. Inoltre proprietà, pagamento e trasferimento del rischio non coincidono necessariamente: un documento di acquisto o una regola di consegna non basta a ricostruire tutte queste date.

Tenere materiale disponibile vicino all'impianto può ridurre l'esposizione a ritardi, ma richiede capitale, spazio e custodia. Il vantaggio dipende dalla possibilità di utilizzare proprio quel lotto e dalla durata dell'interruzione che la scorta può coprire. Il costo di un eventuale fermo produttivo deve essere valutato sul processo interessato; non si ricava automaticamente dal valore della merce mancante.

Il tempo collega così decisioni finanziarie e funzionamento fisico. Durante un viaggio più lungo il carico resta lontano e la nave rimane occupata. Per comprendere gli effetti di una modifica delle rotte bisogna seguire insieme queste due durate: quella del materiale che raggiunge la fabbrica e quella del mezzo che potrà tornare a trasportare un'altra partita.

Quando il percorso si allunga

Una deviazione aggiunge distanza al viaggio. A parità delle altre condizioni, la nave impiega più tempo a completare il servizio e realizza meno rotazioni nello stesso periodo. Per mantenere un flusso annuo invariato può quindi servire più capacità di flotta, anche se la quantità da consegnare non cambia. L'utilizzatore, intanto, può avere più materiale in transito e dover anticipare gli ordini. Il maggiore costo finanziario dipende da quando paga; la necessità di aumentare una scorta di sicurezza dipende anche dalla variabilità degli arrivi. Nessuno di questi effetti implica automaticamente il raddoppio del magazzino.

La massa scambiata e il lavoro di trasporto permettono di osservare due aspetti del fenomeno. Secondo la Conferenza delle Nazioni Unite sul commercio e lo sviluppo, UNCTAD, nel 2024 il commercio marittimo mondiale è cresciuto del

2,2% in massa e del 5,9% in tonnellate-miglio. Una tonnellata-miglio rappresenta una tonnellata trasportata per un miglio nautico; la misura incorpora quindi la distanza: non rappresenta materiale aggiuntivo. Nel 2024 aumentano entrambe le grandezze, ma il lavoro di trasporto cresce più rapidamente della massa. Percorsi più lunghi contribuiscono a questo risultato, senza che tutta la differenza possa essere assegnata a una sola rotta. [9]

Gli attacchi degli Houthi alle navi commerciali nel Mar Rosso, documentati dall'Organizzazione marittima internazionale a partire dal novembre 2023, hanno compromesso la sicurezza della navigazione. [12] Le deviazioni intorno al Capo di Buona Speranza hanno reso evidente il vincolo logistico. La sintesi del rapporto UNCTAD del 2025 indica che all'inizio di maggio di quell'anno il tonnellaggio delle navi transitanti a Suez era circa il 70% sotto la media del 2023. Il dato riguarda la dimensione complessiva delle navi in transito, non direttamente la massa delle merci né il numero dei passaggi. [9]

Anche i collegamenti fra porti possono cambiare. Per il 2024 Istat registra circa 34 milioni di tonnellate nelle relazioni marittime italiane con la Spagna, il 30% in più del 2023, nel quadro della riorganizzazione dei traffici associata alla crisi del Mar Rosso. Il porto dal quale una merce arriva può essere un nodo intermedio: il paese partner della tratta non identifica necessariamente quello di produzione. L'aumento non dimostra quindi una crescita equivalente degli acquisti italiani di materie prime prodotte in Spagna, né attribuisce una causa unica a ogni flusso. [1]

Più distanza può comportare più combustibile e più emissioni per consegnare una partita, secondo mezzo, velocità e condizioni operative. Il confronto ambientale deve comprendere la catena pertinente: alla navigazione si aggiungono movimentazione e collegamenti terrestri. Il vantaggio di un mezzo sulla tratta principale non determina da solo il bilancio dell'intera consegna. Le polveri del terminale e il rumore delle vie di accesso hanno inoltre effetti locali diversi dalle emissioni di gas serra. Ridurre una dispersione durante lo scarico non elimina il combustibile consumato lungo la rotta.

Una risposta logistica può cambiare porto, dimensione dei lotti o calendario degli ordini. La possibilità reale dipende da depositi, accessi, mezzi e compatibilità del materiale. La merce continua a esistere, ma può richiedere più risorse e più tempo per tornare disponibile nel punto in cui l'industria la utilizza.

La disponibilità si costruisce lungo la catena

Il materiale diventa una fornitura utilizzabile attraverso operazioni che ne conservano la qualità e ne coordinano la consegna. Le proprietà del lotto determinano come può viaggiare; terminali e collegamenti permettono di trasferirlo; l'organizzazione commerciale raccorda le partite grandi con le quantità e i tempi della fabbrica. Il costo dei servizi e il capitale finanziato esprimono impieghi diversi di risorse, che vanno ricostruiti sullo stesso percorso.

La distanza geografica acquista così un significato industriale attraverso accessibilità e durata. Un carico vicino ma non conforme o bloccato può offrire meno disponibilità di uno più lontano inserito in una catena affidabile. Questa disponibilità dipende anche dalle alternative: se un porto, una rotta o una fonte diventano inutilizzabili, quanto facilmente si può riorganizzare la fornitura? È il punto in cui la logistica dei materiali incontra la vulnerabilità delle filiere e le dipendenze strategiche.

Fonti e riferimenti

[1] Istat — Trasporto marittimo in Italia, anno 2024, pubblicato nel 2026; traffico nazionale e relazioni con la Spagna, pp. 5–6.

https://www.istat.it/wp-content/uploads/2026/02/STATISTICA-REPORT_TRASPORTO-MARITTIMO_2024.pdf

[2] Organizzazione marittima internazionale — International Maritime Solid Bulk Cargoes Code; caratteristiche e sicurezza dei carichi solidi alla rinfusa.

https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/CargoesinBulk-default.aspx

[3] Istat — Il trasporto di merci su strada e su ferrovia, anno 2024, pubblicato nel 2026; quantità, lavoro di trasporto e perimetri statistici.

https://www.istat.it/wp-content/uploads/2026/02/Statistica-Focus_Il-trasporto-di-merci-su-strada-e-su-ferrovia_Anno-2024.pdf

[4] Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale — Statistiche 2024; prodotti forestali del porto di Livorno.

https://www.portialtotirreno.it/studi-e-sviluppo/statistiche-2024/

[5] FHP — Con MarterNeri S.p.A. inaugurati due nuovi magazzini, 28 maggio 2026; superficie e investimento dichiarati.

https://www.fhpgroup.it/comunicati/fhp-con-marterneri-s-p-a-inaugurati-2-nuovi-magazzini/

[6] FHP — Scheda del porto di Livorno, pagina non datata; binari interni e raccordi.

https://www.fhpgroup.it/network/porti/livorno/

[7] Terminal Rinfuse Genova — Condizioni generali e tariffe, edizione 2025; allegato A1, p. 19 interna, p. 20 del PDF; copia pubblicata da Assagenti.

https://www.assagenti.it/storage/old-files/TariffeServFile/1150/Terminal%20Rinfuse.pdf

[8] Camera di commercio internazionale — Introduzione alle regole Incoterms 2020, paragrafi 4–8; obblighi, rischio e materie escluse dalle regole.

https://library.iccwbo.org/content/tfb/BOOKS/BK_0049/BK_0049_03_Introduction.htm

[9] UNCTAD — Review of Maritime Transport 2025, Overview; massa e tonnellate-miglio, pp. 1–2; transiti a Suez, pp. 4–5.

https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025overview_en.pdf

[9] UNCTAD — Copia pubblica dell'Overview consultata, ospitata da Maritime Cyprus.

https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2025/10/UNCTAD-2025overview_en_c.pdf

[10] BIMCO — CEMENTVOY 2006, testo comparativo e note; clausole su tempo di carico/scarico e controstallie, pp. 9–10 del PDF.

https://www.bimco.org/media/iw2jquty/comparison_cementvoy_2006.pdf

[11] Organizzazione internazionale del lavoro — Safety and health in ports, codice di pratica, revisione 2016.

https://www.ilo.org/resource/other/safety-and-health-ports-revised-2016

[12] Organizzazione marittima internazionale — Red Sea area; attacchi degli Houthi alle navi mercantili e commerciali dal novembre 2023.

https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/red-sea.aspx

[13] Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale — Piano organico porto 2021–2023, p. 7 del PDF; esempi merceologici delle rinfuse bianche.

https://www.portsofgenoa.com/documenti/field13/Piano_Organico_Porto_2021-2023.pdf

04.30 – Materie prime critiche e dipendenze strategiche

Una fabbrica può avere bisogno di un materiale che esiste in quantità considerevoli nella crosta terrestre e trovarsi comunque senza una fornitura utilizzabile. Fra la presenza dell'elemento e l'ingresso nel processo produttivo ci sono operazioni che devono riuscire: estrarre, concentrare, separare, raffinare e consegnare una forma con caratteristiche definite. La disponibilità dipende dall'intera sequenza, compresi gli impianti, le competenze e le relazioni commerciali che la sostengono.

Il compratore può cercare un metallo per una lega, un composto per una batteria o un ossido destinato alla produzione di magneti. Per ciascun impiego contano composizione, purezza, impurità ammesse e regolarità della consegna. Un deposito minerario non soddisfa direttamente questi requisiti; neppure un materiale già raffinato è necessariamente compatibile con ogni impianto o applicazione.

La domanda sulla sicurezza degli approvvigionamenti comincia quindi con una specifica industriale. Occorre capire chi possa fornire quel materiale e quale passaggio diventerebbe difficile da sostituire se si interrompesse. La geologia determina una parte delle possibilità; la struttura della filiera decide come quelle possibilità arrivano alla fabbrica.

Critica per chi, strategica per che cosa

La rarità geologica riguarda la distribuzione naturale di un elemento e le concentrazioni in cui compare. La criticità considera invece quanto un sistema economico dipenda da una materia e quanto sia esposto a difficoltà di approvvigionamento. Un elemento diffuso può richiedere trattamenti complessi, essere recuperato soltanto insieme ad altri metalli o raggiungere il mercato attraverso pochissimi impianti. La sua abbondanza naturale lascia aperta la domanda sulla disponibilità industriale.

Anche le parole risorsa e riserva descrivono condizioni diverse. Una risorsa individua una concentrazione naturale di possibile interesse; una riserva è la parte recuperabile economicamente nelle condizioni considerate. Conoscenze

geologiche, prezzi, tecnologia e costi possono cambiare questa valutazione. L'iscrizione di una quantità fra le riserve non significa tuttavia che esista già una miniera, tanto meno una catena capace di trasformarla nel prodotto richiesto.

Nell'Unione europea la classificazione delle materie prime critiche combina importanza economica e rischio di approvvigionamento. Il primo criterio guarda al ruolo della materia nelle attività produttive; il secondo considera la vulnerabilità della fornitura, anche in relazione alla concentrazione e alle alternative disponibili. Sostituibilità e riciclo contribuiscono alla valutazione secondo la metodologia prevista. L'elenco è riferito a un sistema e a criteri definiti, e può essere aggiornato quando cambiano le condizioni. [1]

Il regolamento europeo sulle materie prime critiche, noto con la sigla inglese CRMA, Critical Raw Materials Act, distingue inoltre le materie strategiche. La selezione tiene conto della rilevanza per tecnologie prioritarie, delle prospettive di domanda e della difficoltà di accrescere l'offerta. Le materie strategiche sono incluse nell'elenco delle critiche; la loro individuazione non equivale a scegliere gli elementi meno abbondanti sulla Terra. Il termine riguarda la funzione che svolgono e la possibilità di procurarseli nelle forme necessarie. [1]

Per un'industria, una quota elevata di importazioni descrive soltanto una parte dell'esposizione. Importare da più filiere effettivamente indipendenti offre possibilità diverse rispetto a comprare da numerosi intermediari che si riforniscono tutti dallo stesso produttore. Anche un impianto nazionale può dipendere da una materia intermedia, da reagenti o da attrezzature estere. Il luogo dell'ultima trasformazione non riassume tutte le dipendenze precedenti.

La concentrazione, a sua volta, non dimostra che una crisi sia imminente. Può accompagnarsi a impianti efficienti e a consegne regolari per lunghi periodi. Diventa una misura dell'esposizione quando si considera che cosa accadrebbe se una parte rilevante della capacità venisse meno e quanto rapidamente altri operatori potrebbero sostituirla. Per interpretarla bisogna indicare la fase osservata: una quota mineraria e una quota di raffinazione rispondono a domande differenti.

Il rischio comprende quindi sia la possibilità dell'interruzione sia le conseguenze che essa avrebbe. Una fornitura piccola in valore può essere indispensabile al funzionamento di un processo; spendere poco per acquistarla non implica che

sia facile farne a meno. La criticità non si legge direttamente nella fattura o nel peso del lotto. Per l'acquirente conta la funzione svolta, insieme alla possibilità di ottenere un risultato equivalente con altri materiali o processi. L'esposizione cambia se cambiano la tecnologia impiegata, la rete dei fornitori o il tempo durante il quale l'industria può continuare senza nuovi arrivi.

Quali materie sono critiche e a che cosa servono

L'elenco europeo comprende 34 materie prime critiche. Alcune voci indicano un elemento, altre un minerale o un gruppo di elementi: la voce sulle terre rare, per esempio, raccoglie metalli diversi. Questa breve mappa associa ciascuna materia a impieghi riconoscibili, seguendo l'ordine dell'allegato II del regolamento. [1, 11–13]

L'asterisco (*) segnala anche l'inclusione fra le materie strategiche, con le precisazioni riportate nella singola voce. L'allegato I ne individua 17 categorie: le terre rare per magneti costituiscono una sola categoria strategica, che attraversa i due gruppi delle terre rare critiche. Quando è specificato un «grado», si intendono le caratteristiche, come composizione e purezza, richieste per quell'impiego. [1]

• Antimonio. I suoi composti aiutano a rallentare la propagazione delle fiamme in alcuni materiali; il metallo entra anche nelle leghe di piombo delle batterie tradizionali.

• Arsenico. In composti come l'arseniuro di gallio serve a produrre semiconduttori per dispositivi elettronici e celle solari speciali. Ha impieghi anche nella lavorazione del vetro.

• Bauxite, allumina e alluminio *. Sono tre passaggi della stessa filiera: dalla bauxite si ottiene l'allumina, dalla quale si produce l'alluminio. Il metallo serve per veicoli, edifici, cavi e imballaggi.

• Barite. Aumenta la densità dei fluidi usati nelle perforazioni petrolifere e del gas, contribuendo al controllo della pressione. È impiegata anche come carica in vernici, plastiche e gomma.

• Berillio. In lega con il rame permette di realizzare contatti elettrici e componenti meccanici affidabili. È utilizzato anche in componenti aerospaziali che richiedono leggerezza e rigidità.

• Bismuto *. È impiegato in prodotti farmaceutici e in leghe che fondono a temperature relativamente basse, utili per saldature e dispositivi di sicurezza.

• Boro *. I suoi composti servono per vetri resistenti agli sbalzi di temperatura, fibre di vetro e ceramiche. Entra anche nelle leghe dei magneti; la categoria strategica riguarda il grado metallurgico.

• Cobalto *. Serve per alcuni tipi di batterie ricaricabili e per leghe capaci di lavorare ad alte temperature, come quelle impiegate nei motori aeronautici.

• Carbone da coke. È il carbone adatto a produrre coke, che negli altiforni fornisce calore e aiuta a separare il ferro dall'ossigeno del minerale, sostenendo anche il peso della carica.

• Rame *. Conduce elettricità e calore: è impiegato in cavi, motori, trasformatori, reti elettriche e scambiatori di calore. È quindi essenziale anche per elettrificare molti impieghi.

• Feldspato. È una materia prima per piastrelle, sanitari e altri prodotti ceramici, oltre che per il vetro. Facilita la fusione della miscela durante la cottura.

• Fluorite. È una fonte di fluoro per l'industria chimica, compresa la produzione di sostanze refrigeranti. Ha impieghi anche nei processi di produzione dell'acciaio e dell'alluminio.

• Gallio *. I suoi composti sono impiegati in semiconduttori per LED, comunicazioni radio ed elettronica di potenza, cioè dispositivi che controllano e convertono energia elettrica.

