Italian Circular Economy Stakeholder Platform

GRUPPO DI LAVORO 4
"Catene di valore sostenibili
e circolari"

Le materie prime nelle filiere: casi studio per Costruzione e Demolizione, Mobilità sostenibile e Apparecchiature elettriche ed elettroniche

Edizione 2024

RASSEGNA DELLE ATTIVITÀ DELL'ANNO 2024

Le materie prime nelle filiere:
casi studio per Costruzione e Demolizione,
Mobilità sostenibile e
Apparecchiature elettriche ed elettroniche

DOI 0.12910/DOC-2024-001

GRUPPO DI REDAZIONE

Curatori

Roberta De Carolis - ENEA
Viviana Gugliemi - ENEL
Paola De Bernardi - Università degli Studi di Torino

Autori

Pier Luigi Porta, Danilo Fontana, Massimo Puzone, Chiara Cardenia - ENEA
Fiore Montini - Università della Tuscia, ENEA
Irene Pellucchi - ERION
Alessia Amato, Alessandro Becci, Matteo D'Arcangelo, Emiliano Laudadio, Eleonora Pavoni - Università Politecnica delle Marche
Roberta Vecchiola - ORIM
Giuseppe Mancini - Università degli Studi di Catania
Francesca Ceruti - Università degli Studi di Brescia
Paola Altamura - La Sapienza Università di Roma
Roberto Cattaneo - Associazione Italiana Industrie Metalli non Ferrosi (ASSOMET)
Daniela Fontana - COMAU

Contenuti

INDICE DELLE FIGURE **5**

INDICE DELLE TABELLE **6**

LISTA ACRONIMI **7**

EXECUTIVE SUMMARY **8**

1 La piattaforma italiana degli stakeholder dell'Economia Circolare – ICESP **11**

1.1 Il Gruppo di lavoro 4: Catene di valore sostenibili e circolari 11

2 Materie prime critiche e catene di valore **12**

2.1 Le materie prime critiche 12

2.1.1 Le iniziative nazionali sulle materie prime e il supporto del GdL4 *13*

2.1.2 Il lavoro del GdL4: la selezione dei casi studio *15*

3 Litio **16**

3.1 Usi del litio nell'industria europea ed italiana 16

3.2 Risorse e riserve 21

3.2.1 Geologia *22*

3.2.2 Risorse e riserve di Litio *23*

3.3 Riciclabilità 25

3.4 Sostituibilità 30

3.5 Criticità (tecnologiche, normative, di mercato) 33

3.6 Proposte di superamento degli ostacoli 36

4 Rame **40**

4.1.1 Utilizzo del Rame nelle Industrie Italiane ed Europee *40*

4.1.2 Ricerca e Riserve *44*

4.2 Geologia, Risorse e Riserve di Rame 46

4.2.1 Geologia *46*

4.2.2 Risorse e riserve globali *46*

4.3 Riciclabilità 50

4.4 Sostituibilità 55

4.5 Criticità (tecnologiche, normative e di mercato) 56

4.6 Proposte per il superamento degli ostacoli 58

5 Alluminio e Bauxite 62
5.1 Risorse e riserve 65
5.2 Riciclabilità 65
5.3 Sostituibilità 66
5.4 Criticità (tecnologiche, normative, di mercato) 68
5.5 Proposte di superamento degli ostacoli 68
6 CONCLUSIONI 69
7 BIBLIOGRAFIA 70
7.1 Litio 70
7.2 Rame 74
7.3 Alluminio e Bauxite 77

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Lista EU materie prime critiche e strategiche....13
Figura 2. Format questionario selezione CRM / SRM....15
Figura 3 a) Consumo di litio tra il 2000 e il 2017, b) consumo di carbonato di litio tra il 2016 e il 2022 c) Utilizzo del litio in Europa e nel mondo nel 2010, 2020, 2024....17
Figura 4 Composizione di una Batteria agli ioni di litio....18
Figura 5 Piano cottura (a sinistra) e protesi dentale (a destra) in vetroceramica....20
Figura 6 Concentrazioni di Litio in salamoie geotermiche....23
Figura 7 Produzione mondiale di litio (2021)....24
Figura 8 Zone favorevoli per il ritrovamento di fluidi profondi ricchi di litio sul territorio italiano....25
Figura 9 Possibili schemi di processo per il trattamento di batterie al litio esauste....27
Figura 10 Caso studio di riciclo delle LIB....34
Figura 11 Andamento del prezzo del litio $/Kg e €/Kg....36
Figura 12 Schema semplificato della soluzione innovativa sperimentata dall'azienda ORIM, in collaborazione con UNICAM....38
Figura 13 Prezzo medio annuale del rame tra il 2010 e il 2020....40
Figura 14 Intensità energetica in funzione della qualità del minerale per 31 operazioni di rame, con ciascun punto dati che rappresenta un anno di produzione....41
Figura 15 Utilizzi del rame in Europa, media nel periodo 2016-2020....43
Figura 16 Approvvigionamento europeo di rame e produzione mineraria globale....45
Figura 17 Produzione mondiale di Rame da miniere in tonnellate....48
Figura 18 Afflussi, deflussi e scorte globali di rame in uso nello scenario commerciale, 2000–2050. Le linee tratteggiate verticali segnano l'anno in cui iniziano gli scenari futuri (2015). La voce "Altri" comprende edilizia e costruzioni, infrastrutture, trasporti....50
Figura 19 Flussi globali di rame semplificati per l'anno 2017....52
Figura 20 Tassi di riciclo del rame EoL richiesti in relazione alle risorse di rame disponibili e alle opzioni di sostenibilità scelte....53
Figura 21 Catena del valore semplificata per bauxite (sopra) e alluminio (sotto) per l'UE.62
Figura 22 Il profilo dell'alluminio: dati di sintesi....63
Figura 23 Usi di bauxite (a sinistra) e alluminio (a destra) nel mercato europeo....64
Figura 24 Produzione mondiale di allumina e bauxite, riserve di bauxite....65

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 Produzione e consumo di litio nel 2020 (a USGS 2022; b Horizon Programme, 2020)....16
Tabella 2 Principali batterie agli ioni di litio 19
Tabella 3 Principali impianti nel mondo (esistenti o progettati) 29
Tabella 4 Usi e possibili sostituti del Litio....32
Tabella 5 Principali progetti Horizon Europe sul tema del recupero del litio dalle batterie a partire dal 2020 37
Tabella 6 Mercato del rame in media nel periodo 2016-2020 42
Tabella 7 Riserve di Rame dei vari stati, in Tonnellate 47
Tabella 8 Principali applicazioni dei semi-lavorati in alluminio per la produzione di prodotti per l'edilizia 64
Tabella 9 Flussi di materiali rilevanti per l'EOL-RIR* dell'alluminio 66
Tabella 10 Usi e possibili sostituti 67

LISTA ACRONIMI

UE	Unione Europea
CE	Commissione Europea
CRMA	Critical Raw Material Act
CRM(s)	Critical Raw Material(s)
SRM(s)	Strategic Raw Material(s)
EoL	End-of-Life
EoL-RIR	End-of-Life Recycling Input Rates
LCA	Life Cycle Assessment
LIB	Lithium Ion Batteries

EXECUTIVE SUMMARY

Le **materie prime**, definite come materie non alimentari e non energetiche, sono distribuite in modo disomogeneo sulla crosta terrestre, storicamente questo fatto ha contribuito ad alimentare guerre coloniali e instabilità politica con ripercussioni economiche e sociali significative. In Europa, attualmente, queste risorse sono particolarmente scarse, incrementando la dipendenza dei Paesi dell'Unione Europea dalle importazioni da paesi extra-europei, spesso politicamente instabili, che non garantiscono approvvigionamenti sicuri a lungo termine.

Per rispondere a questa problematica, la Commissione Europea ha avviato nel 2008 l'Iniziativa Europea delle Materie Prime e, da allora, si sono moltiplicate le iniziative europee e nazionali sul tema. Dal 2011, inoltre, la Commissione pubblica, con cadenza triennale, una lista di materie prime critiche, ovvero quelle ad elevato rischio di approvvigionamento perché disponibili (quasi) esclusivamente) in Paesi extraeuropei con instabilità politiche e di elevata importanza economica, ovvero necessarie alla produzione di beni ormai indispensabili per le economie moderne. L'ultima lista è del 2023, che ha visto un sensibile incremento del numero di tali materie, in conseguenza dell'aggravamento della situazione internazionale.

A livello nazionale, nel gennaio 2021 è stato avviato il Tavolo Tecnico Materie Prime Critiche (Tavolo CRM), coordinato dal Ministero delle Imprese e del Made in Italy e dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, con l'obiettivo di rafforzare il coordinamento, migliorare la sostenibilità degli approvvigionamenti e promuovere la circolarità. Nel 2019 il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, oggi Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), ha promosso inoltre la nascita della Piattaforma Italiana del Fosforo, con la finalità, tra le altre, del raggiungimento dell'autosufficienza del ciclo del fosforo su base nazionale e coordinamento con le politiche europee, tramite lo sviluppo di un modello di economia circolare. Nel 2022 è stato siglato un nuovo accordo di collaborazione biennale tra il MASE e l'ENEA per la ripresa delle attività della Piattaforma per il biennio 2023-2024.

Il GdL4 di ICESP supporta il lavoro di entrambe le iniziative incrementando la massa critica delle consultazioni e fornendo contributi con competenze specifiche sui singoli materiali. Il supporto avviene in particolare:

- al Tavolo CRM con i sottogruppi Costruzione e Demolizione, Mobilità sostenibile, Apparecchiature elettriche ed elettroniche
- alla Piattaforma Italiana del Fosforo con il sottogruppo Agrifood

Questo documento illustra dei casi studio selezionati di materie prime critiche particolarmente rilevanti per il panorama italiano, in particolare su litio, rame e alluminio/bauxite.

Il **litio** risulta fondamentale nei veicoli elettrici ed ibridi, nonché in settori come l'elettronica, l'aerospazio e la difesa. La sua produzione primaria ha impatti ambientali e sociali significativi, inclusi degrado del suolo, consumo e inquinamento dell'acqua, perdita di

biodiversità, dislocazione delle comunità locali e problemi legati ai diritti umani e a condizioni di lavoro dignitose. Il suo riciclo, invece,avviene principalmente dal trattamento delle batterie esauste, anche se, attualmente, meno dell'1% del metallo viene effettivamente recuperato, dato l'alto consumo energetico dovuto alle tecnologie di trattamento e il processo di recupero non sostenibile. Inoltre, la complessità del disassemblaggio delle batterie e la mancanza di standardizzazione del processo ne ostacolano le operazioni di recupero; la classificazione ambigua della "*black mass*" come rifiuto non pericoloso favorisce l'esportazione verso Paesi Terzi. La fluttuazione dei prezzi e la mancanza di una normativa comunitaria armonizzata sono ulteriori criticità legate a questa materia prima, tuttavia, l'aumento della sua importanza economica sta spingendo nuove aziende a investire in progetti di ricerca e sviluppo per il recupero. La sostituzione presenta diverse sfide per gli attuali utilizzi, tra cui performance inferiori, costi più elevati di sviluppo e produzione, disponibilità limitata di materiali alternativi, impatto ambientale maggiore e necessità di effettuare modifiche infrastrutturali rilevanti. Affrontare tali criticità richiede un approccio olistico che include sviluppo di processi innovativi, possibile integrazione di biotecnologie nei processi di trattamento, investimenti e politiche pubbliche mirate con obiettivi ambiziosi e ben strutturati al livello europeo.

Il **rame** è utilizzato principalmente per la sua eccellente conducibilità elettrica e termica, malleabilità e resistenza alla corrosione. È impiegato nell'industria elettrica ed elettronica (cavi, componenti elettronici), nelle costruzioni (tubi, impianti di riscaldamento, materiali da costruzione), nei trasporti (cablaggi, radiatori, veicoli elettrici) e nelle energie rinnovabili (pannelli solari, turbine eoliche). Pur non essendo critico secondo i criteri della Commissione Europea, è elencato come strategico per la sua rilevanza nelle applicazioni necessarie alla transizione ecologia e digitale e per la difesa e l'aerospazio. L'estrazione del rame ha impatti ambientali significativi, tra cui deforestazione, perdita di biodiversità e inquinamento del suolo e delle acque. Socialmente, può causare conflitti con le comunità locali e problemi di salute pubblica, ma offre anche opportunità di lavoro. Nel 2020, il Cile ne era il principale produttore mondiale con il 28% della produzione globale, seguito da Perù, Cina e Repubblica Democratica del Congo (RDC). Economicamente, l'estrazione rappresenta una fonte significativa di reddito per molti Paesi produttori, contribuendo in maniera rilevante al PIL (ad esempio, in Cile, l'estrazione del rame ne costituisce circa il 10%). In ogni caso il materiale può essere riciclato senza perdita di qualità del materiale (attualmente il 30% dell'uso globale proviene da materiale riciclato). Le sfide relative all'incremento del recupero del rame sono relative alla complessità del processo di recupero in quanto particolarmente energivoro e costoso, oltre che al design dei prodotti, non funzionale per il disassemblaggio e la separazione; le politiche dovranno essere mirate a incentivare l'*urban mining* e gli investimenti nelle infrastrutture. Il rame è in generale un materiale difficile da sostituire, ma esistono alternative come l'alluminio per i cavi elettrici, la fibra ottica per le telecomunicazioni e la plastica per tubi e gli impianti idraulici; materiali come il titanio, l'acciaio inossidabile e la plastica possono sostituire il rame negli scambiatori di calore, a seconda delle specifiche dell'applicazione. Inoltre, si stanno esplorando diverse alternative come fibre organiche lubrificanti e fibre ottiche, che offrono vantaggi tecnologici, anche se il rame risulta avere un

minor impatto ambientale. L'elemento è al centro di molte discussioni per la sua crescente domanda in settori cruciali come l'elettrificazione dei trasporti e le infrastrutture digitali, ma l'aumento dei prezzi delle materie prime può renderlo soggetto a una forte volatilità e imprevedibilità. La pandemia ha ulteriormente complicato la situazione, con una contrazione degli investimenti che potrebbe influenzare l'offerta e la domanda. Da un punto di vista normativo, esistono invece criticità legate all'approvazione e all'uso dei composti di rame nell'agricoltura biologica, i quali, sebbene essenziali per molte colture, possono comportare rischi per l'ambiente e la salute umana, portando a dibattiti su come regolarne l'uso in modo sostenibile e sicuro.

La **bauxite** è un minerale ricco di alluminio, fondamentale per la produzione di allumina da cui si ricava alluminio metallico. L'alluminio è leggero, conduttore di calore ed elettricità, altamente malleabile, versatile e resistente alla corrosione; inoltre, è completamente riciclabile. In Italia, la produzione di alluminio è basata al 100% sul riciclo, operazione che richiede solo il 5% dell'energia necessaria per la produzione primaria, offrendo vantaggi finanziari e ambientali significativi. Nel 2018, circa 2.986.000 tonnellate di alluminio sono state raccolte per il riciclaggio, con un tasso di riciclaggio a fine vita (EOL-RIR) del 69%. Queste caratteristiche lo rendono il secondo metallo più utilizzato nella società moderna, con impiego in svariati settori, tra cui trasporti, edilizia (il 23% degli usi finali sia in Italia che in Europa), imballaggi e ingegneria *high-tech*. In ogni caso, la crescente domanda di alluminio e la lunga durata di molte applicazioni rendono ancora necessaria la produzione primaria. Quest'ultimo processo è problematico a causa delle caratteristiche dei depositi di bauxite, che richiedono l'uso di ampie aree di terreno, spesso situate in prossimità di aree naturali protette, foreste tropicali e terre indigene, con impatti significativi sulla biodiversità e sulle comunità locali. Inoltre, la gestione dei residui del suo trattamento(fanghi rossi), il consumo di energia, la gestione dell'acqua e l'impronta fisica degli impianti costituiscono ulteriori criticità ambientali. La produzione secondaria implica invece potenziali emissioni di polveri, policloro-dibenzo-p-diossine e rifiuti solidi. Per quanto riguarda riciclo e sostituzione, la bauxite non è disponibile per il riciclo e la produzione di allumina da fonti alternative alla bauxite è teoricamente possibile utilizzando concentrati di nefelina, con alcuni esempi di produzione commerciale in Russia. Altri potenziali sostituti della bauxite per la fornitura di allumina includono anortosite, alunite, caolino, argilla di bassa qualità e ceneri volanti di carbone. L'alluminio può essere inoltre sostituito in vari settori da materiali come plastica rinforzata con fibra di carbonio nei trasporti, acciaio, plastica e legno nell'edilizia, e vetro, carta, plastica e acciaio negli imballaggi, ma anche dal rame nelle linee elettriche e nell'ingegneria ad alta tecnologia, mentre la ghisa e l'acciaio fuso possono essere alternative in alcune applicazioni specifiche. Ogni alternativa prevede un'analisi del ciclo di vita (LCA) del prodotto finale per determinare l'opzione più sostenibile nella scelta del materiale. Le attuali discussioni sul Regolamento REACH stanno ritardando gli investimenti in nuovi impianti di riciclo; alcuni stakeholder ritengono per questo necessaria l'introduzione di una fase preliminare di screening nel Regolamento per favorire una gestione più rapida dei rischi e stimolare gli investimenti oltre che rafforzare il regolamento sulle spedizioni di rifiuti.

1 La piattaforma italiana degli stakeholder dell'Economia Circolare – ICESP

La Piattaforma Italiana degli Stakeholder sull'Economia Circolare – ICESP, nasce nel 2018 come piattaforma "mirror" della Piattaforma Europea degli Stakeholder per l'Economia Circolare - ECESP (European Circular Economy Stakeholder Platform). L'obiettivo principale della piattaforma ICESP è di innescare, ispirare e supportare i processi di transizione circolare, creando un punto di convergenza nazionale sulle iniziative, le esperienze, le criticità, le prospettive che il sistema Italia vuole e può rappresentare in Europa in tema di economia circolare (www.icesp.it). Attualmente ICESP è composta da oltre 300 organizzazioni della quadrupla elica, che quindi includono stakeholder di Pubblica Amministrazione, imprese e associazioni di categoria, mondo della ricerca e formazione e società civile.

1.1 Il Gruppo di lavoro 4: Catene di valore sostenibili e circolari

ICESP è composta da 6 gruppi di lavoro tematici (GdL), 2 gruppi di lavoro trasversali (GT) e dal Comitato di Revisione Buone Pratiche; in particolare, il GdL 4 'Catene di valore sostenibili e circolari', coordinato da ENEA, ENEL e Università degli Studi di Torino, affronta la tematica della chiusura dei cicli, biologici e tecnici, nella catena del valore con approccio integrato per filiera/settore. La tematica rientra nel quadro delle iniziative europee sull'economia circolare ed è allineata al focus sulle filiere sottolineato nel New Action Plan pubblicato dalla Commissione europea l'11 marzo 2020, oltre che dalla 'Strategia nazionale per l'economia circolare' in attuazione degli obiettivi del PNRR del primo Semestre 2022, approvata con il Decreto MITE n.259 del 24 giugno 2022. La catena del valore include tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto/servizio/progetto (progettazione, produzione, distribuzione, consumo e fine vita) e il focus viene posto su singoli materiali (e.g. materie prime critiche), prodotti (e.g. imballaggi in plastica, RAEE, pneumatici, ecc.) e su specifiche catene di approvvigionamento (e.g. costruzioni, agro-industria, tessile, ecc.). Con questa logica, il GdL 4 è organizzato in sottogruppi relativi alle filiere individuate come strategiche per favorire la transizione verso l'economia circolare, ovvero:

- Costruzione e Demolizione
- Tessile, Abbigliamento e Moda
- Mobilità sostenibile
- Agrifood
- Plastiche
- Apparecchiature elettriche ed elettroniche

Tutti i sottogruppi contribuiscono al raggiungimento degli obiettivi specifici del GdL4, come descritto qui di seguito.

✓ Obiettivi a breve termine: raccolta delle buone pratiche già sul mercato, relative alla chiusura del ciclo in significative catene del valore e filiere; ove presenti, individuazione

delle lacune e promozione della eventuale replica dei casi di successo; redazion documenti di posizionamento di filiera volti al superamento dei vincoli di sistema e all'implementazione di business models circolari, anche inter-filiera.

- ✓ Obiettivi a medio-lungo termine: promozione dell'interazione intersettoriale per supportare la chiusura dei cicli nelle filiere e nelle catene di valore individuate

Il Gruppo di lavoro pubblica periodicamente documenti di posizionamento e supporta iniziative su specifiche tematiche di interesse nazionale. Questo documento è un lavoro con focus sulle materie prime critiche (CRM) e strategiche (SRM).

2 Materie prime critiche e catene di valore

2.1 Le materie prime critiche

Le materie prime, definite come quelle non alimentari e non energetiche, sono distribuite in modo disomogeneo sulla crosta terrestre, cosa che, nella storia, ha portato a guerre coloniali e instabilità politiche tuttora esistenti, con enormi ripercussioni economiche e sociali. I Paesi europei sono tra i più poveri di materie prime e quindi quasi completamente dipendenti dall'importazione da Paesi extra-europei, tra i quali ne spiccano alcuni con instabilità politiche e che quindi non garantiscono approvvigionamenti sicuri a lungo termine.

Già nel 2008 la Commissione Europea aveva lanciato l'Iniziativa Europea delle Materie Prime, con l'obiettivo di limitare tale dipendenza. A valle di tale iniziativa, sono nate in questi anni diverse iniziative, le più recenti delle quali sottolineano l'importanza delle materie prime anche per il loro ruolo cardine nella realizzazione di un'economia circolare e competitiva. A partire dal 2011, inoltre, la Commissione stila (con cadenza triennale) una lista che definisce critiche quelle materie prime a rischio approvvigionamento (da cui dipendiamo per l'importazione da Paesi con situazioni politiche instabili) e con elevata importanza economica, tenendo conto che in questo caso non si parla di valore economico intrinseco, ma di necessità delle materie prime per la realizzazione di prodotti ormai indispensabili per le nostre economie.