• Germanio *. Serve per fibre ottiche, lenti e sensori che lavorano nell'infrarosso, oltre che per celle solari ad alte prestazioni utilizzate nello spazio.

• Afnio. È utilizzato in leghe per alte temperature e nelle barre che regolano la reazione di alcuni reattori nucleari. Suoi composti entrano anche nella fabbricazione dei microchip.

• Elio. Permette di raggiungere temperature molto basse, necessarie per raffreddare i magneti di apparecchi per la risonanza magnetica. Serve anche per individuare perdite e creare atmosfere di lavorazione controllate.

• Terre rare pesanti *. Elementi come disprosio e terbio migliorano la resistenza al calore di alcuni magneti per motori e generatori. La qualifica strategica riguarda soltanto gli elementi per magneti indicati nel regolamento.

• Terre rare leggere *. Neodimio e praseodimio servono per magneti potenti; cerio e lantanio trovano impiego anche in catalizzatori e vetri. Sono strategici gli elementi per magneti specificati dal regolamento.

• Litio *. È impiegato nelle batterie ricaricabili di telefoni, veicoli e sistemi di accumulo, ma anche in vetri e ceramiche. La categoria strategica riguarda il grado per batterie.

• Magnesio *. Il metallo e le sue leghe permettono di costruire componenti leggeri, soprattutto nei trasporti. È aggiunto anche alle leghe di alluminio; la qualifica strategica riguarda il magnesio metallico.

• Manganese *. È importante nella produzione dell'acciaio e serve anche per alcune batterie. Per la categoria strategica il regolamento specifica il grado per batterie.

• Grafite *. È usata negli anodi, uno dei due elettrodi delle batterie agli ioni di litio, e in materiali resistenti al calore e lubrificanti. È strategica nel grado per batterie.

• Nichel di grado batteria *. È destinato ai materiali dell'elettrodo positivo di alcune batterie agli ioni di litio. La voce europea riguarda questo grado specifico, anziché tutti gli impieghi del nichel.

• Niobio. Piccole aggiunte migliorano le prestazioni di acciai per edifici, condotte e veicoli. È utilizzato anche in leghe per applicazioni che richiedono resistenza ad alte temperature.

• Fosforite. È una roccia ricca di fosfati, dalla quale si ricavano soprattutto materie prime per fertilizzanti. Fornisce il fosforo necessario alla nutrizione delle piante.

• Fosforo. Il fosforo elementare ottenuto dalle rocce fosfatiche alimenta filiere chimiche, fra cui additivi che rallentano le fiamme e prodotti per trattare l'acqua. È una voce distinta dalla fosforite.

• Metalli del gruppo del platino *. Comprendono platino, palladio, rodio, rutenio, iridio e osmio. Diversi elementi del gruppo servono nei catalizzatori delle auto e dell'industria chimica; alcuni anche nelle tecnologie dell'idrogeno.

• Scandio. È utilizzato in particolari celle a combustibile, che producono elettricità mediante reazioni chimiche. Aggiunto all'alluminio può formare leghe leggere ad alte prestazioni.

• Silicio metallico *. Serve per leghe di alluminio e prodotti chimici come i siliconi. Dopo ulteriori purificazioni alimenta la produzione di celle fotovoltaiche e semiconduttori.

• Stronzio. I suoi composti sono impiegati in magneti ceramici, nella produzione del vetro e in pirotecnica, dove permettono di ottenere il colore rosso.

• Tantalio. Serve per condensatori, piccoli componenti che accumulano carica nei circuiti elettronici. È impiegato anche in leghe resistenti alle alte temperature e in attrezzature resistenti alla corrosione.

• Titanio metallico *. È usato in componenti aeronautici, impianti medici e apparecchiature industriali grazie a leggerezza, resistenza e tolleranza alla corrosione. La voce riguarda il metallo, distinto dal biossido di titanio dei pigmenti.

• Tungsteno *. È impiegato soprattutto in materiali molto duri per utensili da taglio, punte di perforazione e lavorazioni industriali. Serve anche in leghe destinate ad applicazioni gravose.

• Vanadio. Migliora le proprietà di alcuni acciai per strutture, utensili e componenti meccanici. È utilizzato anche in particolari batterie stazionarie, nelle quali l'energia è immagazzinata in soluzioni liquide.

L'elenco rende visibile quanto siano diversi gli impieghi: fertilizzanti, vetri, acciai, elettronica, batterie e apparecchiature mediche. Per capire una dipendenza bisogna ora seguire ciascuna materia attraverso le trasformazioni che la rendono adatta al suo impiego. Il cobalto offre un primo esempio concreto.

La dipendenza cambia lungo la filiera

Il cobalto rende visibile questo passaggio. È impiegato, fra l'altro, in alcune chimiche delle batterie e in leghe con particolari requisiti di prestazione. L'industria può acquistarlo come metallo o composto, dopo trasformazioni che lo separano dagli altri componenti della materia estratta. Una parte importante della sua offerta nasce dalle filiere del rame e del nichel: il cobalto viene recuperato insieme al materiale che sostiene l'attività principale della miniera. [2]

Questo legame modifica la risposta dell'offerta. Un prezzo più favorevole del cobalto può rendere interessante recuperarlo meglio, ma l'aumento delle quantità dipende anche dalla miniera e dagli impianti della filiera ospite. Sono coinvolti i volumi trattati, la composizione della materia in ingresso e la convenienza complessiva dell'attività. Un compratore di cobalto può quindi essere esposto a decisioni produttive che riguardano anche altri metalli.

L'Agenzia internazionale dell'energia, IEA, offre un confronto storico omogeneo per il 2023: quasi due terzi dell'estrazione mondiale di cobalto erano localizzati nella Repubblica Democratica del Congo, mentre circa tre quarti della raffinazione avvenivano in Cina. Il primo paese dominava l'uscita mineraria; il secondo il passaggio al prodotto raffinato. Le due quote descrivono parti successive della stessa catena e non possono essere usate l'una al posto dell'altra. [3]

Le stime per il 2025 dello United States Geological Survey, il servizio geologico statunitense USGS, aggiornano la sola fase mineraria. La produzione mondiale è indicata in 310.000 tonnellate di cobalto contenuto, delle quali 230.000 nella Repubblica Democratica del Congo e 44.000 in Indonesia. Dividendo queste quantità per il totale mondiale si ottengono circa il 74% e il 14%; insieme, i due paesi rappresentano circa l'88% della produzione mineraria stimata. Sono elaborazioni sui valori arrotondati della fonte. [2]

Le 310.000 tonnellate misurano contenuto di cobalto nella produzione mineraria, senza identificare altrettanti lotti di metallo raffinato pronti alla vendita. La quota cinese citata in precedenza riguarda invece la raffinazione nel 2023: accostarla al dato minerario del 2025 come se fosse un bilancio dello stesso anno produrrebbe un confronto ingannevole. L'aggiornamento mostra la

concentrazione recente dell'estrazione; il confronto storico chiarisce perché la geografia cambi seguendo il materiale.

La localizzazione non identifica neppure il proprietario dell'impianto o l'intera provenienza commerciale della merce. Per ricostruire una dipendenza servono queste informazioni separatamente. Un acquisto registrato da un paese può arrivare da una catena che attraversa più territori; conoscere il venditore immediato non basta a stabilire quanto indipendente sia la sua fonte.

Anche il numero delle imprese richiede una lettura distinta da quello dei paesi. Più impianti nello stesso territorio possono avere proprietari diversi e competere commercialmente, pur condividendo esposizioni a decisioni normative o interruzioni delle infrastrutture. Un gruppo può invece gestire attività in più paesi. La mappa geografica aiuta a localizzare alcune cause di rischio; la struttura societaria e i rapporti di fornitura aiutano a capire chi decida sui volumi e sulle destinazioni. Nessuna delle due mappe sostituisce l'altra, e non è possibile ricavare la seconda dalle sole quote nazionali di produzione.

Seguire l'estrazione significa anche osservare le persone che vi lavorano. In un comunicato del novembre 2024, l'Organizzazione internazionale del lavoro, ILO, riferiva oltre 100.000 minatori artigianali e di piccola scala nella Repubblica Democratica del Congo. Riportava inoltre oltre 6.200 bambini registrati da un sistema di monitoraggio e intervento sul lavoro minorile nelle province di Haut-Katanga e Lualaba. Il secondo numero descrive il perimetro raggiunto dal programma, non un censimento nazionale. [4]

I due dati non permettono di ricavare una percentuale di minori fra tutti i minatori, né una quota della produzione ottenuta attraverso lavoro minorile. Documentano condizioni da affrontare nella filiera osservata. Per un acquirente, la conoscenza della provenienza e delle condizioni di lavoro richiede informazioni che arrivino fino ai passaggi estrattivi e commerciali effettivi. La sola etichetta nazionale non descrive il singolo lotto.

Il cobalto mostra così una dipendenza composta: la miniera, la filiera dei metalli associati e la raffinazione possono concentrare rischi in luoghi diversi. Cambiare il paese di estrazione lascia aperta la questione del passaggio successivo. È proprio lì che altre materie mostrano quanto possa essere impegnativo trasformare una fonte alternativa in una fornitura.

Una miniera non consegna un materiale qualificato

Le terre rare entrano nella produzione industriale attraverso una famiglia di elementi con impieghi differenti. Alcuni, come neodimio e praseodimio, sono importanti per i materiali destinati ai magneti permanenti. Il compratore cerca una composizione determinata: la disponibilità complessiva della famiglia non gli dice quanta materia utile possa ottenere per quella specifica destinazione.

Nel minerale e nel concentrato gli elementi possono essere presenti insieme. Il trattamento deve portarli alle forme richieste e, quando necessario, separarli. Una miniera può quindi fornire un concentrato a un impianto situato altrove, dal quale usciranno ossidi o altri prodotti con caratteristiche distinte. Per valutare un'alternativa bisogna seguire questa trasformazione: la presenza di una miniera fuori dal paese dominante non garantisce una separazione indipendente.

Per il 2025 USGS stima 390.000 tonnellate mondiali di equivalente di ossidi di terre rare contenuto nella produzione mineraria, delle quali 270.000 in Cina. Il rapporto fra le due quantità è circa il 69%. La misura esprime il contenuto dei prodotti minerari su una base comune; non è un totale di ossidi già separati e non assegna la stessa quota a ogni elemento della famiglia. [5]

La differenza ha conseguenze concrete. Un concentrato può contenere elementi in proporzioni diverse da quelle richieste dal mercato. La sua trasformazione richiede impianti e processi adeguati alla materia in ingresso, oltre alla gestione delle impurità e dei residui. La quantità disponibile in miniera non può essere trasferita direttamente alla colonna delle forniture industriali senza considerare questi passaggi.

Anche dopo la separazione resta la conformità. Il compratore deve poter usare il prodotto con il proprio processo e ottenere risultati regolari. Purezza, composizione e limiti alle impurità costituiscono parte della specifica di fornitura; cambiare produttore può richiedere prove e verifiche. Un campione conforme dimostra una possibilità, mentre la continuità commerciale richiede che quella qualità venga mantenuta nei lotti successivi. Non esiste un tempo unico di qualificazione valido per tutte le materie e tutti gli impieghi.

Il percorso dal concentrato al materiale per magneti chiarisce dunque perché l'alternativa debba comprendere più della miniera. La separazione e la

qualificazione sono funzioni industriali da assicurare, con attrezzature e competenze che devono essere disponibili nel punto appropriato della catena.

La compatibilità degli impianti costituisce un vincolo ulteriore. Un processo progettato per un concentrato non è automaticamente adatto a un altro: composizione e impurità possono richiedere modifiche alle lavorazioni e nuove verifiche del prodotto. Per utilizzare una fonte mineraria alternativa occorre quindi accertare che gli impianti successivi possano trattarla, mantenendo il recupero e la qualità richiesti. La loro capacità nominale, da sola, non risolve questa verifica.

Allargando lo sguardo agli altri materiali, emerge una concentrazione della raffinazione che supera il solo caso delle terre rare. Nel rapporto IEA del 2026, escludendo proprio le terre rare, la quota media del primo paese raffinatore nel gruppo analizzato passa dal 70% nel 2023 al 72% nel 2025. La media riguarda quel gruppo di materiali e non attribuisce il 72% a ciascuno di essi. La fonte segnala separatamente progressi di diversificazione nella raffinazione delle terre rare. [6]

Questa media non è direttamente confrontabile con il 69% minerario delle terre rare: cambiano materiali, fase e tipo di indicatore. Serve a collocare il problema su una scala più ampia. Gli annunci di nuove fonti estrattive possono coesistere con trasformazioni ancora concentrate; per capire se la dipendenza si riduca occorre osservare dove esce il prodotto utilizzabile.

Come un’interruzione attraversa la catena

Una filiera può perdere continuità in punti differenti. Se cambia la composizione della materia estratta, gli impianti successivi possono dover modificare il trattamento. Se manca energia, un reagente o una parte essenziale dell’attrezzatura, il materiale in ingresso può accumularsi mentre diminuisce l’uscita. Se il prodotto perde conformità, una quantità fisicamente presente può non essere accettata dal cliente. Sono interruzioni che non richiedono l’esaurimento del giacimento.

Il rischio giacimentale riguarda le condizioni della risorsa e la possibilità di sfruttarla; quello industriale riguarda la trasformazione stabile in un prodotto. I due si incontrano nell’impianto: una mineralogia diversa può richiedere un processo diverso, e un processo non adatto può limitare il recupero o la qualità.

Una grande disponibilità geologica può così essere accompagnata da un'offerta industriale molto più ristretta.

La concentrazione amplifica le conseguenze quando gli altri produttori non hanno la capacità libera o le caratteristiche necessarie. Non basta che esistano impianti in altri paesi: bisogna sapere che cosa lavorano, quale prodotto ottengono e se possono aumentare l'attività. Una capacità nominale misura una possibilità nelle condizioni dichiarate; il volume conforme effettivamente disponibile misura ciò che il compratore può procurarsi.

Il rischio commerciale interviene anche quando il materiale è stato prodotto. Contratti, credito e condizioni di vendita stabiliscono chi possa acquistarlo e a quali termini. Un lotto già impegnato non è disponibile per un altro cliente; una consegna incompatibile con il calendario di produzione può non risolvere il fabbisogno. Avere individuato un'offerta mondiale non equivale quindi ad aver assicurato l'accesso alla parte necessaria.

Le decisioni politiche e regolamentari possono modificare questo accesso. Dazi, quote, licenze e divieti agiscono attraverso meccanismi diversi. Una licenza all'esportazione richiede che l'operazione sia autorizzata secondo determinate regole; un divieto la impedisce nel perimetro previsto. L'esistenza di una procedura di licenza, da sola, non dimostra che tutte le esportazioni siano ferme o che ogni compratore sia trattato nello stesso modo.

In termini operativi, un'autorizzazione può aggiungere documentazione, verifiche e tempi di attesa. Quando l'esito o la durata diventano incerti, il compratore può dover sostenere maggiori costi di gestione, anticipare gli ordini o valutare scorte di sicurezza più ampie. L'allocazione delle operazioni autorizzate può inoltre modificare l'accesso fra clienti o destinazioni. Questi sono effetti possibili del meccanismo: per attribuirli a un provvedimento concreto servono il suo testo, il periodo e riscontri sulle operazioni effettive.

La distinzione è essenziale anche per leggere le conseguenze economiche. Un aumento del prezzo può dipendere da più fattori; una diminuzione del flusso doganale può riflettere tempi di autorizzazione, domanda, scorte o condizioni produttive. La coincidenza temporale con una misura non basta a quantificare il danno che essa avrebbe causato. Il rischio geopolitico diventa comprensibile seguendo il cambiamento delle condizioni di accesso e la risposta delle imprese.

Nella fabbrica l'interruzione si manifesta infine come distanza fra input richiesto e input disponibile. Il materiale può essere assente, arrivare troppo tardi o avere caratteristiche incompatibili. La possibilità di continuare dipende dalle quantità conformi già disponibili e dalle alternative utilizzabili. Un mercato complessivamente ben fornito può quindi lasciare esposto un acquirente legato a una fase concentrata o a una specifica difficile da sostituire.

La propagazione segue anche un calendario. Un passaggio a valle può proseguire finché dispone della materia già acquistata, pur mentre quello precedente ha ridotto l'attività. Il problema appare quindi in momenti diversi lungo la catena. Quando una consegna alternativa richiede nuove prove o trasformazioni, il suo tempo va confrontato con l'intervallo di autonomia disponibile. Il fatto che il materiale ricominci a uscire dalla miniera non garantisce il ripristino immediato di ogni fornitura successiva: restano da completare lavorazioni, verifiche e consegne. Per capire la durata dell'interruzione bisogna seguire il percorso del prodotto richiesto.

Costruire un'alternativa richiede tempo

Individuare un'altra risorsa apre un percorso. Bisogna provarne le caratteristiche, scegliere il processo, definire un progetto economicamente sostenibile e assicurare le condizioni per realizzarlo. Autorizzazioni, finanziamento, costruzione, avviamento e qualificazione possono sovrapporsi in parte, ma ciascuna risponde a una domanda che il semplice annuncio non risolve. Un progetto può avanzare in un ambito e restare incerto in un altro.

La distanza temporale è visibile nell'analisi IEA pubblicata nel 2021 sui 35 maggiori progetti minerari entrati in produzione fra il 2010 e il 2019. Dal momento della scoperta alla prima produzione erano trascorsi in media oltre 16 anni. Il dato riguarda quel campione storico di nuove miniere: non è la durata universale di un impianto e non si applica automaticamente a raffinerie o attività di riciclo. [7]

Per l'industria che cerca una fornitura durante una crisi, il significato è la differenza fra i due calendari. Una decisione di acquisto può cambiare rapidamente; una nuova capacità estrattiva deve superare condizioni materiali, tecniche ed economiche. Il prezzo può stimolare la ricerca e gli investimenti,

ma gli operatori devono valutare se la domanda e i ricavi sosterranno l'attività quando l'impianto sarà pronto.

La costruzione richiede capitale prima di generare vendite. Dopo l'avviamento, attrezzature e processo devono ottenere lotti conformi con regolarità: i primi risultati non dimostrano ancora il ritmo dell'attività commerciale. Anche raggiunta questa condizione, l'alternativa deve sostenersi economicamente. Se i prezzi di vendita scendono sotto i costi di estrazione e trattamento, la nuova fonte può dover ridurre o sospendere l'attività. Il finanziamento iniziale non elimina questo rischio: impianti, personale e input richiedono risorse durante tutto l'esercizio. Per il compratore, la continuità dipende quindi sia dalla riuscita tecnica sia dalla possibilità del produttore di mantenere l'offerta sul mercato.

L'alternativa deve inoltre comprendere le risorse che rendono possibile la trasformazione. Energia, acqua, reagenti, personale specializzato e gestione dei residui fanno parte dell'esercizio dell'impianto. Cambiare localizzazione può modificare costi e disponibilità di questi input. Una dipendenza ridotta sul materiale principale può essere accompagnata da una nuova esposizione su un passaggio meno visibile.

Acqua e residui collegano il progetto al territorio. La valutazione deve distinguere quanta acqua viene prelevata, quanta viene consumata e quale qualità abbia quella restituita. Il trattamento trasferisce alcune componenti della materia in scarti che richiedono gestione. La possibilità di operare dipende anche da queste condizioni, oltre che dal recupero del materiale vendibile; ignorarle rende incompleta la valutazione della capacità futura.

Le autorizzazioni affrontano impatti, sicurezza e compatibilità del progetto con le regole applicabili. Tempi più prevedibili possono ridurre l'incertezza dell'investimento, ma il risultato industriale richiede comunque conformità e condizioni di esercizio sostenibili. Per lavoratori e comunità, un nuovo impianto porta attività e competenze insieme a rischi e pressioni da valutare nel luogo concreto. La diversificazione sposta anche la distribuzione di questi effetti.

Ridurre la concentrazione richiede quindi coordinamento fra fasi. Una miniera senza una trasformazione accessibile può continuare a dipendere dall'anello dominante; una raffineria senza materia in ingresso adeguata può avere capacità inutilizzata. Il compratore ha bisogno che le diverse parti

dell'alternativa arrivino a funzionare insieme. Durante questa costruzione resta un intervallo da proteggere.

Proteggersi oggi e cambiare domani

Nel breve periodo una scorta utilizzabile consente di continuare mentre una consegna manca. La sua funzione dipende dalla materia contenuta, dalla conformità e dalla possibilità di prelevarla quando serve. Il totale di un deposito può includere lotti già impegnati, di proprietà altrui o non adatti al processo. La quantità fisicamente immagazzinata non misura da sola la protezione dell'acquirente.

Per valutare la copertura occorre mettere in rapporto la scorta effettivamente disponibile con il fabbisogno pertinente. Se quest'ultimo cambia, cambia anche la durata della protezione. Non esiste una quantità minima valida per ogni industria: contano i tempi di consegna, l'incertezza, la possibilità di sostituire il materiale e le conseguenze di un arresto. Una riserva di materia compra un intervallo nel quale cercare o attendere un'altra fornitura.

Questa protezione assorbe risorse. Il materiale deve essere acquistato e custodito, immobilizzando capitale; secondo la forma richiede condizioni che ne conservino integrità e qualità. Occorre inoltre decidere chi lo possieda e chi possa disporne durante una crisi. Scorte strategiche pubbliche e scorte operative private rispondono a responsabilità e priorità che devono essere esplicitate, senza presumere che ogni quantità accantonata sia immediatamente accessibile a tutte le imprese.

Anche i contratti possono rendere più prevedibile la fornitura. Definiscono quantità, qualità, tempi e responsabilità, e permettono alle parti di organizzare acquisti e attività. Restano però legati alla capacità della controparte di rispettare l'accordo. Un impegno contrattuale non produce il materiale se il passaggio industriale si ferma; può stabilire conseguenze e rimedi, senza eliminare la causa fisica della carenza.

Un contratto di lungo periodo può anche sostenere il cambiamento strutturale. Una domanda più prevedibile aiuta il produttore a valutare l'investimento e il finanziatore a esaminarne le prospettive. Il compratore assume tuttavia impegni su quantità, condizioni e controparte. La funzione temporale dei

contratti non è dunque unica: possono proteggere un calendario di consegne e contribuire alla costruzione di una capacità futura.

Per modificare l'esposizione nel medio e lungo periodo, la diversificazione deve raggiungere l'anello concentrato. Aggiungere venditori che comprano lo stesso intermedio dalla stessa fonte distribuisce i rapporti commerciali senza necessariamente distribuire il rischio produttivo. Occorre valutare l'indipendenza delle filiere e la loro compatibilità con la specifica richiesta, comprese le fasi di trasformazione.

Una fonte alternativa utile durante un'interruzione deve anche avere spazio per fornire quantità aggiuntive. La produzione già venduta ad altri clienti non diventa automaticamente disponibile, e una capacità non utilizzata può avere limiti tecnici o economici. La diversificazione va quindi esaminata sia nella situazione ordinaria sia nella capacità di risposta. Il contratto può prevedere quantità e modalità di consegna; la filiera deve poterle sostenere. Se diversi acquirenti cercano contemporaneamente la stessa alternativa, il numero dei fornitori sulla carta non descrive quanta materia conforme possa essere redistribuita fra loro.

Accordi fra paesi, investimenti e collaborazioni industriali possono facilitare accesso, infrastrutture e sviluppo di competenze. Il loro contributo va seguito fino al progetto e all'output. Un'intesa può aprire possibilità senza garantire finanziamento, autorizzazione o competitività dell'impianto. I costi della capacità alternativa devono trovare soggetti disposti a sostenerli, attraverso il prezzo pagato, il capitale investito o gli strumenti pubblici utilizzati.

Il riciclo aggiunge una fonte quando i materiali diventano effettivamente disponibili al recupero. La presenza di una materia nei prodotti oggi in uso non significa che essa possa alimentare domani una raffineria. Occorrono flussi a fine vita, raccolta e trattamento; il materiale recuperato deve poi raggiungere caratteristiche compatibili con la domanda. Il contributo alla sicurezza dipende dall'uscita conforme, non dalla sola riciclabilità teorica.

La sostituzione modifica invece il fabbisogno. Un altro materiale o una composizione diversa possono ridurre la domanda della materia vulnerabile, ma devono assicurare prestazioni e compatibilità con il processo. Prove, adattamenti e nuova qualificazione richiedono tempo. La soluzione può inoltre

trasferire una parte della dipendenza ad altri input, dei quali bisogna conoscere la disponibilità.

Queste risposte hanno funzioni complementari. Le scorte proteggono un intervallo; le relazioni contrattuali organizzano accesso e impegni; nuove filiere, riciclo e sostituzione possono cambiare l'esposizione che resta dopo quell'intervallo. La combinazione dipende dal materiale e dall'impiego. Il suo risultato va misurato nella continuità ottenuta e nelle alternative realmente utilizzabili, insieme ai costi e ai rischi sostenuti.

Obiettivi europei e progetti italiani

Il CRMA traduce parte di queste esigenze in parametri per il 2030. L'articolo 5 orienta la capacità complessiva dell'Unione verso la copertura di almeno il 10% del consumo annuo di materie strategiche tramite estrazione, il 40% tramite trasformazione e il 25% tramite riciclaggio. Prevede un aumento significativo delle capacità per ciascuna materia, con la qualificazione delle riserve disponibili per l'estrazione. Le percentuali riguardano capacità e non produzione già ottenuta; descrivono fasi successive e non si sommano. [1]

Un altro parametro riguarda la diversificazione: nessun singolo paese terzo dovrebbe coprire più del 65% del consumo annuo dell'Unione di ciascuna materia strategica in ogni fase di trasformazione pertinente. Il consumo usato dal regolamento come base di calcolo esclude le materie già incorporate in prodotti intermedi o finali immessi sul mercato dell'Unione. Questa misura lascia quindi fuori anche una parte della dipendenza legata ai componenti e ai beni finiti importati. [1]

L'Italia ha adottato il decreto-legge 84 del 2024, convertito con modificazioni nella legge 115 dello stesso anno, per organizzare il governo dell'approvvigionamento e le procedure relative alle materie critiche strategiche. L'esistenza del quadro nazionale non indica quanta materia venga prodotta o recuperata, né attribuisce all'Italia il raggiungimento dei parametri europei. [8][9]

Un esempio concreto è LIFE22-ENV-IT-INSPIREE. Nell'allegato alla decisione europea del marzo 2025 sui progetti strategici è indicato come progetto in corso in Italia, promosso da Itelyum Regeneration, per il riciclaggio di terre rare per magneti. Il documento prova il riconoscimento del progetto; non riporta

capacità, data di avvio o produzione commerciale. Per conoscere lo stato di avanzamento e le quantità eventualmente disponibili occorrono ulteriori riscontri sulle autorizzazioni, sulla realizzazione e sull'attività dell'impianto. [10]

Fra una risorsa e una fornitura c'è una sequenza da rendere operativa. Ridurre una dipendenza significa creare alternative per le funzioni vulnerabili e conservarne qualità, continuità e sostenibilità economica. Una miniera, un impianto o un accordo acquistano questo significato quando il loro contributo arriva al materiale che l'industria può usare.

Una parte di quel materiale può tornare dai prodotti dopo l'impiego, attraverso il recupero dai rifiuti. Per diventare una fonte alternativa deve raggiungere le specifiche richieste e trovare un mercato. È il tema del prossimo capitolo: il passaggio dalla materia presente nei rifiuti alla materia prima secondaria effettivamente commerciabile.

Fonti e riferimenti

[1] Unione europea — Regolamento (UE) 2024/1252, articoli 2–5 e allegati I–II

https://publications.europa.eu/resource/oj/L_202401252.ITA.xhtml.L_202401252IT.html

[2] USGS — Mineral Commodity Summaries 2026, Cobalt, produzione mineraria e riserve

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-cobalt.pdf

[3] IEA — Global EV Outlook 2025, Electric vehicle batteries, concentrazione della filiera

https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-batteries

[4] ILO — Avvio del progetto GALAB nella Repubblica Democratica del Congo, 20 novembre 2024

https://www.ilo.org/resource/news/ilo-launches-galab-project-democratic-republic-congo-address-child-labour

[5] USGS — Mineral Commodity Summaries 2026, Rare Earths

https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-rare-earths.pdf

[6] IEA — Global Critical Minerals Outlook 2026, Executive summary

https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2026/executive-summary

[7] IEA — The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, Reliable supply of minerals, 2021

https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/reliable-supply-of-minerals

[8] Italia — Decreto-legge 25 giugno 2024, n. 84, Normattiva

https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legge:2024-06-25;84

[9] Italia — Legge 8 agosto 2024, n. 115, conversione del DL 84/2024, Normattiva

https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:legge:2024-08-08;115

[10] Commissione europea — Decisione C(2025)1904, allegato dei progetti strategici, pagina 2

https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/e9c90c91-7492-4047-bc51-d0c9d5e89a2f_en?filename=C_2025_1904_1_EN_annexe_acte_autonome_part1_v2.pdf

[11] Commissione europea, Joint Research Centre — RMIS, Critical and Strategic Materials, elenchi del CRMA e accesso alle schede delle materie

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/critical-and-strategic-materials

[12] SCRREEN2 — Schede delle materie prime a supporto della valutazione europea 2023, sezioni sugli impieghi industriali

https://scrreen.eu/crms-2023/

[13] Commissione europea, Joint Research Centre — Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study, 2023

https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRMs_for_Strategic_Technologies_and_Sectors_in_the_EU_2023.pdf

04.31 – Materie prime secondarie

Una fabbrica può acquistare materia recuperata da prodotti già usati o da scarti di lavorazione. Quella provenienza, però, non descrive ancora ciò che entrerà nel processo. Una balla di carta, un carico di rottame o un granulo di plastica devono possedere proprietà compatibili con il prodotto da ottenere. L'impresa deve sapere quale parte della massa sarà utilizzabile, quali controlli richiederà e se la fornitura potrà ripetersi senza modificare continuamente la lavorazione.

La materia prima secondaria è materiale recuperato nuovamente impiegabile come materia prima. Il suo valore industriale dipende dalla qualità e dalle condizioni d'uso, oltre che dalla quantità disponibile. Porta con sé una storia: composizioni originarie, rivestimenti, additivi, contaminazioni, lavorazioni e impieghi precedenti possono influenzare ciò che sarà possibile produrre.

Per capire quanto il recupero contribuisca all'approvvigionamento occorre seguire questa materia fino alla funzione successiva. La raccolta misura l'intercettazione di un flusso; il riciclaggio riguarda la sua trasformazione materiale; la vendita e l'impiego descrivono altri passaggi. La sostituzione di una materia primaria richiede ancora una verifica: quale prodotto si sarebbe ottenuto senza quel recuperato, con quali prestazioni e consumi? È lungo questi passaggi che una disponibilità apparente diventa una fornitura concreta.

La quantità cambia lungo il percorso

Le masse della filiera rispondono a domande differenti. Il materiale generato o immesso sul mercato definisce un primo perimetro; quello raccolto rappresenta la parte intercettata. La selezione separa ciò che può essere alimentato a un processo da ciò che richiede un'altra destinazione. Dopo il trattamento, occorre misurare quanto materiale recuperato soddisfi la specifica richiesta. Una parte può essere venduta, una parte restare in deposito. Solo seguendo l'impiego successivo si conosce la massa incorporata nel nuovo prodotto.

Il passaggio fra queste quantità comprende trasformazioni fisiche. Acqua, componenti estranei, adesivi, rivestimenti e frazioni incompatibili possono accompagnare il materiale utile. La pulizia rimuove contaminanti, ma può trascinare anche materia recuperabile. Nel materiale ottenuto possono invece

rimanere acqua o sostanze aggiunte durante la preparazione. Confrontare due pesi senza conoscere queste componenti può far apparire come maggiore recupero ciò che è soltanto una diversa umidità o composizione.

La resa è il rapporto fra la quantità ottenuta da una lavorazione e quella alimentata al processo. Può riguardare una selezione, un trattamento o l'intero percorso. Dire che un impianto recupera una certa percentuale richiede quindi di nominare il materiale alimentato, il punto in cui si pesa il materiale ottenuto e le condizioni di misura. La resa di un ingresso separato e omogeneo non descrive necessariamente un carico misto. Anche due impianti dedicati alla stessa famiglia di materiali possono ricevere partite con composizioni differenti.