Il 16 marzo 2023 la Commissione Europea ha pubblicato il documento 'Study on the Critical Raw Materials for the EU", contenente la proposta per la Lista CRM 2023, ma anche la proposta di Lista di Materie Prime Strategiche, ovvero quelle che, indipendentemente dalla loro criticità, sono indispensabili alla transizione ecologica e digitale e/o per la difesa e

l'aerospazio. Qui di seguito la lista delle Materie Prime Critiche e riportate in corsivo le Materie Prime Strategiche:

2023 Critical Raw Materials (*Strategic Raw Materials in italics*)			
aluminium/bauxite	coking coal	*lithium*	phosphorus
antimony	feldspar	*LREE*	scandium
arsenic	fluorspar	*magnesium*	*silicon metal*
baryte	*gallium*	*manganese*	strontium
beryllium	*germanium*	*natural graphite*	tantalum
bismuth	hafnium	niobium	*titanium metal*
boron/borate	helium	*PGM*	*tungsten*
cobalt	*HREE*	phosphate rock	vanadium
		*copper**	*nickel**

Figura 1. Lista EU materie prime critiche e strategiche

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

Accanto alla consueta lista delle CRMs e alla nuova lista SRMs, la Commissione Europea ha proposto l'adozione del Regolamento CRM Act[1], con l'obbiettivo di garantire l'accesso dell'UE a un approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche, consentendo all'Europa di raggiungere i suoi obiettivi climatici e digitali per il 2030. Dopo un lungo negoziato con gli Stati Membri e il Parlamento Europeo, il testo è stato confermato il 18 marzo 2024 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale Europea il 3 maggio 2024[2]. Tra le modifiche apportate al testo a seguito del negoziato, si sottolinea l'ingresso dell'Alluminio nella lista delle SRMs.

In questo quadro si inserisce il lavoro oggetto di questo documento.

2.1.1 Le iniziative nazionali sulle materie prime e il supporto del GdL4

Tavolo Nazionale Materie Prime Critiche. A gennaio 2021 è stato avviato il Tavolo Tecnico Materie Prime Critiche (Tavolo CRM), coordinato dal Ministero delle Imprese e del Made in Italy e dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica con l'obiettivo di:

- rafforzare il coordinamento sul tema;
- potenziarne la progettualità in termini di sostenibilità degli approvvigionamenti e di circolarità;
- contribuire alla creazione delle condizioni normative, economiche e di mercato volte ad assicurare un approvvigionamento sicuro e sostenibile delle materie prime critiche.

A gennaio 2022 il Tavolo è stato organizzato in 4 Gruppi di Lavoro tematici, come qui di seguito:

[1]https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en
[2]https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=OJ:L_202401252

- ✓ Gruppo di Lavoro 1 'Analisi Fabbisogni' (CRM1) → Coordinato da Confindustria con l'obiettivo di stimare i bisogni futuri di materie prime critiche, sia diretti che indiretti analizzando anche il divario tra domanda e offerta;
- ✓ Gruppo di Lavoro 2 'Mining' (CRM2) → Coordinato da ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico D'Italia, con l'obiettivo di identificare le potenzialità per le attività estrattive primarie e secondarie (recupero da rifiuti estrattivi) verificando le possibilità di un'estrazione sostenibile nel territorio italiano;
- ✓ Gruppo di Lavoro 3 'Ecodesign – Ecoprogettazione' (CRM3) → Coordinato da ENEA, con l'obiettivo di analizzare le potenzialità dell'eco-design per ridurre la domanda di materie prime critiche;
- ✓ Gruppo di Lavoro 4 'Urban mining' (CRM4) → Coordinato da ENEA, con l'obiettivo principale la stima del potenziale delle attività di Urban Mining, con un focus sui RAEE.

Il lavoro di CRM3 e CRM4 è stato condotto con il supporto di ICESP e, in particolare, dal GdL4 'Catene di Valore Sostenibili e Circolari' e dal GT 'Ecodesign e Modelli di consumo circolari'. ICESP, pur non essendo parte del Tavolo CRM, ha partecipato alle consultazioni indette dal Tavolo, consentendo di ampliare la platea di partecipanti, e incrementando così la significatività dei risultati. Per quanto riguarda il GdL4, hanno contribuito i sottogruppi Costruzione & Demolizione, Mobilità sostenibile e Apparecchiature elettriche ed elettroniche.

Piattaforma Italiana del Fosforo. Nel 2019 il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, oggi Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), ha promosso la nascita della Piattaforma Italiana del Fosforo, con la finalità, tra le altre, del raggiungimento dell'autosufficienza del ciclo del fosforo su base nazionale e coordinamento con le politiche europee, tramite lo sviluppo di un modello di economia circolare. Nel 2022 è stato siglato un nuovo accordo di collaborazione biennale tra il MASE e l'ENEA per la ripresa delle attività della Piattaforma per il biennio 2023-2024.

La Piattaforma, gestita da ENEA in collaborazione con la Direzione Generale Economia Circolare del MASE, è costituita da stakeholder attivi sul ciclo del fosforo, con la partecipazione di più di 60 organizzazioni aderenti, tra cui organizzazioni di ricerca, istituzioni pubbliche e private, aziende e terzo settore. La partecipazione alla Piattaforma è aperta a tutti i soggetti portatori di interesse della catena di valore del fosforo.

Il lavoro della Piattaforma è supportato da quello del sottogruppo Agrifood del GdL4 di ICESP.

2.1.2 Il lavoro del GdL4: la selezione dei casi studio

Il lavoro oggetto di questo documento mira a identificare priorità, criticità, opportunità nelle catene del valore delle filiere di produzione italiane con focus su CRM e SRM con proposte di superamento degli ostacoli. Nel corso del 2023, a valle di una ricerca bibliografica, i tre sottogruppi con focus sulle materie prime (Costruzione e Demolizione, Mobilità Sostenibile e Apparecchiature Elettriche ed elettroniche) hanno condotto per questo un'indagine interna con l'obiettivo di selezionare alcuni casi studio di CMR e/o SRM sulle quali finalizzare l'approfondimento descritto. In particolare, è stato proposto un questionario agli stakeholder della piattaforma finalizzato a selezionare le materie prime di importanza strategica per la loro attività economica, come riportato nella figura qui di seguito:

CRM	Prodotti	Paesi da cui dipendiamo per l'importazione	Organizzazioni rappresentanti nel sottogruppo di riferimento	Riciclabilità	Sostituibilità	Criticità (tecnologiche, normative, di mercato)	Proposte di superamento degli ostacoli

Figura 2. Format questionario selezione CRM / SRM

Il lavoro si è svolto in tre fasi:

1. Selezione delle CRM/SRM come casi studio
2. Individuazione di opzioni di riciclabilità e sostituibilità
3. Individuazione di criticità e proposte di superamento degli ostacoli

Le fasi 2 e 3 sono state avviate a valle delle risposte ottenute nelle colonne bianche.
Sulla base dei dati ottenuti dal questionario i sottogruppi Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche e Mobilità Sostenibile hanno selezionato il rame e il litio, mentre il sottogruppo Costruzione & Demolizione l'alluminio. L'indagine è stata svolta anche all'interno del sottogruppo Agrifood, ma, avendo questo confermato il fosforo, si rimanda ai lavori della Piattaforma Italiana del Fosforo.

3 Litio

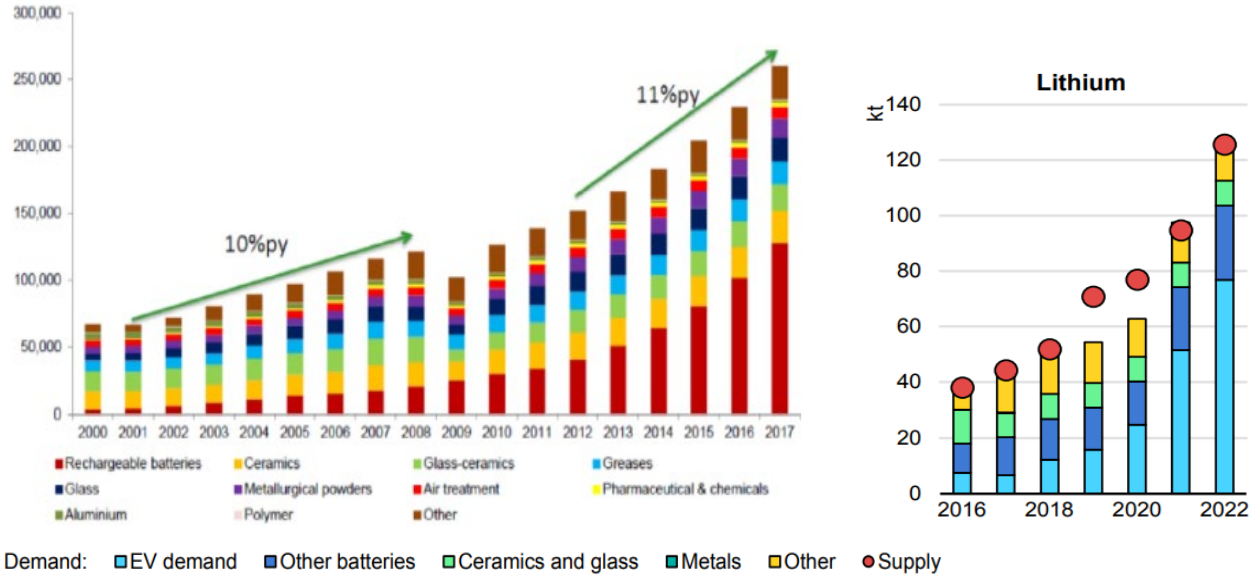
3.1 Usi del litio nell'industria europea ed italiana

Il litio è un elemento appartenente al gruppo dei metalli alcalini dal colore grigiastro-bianco. Le sue proprietà, uniche rispetto agli altri metalli alcalini, giustificano il suo largo utilizzo nei diversi settori dell'industria italiana ed europea (Amato et al., 2021).
Attualmente, i maggiori produttori di litio sono Australia, Cile, Cina e Argentina che coprono circa il 95% della produzione. L'Europa deve perciò assicurarsi un approvvigionamento esterno affidandosi all'importazione da Paesi terzi (Horizon Programme, 2020).
Come mostrato nella Tabella 1, il principale Paese da cui l'Unione Europea importa litio è il Cile, che garantisce la copertura del 79% della domanda, mentre l'Europa, per il momento, ha in attivo una sola miniera di litio situata in Portogallo, che nel 2020 ha prodotto poco meno di 700 tonnellate (JRC - European Commission, 2023.). Sono comunque presenti diversi giacimenti sul territorio europeo che potrebbero essere sfruttati in futuro e che verranno esplorati nel dettaglio nel paragrafo successivo.

Tabella 1 Produzione e consumo di litio nel 2020 (a USGS 2022; b Horizon Programme, 2020)

Produzione globale (t) [a]	Produttori mondiali (esclusi USA)	Produzione Europea (t)	Tasso d'importazione	Importatori	Consumo europeo (t) ([b] media negli anni 2016-2020)	Consumo italiano (t)
82.500; 119.290 per usgs senza stime produzione; 146.450 per usgs con stime produzione; 130.000 per IEA	Australia 53% (51% usgs) Cile 32% (26% usgs) Cina 15% Argentina 11% (5% usgs)	Portogallo 0 (380 usgs)	1	Cile 79% Russia 8% Argentina 6%	5.000 1.832 (Horizon Programme)	21

La maggior parte del litio attualmente estratto viene impiegato per la produzione di batterie, passando da un utilizzo del 23% del 2010 al 71% del 2020 (come mostrato in Figura 1). In base alle proiezioni, questa percentuale potrebbe raggiungere il 93% entro il 2030. L'importanza delle altre applicazioni si è conseguentemente ridotta, infatti il peso del litio usato nella vetroceramica, ad esempio, è fortemente diminuito, passando dal 31% del 2010 al 14% del 2020 (*Horizon Programme*, 2020). Inoltre, è nettamente aumentato il consumo di litio da 70 a 270 kton di carbonato equivalente (tra il 2000 e il 2017) - LCE e 40->130 kton Li tra il 2016 e il 2022 e, poiché è nettamente aumentata la produzione di batterie, il peso percentuale delle restanti tecnologie che lo utilizzano è diminuito in %, ma è rimasto pressoché costante la quantità di LCE utilizzato.



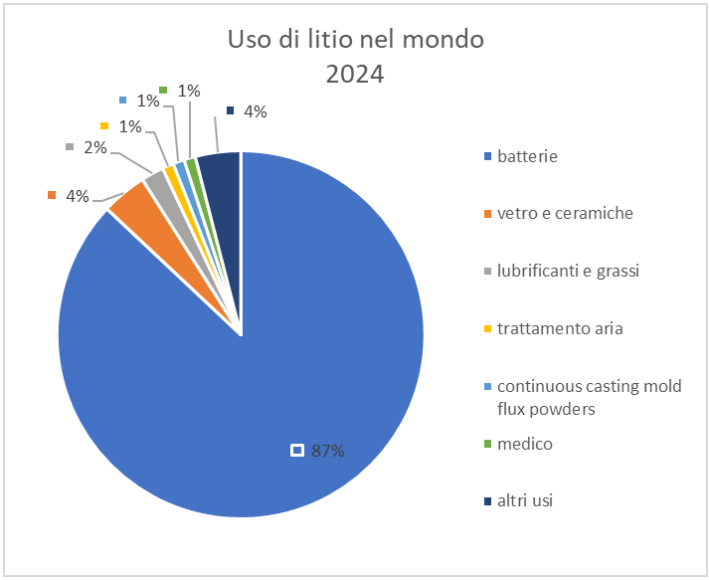


Figura 3 a) Consumo di litio tra il 2000 e il 2017, b) consumo di carbonato di litio tra il 2016 e il 2022 c) Utilizzo del litio in Europa e nel mondo nel 2010, 2020, 2024 (Fonte: IEA, 2023, Horizon Programme, 2020, Fox Davies Resources Specialist, 2017)

Il largo e crescente utilizzo del litio nell'industria delle batterie è giustificato dalle sue caratteristiche che lo rendono un metallo ideale per accumulare energia, trovando oggi terreno fertile in un'Europa chiaramente determinata a raggiungere gli ambiziosi obiettivi di decarbonizzazione. Le batterie agli ioni di litio, infatti, sono sempre più diffuse nei settori strategici andando a sostituire gradualmente le altre batterie ricaricabili come quelle al nichel-metallo-idruro (NiMH) e al piombo-acido (PbA). Una tipica batteria utilizzata per questo scopo è strutturata da una coppia di elettrodi (anodo e catodo) ed un elettrolita (Figura 2). Il litio è attualmente utilizzato nel catodo (sotto forma di ossido o sale di vari metalli, tra cui il litio) e nell'elettrolita (sale di litio disciolto in solventi), ma nel futuro si prospetta di utilizzarlo anche negli anodi sotto forma di litio metallico.

La scelta dell'elettrodo positivo dipende se si tratta di batterie ricaricabili al litio o agli ioni di litio. Per le batterie al litio ricaricabili, grazie all'uso del litio metallico come elettrodo negativo, non è necessario che l'elettrodo positivo venga litiato prima dell'assemblaggio della cella. Al contrario, per le batterie agli ioni di litio, poiché l'elettrodo negativo di carbonio è vuoto (senza Li), quello positivo deve agire come fonte di Li, richiedendo quindi l'uso di composti intercalanti a base di Li stabili in aria per facilitare l'assemblaggio delle celle.Mediamente una cella agli ioni di litio e composta per circa il 50% da metalli di base, il 29% da grafite, il 7% da legante e plastica, il 4% di elettrolita e il 10% da altri componenti (Amato et al., 2021).

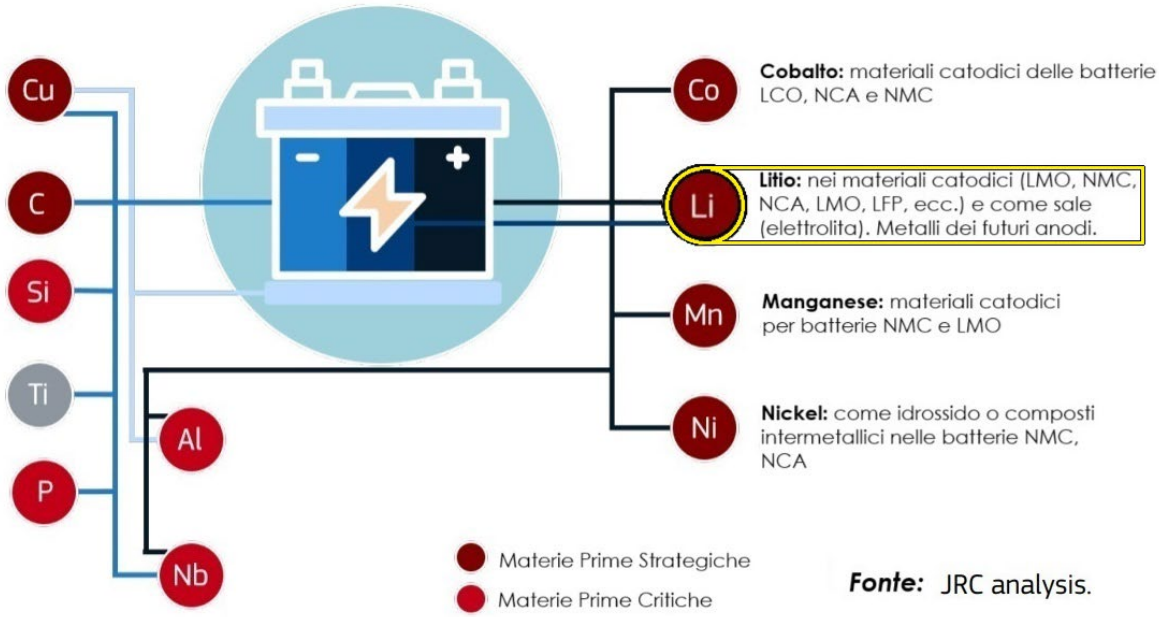


Figura 4 Composizione di una Batteria agli ioni di litio

Come indicato in Tabella 2, esistono varie tipologie di batterie agli ioni di litio presenti sul mercato, che si differenziano in base ai materiali utilizzati e alle conseguenti proprietà che le rendono più o meno adatte ai differenti impieghi.
Uno dei principali utilizzi delle batterie riguarda la propulsione dei veicoli elettrici ed ibridi la cui domanda è in forte crescita negli ultimi anni. Basti pensare che, per capire la rilevanza del litio sul mercato europeo, nel 2018 la domanda di batterie in Europa è stata di 12GWh, per poi raggiungere i 127,7GWh 2022, anno in cui la vendita di auto a propulsione elettrica e ibrida ha raggiunto una quota di mercato del 44,1%. Di queste, le *Full-Electric* coprono circa il 12%, contro l'1% del 2018, quando il mercato delle auto ibride ed elettriche era del 5,9%.

Tabella 2 Principali batterie agli ioni di litio

Batteria	Utilizzi	Criticità	Qualità
Litio ossido di cobalto (LiCoO2)-LCO	Smartphone, Videocamere digitali e laptop	Durata ridotta, bassa stabilità termica, ridotta capacità di carica, rischiosa se danneggaita e ridotte risorse di cobalto	Dimensioni ridotte
Litio ossido di manganese (LiMn2O4)-LMO	Strumentazione medica, utensili elettrici e veicoli ibridi ed elettrici	Bassa densità energetica	
Litio ferro fosfato (LiFePO4)-LFP	Carrelli elevatori, dispositivi di monitoraggio climatico, boe oceaniche e equipaggiamento delle condotte di gas e petrolio	Non carica a basse temperature e alte temperature	Miglior bilanciamento tra densità energetica e sicurezza senza causare danni ambientali
Litio ossido di nickel manganese e cobalto (LiNiMnCoO2)-NMC	Utilizzati per l'accumulo energetico per dispositivi elettronici, e-bike e altri propulsori elettrici	Instabilità meccanica della cella e limitate risorse di cobalto e nikel	
Litio ossido di nickel, cobalto e alluminio (LiNiCoAlO2)-NCA	Utilizzati per l'accumulo energetico per dispositivi medici, usi industriali e propulsori elettrici (Tesla)	Alto costo e limitate risorse di cobalto e nikel.	

Oltre che nell'industria della mobilità, le batterie agli ioni di litio vengono applicate in altri settori come accumulatori di energia, dispositivi elettronici e tecnologie aereonautiche e spaziali. In particolare, *smartphone*, *tablet* e *laptop,* che sono utilizzati ogni giorno da milioni di persone durante tutto l'arco della giornata, vengono inseriti tra i prodotti più sensibili essendo l'Unione Europea fortemente dipendente dall'importazione da Paesi terzi (Carrara et al., 2023). Per quanto riguarda il settore delle energie rinnovabili, poi, il litio ha un ruolo primario nella transizione nel processo verso una società a neutralità climatica che punti a ridurre la dipendenza da Paesi terzi per l'importazione di combustibile fossile. Per accelerare tale transizione l'Europa ha adottato il *REPowerEU* che fissa target ambiziosi da raggiungere. Tra le azioni necessarie per potenziare la diffusione delle rinnovabili, viene evidenziato come strategico l'utilizzo di batterie per i sistemi di accumulo energetico e supporto alle principali tecnologie. L'impiego delle batterie al litio risulta strategico anche nel settore della difesa e in quello aerospaziale, da sempre pionieri delle scoperte tecnologiche, con un ruolo decisivo nella crescita economica di un Paese.

Anche se si tratta del mercato prediletto, il litio non viene usato esclusivamente per la produzione di batterie. La seconda applicazione, per percentuale sul totale, è l'industria della vetroceramica. In questo contesto il litio viene utilizzato per la produzione di materiali a ridotta espansione termica, i quali forniscono al prodotto finale una notevole resistenza in situazioni di stress termico, riducono il cambio di colore causato dall'invecchiamento e aumentano la resistenza dello stampo ottenendo un prodotto finale duraturo nel tempo.

Queste particolarità fanno sì che la vetroceramica sia perfetta per la realizzazione di piani cottura e protesi dentali (Figura 3).