La provenienza aiuta a interpretare tali differenze. Lo scarto pre-consumo nasce durante la fabbricazione, prima dell'uso del prodotto; quello post-consumo arriva dopo l'utilizzo e può avere una storia più articolata. Lo scarto interno che ricircola nello stesso impianto è un caso ulteriore. Se viene pesato ogni volta che attraversa una fase, contribuisce alle masse lavorate più volte, pur senza costituire ogni volta un nuovo afflusso di materia. Il ricircolo è utile al processo, ma la somma dei passaggi non misura una disponibilità esterna aggiuntiva.

Queste categorie non stabiliscono da sole una graduatoria qualitativa. Uno scarto di produzione può avere composizione nota, ma essere fuori dalla specifica necessaria al compratore. Un flusso post-consumo ben separato può invece diventare una materia ripetibile. La distinzione serve a capire quali informazioni mancano e quali verifiche occorrono, senza attribuire automaticamente purezza o idoneità alla sola origine.

Anche il tempo modifica il bilancio. Un prodotto conforme non venduto entro la fine dell'anno rimane una giacenza: non è per questo una perdita del trattamento. Una partita venduta può essere ancora in viaggio o nel magazzino del compratore. Il suo incorporamento nel prodotto successivo può avvenire in un altro periodo. Quando si confrontano risultati annuali, queste differenze temporali devono essere separate dalle perdite effettive di materia.

Il confine geografico aggiunge un'altra distinzione. Esportare un materiale può portarlo a un impiego industriale reale all'estero; importare un recuperato può alimentare una fabbrica nazionale. La spedizione, da sola, non prova che il materiale sia stato utilizzato. Allo stesso modo, sommare flussi osservati prima

e dopo una trasformazione rischia di contare più volte la stessa materia. Il bilancio deve seguire le forme del materiale, le destinazioni e il periodo, oltre ai pesi.

Anche i materiali ottenuti vanno distinti secondo la loro destinazione. Un trattamento può produrre più materiali utili, ma soltanto alcuni soddisfare il grado richiesto da un cliente. Sommare tutti gli sbocchi descrive il recupero complessivo; chiamarli tutti fornitura di quel grado ne sovrastima la disponibilità. Occorre conservare un bilancio per ciascun materiale ottenuto e riconciliare la somma con l'ingresso, tenendo separati i residui e le variazioni di giacenza. La quantità commerciale utile emerge dalla relazione fra il bilancio fisico e la specifica.

La quantità disponibile per il compratore deve però possedere caratteristiche che il processo sappia accettare. Una massa correttamente contabilizzata può restare inutilizzabile per un determinato prodotto: la verifica si sposta allora dalla quantità alla composizione del lotto.

Il forno compra una qualità

Il rottame di vetro rende visibile questo passaggio. Il materiale selezionato e preparato per la fusione viene chiamato pronto-forno. La vetreria lo impiega nella miscela con cui produce nuovo vetro, sostituendo parte delle materie prime. La sua idoneità dipende da composizione, colore e presenza di materiali incompatibili. Il fatto che i frammenti provengano da oggetti di vetro non garantisce che tutto il carico si comporti nello stesso modo durante la fusione.

Ceramica, pietre e porcellana possono lasciare inclusioni, cioè parti estranee nel vetro ottenuto, e compromettere il prodotto. Altri vetri possono avere composizioni inadatte alla miscela richiesta. Plastica, metalli e residui organici introducono ulteriori componenti da separare. Il controllo della partita serve quindi a evitare che una massa apparentemente simile nasconda comportamenti differenti. Non basta rimuovere ciò che si riconosce come altro materiale: occorre anche distinguere fra vetri compatibili con la destinazione.

Nei rottami siderurgici il problema può assumere un'altra forma. Rame e stagno presenti nella carica possono rimanere come elementi residui nel metallo: la semplice rifusione non li elimina automaticamente. Le tolleranze dipendono dal grado di acciaio da ottenere. Se la composizione non è adatta,

occorre migliorare la separazione, destinare il rottame a gradi compatibili oppure integrare la carica con materiale di composizione nota. Mentre nel vetro un frammento incompatibile può generare un'inclusione, nell'acciaio la composizione del bagno liquido può limitare la prestazione dell'intero prodotto. [1]

Una composizione media favorevole non esclude inoltre parti del carico più contaminate. Il controllo deve tenere conto della distribuzione delle impurità nella partita e della variabilità fra consegne. Una fornitura diventa ripetibile quando le misure e le tolleranze permettono al processo di assorbire tale variabilità. L'omogeneità del lotto non si deduce dal fatto che tutti i frammenti siano commercializzati sotto lo stesso nome.

Per il vetro anche il colore delimita gli impieghi. Il materiale adatto a una miscela colorata non è automaticamente adatto a una produzione incolore. La possibilità di separare i frammenti modifica quindi l'offerta di una specifica qualità. Una disponibilità complessiva di rottame può convivere con una disponibilità più limitata del colore e della composizione richiesti. Il compratore acquista quella qualità, mentre una statistica sul vetro raccolto aggrega materiali con destinazioni potenzialmente differenti.

Il Consorzio Recupero Vetro, CoReVe, riporta per gli imballaggi italiani del 2024 una quantità riciclata di 2.102.979 tonnellate e un tasso dell'80,3%. Quest'ultimo mette in rapporto il riciclo con l'immesso al consumo degli imballaggi secondo il rendiconto della filiera. Non è la resa di un singolo impianto e non misura tutta la materia alimentata alle vetrerie. La quantità raccolta, quella riciclata e la carica dei forni hanno perimetri diversi: sottrarre i totali annuali non basta a ricostruire gli scarti di processo. [2]

La preparazione richiede attività industriali e lavoro qualificato. Campionare il carico, ispezionarlo, verificare la composizione e registrare gli esiti consente di collegare la partita consegnata ai limiti di accettazione. Il campione deve rappresentare il materiale: scegliere soltanto la parte più pulita renderebbe poco utile un'analisi accurata. Chi esegue queste operazioni deve poter accedere al carico e movimentarlo in condizioni controllate. La qualità documentata nasce anche dall'organizzazione del lavoro, oltre che dalle macchine di separazione.

Le frazioni escluse dal pronto-forno non hanno necessariamente tutte la stessa destinazione. Il rapporto CoReVe descrive ulteriori recuperi delle frazioni fini e di parte degli scarti di selezione per ottenere sabbia di vetro, utilizzabile in impieghi compatibili. Si tratta di un altro prodotto e di un altro percorso: recuperare quella massa non significa averla trasformata tutta nel pronto-forno richiesto dalla vetreria. La nuova destinazione deve essere riconosciuta nel bilancio, con le proprie caratteristiche e il proprio sbocco. [2]

La rifondibilità del vetro permette cicli ripetuti, ma non elimina perdite, selezione e controllo. Una proprietà del materiale non garantisce che ogni partita conservi le condizioni per sfruttarla. Per rendere commerciabile il lotto serve inoltre un percorso giuridico coerente con la provenienza e l'uso. L'accettazione del forno e la condizione legale della materia sono verifiche collegate, che non si sostituiscono reciprocamente.

Il percorso legale e la prestazione sono prove diverse

L'industria può ricevere materiali ancora qualificati come rifiuti, quando l'impianto è autorizzato a gestire quella materia e a svolgere l'operazione prevista. Può anche acquistare prodotti che hanno cessato di essere rifiuti. La cessazione della qualifica, indicata con l'espressione inglese *end of waste*, è dunque uno dei percorsi possibili; non è un passaggio obbligatorio prima di ogni utilizzo industriale. Il nome commerciale o la pulizia del carico non bastano a scegliere quale regime si applichi.

Un sottoprodotto segue una distinzione ulteriore. Deriva da un processo il cui scopo principale non è produrlo e può non essere rifiuto quando ricorrono le condizioni previste. Nell'articolo 5 della direttiva quadro europea sui rifiuti, nel testo consolidato al febbraio 2024, queste comprendono certezza dell'uso successivo, possibilità di impiego diretto senza trattamenti diversi dalla normale pratica industriale, origine come parte integrante del processo e legalità dell'utilizzo. La possibilità astratta di trovare un cliente non equivale alla certezza dell'impiego. [3]

Lo stesso testo, all'articolo 6, collega la cessazione della qualifica di rifiuto al recupero e a condizioni su uso specifico, mercato o domanda, requisiti tecnici e norme applicabili, oltre all'assenza di effetti complessivamente avversi per salute e ambiente. Queste condizioni mostrano che la trasformazione giuridica

riguarda un materiale con una destinazione definita. Non certifica però qualsiasi prestazione richiesta da qualsiasi industria. Una partita può interessare un mercato e non essere adatta al particolare processo di un compratore. [3]

La carta permette di osservare concretamente la differenza. Il decreto italiano 22 settembre 2020, n. 188, pubblicato nel febbraio 2021, disciplina la cessazione della qualifica di rifiuto di carta e cartone. L'articolo 3 rinvia alla norma tecnica UNI EN 643 e ai requisiti dell'allegato 1. Fra questi, il contenuto di rifiuti organici, compresi gli alimenti, deve essere inferiore allo 0,1% in peso: su una tonnellata significa meno di un chilogrammo. La soglia riguarda questa categoria di impurità, non il totale di tutte le sostanze estranee. [4]

La traduzione in chilogrammi chiarisce la scala del requisito, ma non descrive la resistenza del foglio che verrà prodotto. Una cartiera deve conoscere anche le fibre disponibili, la loro storia e il comportamento durante la lavorazione. Umidità, adesivi, rivestimenti e altri componenti influiscono sulla preparazione della materia. Le proprietà necessarie a un determinato grado di carta non si possono dedurre dal solo rispetto della soglia organica.

Le fibre recuperate possono accorciarsi e modificare la propria capacità di rigonfiarsi e formare nuovi legami dopo l'essiccazione. La cartiera deve combinare gli ingressi in funzione delle caratteristiche del foglio. Alcune ricette richiedono integrazione con fibre vergini; altre possono utilizzare qualità recuperate differenti. Il risultato dipende dalla prestazione cercata e dalla composizione effettiva. Non esiste un numero universale di cicli che descriva allo stesso modo tutta la carta e tutti i prodotti cartari.

Questa verifica continua al momento della consegna. La documentazione permette di identificare origine, trattamento e caratteristiche dichiarate della partita; prove e controlli verificano se il materiale risponde all'impiego previsto. Il compratore può richiedere proprietà ulteriori rispetto al minimo necessario per il percorso legale. Se un lotto viene respinto per una specifica tecnica, ciò non dimostra automaticamente che ogni requisito giuridico sia venuto meno. Le ragioni della contestazione vanno individuate separatamente.

La conformità legale rende possibile una determinata gestione; quella industriale rende possibile un determinato risultato. Il materiale conforme oggi porta inoltre le conseguenze della lavorazione nel ciclo seguente. Per capire il

valore del recupero bisogna quindi osservare anche dove andrà la materia dopo il nuovo impiego e quali proprietà potrà conservare.

La destinazione prepara il ciclo successivo

Per le plastiche la forma di consegna può suggerire un'uniformità che deve ancora essere dimostrata. Una scaglia, un macinato o un granulo descrivono una forma del materiale, non tutte le sue proprietà. Il trasformatore deve conoscere il polimero, il grado, gli additivi e i contaminanti. Colore, odore, umidità e comportamento durante la lavorazione possono restringere le applicazioni. Due granuli dall'aspetto simile possono produrre risultati diversi sulla stessa linea.

Per un granulo, ad esempio, interessa il comportamento del materiale quando viene riscaldato e lavorato, oltre alla sua identificazione chimica. Un lotto che contiene il polimero desiderato può includere sostanze che ne alterano colore, lavorabilità o risultato. Dichiarare la famiglia della plastica restringe il problema, ma non equivale a dichiarare il grado. La specifica deve trasformare queste differenze in proprietà misurabili e limiti compatibili con l'applicazione.

Il polietilene tereftalato, PET, usato anche per bottiglie e fibre, mostra quanto conti la destinazione. Il materiale recuperato dalle bottiglie può alimentare nuovi imballaggi oppure entrare nella produzione di fibre tessili. Entrambi sono impieghi materiali. Il ritorno alla funzione originaria mantiene però un percorso diverso dal passaggio a un'altra famiglia di prodotti. La qualità richiesta e le possibilità di recupero successivo dipendono dalla destinazione scelta.

Il cambiamento di funzione non rende fittizio il riciclaggio. Una fibra ottenuta da PET recuperato può sostituire materia nella propria applicazione. Per valutare il risultato occorre distinguere questa sostituzione dalla capacità di ritornare ancora alla stessa funzione. Il termine *downcycling* indica una perdita di qualità, valore o possibilità d'impiego nei cicli successivi. Un semplice cambiamento di prodotto non basta, da solo, a dimostrare che ogni prestazione sia peggiorata: bisogna nominare la proprietà o la possibilità che si perde. Nel passaggio da bottiglia a fibra, il PET esce dal circuito degli imballaggi: il ritorno a una bottiglia alimentare richiederebbe un recupero e una nuova verifica di idoneità. Nel caso studiato dall'EEA, la possibilità di intercettare nuovamente

quel materiale è inoltre inferiore per le fibre tessili rispetto agli imballaggi, dotati di sistemi di riciclo più consolidati. [5]

La trasformazione in un nuovo prodotto determina anche come la materia potrà essere intercettata in futuro. Un materiale omogeneo inserito in un circuito di recupero esistente ha una prospettiva diversa dalla stessa sostanza dispersa in un insieme di prodotti difficili da separare. La composizione del nuovo oggetto, gli altri materiali con cui viene combinato e l'organizzazione del suo fine vita influiscono sul ciclo seguente. La scelta industriale attuale modifica quindi una disponibilità che si manifesterà più avanti.

L'Agenzia europea dell'ambiente, EEA, propone di valutare la qualità del riciclaggio considerando tre dimensioni: efficienza del percorso, conservazione delle possibilità nei cicli successivi ed effetti ambientali. Il suo caso metodologico sul PET, riferito al 2018 e al 2020, confronta destinazioni in imballaggi e fibre. La lettura non si limita alle caratteristiche del materiale recuperato: comprende ciò che viene perso lungo il percorso e la possibilità di un ulteriore riciclo. Alcune quote e valutazioni del modello sono ipotesi, non una fotografia della produzione italiana attuale. [5]

Questa distinzione aiuta a leggere due risultati che possono muoversi diversamente. Un percorso può aumentare la quantità recuperata, ma indirizzarla verso impieghi dai quali sarà più difficile recuperarla nuovamente. Un altro può conservare meglio la funzione, ma richiedere una selezione più esigente, con altre perdite e costi. Non basta scegliere il risultato migliore su una sola di queste dimensioni per sapere quale percorso offra il beneficio complessivo maggiore.

Anche la qualità iniziale e quella richiesta all'arrivo devono restare distinte. La separazione può rendere il flusso più omogeneo, senza recuperare automaticamente tutte le proprietà perse durante l'uso o la lavorazione. Per ottenere un grado stabile possono servire preparazione e formulazione ulteriori. Ciò che entra nel prodotto successivo comprende quindi il recuperato effettivamente utilizzato e gli eventuali altri ingredienti della ricetta. La percentuale di contenuto riciclato descrive tale composizione, non la resa di tutta la filiera precedente.

Il controllo ambientale deve seguire questo stesso percorso. Trattare, lavare, asciugare e trasformare richiede risorse e può generare frazioni residue. La

metodologia EEA mette questi effetti in relazione con quelli evitati attraverso il recupero, ma il suo punteggio non incorpora i costi economici. Una buona valutazione ambientale non dimostra quindi automaticamente che il materiale trovi un compratore alle condizioni disponibili. [5]

Per la fabbrica, l'impiego successivo resta una decisione concreta su qualità, processo e prodotto. La possibilità di un ciclo ulteriore aggiunge una prospettiva temporale alla decisione, senza sostituirla. Un percorso utile sulla carta deve ancora poter fornire una materia conforme in quantità ripetibili e a un costo che consenta di sostenerne preparazione, controllo e utilizzo.