Figura 5 Piano cottura (a sinistra) e protesi dentale (a destra) in vetroceramica

Il litio viene impiegato anche nei prodotti farmaceutici: alcuni composti sono usati come stabilizzatori dell'umore, antidepressivi e cura del disordine bipolare.
In campo industriale viene utilizzato per diminuire il punto di fusione nel processo di produzione di allumino permettendo un risparmio energetico e, sottoforma di composto organolitico, come catalizzatore o iniziatore nella produzione di prodotti in gomma sintetica (*Horizon Programme*, 2020). L'utilizzo del litio in varie forme è previsto anche negli impianti di condizionamento e trattamento dell'aria. La salamoia di bromuro di litio viene usata come mezzo di assorbimento stabile al posto dei clorofluorocarburi negli impianti di condizionamento industriale, mentre le soluzioni di cloruro di litio sono applicate per il controllo dell'umidità industriale e sistemi di essiccazione negli impianti della lavorazione alimentare e laboratori. Infine, l'idrossido di litio anidro permette l'assorbimento e la rimozione di anidride carbonica dall'aria nei sistemi chiusi dei sottomarini e navette spaziali. Un altro utilizzo riguarda la produzione di grasso al litio, impiegato dalle case automobilistiche per lubrificare cuscinetti delle ruote e sul telaio, poiché possiede un'elevata resistenza all'acqua e alle alte temperature, rendendo il prodotto finale migliore di altri grassi. Nel campo della difesa e sicurezza, che coprono sempre più spazio nell'agenda politica europea, il litio occupa un ruolo nella realizzazione di leghe insieme all'alluminio e il manganese per la produzione di specifiche componenti di aerei, droni e satelliti. Si prevede un crescente utilizzo in futuro, visti i recenti investimenti nel settore.

Altre applicazioni minori riguardano:

- Niobato di litio nell'elettronica per le telecomunicazioni;
- Isotopi ^{6}Li e ^{7}Li applicati in reattori nucleari;
- Acetato di litio e idrossido di litio come additivo nella tintura tessile;
- Carbonato di litio utilizzato nell'edilizia per accelerare l'indurimento del cemento a presa rapida;
- Nitrato di litio come generatore del colore rosso nei fuochi d'artificio;
- Litio metallico e idruro di litio come additivi nei combustibili per la propulsione di missili;
- Ipoclorito di litio in prodotti per la pulizia di piscine;

- Cloruro di litio per la saldatura;

3.2 Risorse e riserve

Il litio è considerato una materia prima critica e strategica, vale a dire un materiale ad alto rischio di approvvigionamento, la cui fornitura è dominata da pochi Paesi, e di elevata importanza industriale dato che, al momento, è indispensabile per la realizzazione di tecnologie innovative per l'economia dell'Unione Europea. Il lito è stato inserito nel 2020, insieme alla bauxite, il titanio e lo stronzio.
Il CRMA citato all'inizio di questo documento inizia dando chiari parametri di riferimento per diversificare, entro il 2030, l'approvvigionamento di materie prime all'interno dell'Unione:

- il 10% del consumo annuo dovrà provenire dall'estrazione da miniere europee;
- almeno il 40% del consumo annuo dovrà essere lavorato in Europa;
- il 15% del consumo annuo dal recupero della filiera europea;
- non più del 65% di una singola materia prima critica, in qualsiasi fase di lavorazione, potrà provenire da un unico paese terzo.

Si dovrà investire maggiormente nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie estrattive, minerarie e di trasformazione rafforzando i rapporti di collaborazione su larga scala per la condivisione di competenze.
Per quanto riguarda la sostenibilità, il piano stabilisce criteri per aumentare la circolarità e la sostenibilità delle materie prime critiche. Prevede azioni che riguardano sia il territorio europeo, tramite il riciclo delle componenti e il recupero dei materiali, sia il territorio extra-unione promuovendo lo sviluppo dei Paesi terzi. Nella seconda metà del piano, vengono trattati i rapporti internazionali. Si conferma, per prima cosa, l'impossibilità dell'Unione Europea di essere pienamente auto sufficiente nella catena di approvvigionamento, sottolineando l'importanza dell'importazione. A tal riguardo, si considera essenziale diversificare le importazioni di materie prime critiche, mantenendo rapporti di reciproco vantaggio con i Paesi in via di sviluppo promuovendo pratiche minerarie responsabili.
Tutto questo deve confrontarsi con le stime ottenute dalle analisi svolte dal gruppo di ricerca europeo JRC che definisce due scenari al 2040 riguardanti la fornitura delle materie prime critiche:

- Scenario con alta domanda (HDS): assume una rapida evoluzione tecnologica con aumento della domanda di materiali e un'espansione tecnologica in linea con le ambizioni energetiche e i target stabiliti per la mitigazione del cambiamento climatico.

- Scenario con bassa domanda (LDS): assume un lento sviluppo tecnologico con un incremento della domanda di materiali molto più moderata rispetto allo scenario HDS.

L'Europa potrebbe così aumentare la sua richiesta di litio di circa 27 volte rispetto a quella attuale. Per quanto riguarda l'Italia, il fabbisogno nel 2020 è stato di 2.782 tonnellate di materie prime strategiche; di queste, il litio copre circa 21 tonnellate. Negli scenari futuri, la richiesta potrà variare da un minimo di 225 tonnellate (LDS) ad un massimo di 320 tonnellate (HDS).

3.2.1 Geologia

Il litio è stato scoperto nel 1817 nel minerale petrolite, ma isolato solo 48 anni dopo da R.W. Bunsen. Ha peso atomico 6,94 ed è moderatamente diffuso nella crosta terrestre con una concentrazione di 65 parti per milione. È possibile trovarlo sotto forma di minerale di roccia (circa il 25% delle riserve globali) e disciolto in sali nelle salamoie dei grandi laghi di alta quota (circa il 65%). Secondo la letteratura, sulla crosta terrestre, possiamo trovare circa 131 minerali di litio; quelli importanti da un punto di vista economico sono solo 6 silicati e i minerali a base fosfato. Principalmente, questo elemento è presente nei depositi di pegmatite: rocce intrusive a grana grassa che si formano durante le fasi finali della cristallizzazione di un magma. Al loro interno si trovano molti minerali, tra cui lo spodumene ($LiAl[SiO_3]_2$) che è considerato il minerale più importante per il mercato. L'estrazione del litio dalle rocce è un processo energivoro e impattante poiché avviene con il metodo a cielo aperto, ovvero aprendo una fossa dal terreno per il recupero della roccia. I blocchi di pegmatite vengono poi frantumati e inviati alle celle di flottazione in cui avviene una separazione dei minerali. Quando si raggiunge una concentrazione di circa 5-7% di LiO_2, il minerale viene inviato ad un impianto che effettua un trattamento chimico per ottenere carbonato di litio. La seconda fonte di litio è la salamoia, con concentrazioni comprese tra 160 e 1400 ppm, situata all'interno dei pori delle rocce in zone lacustri o spiagge dove il metallo viene accumulato dall'erosione della roccia e/o dalle sorgenti termali. L'estrazione avviene tramite pompaggio della salamoia in vasche esterne che permettono la concentrazione del metallo attraverso l'evaporazione degli altri composti; nel complesso questa tecnica è a più basso impatto ambientale poiché utilizza energia solare nelle prima fasi di lavorazione. Successivamente, la salamoia viene inviata a un impianto a scambio ionico da dove si ottiene il carbonato di litio.
Recentemente, prende sempre più piede l'idea di recuperare il metallo dalla salamoia presente nelle falde acquifere profonde sfruttando contemporaneamente anche l'energia geotermica. La *Georesources Switzerland* si occupa appunto di studiare, per conto del servizio geologico svizzero, le principali aree che presentano risorse sul territorio svizzero. Dai loro risultati, sono stati rinvenuti giacimenti di litio in falde profonde in tutta Europa, come mostrato in Figura 6.

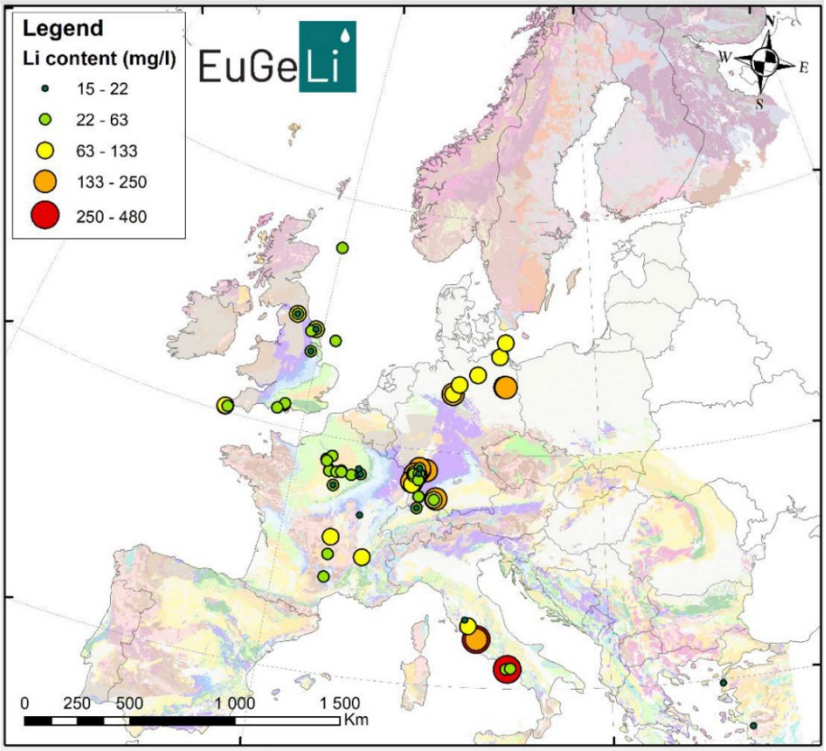


Figura 6 Concentrazioni di Litio in salamoie geotermiche

Questa tecnica permetterebbe di estrarre il litio e di sfruttare l'energia geotermica profonda. Attualmente esistono molti studi al riguardo, ma nessun impianto industriale attivo.
Tra gli altri metodi alternativi per ottenere litio sul territorio europeo c'è il recupero dalle batterie esauste, argomento che verrà approfondito nei capitoli successivi.

3.2.2 Risorse e riserve di Litio

Le riserve di litio a livello mondiale si stimano essere di circa 28 milioni di tonnellate, di cui 5.7 milioni nelle miniere australiane. La produzione globale è aumentata da 82.500 t nel 2020 a 100.000 t nel 2021 (*Horizon Programme*, 2020). Attualmente le più grandi riserve di litio, come mostrato in Figura 5, sono localizzate in Cile, Australia, Argentina e Cina (Amato et al., 2021). Quest'ultima, pur possedendo l'11% del litio mondiale sui suoi territori, di fatto ne controlla il 24%. Questo grazie ad investimenti svolti su territorio australiano e cileno (acquistando, rispettivamente, il 51% e il 43% delle quote delle società estrattive) che le permettono di avvicinarsi al suo obiettivo di diventare la prima potenza mondiale nelle tecnologie del futuro, seguendo il proprio piano decennale "*Made in China 2025".* D'altro canto, negli U.S. troviamo una delle ultime importanti scoperte: il Lago Salton. Situato a sud dello stato della California, è un lago chiuso alimentato da acque reflue creato da una piena agli inizi del ventesimo secolo; sarebbe dovuto diventare una meta turistica per i Californiani degli anni Cinquanta, ma gli elevati livelli di inquinamento lo hanno portato a diventare un luogo in stato di abbandono circondato dal deserto.
Con la riduzione del livello delle acque in seguito alla diminuzione delle precipitazioni e i prelievi per l'agricoltura, dal fondale è emerso uno dei più grandi giacimenti di litio in forma

di salamoia del mondo, con una potenzialità tale da poter produrre 375 milioni di batterie per veicoli elettrici.

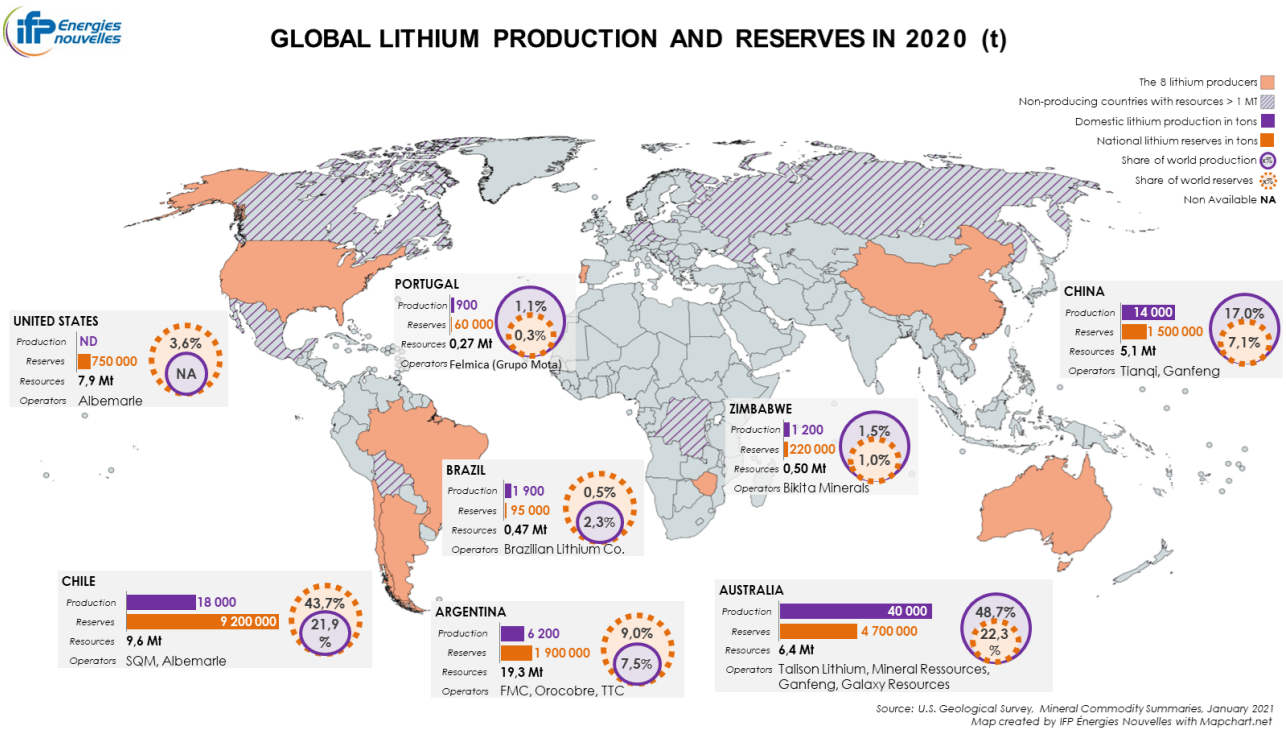


Figura 7 Produzione mondiale di litio (2021)

Per quanto riguarda l'approvvigionamento dell'Europa, il litio viene fornito principalmente dal Cile, che copre il 79% della richiesta. Sono tuttavia in corso attività di esplorazione sul territorio europeo, in particolare:

- Austria, in aprile 2018 sono state stimate 7.5 milioni di tonnellate di minerale con 0,71% di ossido di litio (Li_2O)
- Repubblica Ceca, considerata il più grande sito di litio in Europa, con circa 34.5 Mt di minerale a 0,65% Li_2O.
- Finlandia, nel corso di varie esplorazioni in diversi siti si stima che in totale ci siano circa 13.7 milioni di tonnellate di minerale con diverse percentuali di Li_2O.
- Germania, dispone di diversi giacimenti sparsi per il paese (Zinnwald con 40 milioni di tonnellate al 0,76% e Sadisdorf con 25milioni di tonnellate al 0,45%) e una grande risorsa di litio in salamoia di circa 2.484 milioni di tonnellate con una concentrazione di 181mg/l nella valle del reno.
- Portogallo, si stima la presenza di circa 43 milioni di tonnellate con una concentrazione di ossido di litio del 0,88%.
- Spagna, il deposito di San Jose dispone di circa 111 milioni di tonnellate di minerale con concentrazione di 0,61%.
- Serbia, possiede un notevole giacimento di litio a livello mondiale, scoperto dalla Rio Tinto nel bacino di Jadar. Qui il litio esiste come jadarite, una nuova specie di minerale scoperto nella zona. L'azienda mineraria ha individuato tre depositi: un primo da 16.6Mt con concentrazione di 1,81%, un secondo da 55.2Mt a 1,68% e un terzo da 84.1Mt a 1,84%(*Horizon Programme*, 2020).

- Italia, un gruppo di lavoro del CNR ha condotto una revisione dei dati geologici per individuare possibili giacimenti di litio sul territorio nazionale. Come mostrato nella Figura 6, c'è un alto potenziale di trovare litio nei fluidi profondi presenti nella fascia vulcanica-geotermica nella zona laziale-campana e sul fronte appenninico, con acque salate che possono contenere fino a 480 mg/Kg di litio, più del doppio dei fluidi francesi, inglesi e tedeschi (Dini & Alla, 2023).

Figura 8 Zone favorevoli per il ritrovamento di fluidi profondi ricchi di litio sul territorio italiano

3.3 Riciclabilità

Tra le raccomandazioni della Commissione Europea per garantire l'approvvigionamento della materia prima critica litio c'è la diversificazione delle fonti. In aggiunta all'identificazione di nuovi Paesi che possa soddisfare la domanda europea, c'è sicuramento la necessità di accelerare lo sviluppo di una catena del valore sostenibile delle batterie, che includa le operazioni di riuso e riciclo capaci di abbattere la richiesta di litio. Le batterie, infatti, sono considerate la principale (e al momento probabilmente l'unica) risorsa secondaria di litio, Brückner et al (2020) ha stimato che il ricavo derivante dalla valorizzazione delle batterie pretrattate (8400 $/t) potrebbe derivare per oltre il 30% da questo metallo. Per quanto riguarda gli altri prodotti contenenti litio, il recupero da grassi lubrificanti e prodotti farmaceutici risulta impossibile, mentre la valorizzazione di scarti ceramici e vetrosi non risulta vantaggiosa né dal punto di vista tecnico né da quello economico (*Horizon Programme*, 2020).

Anche dalle batterie il recupero del litio è ad oggi considerato come una sfida poiché le tecnologie disponibili sono particolarmente energivore e non sostenibili; così meno dell'1%

del metallo presente nelle batterie è ad oggi recuperato. Per questa ragione, il trattamento delle batterie mira principalmente al solo recupero di cobalto e nickel con la conseguente perdita di litio.
La forte crescita della domanda di questo metallo, con la conseguente inclusione nella lista delle CRM sta tuttavia cambiando gli scenari. Sempre più aziende stanno investendo nella ricerca di nuove tecnologie capaci di superare le attuali criticità e rendere sostenibile il recupero di litio secondario. Da un punto di vista commerciale, la via che probabilmente prenderà piede nei prossimi dieci anni è quella idrometallurgica, applicata alla *black mass (*prodotto macinato derivante dal pretrattamento dagli elettrodi - dopo la rimozione meccanica di alluminio e rame - ricco di metalli di forte interesse come Ni, Li, Mn e Co). Data la loro complessità, infatti, le batterie a fine vita non possono essere trattate tal quali ma subiscono una serie di pretrattamenti che includono scaricamento o inattivazione, disassemblaggio e separazione.
Un tipico processo per il trattamento della *black mass* è presentato da Brückner et al. (2020) e include una lisciviazione acida per acido solforico con la separazione della grafite, seguita da una rimozione delle impurezze e una prima precipitazione (che può essere eseguita attraverso processi differenti, come rappresentato nella Figura 7A) per il recupero di cobalto, nickel, manganese. La soluzione residua è trattata con carbonato di sodio per ottenere un prodotto a base di carbonato di litio oppure con uno step di elettrolisi e cristallizzazione per ottenere idrossido di litio. Nello schema di processo rappresentato in Figura 7B, il litio è recuperato direttamente come carbonato. A causa della sua bassa concentrazione e allo sfavorevole rapporto Na:Li (risultante dall'uso di soda caustica, usata come agente neutralizzante nell'estrazione con solvente), si ottengono bassi valori di resa e purezza del prodotto finale. Al fine di risolvere questa criticità, un'alternativa potrebbe essere l'impiego di un agente estraente organico, quale, a titolo d'esempio, il Cyanex 936P, molto selettivo verso il litio. Alternative potrebbero essere il ricorso alla carbonatazione del Li o l'utilizzo di membrane a scambio ionico. *Hielscher Ultrasonics* propone una soluzione ad ultrasuoni, alternativa ai più tradizionali approcci piro e idrometallurgici capace di accelerare i tempi dei trattamenti e ridurre le temperature operative sia in fase di lisciviazione dei metalli che di recupero.

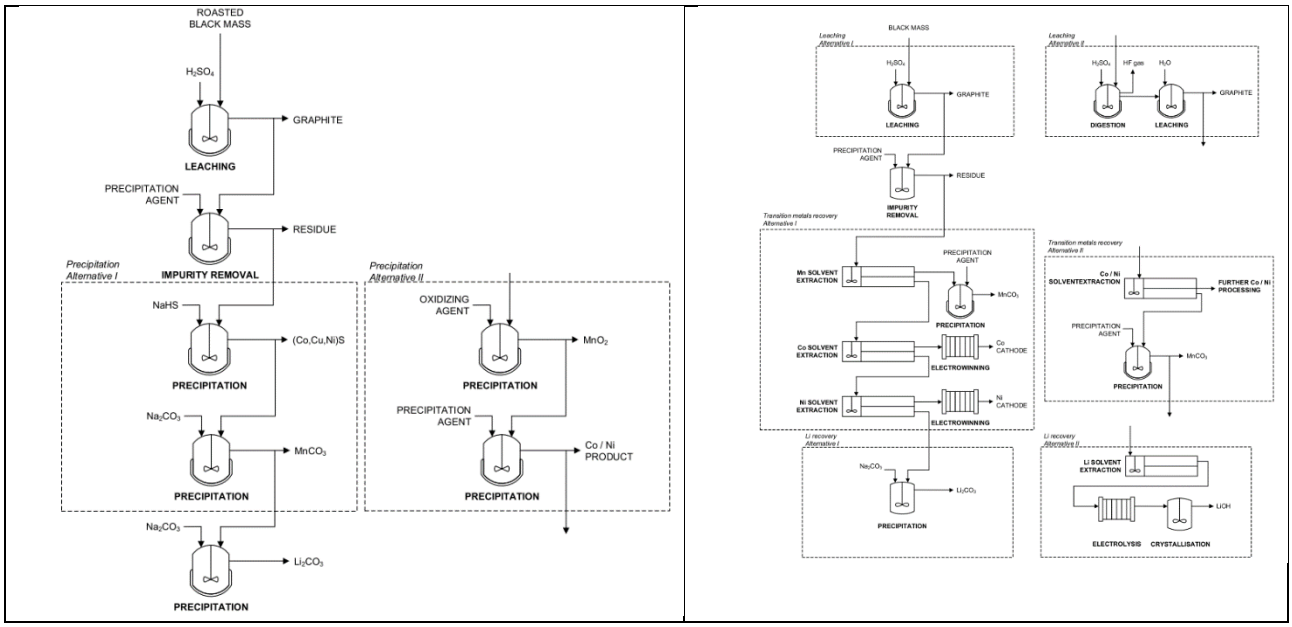


Figura 9 Possibili schemi di processo per il trattamento di batterie al litio esauste

Ad oggi il recupero di litio dalla *black mass* è eseguito principalmente in Asia, dove la grande disponibilità del rifiuto in alimentazione garantisce una maggiore sostenibilità dell'intero processo. La Tabella 3 mostra la lista dei principali impianti presenti (o pianificati) nel mondo che applicano trattamenti idrometallurgici (singoli o in combinazione con un precedente trattamento pirometallurgico per l'estrazione del litio dalle scorie residue), confermando il ruolo leader della Cina. Il proliferare di impianti di varia scala, anche sul territorio Europeo conferma il forte interesse dell'Unione nella creazione di un nuovo mercato. Tra gli impianti pianificati, degno di nota è quello di Umicore che, nel 2022 ha lanciato un nuovo business per lo sviluppo di soluzioni per il riciclaggio di batterie pianificando la realizzazione dell'impianto più grande d'Europa (con una capacità di 150.000 t), da realizzare entro il 2026. L'azienda ha dichiarato che il complesso trattamento, che combinerà approcci piro e idrometallurgici coperti da 20 brevetti, sarà la soluzione a più alta efficienza e sostenibilità per il recupero di materie prime critiche. In particolare, la fase pirometallurgica porterà alla produzione di una lega (contenente cobalto, nichel e rame) e un concentrato di litio da sottoporre a un trattamento idrometallurgico capace di produrre materiali da utilizzare come materie prime seconde per la produzione di nuove batterie, in accordo con i principi dell'economia circolare. In base a quanto dichiarato dall'azienda, la fase pirometallurgica consentirà di evitare il pretrattamento, incluse triturazione meccanica e separazione fisica che portano alla produzione della *black mass*, riducendo i rischi per gli operatori, meno esposti a sostanze pericolose. Sempre sul territorio europeo, ma con una capacità operativa notevolmente più bassa, è l'azienda *Duesenfeld GmbH*, che ha costruito un innovativo impianto con una capacità di 3000 t per il trattamento delle batterie. Nel 2019 l'impianto ha trattato circa 1000 t di batterie, tramite un trattamento che prevede la macinazione del materiale in atmosfera inerte, un trattamento termico seguito da una serie di separazioni meccaniche che hanno come metalli target alluminio e rame. Il materiale risultante, la *black mass*, è trattato con approccio idrometallurgico per il recupero di litio, cobalto, nichel e manganese raggiungendo efficienze di riciclo tra il 70 e il 90%. L'innovazione del trattamento

proposto da Duesenfeld è un pretrattamento brevettato per la rimozione del fluoruro prima della fase idrometallurgica per prevenire la successiva formazione dell'acido fluoridrico. Per quanto riguarda il territorio nazionale, esistono aziende che si occupano per lo più di pretrattamento delle batterie, con successiva esportazione della *black mass* in Paesi europei o extra-europei (Seval, RAEE.Man, Valmet RAEE). Inoltre, per il 2024 è prevista l'apertura di un impianto nella provincia di Chieti (Abruzzo) che, oltre ad effettuare selezione e cernita delle batterie, permetterà il recupero di varie materie prime critiche, incluso il litio con l'applicazione di un processo idrometallurgico (realizzato a temperature basse) con efficienze del 90%. Il processo si baserà sul brevetto di COBAT che prevede le fasi di: scarico della batteria a contatto con un materiale solido conduttore, separazione della *black mass*, immersione della stessa in una soluzione di un acido organico debole, lisciviazione con acidi forti dei metalli (dopo la separazione di membrane e collettori metallici), aggiunta di un solfuro alcalino, precipitazione dei sali di sodio e potassio con ottenimento di una soluzione di litio poi precipitato come carbonato.

Tabella 3 Principali impianti nel mondo (esistenti o progettati)

Azienda	Posizione	Volume (t/anno)	Status
Retriev (Toxco)	Trail, BC, CA	20.000	Pianificato
Li-Cycle	Gilbert, AZ, US	10.000	Pianificato
Li-Cycle	Tuscaloosa, AL, US	10.000	Pianificato
Li-Cycle	Rochester, NY, US	5.000	Esistente
Li-Cycle	Kingston, ON, CA	5.000	Esistente
Umicore Valeas	Hoboken, BE	7.000	Esistente (combinato con pirometallurgico)
Umicore	Hoboken, BE	150.000	Pinificato
Fenix	Whitehall, UK	10.000	Pianificato
COBAT-Ecofactory	Chieti, IT	-	Pianificato
Recupyl	Grenoble, FR	110	Esistente
Accurec	Krefeld, DE	4.000	Esistente (combinato con pirometallurgico)
Duesenfeld GmbH	Wendeburg, DE	3.000	Esistente
Glencore	Baar, CH	3.000	Esistente (combinato con pirometallurgico)
Akkuser	Nivala, FI	4.000	Esistente (combinato con pirometallurgico)
Brunp Recycling Technologies	Hunan, CN	100.000	Esistente (combinato con pirometallurgico)
Taisen	Hunan, CN	6.000	Esistente
GEM	Jingmen, CN	30.000	Esistente
SungEel HiTech	Gunsan, KR	8.000	Esistente
JX Nippon Mining	Tsuruga, JP	5.000	Esistente (combinato con pirometallurgico)

3.4 Sostituibilità

La sostituzione del litio è possibile in diverse applicazioni, quali batterie, vetro e ceramiche (Tabella 4). Tuttavia, al momento ci sono pochi incentivi per cercare di sostituire il litio sia per il suo prezzo basso che per la sua elevata disponibilità. Graedel et al. (2015) hanno assegnato a 62 elementi punteggi per stimare la loro sostituibilità, tenendo in considerazione la distribuzione geografica dei giacimenti, i loro possibili sostituti e le relative performance. È stata al riguardo definita una scala che va da 0 - elemento facilmente sostituibile mantenendo le stesse performance - a 100, quando non esistono elementi alternativi con proprietà confrontabili a quelle dell'elemento di riferimento. Per il Litio è stato stimato un valore pari a 41.

Per quanto riguarda la produzione di vetro e ceramica sono stati presi in considerazione come flussanti per sostituire il litio, sia il sodio che il potassio. Tuttavia, il loro impiego si traduce in una perdita di performance ed una riduzione della resistenza allo shock termico rispetto al carbonato di litio. Oggi, oltre il 50% del Litio viene utilizzato nella produzione delle batterie, che sono andate a sostituire in larga misura le batterie Nickel-Cadmio (NiCd), batterie ibride Nickel-metallo idruro (NiMH) e le batterie Piombo-acido (PbA). Le batterie a ioni di Litio hanno progressivamente preso il posto delle batterie esistenti in quanto presentano performance migliori. Il litio è diventato il materiale preferito per la produzione delle batterie dei dispositivi portatili e delle macchine. Solo le batterie ibride Nickel-metallo idruro (NiMH) competono con quelle a ioni di litio con buone prestazioni per l'immagazzinamento di energia elettrica nei veicoli ibridi. Tuttavia, queste sono state completamente soppiantate da lle batterie al litio nel mercato delle macchine elettriche (Harvey, 2018). Ad oggi non sono state individuate delle tecnologie capaci di sostituire, nel breve-medio termine, questo elemento all'interno delle batterie ricaricabili per le macchine elettriche o nei sistemi di stoccaggio di energia. Anche i nuovi sistemi che si stanno studiando usano fluoro e ferro per sostituire metalli di valore come il cobalto e il nickel ma continuano a richiedere la presenza di litio. Inoltre, le batterie a ioni di litio stanno sostituendo anche le tradizionali batterie al piombo per l'accensione e l'illuminazione, aumentandone ulteriormente la richiesta. Una buona alternativa alle batterie litio-ione sono quelle sodio-ione (Na-ione), che hanno processi di produzione e materiali simili alle Li-ione, con però la completa sostituzione del litio con il sodio, largamente presente in natura e maggiormente distribuito sul pianeta. Le prestazioni delle batterie Na-ione non sono ancora paragonabili a quelle Li-ione per le applicazioni automotive, ma risultano essere una valida alternativa per le applicazioni stazionarie. Per quanto riguarda le batterie primarie, ovvero quelle non ricaricabili, il litio può essere sostituito dallo zinco (ma anche calcio, magnesio e mercurio) per produrre il materiale dell'anodo mantenendone l'efficienza. Per la produzione di lubrificanti grassi, il litio può essere sostituito da prodotti alternativi formati da saponi composti da poliurea, calcio e alluminio.

Nel campo del vetro e della ceramica, il sodio può essere impiegato al posto del litio; anche nel caso della produzione primaria di alluminio il sodio è una possibile alternativa al Litio.

Nel caso delle leghe alluminio-litio, il metallo può essere rimpiazzato da materiali compositi costituiti da boro, vetro o fibre polimere per la produzione di resine.
Nell'elettronica, dove il Litio viene utilizzato per produrre filtri superficiali nei sensori delle onde acustiche, una possibile alternativa può essere l'utilizzo di lantanio o gallio. Mentre, nella produzione dei sistemi di produzione di aria condizionata o di deumidificatori, il litio può essere sostituito da sistemi costituiti da ammoniaca/acqua ma riduzione di efficienza. Infine, per quanto riguarda il campo farmaceutico, dove il litio viene principalmente utilizzato per la produzione di farmaci per contrastare la depressione, non esistono possibili sostituti. In questo settore la promozione di terapie alternative risulta attualmente essere l'unica soluzione disponibile per ridurre l'utilizzo di questo elemento.

Tabella 4 Usi e possibili sostituti del Litio

Applicazione	Possibili sostituti	Frequenza di sostituzione	Costo	Performance
Vetro e ceramica	Potassio	25%	Simile o minore	Ridotto
Vetro e ceramica	Sodio	25%	Simile o minore	Ridotto
Vetro e ceramica	Alluminio	1%	Simile o minore	Ridotto
Vetro e ceramica	Silicone	5%	Simile o minore	Ridotto
Vetro e ceramica	No sostituto	44%		
Lubrificanti	Calcio	10%	Simile o minore	Simile
Lubrificanti	Poliurea	6%	Superiore (circa due volte maggiore)	Simile
Lubrificanti	Alluminio	4%	Simile o minore	Simile
Lubrificanti	No sostituto	80%		
Produzione cemento	Non valutato, minore al 10%			
Produzione farmaceutica	Non valutato, minore al 10%			
Produzione di gomma e plastica	Non valutato, minore al 10%			
Leghe Al-Li	Lega Al-Sc	5%	Elevato (più di 2 volte maggiore)	
Leghe Al-Li	No sostituto	95%		
Batterie	NiCd/NiMH	5%	Simile o minore	Ridotto
Batterie	Batterie a doppio carbonio	0%	Simile o minore	Simile
Batterie	Batterie al Sodio	0%	Simile o minore	Simile
Batterie	Batterie a ioni di Zinco	0%	Simile o minore	Simile
Batterie	No sostituto	95%		

3.5 Criticità (tecnologiche, normative, di mercato)

Sulla base dei vari aspetti discussi nei precedenti capitoli è evidente che l'unico prodotto a fine vita che può essere preso in considerazione per lo sviluppo di un'industria europea del riciclo del litio sono le batterie. È peraltro atteso un forte incremento di queste ultime nei prossimi decenni, soprattutto per il forte sviluppo di politiche a supporto della mobilità elettrica. Per questo motivo è evidente l'interesse per la creazione di nuovi impianti, capaci di rispondere alle esigenze attuali e future che si scontra ancora, tuttavia, con una serie di criticità che riguardano la sfera tecnologica, normativa e di mercato.

Da un punto di vista tecnico, il *design* delle batterie rappresenta una grossa criticità per la chiusura della loro catena del valore. Questi sistemi, infatti, non sono ad oggi progettati nell'ottica del fine vita; ne risultano operazioni complesse di disassemblaggio che rendono spesso non sostenibile il processo di riciclaggio. Il laboratorio SSPT-T4RM di ENEA ha spiegato come la mancanza di standardizzazione delle batterie e la difficoltà di rimuoverle e sostituirle dai sistemi che le contengono hanno ricadute molto negative sulle fasi di raccolta dei prodotti a fine vita, riducendo l'afflusso di materiale potenzialmente riciclabile, che, infine, deve essere smaltito. A questo proposito, l'azienda Orim di Macerata ha iniziato un'interessante collaborazione con un'azienda produttrice di batterie per accumulatori, trattando inizialmente degli scarti di produzione, composti da *pouch* al cui interno si alternano fogli di rame ricoperti di grafite (anodi, Figura 8A) e fogli di alluminio ricoperti di litio-ferro-fosfato (catodi, Figura 8B) e successivamente le batterie complete (Figura 8C).

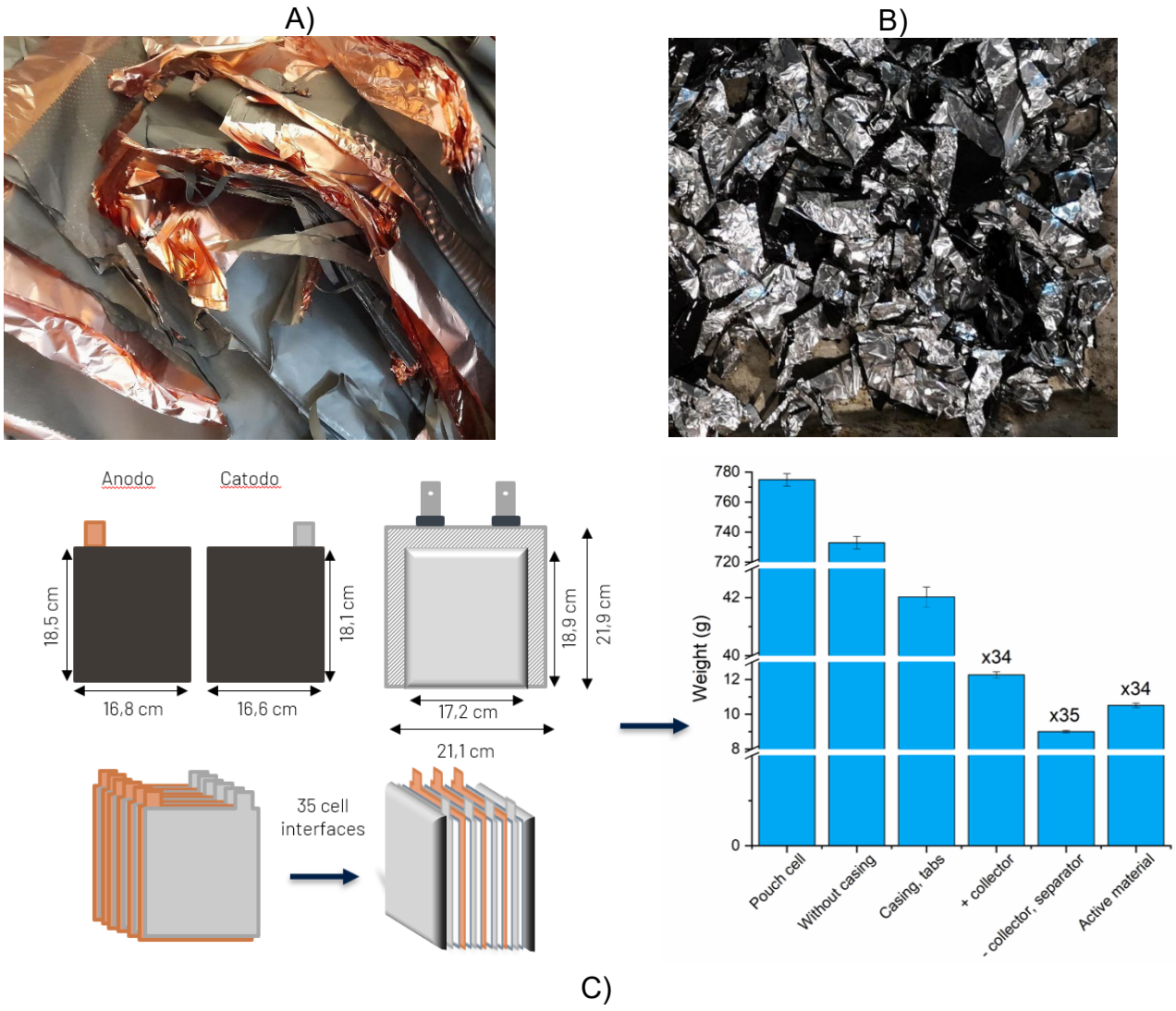


Figura 10 Caso studio di riciclo delle LIB

La sperimentazione ha messo in luce - confermando i rilievi di ENEA - l'enorme difficoltà dello smontaggio delle batterie che dovrebbe essere realizzato attraverso sistemi automatici in grado di sbullonare, svuotare e separare gli anodi e i catodi. Tale trattamento (ad oggi realizzato manualmente ai fini della realizzazione degli esperimenti) è oggetto di una collaborazione tra Orim e l'Università di Camerino.

Grande attenzione è stata posta dalla Comunità Europea alla problematica dello smontaggio e riciclo di batterie, come dimostra il finanziamento di progetti di ricerca e innovazione degli ultimi anni, come ad esempio le call HORIZON EUROPE CL5-2022-D2-01-10 (*Streamlined collection and reversed logistics, fully automated, safe and cost-efficient sorting, dismantling and second use before recycling* (Batteries Partnership)) o CL5-D2-01-01 (*Advanced sustainable and safe pre-processing technologies for End-of-Life (EoL) battery recycling* (Batt4EU Partnership)).

L'ostacolo dello smontaggio delle batterie, si somma poi al costo energetico delle soluzioni di recupero ad oggi disponili sul mercato, tale da rendere, in molti casi, la scelta del riciclo ancora non sostenibile).
A spingere i processi di recupero e riciclo delle batterie, in aggiunta al valore intrinseco dei rifiuti per l'elevato contenuto di litio e di tutti quei metalli inclusi nella lista delle CRM, c'è la necessità di creare un sistema di approvvigionamento quanto più variegato capace di garantire, almeno in parte, l'autonomia del mercato europeo. A supporto di questa evoluzione del mercato dell'Unione, c'è l'emanazione del nuovo Regolamento europeo per le batterie, adottato il 12 luglio 2023. Tale regolamento mira a minimizzare le ricadute economiche e sociali del mercato delle batterie. Il nuovo regolamento vuole includere tutti gli aspetti del ciclo di vita delle batterie, promuovendo lo sviluppo di un sistema sempre più competitivo. In aggiunta alle criticità economiche, il regolamento intende agire anche su quelle etiche ed ambientali connesse all'estrazione di litio primario. I processi innovativi di valorizzazione delle batterie dovrebbero andare a ridurre le attuali emissioni di CO_2 equivalenti la produzione viene individuata variare tra 5,0 t per tonnellata di materiale derivante dalle salamoie in Cile a 14,8 tonnellate per tonnellata di materiale estratto dalla miniera australiana di spodumene, poi lavorato in Cina. Tra i limiti normativi legati al ridotto sviluppo di strategie di recupero delle batterie c'è l'eterogeneità nella classificazione della *black mass* che favorisce l'esportazione verso Paesi extra-europei, principalmente l'Asia (Cina a Corea), dove i processi di valorizzazione sono già maturi. La classificazione di questo residuo come rifiuto pericoloso comporterebbe un controllo più severo dei flussi, dovendo, in questo caso, far riferimento alla Convenzione di Basilea del 1989 sul controllo dei movimenti oltre frontiera di rifiuti pericolosi. La riduzione dell'esportazione di *black mass* potrebbe promuovere la gestione di questo residuo all'interno degli impianti Europei assicurando il sostentamento degli stessi. Con questo scopo, il Parlamento europeo ha incaricando la Commissione di sviluppare "codici dei rifiuti dedicati per le batterie agli ioni di litio e i flussi di rifiuti intermedi (*black mass*)". Tale disposizione andrebbe ad integrare il nuovo Regolamento europeo per le batterie, adottato il 12 luglio 2023, con ricadute positive sull'Economia europea riciclo.
Alcune riflessioni vanno fatte sul prezzo del litio sul mercato; questo, infatti, guida le scelte di mercato dell'Unione favorendo o meno le strategie di riciclaggio delle batterie.
La diffusione delle batterie agli ioni di litio ha notevolmente influenzato l'andamento del prezzo del metallo; la Figura 9 mostra come il prezzo abbia avuto un brusco aumento dopo il 2014, a seguito della pubblicazione del rapporto dell'IPPC, che ha ulteriormente incentivato la diffusione di queste batterie, con il conseguente incremento della richiesta mondiale di litio. La riduzione del prezzo, registrata a ridosso del 2019/2020, è stata causata dall'epidemia di covid-19 che ha rallentato l'industria mondiale e messo in crisi l'approvvigionamento delle materie prime. Attualmente (dicembre 2023) il prezzo di un kg di litio, secondo *Trading Economics*, è di 12 €/kg, mentre il massimo storico è stato raggiunto a novembre 2022 con un valore di 77 €/Kg.

Finora il prezzo del litio si è attestato a meno della metà rispetto a quello del cobalto (circa 30 €/Kg, nel 2023). Questo, sommato al costo del trattamento di recupero del litio, estremamente energivoro, ha contribuito a favorire i processi di recupero degli altri CRM.