Il prezzo riguarda la quantità accettata

Il confronto economico comincia dalla quantità che il processo può usare. Il prezzo pagato per il carico è soltanto una voce: preparazione, trasporto, analisi, gestione degli scarti e non conformità possono modificare il costo della fornitura. Se una parte della massa non è accettabile, le spese sostenute per l'intero lotto devono essere attribuite alla quantità utile secondo un criterio coerente. Acquistare più peso non garantisce di acquistare più materia utilizzabile.

Il costo unitario all'ingresso si può esprimere come rapporto fra costi monetari attribuiti al lotto e tonnellate conformi accettate. La base di misura deve essere dichiarata: una quantità umida e una quantità secca possono condurre a valori diversi. Gli scarti possono incidere in due modi: selezionarli e gestirli aggiunge costi, mentre la loro esclusione riduce la massa utile sulla quale distribuire la spesa complessiva. Il costo unitario va quindi calcolato sulle tonnellate conformi accettate, anziché sull'intero peso acquistato.

Se il materiale richiede l'integrazione di una ricetta, il confronto deve proseguire fino al prodotto conforme. Recuperato, materia primaria, altre aggiunte e lavorazione concorrono allo stesso risultato. Confrontare soltanto il prezzo del recuperato con quello di una materia primaria può trascurare differenze di resa e prestazione. Il costo della quantità accettata e quello del prodotto ottenuto rispondono a due domande successive, entrambe necessarie per la decisione.

La qualificazione del fornitore aggiunge attività che precedono e accompagnano l'acquisto. Comprende analisi, prove di lavorazione, controllo

del risultato e verifica della ripetibilità. Un campione riuscito mostra che una determinata materia può funzionare; per programmare una produzione serve sapere se i lotti successivi rimarranno entro le tolleranze. La capacità nominale di un impianto di recupero non dimostra quanto di quella qualità potrà essere consegnato.

Il costo delle prime prove e quello dei controlli ripetuti hanno tempi diversi. La qualificazione iniziale può precedere una serie di forniture; l'ispezione e le analisi di accettazione accompagnano invece i lotti secondo il piano concordato. Attribuire ogni spesa alla stessa singola consegna renderebbe poco leggibile il confronto. Occorre distribuire i costi sulla quantità e sull'orizzonte a cui si riferiscono, conservando il rischio che una fornitura interrotta non permetta di recuperare le spese iniziali.

Queste verifiche richiedono persone e organizzazione. Chi campiona, analizza e interpreta i risultati deve collegare le misure alla partita; chi registra i controlli permette di rintracciare un problema; chi gestisce una contestazione deve distinguerne origine e conseguenze. Laboratorio, personale formato e tempo impiegato contribuiscono al costo della materia accettata. L'ispezione del carico e il lavoro sul materiale devono inoltre essere organizzati rispetto ai rischi di accesso, movimentazione e contatto con le frazioni presenti.

Il contratto deve rendere utilizzabili queste informazioni. Quantità, qualità, frequenza delle consegne, tolleranze e modalità di verifica definiscono ciò che il compratore può programmare. Una contestazione può generare nuove analisi, selezione ulteriore, restituzione o una diversa destinazione del lotto. Il costo dipende anche da chi sostiene tali operazioni e dal tempo durante il quale la materia resta indisponibile. Il prezzo iniziale può quindi rappresentare diversamente il rischio per due forniture apparentemente simili.

Domanda e continuità completano il confronto. Un recuperato molto pulito può ricevere un premio quando consente un impiego difficile da soddisfare con altre qualità. Un materiale meno adatto può perdere sbocco anche se è abbondante. Il prezzo del primario influenza le alternative, ma non determina meccanicamente il prezzo di ogni materia seconda: ritorno dei prodotti usati, separazione, preparazione e domanda dei singoli gradi hanno condizioni proprie.

Il mercato del vetro offre un riscontro circoscritto. CoReVe descrive nel rapporto 2025 un calo dei prezzi del rottame nel 2024 dopo i rialzi del 2023 e una diminuzione di circa il 34% delle importazioni. Secondo la fonte, il movimento dei prezzi aveva reso meno conveniente acquistare materiale dall'estero, mentre le importazioni continuavano a contribuire al fabbisogno delle vetrerie. Questa dinamica mostra che lo sbocco industriale dipende anche dalla convenienza relativa dei flussi, non soltanto dalla raccolta disponibile. Non fornisce una quotazione unica applicabile a qualsiasi qualità di vetro. [2]

Una fornitura sostenibile per le parti deve dunque combinare proprietà, costo e ripetibilità. La materia fisicamente recuperata può restare in deposito se le condizioni di scambio non trovano un equilibrio. Quando questi risultati vengono rappresentati su scala nazionale, le decisioni dei singoli impianti confluiscono in grandi indicatori. Occorre capire quali passaggi tali numeri misurino prima di ricavarne conclusioni sulla disponibilità industriale.

Che cosa dicono i numeri italiani ed europei

Nel 2024 il tasso di uso circolare dei materiali pubblicato da Eurostat era del 12,2% nell'Unione europea e del 21,6% in Italia. L'indicatore esprime il contributo dei materiali riciclati all'uso complessivo dei materiali: mette la circolazione secondaria in rapporto con una base più ampia della singola filiera di raccolta. Il confronto fra Italia e Unione riguarda lo stesso indicatore e lo stesso anno. [6]

Su questa base, il contributo relativo del riciclato è maggiore in Italia. Il risultato non garantisce però che siano disponibili tutti i gradi richiesti dalla produzione. L'indicatore aggrega materiali differenti e non descrive la specifica di una fibra, il colore del pronto-forno o la composizione di una carica metallica. Una quota nazionale elevata può convivere con un fabbisogno di importazioni o con una disponibilità limitata di un materiale particolare.

Un'altra misura riguarda gli imballaggi. Il Consorzio Nazionale Imballaggi, CONAI, riporta per il 2024 in Italia 10,7 milioni di tonnellate riciclate su oltre 13,95 milioni immessi al consumo, con un tasso del 76,7%. Il denominatore è l'immesso al consumo degli imballaggi secondo la rendicontazione della filiera, non l'uso complessivo di tutte le materie nell'economia. Il dato comprende materiali differenti entro quel perimetro. [7]

Il 76,7% e il 21,6% possono quindi coesistere senza contraddizione. Il primo descrive il riciclo rispetto all'immesso al consumo di un gruppo di prodotti; il secondo il ruolo dei materiali riciclati nell'uso materiale complessivo. La differenza numerica non misura una perdita avvenuta fra due fasi consecutive. Sono rapporti costruiti per rispondere a domande diverse, non due pesature dello stesso flusso a monte e a valle di un impianto.

I 10,7 milioni di tonnellate non costituiscono inoltre un inventario di tutte le materie prime secondarie prodotte in Italia. Il recupero industriale comprende altri flussi, mentre le quantità rendicontate per gli imballaggi non identificano da sole il peso effettivamente incorporato nei nuovi prodotti durante lo stesso anno. Tempi, punti di misura e destinazioni restano rilevanti anche quando una filiera dispone di una rendicontazione estesa.

Questi indicatori mantengono un'utilità precisa. Permettono di osservare il contributo dei materiali riciclati nel sistema e il risultato di un perimetro di prodotti riconosciuto. Per trasformare la misura aggregata in una risposta sull'approvvigionamento occorre però conoscere forma, grado, quantità e continuità della materia disponibile. È lo stesso passaggio che il compratore compie davanti a una partita: dal peso dichiarato alla funzione che il processo può ottenere.

La domanda sulla materia primaria evitata richiede un passo ulteriore. Né il tasso nazionale né il riciclo degli imballaggi dicono da soli quale ingresso sarebbe stato necessario senza il recuperato. Occorre confrontare prestazioni equivalenti e consumi di processo, conservando la distinzione fra circolazione della massa e sostituzione effettiva.

La sostituzione va dimostrata

Il confronto parte dal risultato da ottenere. La quantità di materiale recuperato utilizzata deve essere collegata a un prodotto con una funzione definita. L'alternativa costruita per il confronto deve offrire una prestazione equivalente: produrre lo stesso peso con caratteristiche diverse non basta. Occorre includere le rese, le aggiunte necessarie alla ricetta e le perdite pertinenti. La sostituzione primaria deriva da questa comparazione, non dalla sola quantità acquistata.

L’integrazione con materia primaria mostra perché i confini contino. Essa può essere necessaria a correggere una composizione o a raggiungere una prestazione. Il primario aggiunto appartiene alla ricetta del prodotto conforme e va confrontato con gli ingressi dell’alternativa. Non deve essere sottratto più volte dal beneficio del recupero, né ignorato. Occorre anche chiedersi da dove arriva il recuperato. Se una fabbrica acquista materiale che un’altra avrebbe già utilizzato, quest’ultima deve trovare un’alternativa. Se ricorre a materia primaria, il risparmio ottenuto dalla prima fabbrica può essere compensato dal maggiore consumo della seconda. Per capire quanto primario venga davvero evitato bisogna quindi osservare entrambe le destinazioni.

Il confronto può anche fermarsi a una conclusione parziale. Se sono note le masse impiegate ma non le prestazioni dell’alternativa, si può documentare il contenuto recuperato senza quantificare il primario evitato. Se è verificata la sostituzione materiale ma mancano alcuni consumi, resta incompleta la valutazione ambientale. Esplicitare quale risultato è dimostrato consente di utilizzare le informazioni disponibili senza trasformare ogni lacuna in un’assenza di beneficio o ogni impiego in un beneficio già misurato.

Lo stesso metodo serve alla valutazione ambientale. Energia, acqua, trasporto e preparazione producono effetti lungo il percorso; frazioni residue e contaminanti separati devono essere gestiti. Il confronto con la produzione primaria deve mantenere una funzione e confini coerenti. Un vantaggio sulle emissioni di gas serra non descrive automaticamente tutti gli effetti su acqua, residui o esposizioni locali. La qualità industriale aiuta a rendere possibile la sostituzione, ma il beneficio complessivo va verificato attraverso ciò che il sistema effettivamente richiede ed evita.

Il valore industriale del recupero si riconosce quando la materia può alimentare un processo con qualità e continuità adeguate. La massa riciclata documenta un risultato del percorso; la fornitura conforme ne permette l’impiego; il confronto a prestazione equivalente dimostra quanto primario venga evitato e con quali effetti ambientali. Sono risultati collegati, ciascuno con la propria prova. Tenerli distinti permette di riconoscere il recupero reale e di misurarne il beneficio senza attribuire alla sola circolazione della massa ciò che deve essere dimostrato nell’uso.

Fonti e riferimenti

[1] World Steel Association. Raw materials: qualità dei rottami, elementi residui e tolleranze dei gradi di acciaio; consultato il 2 ottobre 2026.

https://worldsteel.org/about-steel/raw-materials/

[2] CoReVe. Sintesi dei risultati del Piano specifico di prevenzione 2025, dati 2024: pronto-forno, riciclo degli imballaggi, mercato e sabbia di vetro; pp. 7, 18 e 48.

https://coreve.it/wp-content/uploads/2025/07/Sintesi_CoReVe_25_singole.pdf

[3] Parlamento europeo e Consiglio. Direttiva 2008/98/CE del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti, articoli 3, 5 e 6; EUR-Lex, testo consolidato al 18 febbraio 2024.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:02008L0098-20240218

[4] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare. Decreto 22 settembre 2020, n. 188, Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto da carta e cartone, articolo 3 e allegato 1. Gazzetta Ufficiale, Serie generale n. 33 del 9 febbraio 2021, testo originario; consultato il 2 ottobre 2026.

https://www.gazzettaufficiale.it/atto/vediMenuHTML?atto.codiceRedazionale=21G00011&atto.dataPubblicazioneGazzetta=2021-02-09&tipoSerie=serie_generale&tipoVigenza=originario

[5] European Environment Agency. Measuring the quality of recycling: metodologia e caso PET riferito al 2018 e al 2020.

https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/measuring-the-quality-of-recycling

[6] Eurostat. Over 12% of materials in the EU come from recycling, 19 novembre 2025; tasso di uso circolare dei materiali, dati 2024.

https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20251119-1

[7] CONAI. Riciclo imballaggi: Italia al 76,7%, 25 giugno 2025; risultati italiani 2024 e relativo perimetro di rendicontazione.

https://www.conai.org/news-e-press/riciclo-imballaggi-italia-al-767/

04.32 – Sostituzione ed efficienza materiale

Un prodotto più leggero richiede meno materia per essere realizzato, purché il risparmio nel pezzo finito non sia assorbito da scarti, rinforzi o lavorazioni aggiuntive. Per sapere quanto quel cambiamento riduca il fabbisogno di materiali bisogna però seguirlo oltre la fabbrica. Occorre vedere che cosa fa il prodotto, quanto a lungo rimane in uso e quante volte deve essere rimpiazzato. Una confezione che pesa meno ma protegge peggio il contenuto può far perdere materiale altrove; un componente più durevole può richiedere più materia all'inizio e meno nel tempo. Qui distinguiamo due cambiamenti: rimpiazzare un prodotto arrivato alla fine del suo uso e sostituire il materiale con cui viene realizzato. Il primo riguarda la frequenza degli acquisti; il secondo la soluzione tecnica impiegata.

La domanda di risorse nasce dal risultato che vogliamo ottenere: conservare, costruire, trasportare, lavare, proteggere. Il peso dell'oggetto è una misura importante, ma quel risultato dipende anche dalla sua forma, dalle condizioni d'impiego e dalla continuità del servizio. Per questo progettare con meno materia, conservare più a lungo un bene e sostituire un materiale sono interventi da confrontare con una funzione precisa.

Anche quando il confronto dimostra un risparmio, resta una seconda domanda: quante volte viene richiesto il servizio? Un miglioramento per singolo prodotto può accompagnarsi a una crescita della produzione abbastanza forte da far aumentare il consumo complessivo. Le due variazioni descrivono aspetti diversi dello stesso sistema.

Il confronto riguarda il servizio

Confrontare due oggetti sulla bilancia è semplice; stabilire se siano equivalenti richiede una domanda più precisa. Una confezione deve consegnare una certa quantità di prodotto integra, nelle condizioni previste. Un componente deve sopportare determinate sollecitazioni per una durata definita. Se il nuovo oggetto svolge soltanto una parte del compito del precedente, la differenza di peso non misura ancora un risparmio per lo stesso risultato.

La valutazione del ciclo di vita, abbreviata LCA dall'inglese *Life Cycle Assessment*, chiama *unità funzionale* questo riferimento comune: una quantità di servizio, con prestazioni e condizioni dichiarate, alla quale rapportare materiali e impatti. È il modo di chiedere quante risorse servano per ottenere la stessa cosa. Confrontare un contenitore con un altro può essere insufficiente; confrontare la consegna della stessa quantità di merce, con protezione equivalente, permette di includere anche contenitori sostitutivi e operazioni necessarie. [1]

Un esempio ipotetico mostra il ruolo della durata. Consideriamo due prodotti che svolgono la stessa funzione a ogni utilizzo, contando soltanto la massa degli oggetti, senza ricambi o recupero di parti. Il prodotto A pesa un chilogrammo e dura dieci utilizzi. Il prodotto B pesa 0,7 chilogrammi e dura sei utilizzi. Il secondo è più leggero del 30%, ma per confrontarli dobbiamo chiedere a entrambi lo stesso servizio.

Per sessanta utilizzi occorrono sei prodotti A, che complessivamente richiedono sei chilogrammi. Servono invece dieci prodotti B, per un totale di sette chilogrammi. Il prodotto più leggero richiede dunque sette chilogrammi contro sei: un chilogrammo di materia in più ogni sessanta utilizzi, pari al 16,7% in più rispetto ai sei chilogrammi iniziali. Il confronto su sessanta utilizzi esaurisce la durata di tutti gli oggetti conteggiati, senza lasciare parte del loro servizio da attribuire a impieghi successivi.

Questo risultato non significa che alleggerire accorci necessariamente la durata. Nell'esempio le due caratteristiche sono state cambiate insieme proprio per mostrare perché il peso del singolo pezzo non basti. Se la durata rimanesse uguale, il confronto sarebbe diverso. Nella pratica occorre verificare entrambe, senza dedurre la vita utile dal peso e senza trattare la durata dichiarata come utilizzo già avvenuto.