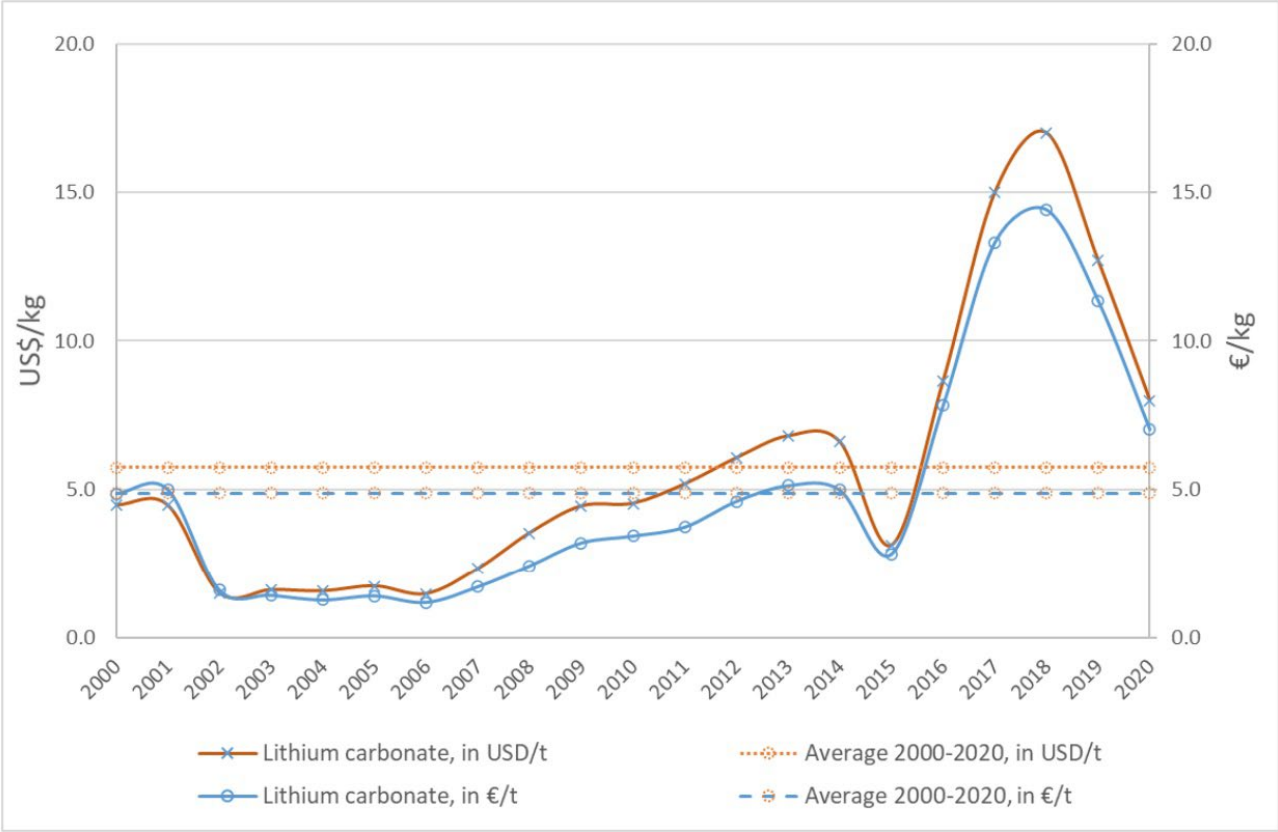


Figura 11 Andamento del prezzo del litio $/Kg e €/Kg

3.6 Proposte di superamento degli ostacoli

Numerosissimi sono gli studi in corso per risolvere le principali criticità tecniche descritte. L'interesse in questa direzione è testimoniato dalla tabella 5, dove vengono riportati alcuni dei progetti Horizon Europe sul tema del recupero del litio dalle batterie, finanziati dal 2020 e ad oggi in corso con data di fine progetto prevista tra il 2025 e il 2026. Tutti i progetti riguardano lo sviluppo di processi innovativi per il recupero di litio (ed altre CRM) ed includono il suo successivo utilizzo per la produzione di nuove batterie al fine di realizzare un approccio circolare in un settore identificato come critico. I progetti mirano anche alla riduzione dell'elevata richiesta energetica tipica delle soluzioni ad oggi disponibili.

Tra le iniziative europee occorre anche ricordare che la Commissione europea ha approvato ufficialmente il secondo Importante Progetto Comune di Interesse Europeo (IPCEI) dedicato al settore delle batterie innovative [x]. Il progetto denominato *European Battery Innovation* (EuBatIn) mira a garantire un vantaggio competitivo dell'innovazione europea sulle batterie, gettando così le basi per una localizzazione dell'intera catena del valore delle batterie all'interno dell'UE e coinvolge 12 Stati membri e prevede una iniezione fino a 2,9 miliardi di euro di aiuti di Stato a sostegno di 46 progetti ideati da 42 imprese.

Il progetto riunisce i principali operatori del settore e le autorità nazionali da Austria, Belgio, Croazia, Finlandia, Francia, Grecia, Germania, Italia, Polonia Slovacchia Spagna e Svezia ai quali si affiancano numerosi partecipanti indiretti e centri di ricerca che operano a vari livelli della catena del valore delle batterie, dall'estrazione, alla riconversione, al riciclaggio e alla raffinazione, attraverso lo sviluppo di materiali avanzati e la produzione di celle, moduli e sistemi, nonché di software e sistemi e soluzioni di test dedicati.Per l'Italia partecipano 12 imprese – Endurance Spa, Enel X Srl, ENGITEC Technologies SpA., FIAMM Energy Technology, Fiat Chrysler Automobiles, Fluorsid Alkeemia SpA, FPT Industrial, Green Energy Storage Srl, Italmatch Chemicals SpA, Italy Srl, MIDAC SpA, Solvay – affiancate dall'ENEA e dall'Istituto Bruno Kessler. L'erogazione di aiuti di stato per oltre 600 milioni di euro produrrà un investimento totale di oltre 1 miliardo a livello nazionale.

Tabella 5 Principali progetti Horizon Europe sul tema del recupero del litio dalle batterie a partire dal 2020

Acronimo	Nome	Paese (anno di fine progetto)
LiCORNE	Lithium recovery and battery-grade materials production from European resources	Spagna (2026)
FREE4LIB	Feasible recovery of critical raw materials through a new circular ecosystem for a Li-ion battery cross-value chain in Europe	Spagna (2026)
RELiEF	Recycling of Lithium from Secondary Raw Materials and Further	Belgio (2025)
METALLICO	Demonstration of battery metals recovery from primary and secondary resources through a sustainable processing methodology	Spagna (2026)
RESPECT	Flexible, Safe and efficient REcycling of Li-ion batterieS for a comPetitive, circular, and sustainable European battery manufaCTuring industry	Francia (2026)
BATRAW	Recycling of end of life battery packs for domestic raw material supply chains and enhanced circular economy	Spagna (2026)

Degno di nota è poi il processo sviluppato da ORIM che vede il trattamento di anodi, realizzato all'interno di un impianto con capacità di circa 1 t/h, che porta alla completa separazione del rame dalla grafite attraverso metodi fisici/meccanici, con ottimi risultati di recupero di entrambe le frazioni. Per quanto riguarda il litio dai catodi, sono ancora in corso degli studi su un piccolo impianto pilota. Lo studio, in collaborazione con UNICAM, è partito dalla ricerca di una tecnica efficace per la separazione del $LiFePO_4$ dal substrato di alluminio e, per tale ragione, è stata testata sia una via termica, sia una via meccanica, oltre ad una via idrometallurgica diretta.
Per quanto riguarda l'approccio termico, il materiale ossidato ha mostrato una maggiore facilità di rimozione dal substrato, ma maggiori difficoltà nelle fasi successive, con scarse rese di lisciviazione, da aggiungere ad un maggiore dispendio energetico ai fini del recupero. Il materiale separato per via meccanica, invece, è stato sottoposto a delle lisciviazioni sfruttando un agente *green*, proveniente da scarti dell'industria alimentare (vedi Figura 10). È stato applicato un disegno fattoriale frazionario per massimizzare l'efficienza di estrazione del metallo e si sono ottenuti dei risultati ottimali, molto favorevoli per un futuro sviluppo industriale.

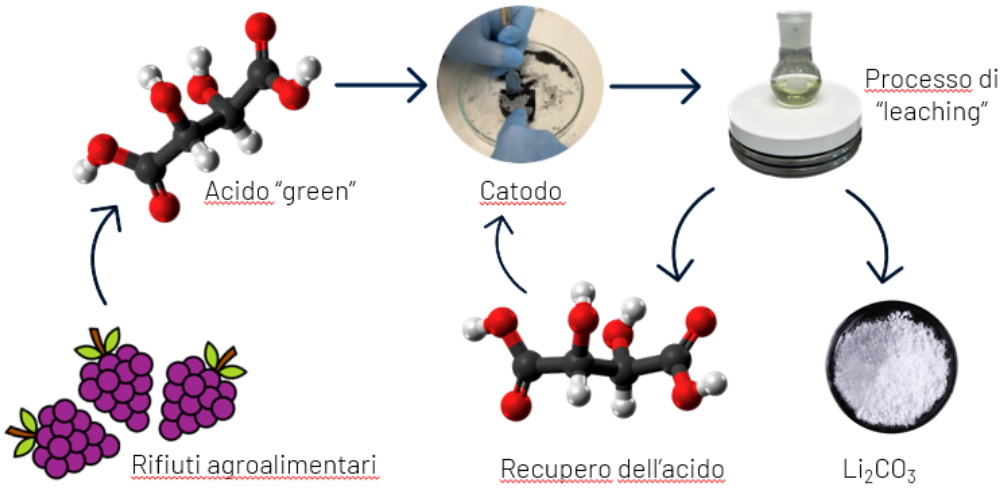


Figura 12 Schema semplificato della soluzione innovativa sperimentata dall'azienda ORIM, in collaborazione con UNICAM

Per quanto riguarda la via idrometallurgica diretta, la separazione delle due componenti, non è mai risultata completa, o comunque ottimale perché parte dei materiali rimaneva come impurezza nei prodotti ottenuti. Durante la fase di studio si sono incontrate diverse difficoltà, la principale per lo sviluppo del processo è stata quella della separazione ottimale del litio dal substrato. Successivamente invece, le difficoltà hanno riguardato la filtrazione del materiale residuo, con granulometria molto ridotta. Complessivamente i risultati sono incoraggianti e si sta valutando la successiva fase di *scale-up* per portare le prove su un pilota più grande ed in seguito su scala industriale.
13Un abbattimento delle emissioni e dei costi energetici nei processi innovativi potrebbe avvenire tramite l'integrazione delle biotecnologie all'interno dei processi di trattamento delle batterie. A questo proposito l'Università Politecnica delle Marche ha in corso una

sperimentazione per il trasferimento di processi già sviluppati per il recupero di altri metalli di valore da RAEE. Le ricerche sono ancora ad uno stadio preliminare ma i risultati sono promettenti. È evidente comunque che, indipendentemente dall'approccio proposto, la possibilità di lavorare su batterie standardizzate, facilmente rimovibili e sostituibili, inciderebbe sulla fattibilità, e in generale sulla sostenibilità dei trattamenti proposti. Questo avrebbe ricadute positive anche sulla fase di raccolta, aumentando i flussi in ingresso ai processi di riciclo. Gli aspetti tecnici sono essenziali per l'identificazione delle soluzioni più performanti e a ridotto impatto ambientale da trasferire su scala industriale. Prioritario rimane però il ruolo della normativa, la cui azione deve garantire una corretta gestione delle batterie a fine vita, assicurando un approvvigionamento costante di *black mass* all'industria del riciclo. In tal senso giocherà un ruolo fondamentale il nuovo Regolamento europeo per la gestione delle batterie a fine vita ma anche l'eventuale classificazione della *black mass* come rifiuto pericoloso che ne ridurrebbe notevolmente l'esportazione.
Altro punto essenziale sarà l'emanazione del nuovo Regolamento europeo per la gestione dei veicoli a fine vita che dovrebbe migliorare il tracciamento delle autovetture dismesse sul territorio dell'Unione ed incentivare le strategie per la rimozione e sostituzione delle batterie nelle auto elettriche anche grazie all'introduzione di un passaporto dell'autoveicolo. I nuovi target di riuso e riciclo (almeno 85% del peso del veicolo) e di riuso e recupero (almeno il 95%) dovrebbero focalizzare sempre più l'attenzione dell'industria del riciclo sulla valorizzazione delle batterie delle auto elettriche. Il Regolamento (ad oggi una proposta) fa specifico riferimento al litio e all'obbligo di rimuovere le parti che lo contengono. I veicoli a fine vita, promettente risorsa secondaria di litio, potranno essere esportati verso i soli Paesi terzi che garantiranno condizioni di trattamento equivalenti a quelle del Regolamento europeo.

4 Rame

4.1.1 Utilizzo del Rame nelle Industrie Italiane ed Europee

Il rame (Cu) è un metallo duttile, rossastro, utilizzato fin dagli albori della storia umana ed è un oligoelemento importante per molti organismi viventi, compreso l'uomo. Pur non essendo critico secondo i criteri della Commissione Europea, è elencato come strategico per la sua rilevanza nelle applicazioni necessarie alla transizione ecologia e digitale e per la difesa e l'aerospazio. Dal punto di vista industriale, è un elemento fondamentale che trova largo utilizzo in numerose applicazioni ed in particolare viene utilizzato come materiale principale per componenti con elevata conducibilità elettrica grazie ad alcune proprietà che lo caratterizzano: è un metallo di transizione, è resistente alla corrosione, è duttile e malleabile. Inoltre, non reagisce con l'acqua, ma reagisce lentamente con l'ossigeno atmosferico formando un sottile strato protettivo di ossido di rame, di colorazione marrone-nero, che impedisce l'ulteriore e massiva ossidazione della parte interna del metallo, dando luogo ad una forma di passivazione. In assenza di aria il rame è resistente anche a molti acidi come l'acido cloridrico, l'acido solforico o l'acido acetico. Il rame trova anche significativo utilizzo in prodotti per il settore agricolo. Gli impieghi di questo importante metallo sono rimasti piuttosto stabili negli ultimi 10 anni, e l'andamento nell'UE è in linea con quello globale.
Il rame è il materiale industriale più scambiato ed il suo prezzo varia significativamente in relazione al rapporto domanda-offerta. Come rappresentato in Figura 10, il metallo ha raggiunto il suo prezzo più alto nel 2010, dopo essersi ripreso dalla crisi finanziaria del 2008, quando era arrivato al suo minimo storico. Il prezzo è poi diminuito progressivamente fino al 2015 per raggiungere un nuovo picco nel 2017 e nel 2020, attestandosi a 7000 €/t.

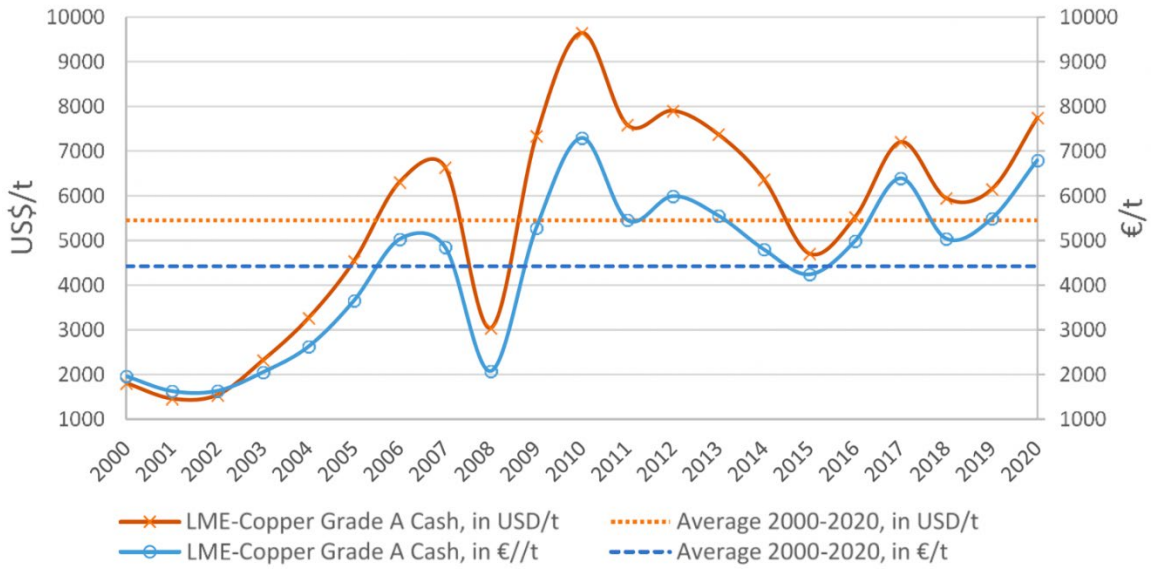


Figura 14 Prezzo medio annuale del rame tra il 2010 e il 2020

(Fonte: SCREEN EU Project, grant n. 95821)

Gli impatti ambientali della produzione di rame sono oggi ben definiti, anche grazie agli approcci di LCA. Per l'estrazione, la raffinazione, e la produzione del rame è richiesta una elevata intensità energetica che comporta importanti emissioni di gas serra[3]. Anche il consumo di acqua è rilevante nel ciclo di vita del rame; a riguardo è importante sottolineare che alcune fasi determinanti di tale ciclo di vita avvengono in paesi in cui lo stress idrico è relativamente elevato, Cile o Perù ne sono alcuni esempi. Alcune delle miniere di rame sono a cielo aperto, comportando impatti più elevati sull'uso del territorio. Gli effetti derivanti dall'estrazione e dalla produzione di rame dipendono dal tipo di estrazione (a cielo aperto o sotterranea), dal tipo e qualità di minerali sfruttati (ossidati o solforici) e dalla tecnologia di lavorazione del metallo (pirometallurgia vs idrometallurgia). L'intensità energetica richiesta in funzione della qualità del minerale è rappresentata in Figura 14.

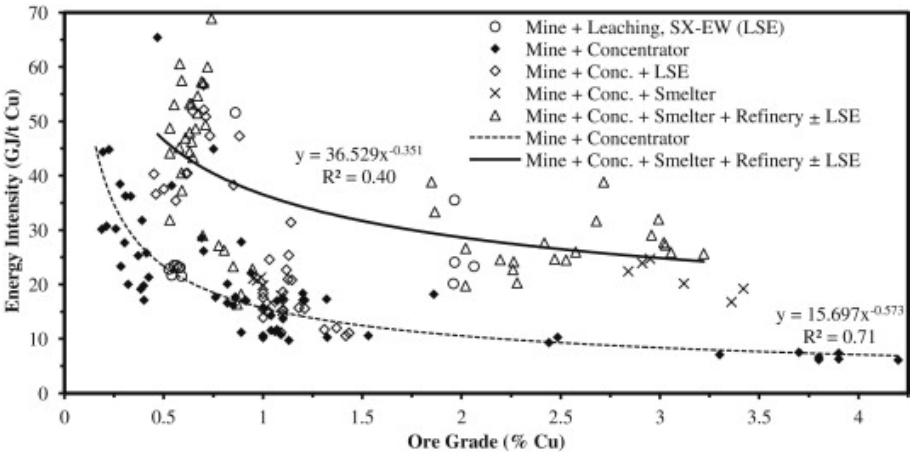


Figura 15 Intensità energetica in funzione della qualità del minerale per 31 operazioni di rame, con ciascun punto dati che rappresenta un anno di produzione

(Fonte: *https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.027*)

Il mercato del rame è parzialmente consolidato, con alcuni grandi operatori che dominano una parte significativa del mercato. I primi cinque maggiori gruppi relativi alla produzione di rame sono *Codelco, Freeport McMoRan, Glencore, BHP e Southern Copper*. Si prevede che le dimensioni del mercato del rame cresceranno tra il 2024 e il 2026, con l'area Asia-Pacifico che dovrebbe registrare la crescita più rapida, anche grazie alla crescente domanda da parte delle industrie edili, elettriche ed elettroniche.

Tabella 6 Mercato del rame in media nel periodo 2016-2020

Produzione Globale (metric tonnes)	Produttori globali	Consumo Europeo	Percentuale condivisa dall'Europa	Fornitori europei	Dipendenza dall'Europa importazioni
Estrazione, approvvigionamento e domanda (tonnellate), 2016-2020					
20.538.727	Cile 28% Perù 12% Cina 8% Congo, D.R., USA 6% Australia Zambia Russia Messico 4% Canada Indonesia Kazakistan 3% Altri 16%	2.054.007	10%	Polonia 20% Cile 15% Brasile 10% Perù 10% Spagna 9% Bulgaria 5% Svezia 5% Canada 4% Portogallo 3% Georgia 3% US 3%	48%
Lavorazione, approvvigionamento e domanda 2016-2020					
24.132.631	Cina 38% Cile 10% Giappone 6% Congo, D.R., Russia, UMI 4% Germania, India, Corea del Sud 3%	3.688.055	15%	Germania 18% Polonia 15% Spagna 11% Belgio 10% Russia 8% Cina 7% Svezia 6% Bulgaria 6% Finlandia 4% Austria 3% Congo 3%	17%

In Figura 15 sono mostrati i diversi utilizzi del rame all'interno dei diversi settori industriali europei. La versatilità del rame dipende dalle sue proprietà chimiche fisiche che rendono questo metallo fondamentale per l'economia europea. Osservando il grafico, circa il 21 % del rame viene utilizzato nell'industria energetica e, in particolare, trova applicazione in tutti i tipi di cablaggio: dall'approvvigionamento di energia di centrali elettriche alle prese a muro domestiche, passando per gli avvolgimenti dei motori elettrici, fino ai connettori dei computer. L'utilizzo del rame non si limita al campo dell'energia elettrica, ma grazie alle sue caratteristiche funzionali, viene impiegato anche nel settore delle costruzioni per tubi e raccordi, prese elettriche, interruttori e serrature, batterie e anche come copertura. Poiché il rame è anche resistente alla corrosione, antibatterico e impermeabile viene usato nell'industria idraulica (10 %), nella produzione di tubature per il passaggio di acqua. Nel settore automobilistico e dei trasporti, il rame è un metallo essenziale; in ogni automobile sono presenti in media 25 kg di rame. Oltre al suo utilizzo nelle parti elettriche, il rame viene utilizzato negli scambiatori di calore e nei radiatori grazie alla sua elevata conduttività termica. Lo sviluppo di auto ibride ed elettriche sta conducendo ad un utilizzo di rame sempre più elevato nel settore dell'automotive. Per un veicolo elettrico è necessario molto più rame che per uno con motore a combustione interna,quindi diventa necessaria una

trasmissione elettrica più resistente e devono essere costruiti grandi volumi di impianti di stoccaggio dell'elettricità.
Il rame risulta essere un materiale essenziale per le tecnologie a basse emissioni di carbonio non solo nei grandi settori dei trasporti (infrastrutture energetiche, veicoli ibridi ed elettrici e relative infrastrutture di ricarica), ma anche energia eolica (cablaggio e controllo della temperatura all'interno delle turbine eoliche), energia solare (scambiatori di calore di sistemi solari termici, pannelli fotovoltaici), generazione delle maree. Nella produzione di energia rinnovabile, è l'energia eolica a richiedere la maggior parte del rame per MW prodotto, 3-6 volte la domanda nelle centrali elettriche a carbone e gas naturale.
Infine, il rame e le sue leghe, principalmente ottone e bronzo, sono importanti materie prime per molti tipi di parti meccaniche come cuscinetti a manicotto e altre parti forgiate.