Il servizio comprende inoltre una qualità. Un imballaggio che arriva a destinazione ma lascia il contenuto danneggiato non ha fornito lo stesso risultato di uno che lo conserva integro. Un pezzo che deve essere rimpiazzato prima del previsto modifica la quantità di materiali necessaria per mantenere il funzionamento. La prestazione non è quindi una condizione accessoria aggiunta dopo il conto: stabilisce quali oggetti possono entrarvi come alternative.

Bisogna poi separare ciò che pesa nel prodotto da ciò che viene impiegato per realizzarlo. Il pezzo finito può contenere meno materiale mentre la linea richiede più materia in ingresso, per esempio perché produce più ritagli o respinge più pezzi. Durante l'uso possono aggiungersi ricambi, lubrificanti o elementi sostitutivi. La massa per prodotto descrive l'oggetto; la massa per servizio segue quanto è necessario per ottenere e mantenere la funzione. Nel passaggio dal disegno alla produzione, la distribuzione della materia determina quanto materiale occorre acquistare e lavorare per ottenere un pezzo utilizzabile.

La geometria governa scarti e ingombri

Ridurre il materiale non significa soltanto assottigliare tutte le pareti. La forma può collocarlo dove svolge una funzione maggiore, distribuire i carichi o adattare una protezione alle dimensioni del contenuto. Le prestazioni richieste stabiliscono il limite del cambiamento: resistenza, sicurezza, stabilità e protezione devono essere conservate nelle condizioni effettive, comprese quelle che si presentano durante movimentazione e uso.

Il progetto decide anche come il pezzo viene ricavato dal materiale disponibile. Quando si tagliano forme da una lamiera o da un foglio, la loro disposizione influenza la superficie che resta inutilizzata. I ritagli e gli altri residui della lavorazione sono gli *sfridi*. Una disposizione che sfrutta meglio il formato può ridurli lasciando identico il peso del prodotto finito. In questo caso il miglioramento avviene prima dell'oggetto, nella quantità necessaria per fabbricarlo.

La *resa produttiva* mette in rapporto il prodotto conforme ottenuto con la materia entrata nel processo. Per leggerla bisogna sapere quali ingressi e uscite siano stati conteggiati. Un residuo può essere recuperato e rimesso in lavorazione, ma quel passaggio richiede operazioni e può comportare ulteriori perdite. Recuperare uno sfrido ed evitarne la formazione sono interventi differenti: entrambi incidono sulla filiera, senza produrre necessariamente lo stesso risultato.

Una geometria più leggera può inoltre essere più difficile da produrre. Se aumentano rotture, difetti o pezzi respinti, la linea deve lavorare più materiale per consegnare la quantità richiesta. Il vantaggio del campione riuscito va

quindi verificato nella produzione ripetuta, con tolleranze e ritmi compatibili con gli impianti. La materia del pezzo conforme è soltanto una delle uscite di quel processo.

Per l'impresa, alla materia acquistata si affiancano costi di attrezzaggio, prove, manutenzione e formazione degli addetti. Un progetto può ridurre alcuni passaggi e richiederne altri più precisi. I controlli aiutano a evitare che il minor peso venga ottenuto sacrificando la qualità; il lavoro necessario a stabilizzare la produzione entra nel costo industriale, e i materiali impiegati nelle prove o consumati dalla linea si aggiungono alla materia richiesta per i pezzi consegnati.

La geometria può ridurre anche gli ingombri dell'imballaggio necessario a proteggere e movimentare il prodotto. Il progetto WrapEasy, presentato da BTicino, azienda del gruppo Legrand, e destinato agli accessori delle canaline metalliche portacavi, rende visibile questa relazione fra forma e materia. Le canaline costituiscono i percorsi che sostengono e organizzano i cavi negli impianti elettrici. I loro accessori devono essere confezionati e movimentati prima dell'installazione; adattare l'imballaggio alla forma del pezzo permette di modificare anche lo spazio occupato. [2]

Nella descrizione pubblicata il 5 febbraio 2024 sul riconoscimento ottenuto al Bando Ecodesign 2023 del Consorzio nazionale imballaggi, CONAI, BTicino presenta un foglio di cartone ondulato con pieghe e tagli predisposti, capace di adattarsi agli accessori. La soluzione riduce i volumi d'imballaggio e lo spazio di deposito, semplifica il confezionamento ed elimina la necessità dei collanti funzionali descritti dall'azienda. BTicino dichiara per il progetto 17,4 tonnellate di materia in meno all'anno. È un risultato annuale riferito a quella applicazione, non alla produzione complessiva del gruppo. [3]

Il foglio adattato al pezzo limita il volume vuoto che accompagna la merce. Diminuisce così l'ingombro trasportato e occupato sui bancali, oltre a cambiare la quantità di imballaggio. Lo spazio vuoto non è materia consumata, ma può condizionare quanti prodotti trovano posto in una consegna o in un deposito. Il caso mostra quindi un risparmio di imballaggio e spazio logistico, distinto dalla resa di taglio dei materiali in fabbrica.

Prodotto e imballaggio arrivano così all'utilizzatore con una quantità di materia che dipende anche dalle scelte geometriche e produttive. Quanto spesso occorrerà fabbricarli di nuovo dipende dalla durata effettiva del servizio.

La durata deve diventare uso

Un prodotto può essere progettato per durare e venire comunque rimpiazzato presto. Un guasto, il prezzo dell'intervento, l'assenza di ricambi o la perdita di compatibilità possono interrompere il servizio prima che tutte le sue parti siano consumate. La durata tecnica indica per quanto tempo il bene potrebbe funzionare nelle condizioni previste; la durata effettiva comprende anche le decisioni e le possibilità dell'utilizzatore.

Conservare un oggetto senza usarlo non produce automaticamente un risparmio. Se resta fermo e viene acquistato un sostituto, il suo materiale continua a esistere, ma non evita la nuova produzione. Per ridurre il fabbisogno di prodotti nuovi occorre che il bene mantenuto, riparato o trasferito a un altro utilizzatore continui a fornire il servizio richiesto. È la continuità dell'uso a collegare la durata alla domanda di materiali.

La riparazione rende concreto questo passaggio. Si identifica il guasto, si stabilisce quali parti debbano essere sostituite e si verifica se l'intervento possa restituire al prodotto una funzione affidabile. Il materiale del ricambio va confrontato con quello dell'apparecchio nuovo, ma la decisione dipende anche da accessibilità del componente, disponibilità degli strumenti, lavoro e tempi. Un difetto circoscritto può richiedere un intervento impegnativo quando la parte è difficile da raggiungere.

Uno studio di Paolo Tecchio, Fulvio Ardente e Fabrice Mathieux, pubblicato nel 2019 e presentato dal Centro comune di ricerca della Commissione europea, il JRC, analizza circa 11.000 diagnosi di lavatrici e lavastoviglie fornite da un centro europeo indipendente di riparazione. Il numero descrive diagnosi di apparecchi difettosi entrati in quel servizio, non tutti gli elettrodomestici utilizzati in Europa. Permette però di osservare come la possibilità di riparare cambi secondo il guasto. [4]

Nelle lavatrici considerate, gli interventi sulle porte e la rimozione di corpi estranei presentavano tassi di riparazione più elevati rispetto ai guasti dei cuscinetti, a quelli del tamburo o della vasca e a quelli dell'elettronica. Il tamburo è la parte rotante in cui viene collocato il bucato; i cuscinetti ne sostengono la rotazione, mentre la vasca esterna contiene il tamburo e l'acqua di lavaggio. La differenza fra guasti mostra che "riparabile" non è una proprietà

uniforme dell'apparecchio: dipende da quale elemento interrompe il funzionamento e da quanto occorre fare per ripristinarlo. [4]

La diagnosi è quindi una parte della fornitura di servizio. Richiede competenza, tempo e informazioni, anche quando porta alla decisione di non procedere. Il lavoro del tecnico non può essere sostituito nel conto dal solo prezzo del pezzo: individuare il difetto, aprire l'apparecchio, intervenire e controllare il funzionamento sono operazioni distinte. Anche la distanza e gli eventuali spostamenti incidono sul costo e sulle risorse impiegate.

Per chi usa il bene conta inoltre il periodo senza servizio. Un ricambio disponibile a un prezzo accettabile può non essere un'alternativa praticabile se arriva troppo tardi. La convenienza dipende dalla relazione fra costo dell'intervento, affidabilità attesa dopo la riparazione e prezzo di un apparecchio nuovo, non soltanto dall'età. Senza una prospettiva sufficiente di uso ulteriore, parte della produzione evitata può essere semplicemente rinviata di poco.

Prolungare l'uso modifica anche i consumi durante il funzionamento. Un apparecchio mantenuto può evitare una nuova fabbricazione e continuare a richiedere più energia o acqua di un sostituto. Il confronto ambientale deve comprendere entrambi gli effetti. Negli scenari di lavatrici e lavastoviglie analizzati dal JRC nel 2016, prolungare l'uso riduceva l'impatto legato all'esaurimento delle risorse minerali, dominato dai materiali della fabbricazione. Il beneficio in termini di emissioni di gas serra dipendeva invece anche dall'elettricità consumata dall'apparecchio mantenuto e da quello nuovo. La durata può dunque favorire il risparmio di materiali senza migliorare nella stessa misura ogni indicatore ambientale. [5]

Ottenere più servizio dallo stesso oggetto può seguire anche un altro percorso. Un apparecchio viene mantenuto presso il suo utilizzatore attraverso manutenzione e riparazione; un contenitore può tornare in circolazione e servire consegne successive, allo stesso utente o ad altri. Nel primo percorso il vincolo può essere un ricambio; nel secondo diventano decisive la restituzione e la preparazione al nuovo impiego.

Il contenitore deve tornare, essere controllato e, quando necessario, lavato o sanificato. Trasporti di ritorno, perdite, rotture e materiali ausiliari fanno parte del servizio ottenuto. La massa iniziale di un oggetto robusto si distribuisce fra

più utilizzi soltanto se questi avvengono realmente. Riparazione e riuso condividono così una logica materiale, pur richiedendo operazioni differenti: evitare la fabbricazione di sostituti attraverso ulteriore uso, contando le risorse che rendono possibile quell'uso.

Cambiare materiale richiede una prova

Conservare il prodotto interviene sulla frequenza del rimpiazzo degli oggetti. Cambiare la materia di cui è fatto interviene invece sulla soluzione tecnica che fornisce la funzione. Il confronto diventa più complesso perché le proprietà non si trasferiscono automaticamente: materiali con densità, resistenza o capacità di protezione diverse possono richiedere forme e quantità differenti per ottenere la stessa prestazione.

Un chilogrammo di un materiale non svolge necessariamente il lavoro di un chilogrammo di un altro. La massa richiesta può cambiare con gli spessori, la geometria e gli elementi aggiunti per assemblare il prodotto. Possono cambiare anche lavorazioni, scarti e manutenzione. La sostituzione di materiale va quindi confrontata attraverso il progetto completo, anziché accostando due pesi o due prezzi al chilogrammo.

Occorre distinguere la possibilità tecnica dalla disponibilità industriale. Un'alternativa può funzionare in una prova ma richiedere una linea diversa, nuove attrezzature o una qualità difficile da ottenere con continuità. Prima che diventi una fornitura occorrono verifiche, documentazione, formazione e capacità produttiva. Il costo del materiale è una voce del cambiamento; non comprende da solo il costo necessario a qualificarlo e renderlo utilizzabile.

Il progetto IdroR-Paper di Istituto Stampa, descritto da CONAI fra i casi premiati in Ecopack 2025, riguarda il passaggio da un incarto poliaccoppiato a una carta trattata con vernice idrorepellente. Un poliaccoppiato unisce strati di materiali diversi; il trattamento della carta modifica invece la soluzione impiegata per proteggere il contenuto. CONAI riporta il mantenimento delle prestazioni di barriera richieste e un risparmio del 24% di materia rispetto alla soluzione precedente. [6]

La barriera è la capacità dell'imballaggio di ostacolare il passaggio degli agenti pertinenti alla protezione del prodotto. La proprietà richiesta deve essere conservata: cambiare la materia senza proteggere adeguatamente il contenuto

sposterebbe la perdita dal contenitore alla merce. Nel caso IdroR-Paper, prestazione e risparmio sono risultati dichiarati nella descrizione del progetto. Il 24% si riferisce alla materia dell'incarto precedente: per tradurlo in tonnellate annue servirebbe anche il numero di confezioni prodotte.

La descrizione richiama anche la classificazione Aticelca, un sistema italiano che valuta attraverso prove di laboratorio la compatibilità di carta e cartone con i processi di riciclo in cartiera. Questa valutazione riguarda il comportamento del materiale durante il riciclo. Il recupero effettivo dipende anche da raccolta e trattamento; il bilancio ambientale comprende inoltre le altre fasi del prodotto.

L'analisi del ciclo di vita permette di allargare lo sguardo oltre la fabbrica, includendo estrazione, trasporto, uso e fine vita. I confini scelti stabiliscono quali operazioni entrano nel confronto. Un processo meno oneroso in una fase può richiedere più risorse in un'altra: occorre seguirne gli effetti lungo il ciclo, mantenendo lo stesso servizio come riferimento. [1]

La massa non sostituisce gli indicatori ambientali. Ridurla può diminuire alcuni consumi, ma una lavorazione alternativa può richiedere più energia, un sistema riutilizzabile più acqua o un nuovo assemblaggio rendere più difficile il recupero. Emissioni, consumo d'acqua e fabbisogno materiale descrivono effetti distinti. Devono essere confrontati con lo stesso riferimento, senza trasformare un miglioramento in una categoria nella prova che ogni impatto sia diminuito.

CONAI valuta i progetti con un proprio strumento semplificato di analisi ambientale, sottoposto a verifica esterna. Per IdroR-Paper, il comunicato rende disponibili la descrizione del cambiamento e i risultati dichiarati, non l'inventario completo necessario a ricostruire tutti gli impatti. Il caso permette di osservare come si riprogetti un incarto mantenendone la prestazione. [6]

Anche una riduzione verificata per lo stesso servizio deve essere moltiplicata per le quantità effettivamente richieste. Se queste crescono, il bilancio annuale può cambiare direzione.

Il totale dipende anche dalla domanda

Il materiale necessario in un anno dipende da quanta materia serve per ciascun prodotto e da quanti prodotti vengono realizzati. Il primo fattore può diminuire mentre il secondo cresce. Per interpretare il risultato bisogna osservarli

insieme, mantenendo chiare le prestazioni: più unità di un oggetto meno durevole non corrispondono necessariamente a una pari crescita del servizio.

Consideriamo un secondo esempio ipotetico, questa volta con funzione e durata uguali nei due scenari. Una produzione iniziale di un milione di unità, ciascuna da un chilogrammo, richiede un milione di chilogrammi, ossia mille tonnellate. Dopo la riprogettazione, la massa unitaria scende a 0,7 chilogrammi, ma la produzione sale a 1,6 milioni di unità. Il totale diventa 1.120.000 chilogrammi, cioè 1.120 tonnellate.

Il pezzo pesa il 30% in meno e le unità prodotte sono il 60% in più. Il consumo complessivo aumenta di 120 tonnellate rispetto alle mille iniziali: il 12%. La riduzione unitaria è reale, ma è stata superata dall'aumento delle quantità. A parità del nuovo volume produttivo, il progetto richiede comunque meno materia di quanto avrebbe richiesto il vecchio prodotto. Il miglioramento tecnico e l'aumento del totale possono dunque essere entrambi veri.

Questo esempio isola l'effetto della scala, ossia della quantità prodotta. Non spiega perché il mercato sia cresciuto. La domanda può aumentare perché ci sono più utilizzatori, perché cambiano i redditi, perché si diffonde una tecnologia o perché si aprono nuovi impieghi. La crescita può essere indipendente dalla riduzione di materia; la successione temporale fra innovazione e vendite non basta a stabilire un rapporto causale.