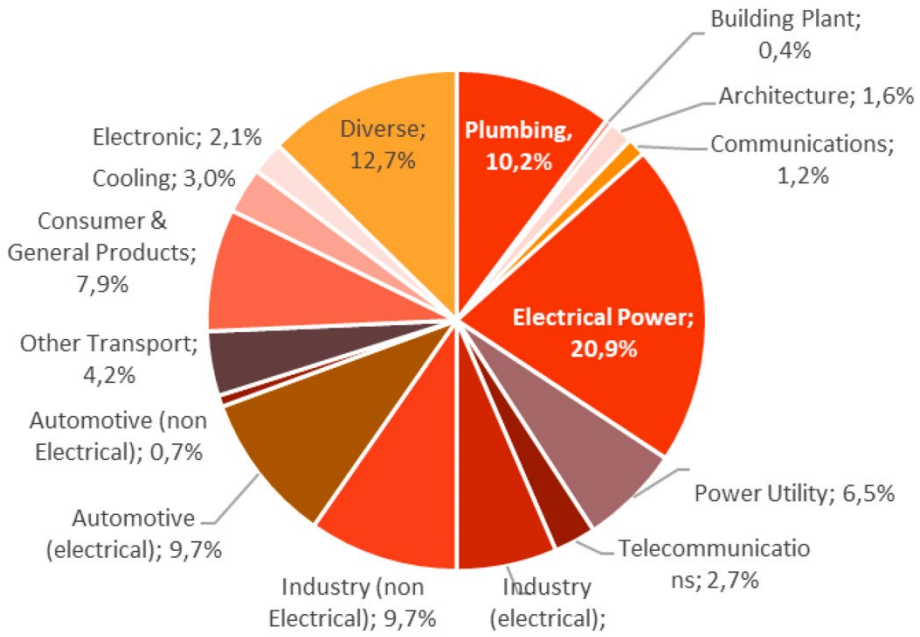


Figura 16 Utilizzi del rame in Europa, media nel periodo 2016-2020

(Fonte: SCREEN EU Project, grant n. 958211)

Il rame, anche in relazione alla lunga tradizione manifatturiera e tecnologica, ha un'ampia gamma di utilizzi nell'industria italiana, ed è uno dei metalli più importanti per diverse applicazioni. Le imprese italiane partecipano infatti attivamente alla produzione di componenti e prodotti che richiedono il rame come materiale fondamentale, sia per l'uso interno che per l'esportazione.

Gli utilizzi non si discostano molto rispetto a quanto in media rappresentato per l'industria europea trovando impiego in numerosi settori tra i quali, in particolare, si segnalano:
Elettronica e tecnologia: Il rame è usato nella produzione di cavi elettrici, circuiti stampati, connettori elettrici e molti altri componenti essenziali per dispositivi elettronici, come smartphone, computer e elettrodomestici.
Industria energetica: Nell'industria energetica, il rame è utilizzato per la fabbricazione di cavi elettrici ad alta tensione utilizzati nelle reti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica.
Industria automobilistica: Trova impiego nella produzione di cavi, radiatori, freni e altre parti del veicolo che richiedono conduttività e resistenza alla corrosione. È anche presente nelle batterie, come supporto per l'elettrodo anodico e conduttore di corrente.
Edilizia e costruzioni: Il rame viene utilizzato in tubazioni, coperture per tetti, rivestimenti e altri componenti architettonici grazie alla sua resistenza alla corrosione e alla sua durabilità.
Produzione di prodotti di consumo: Vasi, pentole e utensili da cucina di alta qualità sono spesso realizzati con rivestimenti di rame grazie alle sue proprietà antibatteriche.
Industria chimica: In alcune applicazioni, il rame è utilizzato nella produzione di reagenti chimici e catalizzatori.
L'industria italiana è coinvolta in molte di queste applicazioni, poiché il Paese ha una lunga tradizione manifatturiera e tecnologica.

4.1.2 Ricerca e Riserve

Sono stati identificati oltre 150 minerali di rame, ma solo una decina di essi hanno importanza economica. Circa la metà della produzione mondiale deriva dalla calcopirite ($CuFeS_2$). Come fornitura primaria, la maggior parte del rame è prodotto dalle relative miniere. Una quantità significativa proviene come sottoprodotto dalle miniere di zinco, piombo, nichel e oro e, in quantità minori, come sottoprodotto dalle miniere di argento e molibdeno. La produzione globale di rame da parte delle miniere tra il 2010 e il 2020 - compresa tra 16.100.000 e 20.800.000 tonnellate all'anno ed ha subito un aumento graduale fino al 2016 per poi stabilizzarsi. Nello stesso periodo nell'UE sono state prodotte quantità molto minori e comprese tra 760.000 e 960.000 tonnellate, con il picco nel 2016. Nel 2020, i principali produttori di rame dell'UE sono Polonia (45% della produzione UE), Spagna (23%), Bulgaria (13%) e Svezia (12%). La fornitura secondaria di rame deriva dal fatto che esso è uno dei metalli più riciclati; quasi tutti i prodotti in rame possono essere riciclati più e più volte senza perdita delle proprietà del prodotto. I rottami di rame derivano dal metallo scartato nella fabbricazione di prodotti semifiniti o nei processi di produzione di prodotti finiti (rottami nuovi) e prodotti a fine vita (rottami vecchi). La produzione di rame raffinato attribuibile all'alimentazione di rottami riciclati è classificata come produzione di rame secondario. I produttori secondari utilizzano processi simili alla produzione primaria. *L'International Copper Study Group* (ISGS) stima che nel 2019, il 30% dell'uso globale di rame provenga da rame riciclato e che il tasso di input di riciclo (RIR) medio su 10 anni (2008-2018) per il rame sia del 32%. A livello globale, nel 2019 sono state riciclate 9.500 kt di rame, compresa la produzione secondaria raffinata e la fusione diretta dei rottami.

Dal rame al cobalto, per continuare con piombo, zinco e litio, sino alle argille, in Italia è ripartita la corsa alla ricerca di materie prime per due motivi principali: i cambiamenti negli scenari internazionali e la necessità di filiere certificate e sostenibili; quindi, cresce il numero di richieste di concessioni per valutare eventuali riattivazioni di miniere inattive.

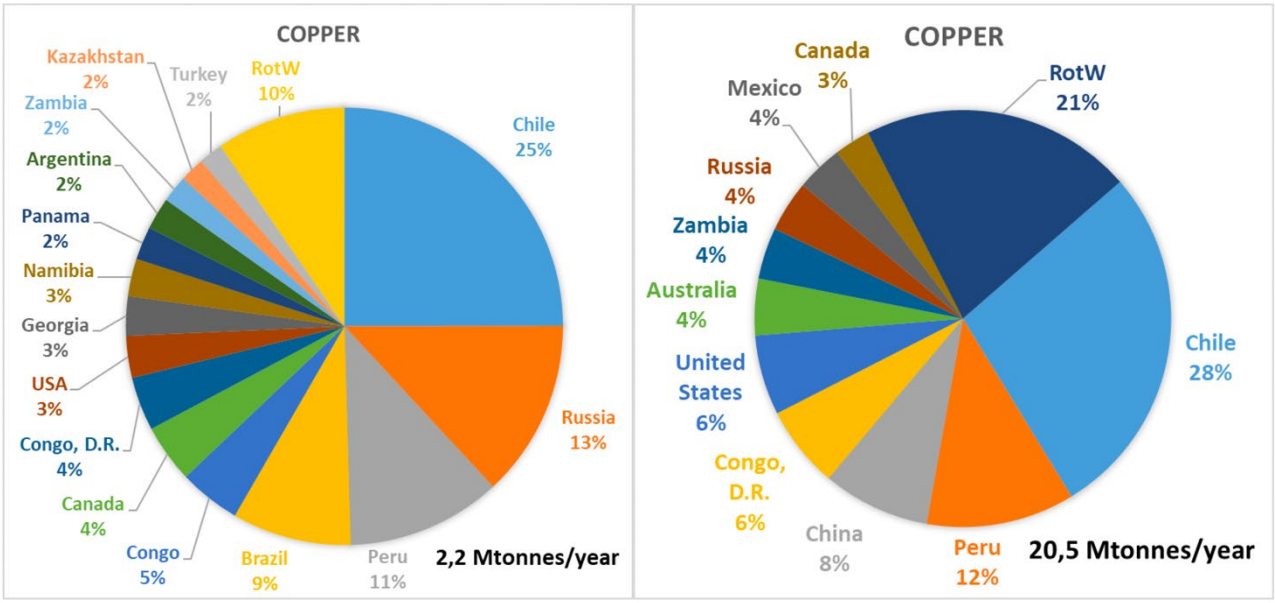


Figura 17 Approvvigionamento europeo di rame e produzione mineraria globale

(Fonte: SCREEN EU Project, grant n. 958211)

Nel periodo 2016-2020 nell'UE sono state prodotte annualmente circa 1 milione di tonnellate di concentrati di rame. Come detto, Polonia, Spagna, Bulgaria e Svezia sono i principali produttori, ma la produzione europea totale di rame nello stesso anno è stata di 2.654.800 tonnellate; di questi, il 24% è stato prodotto in Germania, il 21% in Polonia, il 15% in Spagna, il 12% in Belgio e il resto (28%) in Austria, Bulgaria, Finlandia, Italia e Svezia. L'UE ha importato 4,95 milioni di tonnellate di rame sotto varie forme, tra cui i concentrati con una quantità di Cu del 30%, i metallizzati di rame con un contenuto di Cu del 75% e Cu metallico. La maggior parte della quantità di rame viene importata da Cile, Perù e Brasile. Nello stesso periodo sono stati estratti 1,6 milioni di tonnellate di vari prodotti di rame (compresi concentrati, metallizzati e rame metallico) da paesi terzi. In questo senso, Cina, Namibia e Turchia sono i principali partner. Il tasso di riciclo del rame nell'UE è stimato al 17%, tuttavia questo è valore non aggiornato essendo riferito al periodo 2012-2016 e si possono ipotizzare tassi di riciclo oggi prossimi al 60%. I prodotti finali della fusione e raffinazione (catodi di rame) nell'UE sono realizzati attraverso processi elettrolitici. Questi vengono venduti direttamente sul mercato oppure fusi in forme, tipicamente denominate billette e pannelli, per una lavorazione più semplice da parte degli utilizzatori. Seguono le aziende che operano nel settore dei prodotti semilavorati - circa 80 aziende in tutta l'UE impieganti oltre 35.000 persone - che producono barre, fili, profilati, tubi, lamiere, leghe e nastri di rame. Circa 30 aziende hanno fonderie integrate per la produzione interna di panelli, billette e altre forme, mentre le altre acquisiscono il proprio fabbisogno sul mercato.

Diversi paesi hanno restrizioni relative al commercio di minerali di rame e concentrati. Secondo l'inventario dell'OCSE sulle restrizioni all'esportazione, Indonesia e Mongolia presentano tasse sull'esportazione superiori al 25%. Altri paesi con tasse sull'esportazione di minerali e concentrati sono Zambia (15%), Cina (10%), Repubblica Democratica del Congo (10%) e Argentina (10%), e molti di questi paesi richiedono anche l'accordo di licenza. Nel 2012 l'Indonesia ha modificato più volte la sua tassa sulle esportazioni (addirittura proibendole temporaneamente), per poi rimuovere le restrizioni. Un numero minore di Paesi presenta restrizioni sul commercio di rame raffinato, tra cui Cina, Russia e Repubblica Democratica del Congo che applicano tasse di esportazione inferiori al 25%. Esiste comunque un'ampia gamma di altri Paesi che impongono restrizioni commerciali su prodotti con un'elevata percentuale di contenuto di rame.

4.2 Geologia, Risorse e Riserve di Rame

4.2.1 Geologia

La presenza di rame nella crosta terrestre lo classifica come un elemento moderatamente presente, con un'abbondanza di 28 parti per milione (ppm). Il rame si combina con numerosi elementi e sono stati identificati più di 150 minerali di rame. I minerali più importanti per l'estrazione sono la calcopirite ($CuFeS_2$) e la calcocite (Cu_2S). Altri minerali rilevanti sono la crisocolla ($Cu_4H_4[(OH)_8|Si_4O_{10}]\ nH_2O$) e la malachite ($Cu_2[(OH)_2|CO_3]$). Il rame è uno dei pochi metalli che in parte si trova in natura in una forma metallica direttamente utilizzabile, cioè come metallo nativo. I depositi di rame si trovano in tutto il mondo in una varietà di ambienti geologici. I depositi idrotermali sono più significativi su scala globale, sebbene i depositi magmatici e supergenici siano importanti a livello locale. I depositi di rame porfirico sono attualmente la principale fonte mondiale (50-60% della produzione mondiale), con gradi di rame generalmente compresi tra lo 0,2% e >1%. Sono noti depositi significativi a livello globale in Canada, Cile, Cina, Indonesia, Perù, Filippine e Papua Nuova Guinea; all'interno dell'UE, sono noti grandi giacimenti di porfido e rame provenienti da Bulgaria, Grecia, Ungheria, Romania e Svezia. I depositi di sedimenti situati principalmente nella cintura di rame dell'Africa centrale, ma sono la seconda fonte di rame più importante al mondo (circa il 20% dell'attuale produzione mondiale), con grado di rame pari a circa l'1–2%. In tutta Europa, i depositi polacchi sono la più grande fonte di rame estratto. Anche i depositi massivi di solfuro vulcanico (VMS) sono importanti fonti di rame, con grado pari allo 0,1–3% del metallo. Grandi depositi VMS ricchi di rame attualmente estratti all'interno dell'UE includono Cobre Las Cruces (Spagna), Neves Corvo (Portogallo) e Kristineberg (Svezia). Parlando ancora dell'UE, il rame è prodotto anche da scisti neri (Terrafame, Finlandia), depositi di nichel ospitati da ultramafici (Kevitsa, Finlandia) e depositi epitermici di oro-argento (Chelopech, Bulgaria).

4.2.2 Risorse e riserve globali

La *US Geological Survey* stima che, a partire dal 2015, le risorse mondiali di rame identificate risultavano essere pari a circa 2.1 miliardi di tonnellate metriche (Mt). Ulteriori presunte risorse ("non ancora scoperte") vengono contestualmente stimate -

prevalentemente nei depositi di porfido - in circa 3.5 miliardi Mt, mentre ulteriori 850 Mt in altre tipologie di depositi. Una parte del rame viene generalmente recuperata come sottoprodotto o coprodotto, in particolare dai minerali di altri metalli come già evidenziato, a dimostrazione che le risorse mondiali del metallo non sono pienamente indicative delle forniture disponibili. Secondo la *U.S. Geological survey*, *Mineral commodity summaries 2023* le riserve mondiali conosciute di rame (contenuto di metallo) ammontano a circa 890.890.000.000 e sono piuttosto diversificate (Tabella 7). Come si può notare dalla Tabella 6, il 21,34%% delle riserve si trova in Cile, mentre unulteriore 27% si trova in Australia (11%), Perù (9,1%) e Russia (7,0%).

Tabella 7 Riserve di Rame dei vari stati, in Tonnellate

Stato	Riserve di Cu (Tonnellate)
Cile	190.000.000
Australia	97.000.000
Perù	81.000.000
Russia	62.000.000
Messico	53.000.000
USA	44.000.000.
Polonia	30.000.000
Repubblica Dem. del Congo	31.000.000
Cina	27.000.000
Indonesia	24.000.000
Zambia	19.000.000
Kazakistan	20.000.000
Canada	7.600.000
Resto del mondo	200.000.000
Totale (approssimato)	890.000000

Nel ranking mondiale, il più grande produttore mondiale di minerali di rame, con una quota del 28% nel 2020, è il Cile e l'estrazione del metallo contribuisce in maniera importante sull'economia cilena rappresentando circa il 10 % del PIL del Paese [https://atradius.it/pubblicazioni/rapporto-paese-sud-america-cile-maggio-2021.html]. Il secondo, terzo e quarto produttore di rame sono Perù, Cina e Repubblica Democratica del Congo (RDC), rispettivamente con il 10%, 8,3% e 8,2%. Con le loro percentuali questi Paesi rappresentano più della metà dell'estrazione globale. Come si può notare dalla Figura 17, in termini assoluti, i maggiori cambiamenti dal 2010 al 2020 nella produzione mineraria di rame sono stati gli aumenti nella Repubblica Democratica del Congo -RDC- (di 1.275.000 t), Perù (di 902.000 t), Cina (di 540.000 t) e Messico (di 530.000 t), e la diminuzione in Indonesia (per 375.000 t).

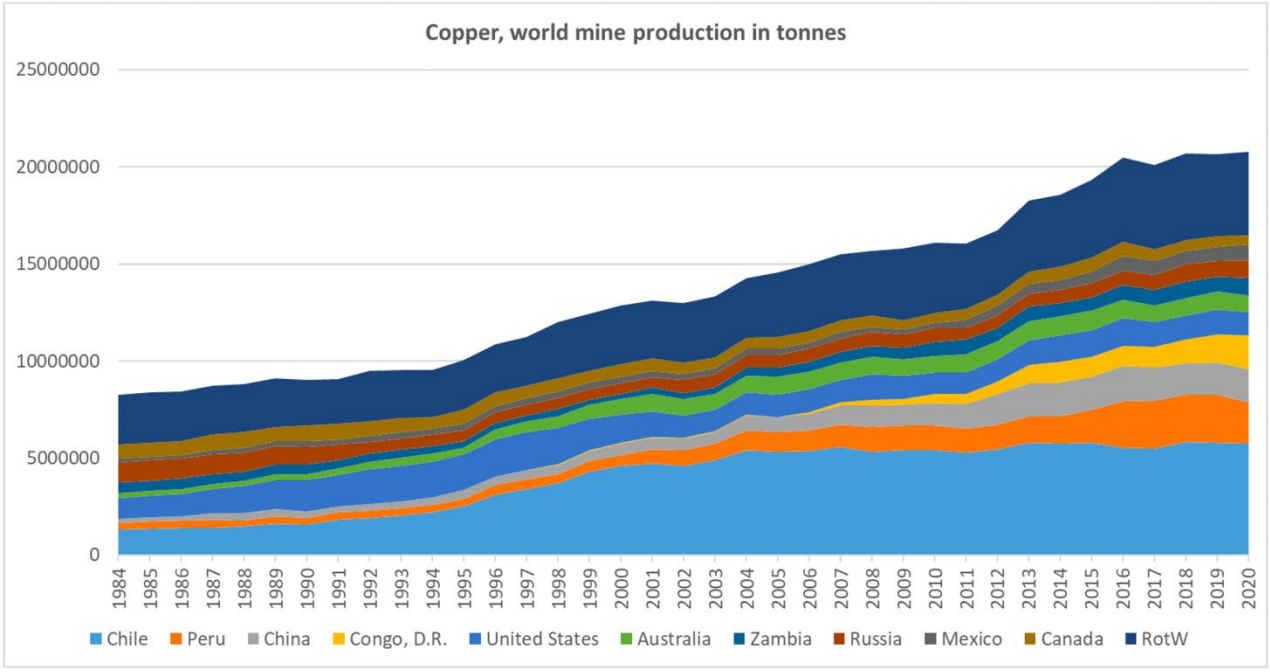


Figura 18 Produzione mondiale di Rame da miniere in tonnellate

(Fonte: SCREEN EU Project, grant n. 958211)

In Europa, le risorse conosciute di rame ammontano a circa 70-71 Mt e le riserve di rame ammontano a 26,5 Mt. Si tratta, rispettivamente, di un modesto 3,5 e 3,0% delle risorse e riserve globali conosciute. La più grande riserva e risorsa di rame in Europa si trova nei depositi di Kupferschiefer nella Polonia meridionale e nella Germania sudorientale. I depositi polacchi del Kupferschiefer coprono circa il 52% delle risorse note dell'UE e il 76% delle riserve. Analizzando la distribuzione delle risorse e delle riserve per tipologia di deposito, i depositi di porfido e rame contengono il 25% delle risorse dell'UE e il 13% delle riserve; solo una piccola parte del totale è coperta dagli altri tipi di giacimenti di rame. Tra le riserve per singola miniera, le quattro maggiori si trovano in Polonia e, per quanto riguarda le risorse, sempre in Polonia si trovano i sei giacimenti più grandi. Il più importante giacimento di tipo porfido è la miniera di Aitik in Svezia, con la quinta riserva più grande e la tredicesima risorsa più grande nell'UE. Risorse maggiori di quelle di Aitik (ovvero, >1,5 Mt di rame), ma inferiori nella dotazione totale di rame (il totale di Aitik è 4,3 Mt di Cu), cioè senza alcuna riserva segnalata, includono *Bucium-Tarnita, Moldova Noua, Roşia Poieni (Romania), Laver (Svezia) e Recsk (Ungheria), Kupferschiefer di KSL (Germania)* e i *depositi VMS di MATSA (Spagna)* ed hanno una risorsa di 1,7–2,4 Mt di rame. Rivestono rilevanza anche il giacimento di rame porfirico di *Skouries in Grecia* e lo scisto nero che ospitava la miniera *Terrafame in Finlandia*, con una dotazione di rame da 2 Mt con 0,87 Mt e 0,74 Mt di riserve, più ulteriori 1,4 Mt e 1,3 Mt di risorse.

Esiste inoltre un grande potenziale per ulteriori risorse di rame in tutte le regioni con miniere di rame attive e chiuse e/o risorse non sfruttate. Per la Finlandia, è stato stimato che tali risorse "non ancora scoperte" contengano - con una probabilità del 50% circa 9,7 Mt di rame. Purtroppo, non si è a conoscenza di stime numeriche moderne simili effettuate altrove

nell'UE. Tuttavia, si dovrebbe presumere una dotazione di rame "ancora da scoprire" di dimensioni simili, se non maggiore di quella della Finlandia, anche di Bulgaria, Polonia, Portogallo, Romania, Spagna e Svezia. Una dotazione aggiuntiva più piccola probabilmente si trova anche a Cipro, nella Repubblica Ceca, in Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Irlanda, Italia e Slovacchia. Un ulteriore osservazione sui dati esposti deriva dal fatto che informazioni pubbliche aggiornate, o qualsiasi informazione sulle risorse, sembrano mancare per diversi depositi, almeno in Bulgaria, Germania, Ungheria, Italia e Romania. Il problema è particolarmente accentuato per Bulgaria, Ungheria e Romania, dove esiste un potenziale significativo per grandi depositi di tipo porfido e per i quali i dati disponibili non sono aggiornati.

La transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio richiederà una quantità aggiuntiva di rame oltre alla quantità di rame utilizzata per le applicazioni attuali. Tale quantità aggiuntiva dipenderà dal percorso della transizione energetica che verrà seguito, ovvero il peso dell'energia nucleare, lo stoccaggio del carbonio, l'energia eolica o solare. La costruzione di un sistema energetico a basse emissioni di carbonio che sia in grado di soddisfare il fabbisogno elettrico mondiale nel 2050 richiederà una quantità aggiuntiva di rame equivalente a un periodo di estrazione compreso tra due e dieci anni dell'attuale produzione globale. In particolare, il team di *International Energy Agency* (IEA) prevede che, entro il 2040, azioni di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici richiederanno, a seconda dello scenario, il 20-40% del rame attualmente estratto ogni anno. Nello scenario prettamente correlato al commercio, la domanda finale globale di rame aumenterà di 2,5 volte dal 2015 al 2050, raggiungendo circa 62 Mt, di cui circa il 4% proverrà da centrali elettriche basate su energie rinnovabili e il 14% da veicoli elettrici (Figura 18). Questi ultimi rappresentano il 10% della domanda globale di rame stimata nel 2050. Un impatto così importante da parte delle centrali elettriche basate sulle energie rinnovabili e dei veicoli elettrici è determinato dall'aumento di circa 33 volte della domanda di rame da parte dei veicoli elettrici. Una recente previsione suggerisce che la domanda di rame raffinato raddoppierà all'incirca entro il 2035 "con le tecnologie di transizione energetica che rappresenteranno circa la metà della crescita della domanda". Tuttavia, questa domanda aggiuntiva non potrà essere soddisfatta da una maggiore produzione mineraria, per cui, nella prospettiva odierna, si prevede un deficit di mercato di circa quattro milioni di tonnellate entro il 2030 rischiando di complicare i piani "Net-zero Emissions" del 2050. Nonostante questo sviluppo, la domanda totale di rame nel mondo sarà ancora determinata principalmente dalla crescita dell'economia globale e della ricchezza relativa (PIL pro capite e popolazione mondiale). È importante notare, in Figura 18, che la domanda nel 2050 sarà ancora dominata da altri settori, come quello dell'edilizia e delle costruzioni, escludendo le centrali elettriche che rappresenteranno la quota maggiore con il 31%, seguite dal settore dei beni di consumo con il 22%. Anche i rifiuti EoL continueranno ad aumentare nel periodo indicato, ma resteranno a circa la metà della domanda finale o circa 35 Mt, a causa della continua espansione delle scorte in uso nel periodo fino al 2025. Senza la transizione energetica, si stima che la domanda annuale di rame nel 2050 sarà circa tre volte superiore a quella del 2000.

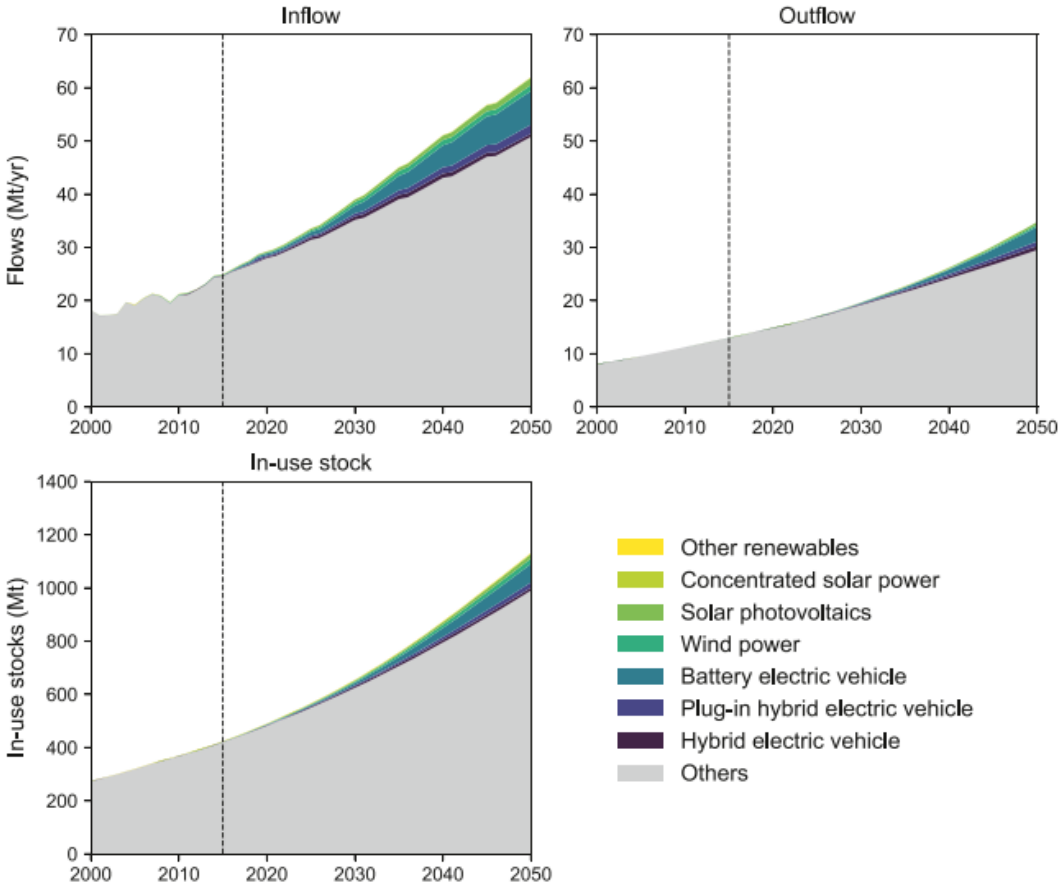


Figura 19 Afflussi, deflussi e scorte globali di rame in uso nello scenario commerciale, 2000–2050. Le linee tratteggiate verticali segnano l'anno in cui iniziano gli scenari futuri (2015). La voce "Altri" comprende edilizia e costruzioni, infrastrutture, trasporti

Non sono previsti cambiamenti importanti per la produzione di rame dalle miniere dell'UE nel breve e medio termine. Non sembrano esserci grandi progetti minerari in cantiere che potrebbero aumentare in modo significativo la produzione totale europea, né si registrano diminuzioni significative, poiché non esistono grandi chiusure di miniere previste prima del 2030. In Italia un importante progetto per ricercare il rame a Corchia, in Emilia-Romagna, viene portato avanti dall'azienda australiana Altamin. Tale azienda ha richiesto e ottenuto il permesso per un programma esplorativo in tale territorio che prevede la valutazione dell'area anche dal punto di vista storico, geologico e geofisico. La licenza di esplorazione concede alla società australiana il diritto di rintracciare rame, cobalto e metalli associati, ed ha una durata sino al 2026, con possibilità di rinnovo.

4.3 Riciclabilità

Il concetto di economia circolare (CE) ha iniziato a ricevere una significativa attenzione dall'inizio degli anni 2000, sulla scia della crescita di nuovi approcci allo studio dei sistemi industriali, come l'ecologia industriale e la simbiosi industriale. Verso la fine degli anni 2000, lo stesso concetto ha iniziato ad attrarre attenzione anche da parte di policy maker in Cina ed Europa. Da allora, una delle aree di interesse più importanti è stato lo studio dei metalli.

Ciò non sorprende, poiché i metalli, a differenza di molte altre materie prime, non perdono le loro proprietà intrinseche durante il riciclaggio e possono essere riutilizzati più volte senza perdere la loro qualità o funzionalità. Inoltre, il riciclo riduce le emissioni di CO_2, il consumo di energia e gli impatti ambientali durante il processo di estrazione, non di meno la dipendenza economica da Paesi con forti instabilità geopolitiche. Per questi motivi, la maggior parte degli sforzi politici e di ricerca sono stati volti a sviluppare e promuovere strategie di CE per soddisfare la crescente domanda di metalli e altri materiali. Tali sforzi si sono concentrati prevalentemente sul potenziale offerto dal riciclo dei materiali presenti nei prodotti che hanno raggiunto la fine del ciclo di vita. Il rame, grazie le sue caratteristiche chimico-fisiche, è un materiale che può essere riciclato ripetutamente senza perdere di qualità. Inoltre, poiché non c'è alcuna differenza tra rame riciclato (produzione secondaria) e quello estratto (produzione primaria), entrambi possono essere utilizzati in modo intercambiabile.

Per poter determinare il quantitativo di rame disponibile (produzione prima e secondaria) bisogna considerare una serie di fasi della vita del metallo in esame: estrazione e lavorazione, fabbricazione, utilizzo ed EoL. I serbatoi di rame includono la litosfera, gli impianti di lavorazione dei minerali e dei lingotti, i fabbricati, le discariche e l'ambiente. Infatti, la Copper Alliance stima che, negli ultimi cento anni, due terzi delle 690 milioni di tonnellate di rame prodotte siano ancora in uso in quanto "stoccati" in infrastrutture che durano nel tempo. I tassi stimati di riciclo del rame nelle diverse parti del mondo variano molto fra loro; nell'Europa occidentale circa l'80% del rame presente nei prodotti EoL viene raccolto per essere riciclato. Di questa quantità, circa l'80% viene riciclato nel circuito del rame. Il restante 20% viene raccolto nei prodotti EoL e viene trasferito ad altri circuiti metallici, come quelli dell'alluminio e dell'acciaio (circa 1/3) e ai siti di smaltimento (circa 2/3). Il tasso di riciclo risultante del rame proveniente dai prodotti EoL nell'Europa occidentale è stimato tra il 48% e il 65%, mentre il medesimo in Australia risulta al 56%, prendendo in considerazione che circa il 20% del rame raccolto non viene riciclato nel circuito del rame. Il tasso di riciclo del rame EoL nel Nord America è stimato invece al 42%, mentre a livello mondiale, la stima è del 45%. Supponendo come punto di partenza un tasso di riciclo globale EoL del 45% e che questo corrisponda all'80% del rame nei prodotti EoL raccolti separatamente, il restante 20% (o circa l'11% della quantità iniziale di rame nei prodotti EoL) termina nel downcycling, ovvero nel processo di riciclo in cui il materiale è di qualità e funzionalità inferiori rispetto al materiale originale. Di questi, 1/3 viene sottoposto a downcycling e i 2/3 vengono smaltiti. La quantità totale di rame raccolto separatamente è del 56%, ciò significa che il 44% del rame non viene raccolto separatamente e viene smaltito in discariche e inceneritori di rifiuti. Prendendo in considerazione anche la parte smaltita del rame raccolto in modo differenziato, si arriva alla conclusione che, attualmente e a livello globale, più del 50% del rame viene smaltito in discariche e inceneritori. Quindi analizzando i dati è possibile affermare che le discariche sono delle vere e proprie miniere urbane dove, mediante il processo virtuoso di *urban mining*, è possibile ricavare dai rifiuti metalli e materiali preziosi che diventano materie prime seconde. Da una ricerca di Zeng et al., attraverso l'analisi del costo del ciclo di vita, il prezzo da pagare per ottenere una tonnellata di rame da estrazione

urbana risulta essere significativamente inferiore a quello da estrazione vergine. Tra il 2021 ed il 2022 la curva dei prezzi è oscillata tra i 4.700 $ per tonnellata a 7.821 $. Nel secondo semestre del 2022 il prezzo si è attestato a circa 9.000 $ per tonnellata. Con la forte spinta della transizione energetica e il conseguente utilizzo massivo del rame i picchi potrebbero toccare anche oltre i 10.000 $; invece, il prezzo di una tonnellata di rame da *urban mining* oscillerebbe tra i 2-3 mila dollari. Lo studio di Henckens e Worrell del 2020 (Figura 19) presenta gli attuali flussi di rame in modo semplificato. È sorprendente notare come un'economia circolare del rame sia ancora lontana, poiché oltre il 50% del rame EoL non viene riutilizzato. Caratteristico della situazione attuale è anche l'importante accumulo di rame nelle riserve antropiche: la produzione annua della fase di utilizzo rappresenta solo il 60% dell'input annuo.

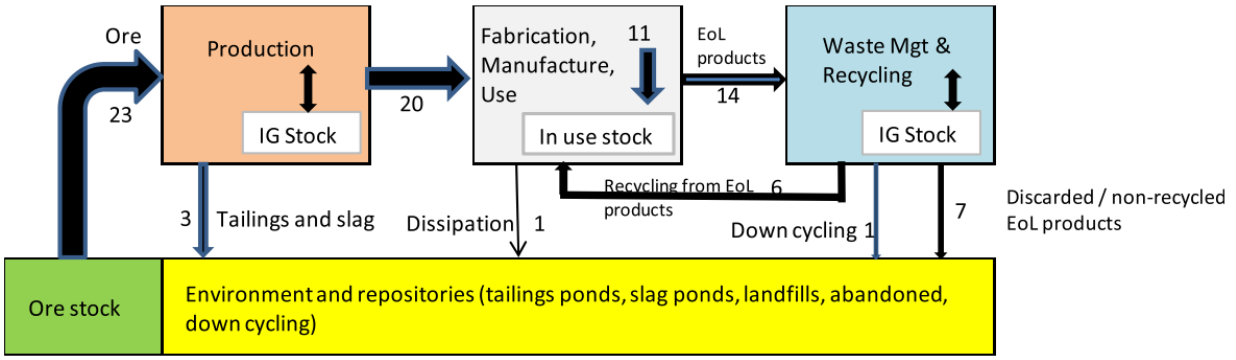


Figura 20 Flussi globali di rame semplificati per l'anno 2017

(I flussi sono espressi in milioni di tonnellate. Il tasso di riciclaggio EoL è del 45%, gli sterili e le scorie rappresentano il 16% del minerale; l'accumulo di stock di origine antropica è del 44%. La dissipazione è del 2%. Le larghezze delle frecce sono un'indicazione approssimativa dell'entità del flusso. Le azioni IG sono azioni industriali, commerciali e governative. Le cifre sono indicative)

La Figura 20 presenta i tassi di riciclo del rame EoL richiesti in relazione alle risorse di rame disponibili e alle opzioni di sostenibilità scelte. La conclusione è che all'attuale tasso di riciclo del rame EoL (45%), la quantità di risorse di rame disponibili necessarie dovrebbe essere di almeno 10 Giga tonnellate (Gt) per garantire che ci siano risorse sufficienti a sostenere un livello di servizio di rame per dieci miliardi di persone nei prossimi 200 anni. Lo stesso concetto riguarda l'attuale livello di servizio di rame nei Paesi sviluppati. Se la quantità di risorse di rame disponibili è pari a 6 Gt, il tasso di riciclo del rame EoL deve aumentare almeno al 65% per garantire la fornitura di rame per un periodo di 200 anni a un livello che consenta un servizio uguale in tutto il mondo. Per una popolazione mondiale di dieci miliardi, l'ambizione di avere abbastanza rame a disposizione per 1000 anni al livello attuale del mondo sviluppato sembra difficilmente realizzabile, se non addirittura impossibile. Una tale ambizione richiederebbe un tasso di riciclaggio dell'EoL dell'85% con una quantità disponibile di risorse di rame di circa 14 Gt, il che è abbastanza ottimistico.

In quanto processo economico, il riciclo del rame dipende ovviamente dal prezzo del rame stesso: quando il prezzo è basso, i rottami possono venire trattenuti o la raccolta ritardata, quando i prezzi sono alti, l'incentivo per la raccolta e il riciclo, nonché per il collocamento dei rottami anche sul mercato aumenta. La disponibilità di materie prime secondarie a prezzi competitivi è fondamentale per la vitalità di ogni industria metallurgica. I meccanismi di mercato e le misure normative possono avere un impatto sul commercio di queste materie prime in modo tale da compromettere seriamente l'infrastruttura di riciclo esistente. Un altro limite consiste nella natura generale delle operazioni di riciclo, I processi tecnici (basati su risorse primarie o secondarie) dipendono da leggi fisiche ed economiche per le quali non è possibile raggiungere un'efficienza del 100%: più il recupero nella lavorazione primaria o secondaria si avvicina al 100%, più (esponenzialmente) aumentano i costi economici e ambientali associati.

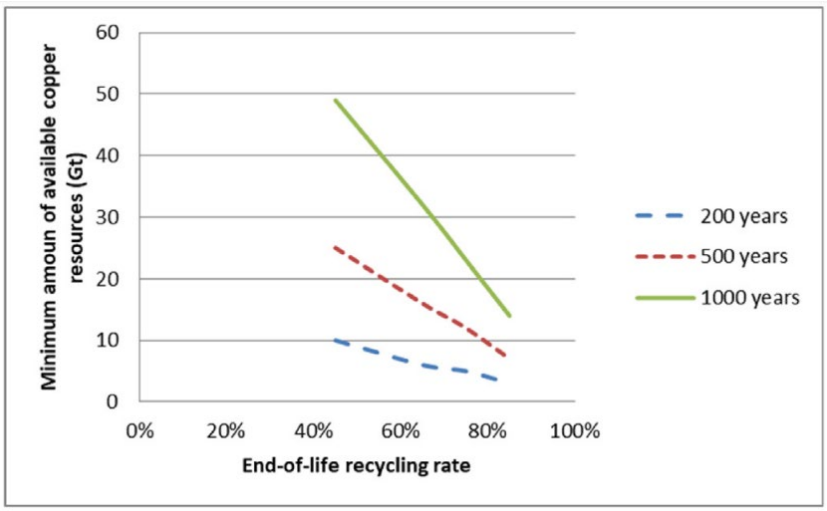


Figura 21 Tassi di riciclo del rame EoL richiesti in relazione alle risorse di rame disponibili e alle opzioni di sostenibilità scelte

(I tassi di riciclaggio del rame EoL richiesti dipendono dalle risorse di rame disponibili e dall'opzione di sostenibilità scelta (200, 500 o 1000 anni). Presupposti: il livello di servizio del rame è uguale all'attuale livello di servizio del rame nei paesi sviluppati, la sostituzione del rame è del 10%, il miglioramento dell'efficienza dei materiali è del 10% e la dissipazione è dell'1%)

Un'altra questione importante da sottolineare è che il rame e le sue leghe vengono riciclati all'interno di un quadro complesso di gestione dei prodotti EoL. Superata la fase di separazione delle frazioni di rame dai prodotti EoL raccolti, il processo di riciclo del metallo si dimostra altamente efficiente. In alcuni casi, i deflussi verso altri circuiti sono inevitabili per garantire il riciclo efficiente di un'ampia gamma di altri materiali. Ulteriori potenzialità per aumentare il riciclo del rame sembrano risiedere al di fuori dell'industria del rame in quanto tale. Sono principalmente legati alla progettazione del prodotto e alla raccolta di prodotti EoL. Una migliore progettazione dei prodotti per il riciclo può significativamente aumentare la facilità di disassemblaggio/smantellamento selettivo dei prodotti contenenti rame dai flussi di rifiuti come nel riciclaggio dei veicoli EoL o durante la demolizione degli edifici.
Le previsioni dinamiche del futuro ciclo globale del rame illustrano le sfide uniche che molti Paesi e industrie dovranno affrontare per soddisfare la crescente domanda di metalli

riducendo la dipendenza dall'estrazione dei metalli primari. Si ritiene che il riciclo come strategia CE, sebbene importante, non sia sufficiente per ridurre la domanda per l'estrazione primaria di rame prima del 2050 in diversi tra gli scenari modellizzati della domanda. Ciò suggerisce che, anche con grandi progressi nella tecnologia di riciclo e nella raccolta di materiali di scarto, dozzine di nuove miniere di rame dovrebbero essere aperte per aumentare l'estrazione di metalli primari e sostituire le previste diminuzioni di produzione derivanti dalle operazioni esistenti.

Vi sono prove sempre più evidenti che, nonostante l'attenzione dominante sulle strategie di riciclo, le strategie CE dal lato della domanda, come l'estensione della durata di vita dei prodotti e il cambiamento delle pratiche di consumo (ad esempio la condivisione di veicoli elettrici), hanno lo stesso o addirittura maggiore potenziale di riduzione della domanda di risorse primarie rispetto al riciclo di sistemi EoL. Sebbene ciò richieda un nuovo sforzo per sviluppare politiche efficaci che riducano la domanda di rame, è evidente che per far fronte ai grandi aumenti del consumo primario di produzione, ai quali probabilmente assisteremo nei prossimi decenni, occorra puntare anche verso questa parte altrettanto importante del ciclo di vita del metallo che deve essere ottimizzata per ridurre il potenziale impatto ambientale e sociale della crescente produzione.

Negli ultimi anni i temi della governance delle risorse e dell'approvvigionamento responsabile dei minerali hanno ricevuto rinnovata attenzione in linea con Il paradigma UE volto a offrire un quadro di soluzioni di sistema in grado di promuovere pratiche di produzione e consumo e modelli di business più sostenibili in tutti i settori e nei segmenti della catena ampie prove del fatto che i principi dell'EC possono essere applicati con successo per trasformare modelli di business e sistemi di produzione non solo nelle parti intermedie e a valle delle catene del valore globali, ma anche nella produzione a monte delle materie prime. Pertanto, per supportare l'industria e le compagini politiche, la comunità scientifica deve esplorare, ancora più efficacemente, gli effetti di tale approccio applicato anche ai sistemi di produzione mineraria. Ciò potrebbe includere lo studio delle strategie CE esistenti nel settore minerario, la valutazione della disponibilità politica per incentivare l'adozione della CE da parte delle società minerarie e l'adattamento delle strategie di altri settori. Dovrebbero essere presi in considerazione anche la condivisione regionale delle infrastrutture minerarie e il riutilizzo dei prodotti di scarto minerario per ridurre i rifiuti del processo di estrazione.

4.4 Sostituibilità

Le proprietà uniche del rame rendono difficile la sua sostituzione in varie applicazioni. Esistono tuttavia opzioni di sostituzione, per le principali applicazioni i possibili sostituti sono i seguenti:

- nelle applicazioni elettriche, l'alluminio può sostituire i cavi in rame, sebbene sia soggetto a perdite di conduzione dovute alla corrosione;
- nelle telecomunicazioni, i cavi in fibra ottica possono sostituire il filo di rame;
- per tubi e impianti idraulici, la plastica può sostituire il rame;
- per gli scambiatori di calore, il titanio, l'acciaio inossidabile, l'alluminio o la plastica possono sostituire il rame, a seconda dei requisiti dell'applicazione (temperatura, fluidi aggressivi, ecc.).