In altri casi il miglioramento contribuisce alla crescita attraverso i costi. Se ottenere lo stesso servizio diventa meno caro, l'utilizzatore può richiederlo più spesso o in maggiore quantità. Una parte del vantaggio atteso a uso invariato viene allora assorbita dall'uso aggiuntivo. Questo meccanismo è chiamato *effetto rebound*, o effetto di rimbalzo: la domanda reagisce al risparmio generato dall'efficienza. La distinzione fra effetti diretti e indiretti è sviluppata nella ricerca sull'efficienza energetica, fra cui il lavoro di Steve Sorrell per il centro britannico di ricerca sull'energia UKERC; qui seguiamo gli stessi canali economici per capire come possa cambiare la domanda di materiali. [10]

Il collegamento può essere diretto. Un'impresa che riduce il costo di una consegna può trovare conveniente effettuare più consegne. Il materiale per ciascuna resta inferiore, ma il numero aumenta in risposta alla nuova convenienza. Non è necessario che la reazione annulli tutto il risparmio: la sua entità dipende da quanto cambia il costo e da come rispondono i compratori.

Non ogni riduzione di materia si trasferisce per intero al prezzo, perché nel servizio entrano anche lavoro, energia, capitale e altre spese.

Il collegamento può essere anche indiretto. Se una famiglia o un'impresa spende meno per ottenere un servizio, può destinare il denaro rimasto ad altri beni. Questi richiedono materiali in filiere differenti. Il risparmio nella prima attività può quindi accompagnarsi a un nuovo fabbisogno altrove, senza che il materiale risparmiato venga fisicamente trasferito a quell'acquisto. Ciò che collega i due consumi è la disponibilità economica.

Un problema collegato, ma distinto, è studiato da Trevor Zink e Roland Geyer in *Circular Economy Rebound* del 2017. Riguarda riparazione, riuso e riciclo: aumentare l'offerta di prodotti recuperati può evitare soltanto una parte della produzione nuova attesa. I beni recuperati possono competere poco con quelli nuovi oppure abbassare i prezzi e far crescere la domanda complessiva. Una vendita di seconda mano, per esempio, può rimpiazzare un acquisto nuovo o aggiungersi agli acquisti che sarebbero comunque avvenuti. Per gli autori, il risultato dipende dalla concorrenza fra le due offerte e dalle reazioni di chi compra. È una questione di produzione nuova effettivamente evitata, oltre che di consumo per singolo utilizzo. [7]

Non possiamo quindi ricavare un rebound per WrapEasy o IdroR-Paper dalle sole riduzioni dichiarate. Dovremmo sapere come siano cambiati i costi, quali effetti abbiano avuto sui prezzi e quale parte della domanda aggiuntiva dipenda da quel cambiamento. Anche un aumento delle vendite osservato nello stesso periodo potrebbe derivare da altre cause. Il bilancio delle tonnellate misura il risultato fisico; l'analisi economica cerca di spiegare il percorso che lo ha prodotto.

I fattori possono agire contemporaneamente. Un mercato cresce per motivi indipendenti, mentre una soluzione meno costosa amplia ulteriormente l'accesso. Possono cambiare anche i prodotti acquistati: la stessa quantità di servizi può essere fornita con oggetti e materiali diversi. Separare variazione per unità, quantità totale e composizione aiuta a capire dove intervenire e impedisce di attribuire tutto a un unico effetto.

L'efficienza resta informativa anche quando il totale aumenta. Dice che, per il servizio confrontato, occorrono meno risorse; il consumo assoluto dice che cosa è successo all'insieme delle attività. Per passare dall'impresa all'economia

servono indicatori che mantengano visibile questa distinzione, senza trasformare un rapporto migliorato nella prova automatica di una minore richiesta complessiva di materia.

Un rapporto migliore non racconta tutto

Il consumo materiale interno, abbreviato DMC dall'inglese *Domestic Material Consumption*, è calcolato sommando l'estrazione interna e le importazioni fisiche, poi sottraendo le esportazioni fisiche. Descrive i materiali direttamente utilizzati nell'economia entro quel perimetro: comprende, per esempio, materia che entra negli edifici e nelle infrastrutture e materiali usati nelle attività produttive. Le quantità vengono conteggiate in massa. [8]

La produttività delle risorse divide il prodotto interno lordo, PIL, per il DMC. Il risultato esprime quanto valore economico viene prodotto per ogni chilogrammo di consumo materiale conteggiato. Il rapporto può crescere perché aumenta il PIL, perché diminuisce il DMC o perché cambiano entrambi. È una misura dell'intera economia, nella quale si riuniscono attività con esigenze materiali differenti.

Secondo l'articolo Eurostat con dati estratti a giugno 2026, nell'Unione europea la produttività delle risorse passa da 1,55 euro per chilogrammo nel 2000 a 2,32 nel 2025. Il PIL è misurato correggendo le variazioni dei prezzi, con riferimento al 2015: si confronta così il valore reale dell'attività economica, depurato dall'inflazione. Il miglioramento rispetto al 2000 non è continuo: Eurostat segnala un calo della produttività nel 2025 rispetto al 2024, legato alla ripresa del consumo materiale. [8]

Per capire se anche la quantità totale diminuisca occorre guardare separatamente il denominatore. Fra il 2021 e il 2024, Eurostat registra per l'UE un PIL in crescita del 5% e un DMC in diminuzione di oltre il 7%. Il confronto riguarda quel triennio, distinto dall'ultimo anno della serie. L'attività economica aumenta mentre il consumo diretto di materia scende: è un caso di *disaccoppiamento assoluto* fra le due grandezze. Se invece la materia crescesse, ma più lentamente dell'attività economica, il disaccoppiamento sarebbe soltanto relativo. [8]

Anche la composizione dell'economia influisce sul rapporto: le costruzioni richiedono molta più materia di molti servizi. Il peso relativo delle attività, gli

investimenti, il ciclo economico e il commercio contribuiscono quindi a spiegare le variazioni osservate.

Nella serie Eurostat sui conti dei flussi di materia, il DMC del 2024 è di circa 8,43 tonnellate per abitante in Italia, contro una media europea di 13,31. Sono masse dell'economia divise per la popolazione, comprensive di produzione e infrastrutture, non acquisti personali di ogni residente. [9]

Il commercio chiarisce un limite importante del conto. Supponiamo che un Paese ottenga determinati componenti estraendo o importando minerale e trasformandolo internamente. Se passa ad acquistare dall'estero gli stessi componenti già pronti, alla frontiera viene registrato il loro peso. Il conto delle importazioni non aggiunge tutto il minerale e le altre risorse impiegate all'estero per fabbricarli.

A consumo finale e tecniche invariati, parte del fabbisogno mondiale viene così spostata oltre confine, senza essere eliminata. Il DMC nazionale può diminuire; il rapporto PIL/DMC migliora se il PIL rimane uguale, cresce o diminuisce in percentuale meno della massa conteggiata. Lo spostamento delle lavorazioni incide anche sul valore aggiunto nazionale: entrambi gli effetti concorrono al risultato. [8]

L'*impronta materiale* segue le risorse richieste dai consumi finali anche lungo le filiere estere. DMC e impronta sono strumenti complementari: il primo descrive i flussi direttamente conteggiati nell'economia, la seconda include le risorse impiegate a monte per produrre ciò che viene consumato. [8]

Un intervento di efficienza materiale si valuta partendo dal servizio che deve continuare a essere fornito. Il progetto può ridurre gli ingressi di fabbrica, la durata può evitare nuovi acquisti e un materiale diverso può ottenere la stessa prestazione con altre quantità. Il risultato prende forma quando queste possibilità diventano produzione conforme e uso effettivo, includendo ciò che serve per mantenerli.

La riduzione complessiva dipende poi dalla domanda di servizi e dalle risorse impiegate lungo le filiere. Vita utile, materiali scelti e lavorazioni collegano il progetto del singolo oggetto al fabbisogno dell'intero sistema. Quando il risparmio ottenuto per ogni servizio supera l'aumento dei servizi richiesti, diminuisce anche la quantità totale di materia necessaria.

Fonti e riferimenti

[1] ISO — ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Scheda ufficiale della norma sui principi della valutazione del ciclo di vita.

https://www.iso.org/standard/37456.html

[2] BTicino — Sistemi di canalizzazione, canali metallici P31 e passerelle a filo CABLOFIL.

https://professionisti.bticino.it/strumenti/cataloghi-brochure-e-guide/sistemi-di-canalizzazione-canali-metallici-p31-passerelle-filo-cablofil

[3] BTicino — WrapEasy Universal Packaging, riconoscimento Bando CONAI Ecodesign 2023. Comunicazione del 5 febbraio 2024; dati dichiarati dall'azienda.

https://professionisti.bticino.it/novita/bticino-vincitrice-il-packaging-bando-conai-ecodesign-2023

[4] Tecchio P., Ardente F., Mathieux F. — Understanding lifetimes and failure modes of defective washing machines and dishwashers, 2019, DOI 10.1016/j.jclepro.2019.01.044. Abstract e scheda originale JRC111697.

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC111697

[5] Joint Research Centre — Analysis of durability, reusability and reparability — Application to washing machines and dishwashers, 2016, JRC102632.

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC102632/lbna28042enn.pdf

[6] CONAI — Ecopack 2025, comunicato del 21 novembre 2025. Caso Istituto Stampa, IdroR-Paper, e metodo di valutazione dei progetti.

https://www.conai.org/news-e-press/ecopack-2025-121-aziende-premiate-per-lecodesign-degli-imballaggi/

[7] Zink T., Geyer R. — Circular Economy Rebound, Journal of Industrial Ecology, 21(3), 593–602, 2017, DOI 10.1111/jiec.12545. Testo originale disponibile presso l'Università di Pisa.

https://www.msn.unipi.it/wp-content/uploads/2020/12/Economia-Circolare-USA_paper-2017.pdf

[8] Eurostat — Material flow accounts and resource productivity. Dati estratti a giugno 2026; produttività delle risorse con PIL in volumi concatenati, riferimento 2015.

https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Material_flow_accounts_and_resource_productivity

[9] Eurostat — Domestic material consumption, dataset env_ac_mfa. Italia e UE, DMC totale, tonnellate per abitante; valori 2024 pari a 8,431 e 13,308. Estrazione del 2 ottobre 2026.

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_mfa/default/table?lang=en

[10] Sorrell S. — UKERC Review of Evidence for the Rebound Effect. Supplementary Note: Graphical illustrations of rebound effects, ottobre 2007, UKERC/WP/TPA/2007/014. Distinzione fra effetti diretti e indiretti per consumatori e produttori.

https://d2e1qxpsswcpgz.cloudfront.net/uploads/2020/03/ukerc-review-of-evidence-for-the-rebound-effect-supplementary-note-graphical-illustrations-of-rebound-effects.pdf

04.33 – Il futuro delle materie prime

Una rete elettrica in costruzione richiede rame mentre si posano i cavi. Una fabbrica di batterie deve ricevere composti di litio adatti alla propria produzione. Il giacimento dal quale potrebbero provenire quei materiali può essere conosciuto da anni e tuttavia trovarsi ancora nella fase degli studi. Nel frattempo, il rame e il litio contenuti nei prodotti già venduti continuano a svolgere la loro funzione e torneranno al riciclo soltanto più avanti.

Il futuro delle materie prime dipende da questa distanza fra fabbisogni e forniture. La domanda cambia con gli edifici, i mezzi di trasporto e le tecnologie che vengono costruiti; la nuova offerta richiede investimenti che possono maturare nell'arco di molti anni. Alcuni processi innovativi hanno già cominciato a produrre, altri restano da sviluppare. Per capire quanto potranno contribuire occorre guardare alle quantità effettive, ai tempi osservati e allo stato dei singoli progetti.

Più materia e materiali diversi

La costruzione di abitazioni e infrastrutture continua a richiedere grandi masse di sabbia, ghiaia e materiali per cementi e laterizi. Le schede del Global Resources Outlook 2024 attribuiscono all'ambiente costruito circa 23 miliardi di tonnellate di minerali non metallici nel 2020: il 76% della domanda materiale di quel sistema di utilizzo. Il dato comprende quindi la massa destinata a edifici e infrastrutture, senza coincidere con il consumo mondiale di tutte le materie prime. [1]

Il Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente, UNEP, e l'International Resource Panel, il gruppo internazionale di esperti sulle risorse, prospettano un aumento del 60% dell'estrazione globale entro il 2060 rispetto al 2020, se proseguono le tendenze considerate. Lo scenario comprende biomassa, combustibili fossili, minerali metallici e non metallici. La crescita dipende anche da come vengono soddisfatti i nuovi bisogni: costruire più beni, usare più a lungo quelli esistenti e ridurre la materia necessaria per ciascun servizio conducono a fabbisogni differenti. [2]

All'interno di questo insieme cambia la composizione della domanda. Le batterie richiedono composti di litio; le reti elettriche e le connessioni

richiedono rame. Il Global Critical Minerals Outlook 2026 dell'Agenzia internazionale dell'energia, IEA, permette di confrontare le due crescite nello Stated Policies Scenario, abbreviato STEPS: lo scenario delle politiche dichiarate. Nelle tabelle del rapporto, la domanda di rame raffinato passa da circa 27,8 milioni di tonnellate nel 2025 a 35 milioni nel 2040. L'aumento è di circa 7,2 milioni di tonnellate, pari al 26%. La domanda di litio passa invece da 275.000 a 932.000 tonnellate di contenuto di litio: circa 3,4 volte il valore iniziale. [3]

Il confronto rende tangibile la differenza fra crescita percentuale e massa aggiuntiva. Il litio cresce molto più rapidamente, ma l'incremento previsto, circa 657.000 tonnellate di elemento, rimane assai inferiore a quello del rame. Le tonnellate di litio indicano quanto elemento è contenuto nei prodotti richiesti, non il peso dei suoi composti né quello delle batterie. Per il rame il conto riguarda il metallo raffinato ed esclude i rottami rifusi direttamente nelle lavorazioni, senza passare dalla produzione di nuovo rame raffinato. Le due unità consentono di leggere la scala delle rispettive filiere senza sommare materiali intermedi a prodotti finiti. [3]

Una maggiore efficienza del singolo prodotto può moderare queste richieste. La crescita del numero di prodotti può però aumentare il consumo complessivo, come accade quando una tecnologia si diffonde presso nuovi utilizzatori. Le proiezioni servono a stimare quanta capacità produttiva occorrerebbe con certe politiche e tecnologie; la loro utilità industriale sta nel confronto con gli impianti che potrebbero effettivamente fornire quei materiali.

Il divario riguarda l'offerta realizzabile

Una parte della materia arriva dall'estrazione, un'altra dal riciclo. Quest'ultima è l'offerta secondaria: materiale ottenuto da scarti di fabbricazione o da prodotti giunti a fine vita. Nel calcolare quanta produzione mineraria servirà, l'IEA sottrae questo contributo dalla domanda totale e tiene conto delle perdite nella raffinazione. Il risultato è il fabbisogno primario, cioè la quantità che resta da soddisfare attraverso la filiera estrattiva. [3]

Per il 2035, nello STEPS, il caso base di offerta copre il 75% di questo fabbisogno per il rame. La parte scoperta è il 25%: un quarto del fabbisogno primario residuo. Per il litio la copertura è del 68% e il divario del 32%, vicino a

un terzo. Queste percentuali sono calcolate sulla richiesta che rimane a carico dell'estrazione dopo il contributo secondario, con gli aggiustamenti per la raffinazione. Applicarle alla domanda totale darebbe una quantità diversa. [3]

Il caso base è costruito esaminando impianti esistenti, attività in costruzione e progetti ritenuti altamente probabili. L'IEA valuta, fra l'altro, autorizzazioni ottenute, finanziamenti impegnati e accordi di acquisto della futura produzione. Una risorsa appena individuata rimane fuori da questo insieme: deve ancora essere studiata e trasformata in un progetto industriale. Il divario confronta dunque il fabbisogno futuro con una selezione di offerta realizzabile, non con tutto il metallo presente nel sottosuolo. [3]

Questa distinzione spiega anche perché il risultato possa cambiare fra due edizioni del rapporto. Un progetto che ottiene finanziamenti o procede nella costruzione può entrare nel caso base; una difficoltà operativa può ridurre la produzione attesa. Per il rame, l'IEA passa dal divario di circa il 30% stimato nell'edizione 2025 al 25% nel 2026, anche grazie all'avanzamento di progetti. La distanza si è ridotta, ma resta consistente nell'orizzonte considerato. [3]

Il riciclo entra già nel calcolo. Per valutare il contributo di un suo ulteriore aumento bisogna modificare la quantità secondaria prevista e ricalcolare il fabbisogno primario. Sommare nuovamente al risultato il materiale recuperato già conteggiato farebbe apparire coperta due volte la stessa parte della domanda. Il punto utile per chi programma una fornitura è stabilire quali quantità aggiuntive possano arrivare entro il 2035 e da quali operazioni.

Dalla scoperta alla produzione possono passare molti anni

Per i nuovi progetti di rame, l'IEA indica circa 17 anni dalla scoperta alla produzione. L'intervallo comprende lo sviluppo del progetto e non va letto come il tempo necessario soltanto a costruire una miniera. Dà però un ordine di grandezza decisivo: l'offerta capace di contribuire entro il 2035 dipende in larga parte da iniziative già avviate. Un nuovo ritrovamento amplia le possibilità per il futuro, mentre gli impianti previsti per il prossimo decennio devono aver già percorso una parte del lavoro. [3]

All'inizio servono esplorazioni, campioni e studi per conoscere la risorsa. La concentrazione del metallo nel minerale, chiamata tenore, determina quanta massa deve essere trattata. La resa misura invece la parte del metallo contenuto che il processo riesce a ottenere. Un tenore basso può richiedere più scavo, frantumazione e trattamento per produrre la stessa tonnellata di rame; una resa inferiore lascia più metallo nelle correnti residue. Sono informazioni necessarie per scegliere attrezzature e dimensionare consumi e gestione dei residui.

Il rapporto IEA segnala che il tenore medio globale delle miniere di rame è diminuito del 40% dal 1991. A parità delle altre condizioni, trattare materiale meno ricco accresce il lavoro per unità di metallo prodotto. Negli impianti reali cambiano anche tecnologie e caratteristiche dei giacimenti, perciò il dato non si traduce automaticamente in un identico aumento dei consumi. Spiega tuttavia una parte della crescente complessità dei nuovi progetti. [3]

Gli studi devono affrontare anche le condizioni del sito. Un approvvigionamento idrico insufficiente può richiedere opere aggiuntive; il trattamento delle acque e la sistemazione dei residui devono essere progettati insieme alle lavorazioni. Le autorizzazioni valutano questi interventi e i loro effetti sul territorio. La disponibilità di energia, gli accessi e le opere di servizio influiscono sul costo e sulla possibilità di costruire. Finanziamento e autorizzazioni possono procedere in parte insieme, ma una modifica importante del progetto può richiedere nuove verifiche.

Dopo la costruzione comincia l'avviamento. Gli addetti mettono in funzione le apparecchiature, regolano il processo e controllano ciò che viene prodotto. La capacità nominale indica quanto l'impianto è progettato per ottenere nelle condizioni dichiarate; la produzione effettiva misura quanto ne esce nel periodo. Solo la parte che rispetta le caratteristiche richieste è utilizzabile per quella fornitura. Il passaggio fra queste quantità diventerà visibile nel caso del litio: un impianto inaugurato può impiegare ancora tempo prima di raggiungere il proprio ritmo previsto.

Il capitale finanzia anche il mantenimento degli impianti

Per rame, litio, nichel e cobalto, l'IEA stima oltre 750 miliardi di dollari di investimenti necessari fra il 2026 e il 2040 nello STEPS. Nella stima dell'IEA, la ripartizione del fabbisogno distingue estrazione e raffinazione per questi quattro materiali. Circa 310 miliardi riguardano il rame e 280 il nichel; litio e cobalto completano il totale. La cifra misura un fabbisogno futuro, anziché somme già spese. [3]

Gli investimenti comprendono nuovi siti, ampliamenti e capitale necessario a mantenere operativa la capacità esistente. Quest'ultima voce conta perché un impianto deve rinnovare apparecchiature e affrontare interventi che ne conservino la produzione. Un ampliamento può sfruttare servizi già disponibili, ma non è necessariamente economico: per il rame, l'IEA rileva un aumento del 65% dell'investimento per unità di capacità negli ampliamenti dal 2020. [3]

Per finanziare un progetto serve anche una prospettiva di vendita. Prezzi e costi previsti devono permettere di remunerare il capitale e pagare l'esercizio. Un fabbisogno mondiale in crescita può quindi convivere con investimenti rinviati quando il prezzo corrente o i rischi del singolo progetto rendono difficile ottenere fondi. La domanda prospettica orienta la scelta, ma il finanziatore deve valutare quell'impianto e i suoi tempi.

Una volta costruito, lo stabilimento richiede operatori, manutentori e tecnici di laboratorio. Il campionamento permette di controllare la materia ricevuta e il prodotto; la manutenzione preserva le apparecchiature, anche attraverso fermate programmate. Preparazione degli addetti e procedure di sicurezza sono necessarie soprattutto durante arresti, interventi e riavvii. Il loro costo appartiene alla produzione ordinaria. Anche il personale deve essere formato prima di poter condurre un nuovo processo, come mostra l'impianto pilota impiegato a Centenario per preparare gli operatori dell'estrazione diretta del litio. [4]

L'estrazione diretta del litio ha già una produzione industriale

Le salamoie sono acque ricche di sali, nelle quali il litio è presente insieme ad altre sostanze. Nei processi convenzionali una parte dell'acqua evapora in bacini e la soluzione viene successivamente trattata per ottenere composti di litio. L'estrazione diretta, spesso abbreviata DLE dall'inglese Direct Lithium Extraction, comprende invece tecnologie che separano il litio selettivamente dalla salamoia.

Una di queste è l'adsorbimento: un materiale trattiene certe sostanze sulla propria superficie e le rilascia durante un passaggio successivo. Un'altra è lo scambio ionico, nel quale vengono scambiati ioni, particelle dotate di carica elettrica, fra una soluzione e un materiale predisposto. La separazione deve essere seguita dalle lavorazioni che portano al composto richiesto, per esempio il carbonato di litio usato nella filiera delle batterie. [3]

Questi processi hanno già superato il laboratorio. Nell'edizione 2026 l'IEA attribuisce alla DLE quasi il 10% dell'offerta globale di litio, precisando che nella maggior parte dei casi viene combinata con bacini di evaporazione. In Argentina, il sito Fénix utilizza da oltre trent'anni un processo che integra adsorbimento ed evaporazione. La presenza di una fase DLE non implica dunque che siano state eliminate tutte le altre operazioni tradizionali. [3]

Un caso più recente è Centenario, in Argentina. Eramet dichiara una capacità nominale di 24.000 tonnellate annue di carbonato di litio di grado per batterie. Dopo l'inaugurazione del luglio 2024 e la prima produzione a fine anno, nel 2025 lo stabilimento ha prodotto circa 6.700 tonnellate equivalenti di carbonato di litio, durante l'aumento graduale della produzione. Sono quantità espresse come carbonato equivalente, non come contenuto del solo elemento litio: non vanno confrontate direttamente con le tonnellate della domanda riportate in apertura. [4]

Il dato osservato equivale a circa il 28% della capacità nominale annua. Questo rapporto rende concreta la distanza fra un impianto entrato in produzione e uno che lavora al ritmo previsto. Non è la resa di estrazione: quest'ultima riguarda la quota del litio contenuto nella salamoia che il processo riesce a separare. In un anno di avviamento, la produzione annua risente anche del

tempo effettivo di funzionamento e della progressiva stabilizzazione delle operazioni.

La DLE può ampliare l'offerta, ma deve adattarsi alla salamoia del sito e sostenere costi e consumi in esercizio. Il litio separato va purificato, mentre i materiali impiegati per la separazione devono conservare la propria efficacia. Gli scarichi e la gestione della salamoia residua rimangono parte del progetto. Una buona resa permette di ricavare più litio dalla stessa quantità in ingresso; il caso Centenario mostra perché, per giudicare il contributo alla fornitura, serva anche misurare la produzione nel tempo. Il riciclo incontra un vincolo temporale diverso: la sua materia prima deve prima tornare dai prodotti utilizzati.

Il riciclo riceve materiali da un altro tempo

Il rame in un cavo e il litio in una batteria rimangono nei beni durante il loro utilizzo. Possono alimentare il recupero quando quei beni vengono dismessi e raccolti. La quantità che ritorna oggi dipende quindi dalle vendite degli anni precedenti e dalla durata dei prodotti. Se un mercato cresce rapidamente, le nuove richieste possono essere molto maggiori dei ritorni provenienti dalle generazioni precedenti.

Gli scarti di fabbricazione tornano prima: vengono generati mentre si producono i beni e possono essere inviati subito al trattamento. Sono un ingresso diverso dal materiale post-consumo, che arriva dopo l'utilizzo. La loro disponibilità dipende dalle lavorazioni e dalle rese produttive. Ridurre gli scarti migliora l'efficienza della fabbrica e modifica anche quel flusso verso il riciclo.

Nel confronto IEA, la quota secondaria dell'offerta di rame passa da circa il 10% nel 2025 a un possibile 20% nel 2040 nello STEPS. Il conto comprende materiale da scarti di fabbricazione e da fine vita, ma esclude i rottami rifusi direttamente nelle lavorazioni. La percentuale descrive quindi una parte delimitata dell'offerta di rame raffinato e non il tasso generale di raccolta dei prodotti contenenti rame. [3]

Per aumentare questa quota servono materiale disponibile, raccolta e impianti capaci di ottenere prodotti utilizzabili. Uno stabilimento di riciclo può essere pronto prima che arrivino abbastanza beni a fine vita. Inoltre, i prodotti dismessi possono avere composizioni differenti da quelli oggi richiesti: il ritorno

di una batteria rende disponibili i materiali impiegati quando fu fabbricata, non necessariamente nella proporzione che serve alla generazione successiva.

Prolungare la vita dei beni interviene su entrambi i lati del bilancio. Rinvia il fabbisogno di materia per un rimpiazzo e, insieme, il ritorno del vecchio prodotto al trattamento. Quel ritardo nel riciclo accompagna un servizio ancora fornito: anticipare la dismissione soltanto per procurare materiale secondario può richiedere nuova materia per sostituire ciò che funzionava. Il beneficio va valutato sul consumo complessivo necessario a mantenere il servizio.

Il riciclo diventa perciò più importante con il maturare dei flussi, mentre l'espansione dei beni in uso può continuare a richiedere produzione primaria. Un progetto italiano consente di osservare la parte impiantistica di questo passaggio e di confrontare un calendario annunciato con gli avanzamenti documentati.

Portovesme fra calendario annunciato e avanzamento del progetto

Il 9 maggio 2023 Glencore e Li-Cycle annunciavano uno studio per sviluppare a Portovesme, in Sardegna, un polo di riciclo dei materiali delle batterie. La proposta prevedeva di riutilizzare parte del complesso metallurgico esistente, con attrezzature, servizi e personale già presenti. Una volta operativo, il nuovo polo avrebbe potuto trattare da 50.000 a 70.000 tonnellate annue di black mass. Il calendario allora indicato prevedeva l'avvio della messa in servizio fra fine 2026 e inizio 2027, subordinato alla decisione finale d'investimento. [5]

La black mass, letteralmente «massa nera», è un materiale fine, simile a una polvere, ricavato dal pretrattamento di batterie usate o scarti di fabbricazione. I pretrattamenti possono comprendere operazioni meccaniche ed eventualmente termiche. Il progetto riguarda quindi un materiale intermedio già preparato, da trattare mediante idrometallurgia: dissoluzione dei materiali contenenti metalli in soluzioni liquide, seguita da separazione e purificazione. La definizione del Centro comune di ricerca della Commissione europea, JRC, aiuta a distinguere questo ingresso dalle batterie intere. Le tonnellate annunciate misuravano la capacità di trattamento della miscela, non il peso dei singoli metalli ottenibili. [6]

Il 31 marzo 2025 Glencore descriveva ancora il progetto in prefattibilità, cioè nella fase di valutazione preliminare della possibilità di realizzarlo. Nel frattempo, la Commissione europea lo aveva riconosciuto fra i progetti strategici. Nell'allegato del 25 marzo il Portovesme CRM Hub (dall'inglese Critical Raw Materials, materie prime critiche) è associato al riciclaggio di litio e manganese di grado per batterie; il comunicato aziendale cita invece nichel, cobalto e litio. I due documenti indicano elenchi di materiali differenti: il primo registra il perimetro del riconoscimento europeo, il secondo descrive la proposta aziendale. In ogni caso, nessuno dei due testi documenta una produzione commerciale già avviata. [7, 8]

Un aggiornamento successivo è disponibile. L'11 giugno 2026 il Ministero delle Imprese e del Made in Italy riferiva che l'azienda aveva confermato il proseguimento del progetto litio–black mass, con criticità normative e di mercato che ne rallentavano l'attuazione. La comunicazione documenta il progetto ancora in sviluppo e non annuncia l'avvio della sua produzione commerciale. Il termine 2026–2027 rimane pertanto quello previsto nel comunicato del 2023, distinto dallo stato descritto nel 2026. [9]

La cronologia è istruttiva proprio perché riguarda il riutilizzo di un sito industriale. La disponibilità di infrastrutture e competenze può ridurre alcune opere necessarie, ma restano da definire e realizzare le trasformazioni richieste dal nuovo processo. Nel caso documentato, all'annuncio con capacità e calendario sono seguiti uno stato di prefattibilità, un riconoscimento strategico e la segnalazione di rallentamenti. Ciascun evento dice qualcosa di diverso sul percorso verso la fornitura.

Per il futuro delle materie prime contano quindi i progressi misurabili. I divari di offerta indicano quanta nuova produzione occorrerebbe; i tempi minerari delimitano ciò che può arrivare nel prossimo decennio; gli impianti già avviati mostrano quanto viene effettivamente ottenuto. Il riciclo aggiunge materiale quando maturano i ritorni, mentre efficienza e durata modificano le richieste. Una risorsa diventa disponibile per l'industria quando questi contributi si traducono nel prodotto utilizzabile nel momento in cui serve.

Fonti e riferimenti

[1] UNEP e International Resource Panel — Global Resources Outlook 2024, Material Resources Factsheets, p. 4: minerali non metallici nell'ambiente costruito, dati 2020.

https://www.resourcepanel.org/file/3442/download?node=1220

[2] UNEP e International Resource Panel — Global Resources Outlook 2024, pagina ufficiale: scenario dell'estrazione mondiale al 2060 rispetto al 2020.

https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024

[3] International Energy Agency — Global Critical Minerals Outlook 2026, pp. 111–115, 120–123, 135 e 331; tabelle sulla domanda di rame e litio, pp. 347 e 350: scenario STEPS, investimenti, tempi minerari, offerta secondaria ed estrazione diretta del litio.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/19c60aa0-ee07-4a20-a138-33c967ac5008/GlobalCriticalMineralsOutlook2026.pdf

[4] Eramet — Lithium: sito Centenario, capacità nominale, prima produzione e consuntivo 2025; pagina consultata il 2 ottobre 2026.

https://www.eramet.com/en/activities/products/lithium/

[5] Glencore e Li-Cycle — Annuncio dello studio per un polo europeo di riciclo a Portovesme, 9 maggio 2023: capacità prevista e calendario condizionato alla decisione finale d'investimento.

https://www.glencore.com/media-and-insights/news/glencore-and-li-cycle-announce-joint-study-to-develop-a-european-recycling-hub

[6] Commissione europea, Joint Research Centre, Egle et al. — Technical recommendations for the targeted amendment of the European List of Waste entries relevant to batteries, 2024, JRC139124, glossario, p. 121: black mass e riciclo idrometallurgico.

https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139124/JRC139124_01.pdf

[7] Glencore — Glencore’s Portovesme Critical Raw Materials Hub selected as Strategic Project by European Commission, 31 marzo 2025: prefattibilità e materiali indicati nella proposta.

https://www.glencore.com/media-and-insights/insights/2025-03-portovesme-critical-raw-materials-hub

[8] Commissione europea — Decisione C(2025) 1904 del 25 marzo 2025, allegato dei progetti strategici, voce 33: Portovesme CRM Hub.

https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/e9c90c91-7492-4047-bc51-d0c9d5e89a2f_en?filename=C_2025_1904_1_EN_annexe_acte_autonome_part1_v2.pdf

[9] Ministero delle Imprese e del Made in Italy — Portovesme: nuovo tavolo al Mimit, 11 giugno 2026: proseguimento del progetto litio–black mass e criticità che ne rallentano l’attuazione.

https://www.mimit.gov.it/it/notizie-stampa/portovesme-nuovo-tavolo-al-mimit