Il rame è un materiale multifunzionale, infatti, non solo garantisce integrità strutturale, ma consente anche di dissipare il calore in modo molto efficiente grazie alla sua elevata conduttività termica e capacità dissipativa. Aiuta anche a migliorare la resistenza allo sbiadimento e ha un potere lubrificante a temperature elevate. D'altra parte, il rame è un elemento essenziale per molte funzioni biochimiche e fisiologiche. In particolare, interviene in alcune reazioni enzimatiche grazie alla sua capacità di ciclizzare tra uno rame divalente ossidato (Cu^{2+}) e uno monovalente ridotto (Cu^{+}). Questa proprietà lo rende anche potenzialmente tossico soprattutto in caso di eccessiva esposizione. Il rame ha un effetto negativo sullo sviluppo, sulla fisiologia, sulla riproduzione e sulla sopravvivenza dell'organismo e ha effetti immunosoppressivi su specifiche specie di pesci. Al riguardo, il rame derivante dall'usura dei freni rappresenta una minaccia per la vita di organismi marini, ed è stato identificato come una delle principali fonti di inquinamento. In uno studio di ricerca, le emissioni di rame dovute all'usura dei freni sono state stimate a 2,4 migliaia di tonnellate per anno in Europa. In Svezia, l'emissione stimata è risultata pari a 3800 kg nel 2005. Allarmati dall'enorme minaccia per l'ambiente dovuta a questo inquinante, Europa e Stati Uniti hanno introdotto leggi per ridurre l'uso di rame a meno dello 0,5% in peso entro il 2025. Quindi la necessità di sostituire il rame e le sue leghe nei materiali di attrito (FM) ha incoraggiato la ricerca in questa direzione, producendo però solo pochi brevetti. In particolare, alcuni ricercatori hanno proposto l'utilizzo sostitutivo di fibre organiche lubrificanti solidi e metalli diversi. Le fibre ottiche sono adatte a sostituire, con poche modifiche, i tradizionali cavi in rame nei sistemi di comunicazione presentando numerosi vantaggi tecnologici significativi. Tuttavia, ai fini della di una comparazione in ottica LCA, considerando le stesse opzioni di produzione e di fine vita (rispettivamente recupero del rame e incenerimento di parti in plastica e incenerimento del cavo in fibra ottica) si è osservato un vantaggio ambientale del cavo in rame.

4.5 Criticità (tecnologiche, normative e di mercato)

Da un punto di vista di mercato, l'aumento dei prezzi delle materie prime spinge a chiedersi se siamo di fronte a un nuovo super-ciclo delle materie prime. Infatti, il peggior scenario per un'industria ad alta intensità di capitale e di esigenza di materie prime, come quella energetica, è quello di una forte volatilità e imprevedibilità dei prezzi. A causa della pandemia la situazione in questo senso è peggiorata, con una contrazione degli investimenti in Europa del 50% dal primo semestre del 2020. La crescita dei prezzi ha attraversato la generalità delle materie prime così da non potersi escludere, secondo diverse fonti a partire dall'Economist, l'avvio di un nuovo super ciclo dei prezzi, non dissimile da quello di inizio Millennio, trainato dalla crescita dei paesi BRIC (ovvero Brasile, Russia, India, Cina e Sudafrica), soprattutto della Cina, e durato oltre un decennio. A sostenere questo nuovo ciclo contribuirebbero gli stimoli fiscali adottati in tutte le aree del mondo (13.000 miliardi di dollari), i bassi tassi di interessi reali, la debolezza del dollaro (che riduce il costo delle importazioni denominate in dollari nei paesi emergenti) e la solida ripresa dell'economia cinese salita oltre i livelli pre-covid, poiché le sue importazioni di greggio hanno toccato un nuovo massimo storico. La fase ascendente dei prezzi per diverse materie prime è iniziata in modo similare da ottobre per il sincrono andamento delle economie e si è consolidata dall'inizio del nuovo anno nonostante il diffondersi della seconda ondata della pandemia. Nel caso del rame, si stima un aumento del prezzo di circa il 67 %, anche in relazione alla domanda che sta conoscendo un'impennata alla luce dei piani di ripresa post-Covid nel rinnovamento delle infrastrutture civili, ma anche in quelle energetiche e digitali, nelle quali il suo impiego è cruciale, come già ampiamente esposto nelle sezioni precedenti. A questo proposito, il piano di investimenti del Presidente Biden prevede 1.300 miliardi di dollari da tradurre in ferrovie ad alta velocità, trasporto pubblico, scuole, banda larga nelle aree rurali, rinnovo delle infrastrutture idriche. Il tutto richiederà milioni di tonnellate di rame, insieme ad altri metalli come nichel, zinco e alluminio. Di fatto, alcune stime suggeriscono che, stando a uno scenario di base, entro il 2030 la domanda globale di rame crescerà di circa il 600% e forse addirittura del 900% in caso di forte accelerazione dell'adozione di tecnologie verdi, un'eventualità sempre più plausibile data la costante incertezza sulle forniture di energia causata dall'invasione dell'Ucraina da parte dell'esercito Russo. In ogni caso, con tutta probabilità in questo decennio la domanda di rame registrerà un aumento senza precedenti e la crescita potrebbe continuare ad accelerare man mano che verranno meno i vincoli strutturali all'espansione della generazione di energia da fonti rinnovabili. Dal punto di vista dell'offerta, si registra attualmente un deficit che rappresenta circa il 3% della domanda globale, e benché vi siano diversi progetti in via di sviluppo, difficilmente si vedranno progressi significativi sul fronte dell'offerta prima della fine del decennio. Il rame è una materia prima a ciclo lungo; ciò implica che occorrono dai due ai tre anni per ampliare le miniere esistenti e sino a otto anni per avviare nuovi progetti, e nonostante il trend dei prezzi della materia prima osservato nell'ultimo anno, al momento non è stato approvato alcun importante progetto greenfield, poiché gli investimenti sono stati frenati da dieci anni di rendimenti scarsi e da considerazioni di tipo ESG. L'acronimo ESG si riferisce a fattori ambientali, sociali e di governance, ovvero, le tre categorie che stanno ridefinendo il modo

in cui le persone pensano agli investimenti. Il fenomeno nasce dal crescente riconoscimento dell'impatto finanziario che i temi ESG possono avere sulle aziende, a livello di *cashflow*, valutazioni, costo del capitale e di ritorno sugli investimenti. Per questo motivo, anche le questioni politiche potrebbero avere un certo impatto nei prossimi anni. Basti pensare che parte del rame proviene da aree che risentono di particolari situazioni politiche, inoltre, potrebbero presentarsi criticità anche Paesi più stabili; pensiamo, ad esempio, al Cile e all'incremento delle imposte a carico delle società minerarie del Paese, di cui non si vedono ancora tutte le conseguenze. Dato che il rame consente un'ampia gamma di applicazioni ed è indispensabile per la decarbonizzazione e la transizione verde, la domanda di questo minerale dovrebbe confermarsi estremamente solida per diverso tempo. Al di là dei problemi dell'offerta ai quali abbiamo già accennato, sembra che il mercato del rame non sia affatto pronto ad affrontare il contesto della domanda che si presenterà nei prossimi anni, e le basse scorte - oltre all'andamento del dollaro americano – potrebbero fornire un ulteriore impulso. È quindi probabile che, per il prossimo futuro, i prezzi siano ben sostenuti.
Come già riportato ampiamente nelle sezioni precedenti, il rame costituisce un elemento chiave nell'elettrificazione dei trasporti; molte analisi prevedono che entro il 2040 circa il 30% delle autovetture del mondo sarà elettrico. Tale stima risulta prudente e ragionevole, traducendosi numericamente in 500 milioni di veicoli elettrici su un parco veicoli totale di 1,6 miliardi. Se ogni veicolo elettrico contiene mediamente circa 85 kg di rame, significa che serviranno 42,5 milioni di tonnellate di rame: oltre il doppio dell'attuale produzione annua. Secondo BloombergNEF entro il 2040 saranno necessari 12 milioni di punti di ricarica domestici, oltre a quelli a ricarica rapida. I primi, cosiddetti "di livello 2" richiedono oltre 7 kg di rame ciascuno, mentre i secondi (caricatore veloce a corrente continua, DCFC) ne utilizzano 25. Infine, il rame è anche un componente chiave, oltre a metalli come litio o argento, nell'implementazione dell'infrastruttura del 5G. Ogni stazione base richiede in media 12 kg di rame, infatti, China Mobile prevede di costruirne oltre 50.000, per un totale di 600 tonnellate di rame. L'intera rete 5G cinese ne richiederebbe invece circa 6 milioni, per un consumo di 72.000 tonnellate. La *Commodities Research Unit* (CRU) prevede che senza nuove prospezioni e investimenti la produzione globale di rame scenderà dagli attuali 20 a circa 12 milioni di tonnellate entro il 2034, per l'esaurimento di oltre 200 miniere e un numero insufficiente di nuove miniere in grado di sostituire la loro produzione.
Il rame ha poi un'ampia gamma di ulteriori utilizzi che comprendono elettronica, idraulica, gioielleria e produzione di monete, nonché applicazioni in campo medico. Per questi motivi vediamo crescere l'impiego del rame in molti settori dell'economia e nella vita quotidiana,
Nonostante il grande interesse, all'orizzonte non vi sono grandi progetti di sviluppo minerario, e ne risente anche la qualità del metallo. Cile e Perù sono il primo e secondo produttore al mondo di rame, ma la qualità del loro rame sta peggiorando. Le miniere sono in fase di chiusura, poiché molte di esse si trovano al termine del loro ciclo produttivo, che dura trai 20 e i 30 anni. A livello internazionale non vi sono piani concreti all'orizzonte. Bisogna sottolineare che per tali progetti ci vogliono almeno 5-6 anni per arrivare a regime, per questi motivi, i prezzi del rame sono destinati a salire e i colli di bottiglia della produzione

e transizione energetica contribuiranno ad una ulteriore impennata dei prezzi. Infatti, viene stimato a 15mila dollari a tonnellata il prezzo nei prossimi 3-4 anni.
Il rame si colloca ai primi posti dell'elenco dei metalli estratti, dopo il ferro e l'alluminio. Il rame è anche richiesto per le sue proprietà antimicrobiche. Infatti, nel regolamento (CE) N. 1488/97 della commissione del 29 luglio 1997, viene regolamentato l'utilizzo di diversi composti di rame come prodotti fitosanitari. Più in dettaglio, l'impiego di rame sotto forma di idrossido di rame, ossicloruro di rame, solfato di rame (tribasico) e ossido rameoso, nonché l'utilizzo di oli minerali come fungicidi, sono considerati pratiche tradizionali dell'agricoltura biologica, conformemente alle disposizioni dell'articolo 7, paragrafo 1 bis, del regolamento (CE) n. 2092/91. Ad oggi, tali sostanze risultano indispensabili per numerose colture. Soltanto sforzi più intensi nel campo della ricerca consentiranno di trovare soluzioni alternative all'utilizzo di composti a base di rame a medio e lungo termine. Questo perché un impiego di rame nelle forme indicate può comportare un eccessivo accumulo nel suolo, quindi, poiché questo aspetto non è compatibile con la vocazione al rispetto dell'ambiente dell'agricoltura biologica, è stato fissato un massimale di utilizzo espresso in kg di rame per ettaro di terreno per anno.
Il regolamento di rinnovo dell'approvazione europea dei composti del rame per uso fitoiatrico è stato pubblicato, tuttavia, ci sono ancora molti gli ostacoli alla sostituzione di questo importante metallo negli usi dell'agricoltura tradizionale e biologica. Il rinnovo dell'approvazione Ue dei composti del rame è infatti stato concesso a discapito del parere negativo dell'Efsa (*European Food Safety Authority*) che aveva segnalato come "*critical areas of concern*" il rischio per uccelli e mammiferi, per gli organismi acquatici e i macrorganismi del suolo (tipicamente i lombrichi). Un aspetto decisamente innovativo riguarda l'utilizzo di rame nella stampa 3D. Tale sistema può essere usato come materiale per realizzare prodotti con tecniche additive. Ma usare il rame per la manifattura additiva non è semplice, poiché esso costituisce un materiale ambivalente nella stampa 3D. Le sue particolari caratteristiche offrono una grande opportunità, ma al tempo stesso rappresentano anche degli ostacoli non indifferenti. Una volta superati, le applicazioni in cui può essere impiegato con successo sono molte. Questa è l'idea di EOS, azienda tedesca tra i principali attori nella stampa 3D di polimeri e di metalli a tecnologia sinterizzazione laser per i settori aeronautica, automotive, oil & gas e medicale.

4.6 Proposte per il superamento degli ostacoli

Le sfide più importanti che riguardano il rame sono quattro. Innanzitutto, il materiale viene scelto per la conduttività termica, ma questo crea dei problemi durante il processo di fusione. Poi la sua precisione: rispetto agli altri materiali, viene creato un pozzetto di fusione che può essere fino a due volte più grande rispetto all'acciaio. La terza sfida riguarda la malleabilità, poiché il rame è molto morbido; quindi, va valutato l'impatto che questo ha nel processo. Infine, l'ossidazione del rame è un fenomeno estremamente importante: la polvere si ossida facilmente e questo porta a un cambio di colorazione, quindi bisogna verificare che il cambio non significhi anche perdita di qualità. Per poter sopperire alle quattro criticità riportate, si è

pensato di utilizzare il rame in tre diverse versioni, ovvero il rame puro, la lega rame-cromo-zirconio e la lega rame-nichel-silicio-cromo.
Il rame puro trova un vasto utilizzo nella produzione di motori elettrici mediante produzione additiva. Nella versione lega rame-cromo-zirconio l'applicazione in camere di combustione monolitiche ha ottenuto ottimi risultati. La lega rame-nichel-silicio e cromo trova applicazioni in ambito biomedicale, poiché è stata utilizzata per realizzare componenti utilizzati in sala operatoria. L'applicazione che ha riscontrato maggior successo è senz'altro quella della tempra a induzione come quella applicata al piantone dello sterzo realizzata per Thyssenkrupp, ovvero un gruppo industriale tedesco specializzato in lavorazione dell'acciaio. I costi di produzione risultano ridotti, la zona di indurimento è più omogenea, il surriscaldamento dei bordi viene eliminato e con la stampa 3D l'induttore non ha un solo punto di saldatura, poiché l'anello stampato è avvitato sulla ganascia di connessione fresata. Quindi utilizzare il rame per la stampa 3D è già una possibilità consolidata, che attende solo nuovi settori applicativi per diventare più diffusa. Il rame è considerato un metallo multiuso, sempre più centrale nell'industria, poiché ha una combinazione unica di duttilità e conduttività, che lo rende ideale per una serie di applicazioni già riportate. Nello scenario base, che prevede che il processo di transizione energetica non abbia ostacoli, ci si aspettano prezzi del rame su livelli molto più alti rispetto agli attuali, come già riportato, ma questo aspetto offre possibilità di investimento molto interessanti.
La Commissione Europea ha finanziato e sta finanziando progetti mirati allo sviluppo di metodi, strumenti e concetti innovativi per la sostituzione del rame nei sistemi europei di produzione biologica. Lo scopo di tali progetti è quindi quello di identificare strategie per sviluppare obiettivi di selezione "intelligenti" mediante ideotipi di colture e favorire l'accettazione da parte dei consumatori e dei rivenditori di nuove cultivar resistenti alle malattie. Le innovazioni e i sistemi di produzione vengono valutati da un punto di vista agronomico, ecologico ed economico. Ciò implica che agricoltori, consulenti, esponenti dell'industria fitosanitaria, decisori politici e ricercatori siano strettamente coinvolti per garantire un rapido sviluppo, diffusione e adozione delle strategie di sostituzione/riduzione del rame non appena diventano disponibili. A questo proposito, composti alternativi al rame devono essere studiati valutando la loro modalità di azione, formulazioni e strategie di applicazione in laboratorio e sul campo. Quindi è necessario sviluppare nuovi principi attivi che possano essere approvati ai sensi del regolamento CE 1107/2009, e fornire quindi i relativi dossier di registrazione. Inoltre, è necessario testare e dimostrare l'efficacia di questi sistemi sul campo. I candidati devono mostrare profili ecotossicologici non problematici in studi su organismi non bersaglio, come artropodi, organismi indicatori acquatici e del suolo. Inoltre, i costi di registrazione non devono essere troppo elevati, evitando notevoli investimenti iniziali da parte delle piccole, medie e grandi imprese. Ciò significa che, unitamente al fatto che il rame ha un ampio spettro di attività, è improbabile che un composto abbia il potenziale per sostituire completamente questo metallo in tutte le colture. I composti alternativi nel migliore dei casi mostrerebbero un'efficacia simile a quella del rame e dovrebbero essere salvaguardati per rimanere efficaci nel tempo. Per questi motivi, è probabile che siano necessari diversi composti candidati per ridurre/sostituire il rame.

Pertanto, sarà necessaria una gamma di prodotti, che forniscono le basi per lo sviluppo di nuovi prodotti per il mercato. Consorzi estesi coinvolti in diversi progetti europei, tra cui CO-FREE, hanno esplorato tecniche avanzate di coltivazione autoregolamentate (agroforestazione e sistemi a bassissimo impatto) nella vite e nel melo, ed entrambe hanno evidenziato un potenziale per la promozione della biodiversità e la riduzione dell'uso del rame. Tuttavia, questi sistemi di produzione sperimentali non sono ancora pronti per l'implementazione su larga scala. Il potenziale dei sistemi resilienti nel contesto della riduzione del rame non è stato ancora esplorato a fondo né pienamente sfruttato. Sono necessari ingenti investimenti in ricerca e sviluppo per trasformare questi sistemi sperimentali in opzioni tradizionali realizzabili, e generalmente, ciò richiederà almeno 20 anni. Questi consorzi hanno fornito una prova parziale del concetto in sistemi modello, ed hanno identificato i limiti attuali. Quindi a seconda della coltura, una serie di misure sono state sviluppate e sono pronte per essere implementate e utilizzate, mentre altre necessitano di più tempo. Inoltre, le nuove varietà hanno bisogno di tempo per essere adottate da agricoltori, rivenditori e consumatori, e la comunicazione e l'impegno lungo tutta la catena è essenziale. Le strategie che includono l'uso di composti alternativi come componente, insieme al Sistema di Supporto Decisionale (DSS) e ulteriori misure, saranno la via da seguire per ridurre/sostituire il rame.

Considerando quanto riportato, appare evidente che la transizione verso le energie rinnovabili porterà a una maggiore domanda di rame e che ciò porterà a una scarsità di esso, ostacolando così la transizione verso le energie rinnovabili. Il rame viene utilizzato principalmente per condurre l'elettricità, ma anche l'alluminio può essere un buon candidato, ed è 1200 volte più abbondante del rame, in effetti, è più abbondante del ferro nella crosta terrestre. Nel 2021, *The Journal of Cleaner Production* ha pubblicato una lettera in cui si evince che la sostituibilità del rame potrebbe rappresentare circa il 60% o più del suo attuale utilizzo. Va però considerato che il rame è preferibile all'alluminio, perché quest'ultimo ha portato problemi di surriscaldamento; quindi, il rame sembra praticamente insostituibile in alcune applicazioni, come per la distribuzione locale dell'energia elettrica. Va anche detto che l'alluminio presenta il 60% della conduttività del rame, ciò significa che, per fare un esempio concreto, sarebbe necessario un filo più spesso del 25% per avere le stesse performance del rame. Questo non rappresenta però un grosso ostacolo se si considera che l'alluminio in questo filo equivalente costerà e peserà circa la metà del rame. Un aspetto importante circa la possibilità di limitare l'utilizzo del rame a favore dell'alluminio riguarda l'industria automobilistica, anch'essa parte della transizione verde. I veicoli elettrici rappresentano ad oggi uno dei maggiori problemi per quanto riguarda la scarsità di rame. L' Agenzia internazionale dell'energia (IEA) afferma che avremo bisogno di circa 50 kg di rame per ogni auto elettrica, ovvero circa il doppio di quella di un'auto convenzionale. Quindi, se dovessimo sostituire tutti gli 1,7 miliardi di automobili nel mondo con veicoli elettrici, avremmo bisogno di altri 42 milioni di tonnellate di rame. Supponendo che ciò avvenga nell'arco di 42 anni, dovremmo arrivare a 1 milione di tonnellate all'anno, ovvero un ulteriore 5% della produzione annua di rame. In questo scenario, l'alluminio è oggetto di molte ricerche perché quasi tutto il rame in un veicolo elettrico può essere sostituito da esso.

Il motore rappresenta la parte dell'auto dove si trova la maggior parte del rame, e questo può essere interamente sostituito dall'alluminio. L'efficienza del motore potrebbe diminuire dell'1% circa, ma si otterrebbe anche un motore più leggero, in virtu' del numero di massa dell'alluminio, che risulta essere inferiore alla metà di quello del rame. Anche nel cablaggio l'alluminio può sostituire il rame.
Un'altra criticità riguarda l'impiantistica per l'industria eolica, che rappresenta il problema principale riguardante il rame. Anche in questo caso, l'uso dell'alluminio negli avvolgimenti delle turbine eoliche è un'opzione concreta. Il rame viene utilizzato anche per i dissipatori di calore, e qui la questione è sostanzialmente in linea con quanto già riportato, ovvero, l'alluminio ha il 60% della conduttività del rame, il che significa che il sostituto dell'alluminio è leggermente più grande, ma l'alluminio è la metà più pesante e la metà più costoso.
L'ultimo aspetto chiave riguarda il fatto che la produzione di elettricità si sposta in maniera sempre più netta verso più basse emissioni di carbonio, e in questo senso, l'alluminio emette effettivamente meno CO_2. Esso contamina gli ambienti marini in maniera minore del rame, ha effetti meno dannosi sulla salute umana e ha metalli pesanti meno dannosi come sottoprodotti. Quindi, se la scarsità del rame ci costringe a considerare delle strategie per il superamento degli ostacoli, la sua sostituzione con l'alluminio è effettivamente un bene per l'ambiente.

5 Alluminio e Bauxite

La bauxite è un minerale eterogeneo che si trova in natura ed è ricco di alluminio (40-60% di ossido di alluminio secondo l'Aluminium Association, 2019). La bauxite è il materiale più utilizzato per produrre allumina (Al_2O_3) e alluminio metallico. La bauxite è stata introdotta nell'elenco dei CRM nel 2020. L'alluminio (Al) è un metallo leggero e un buon conduttore di calore ed elettricità. La superiore malleabilità dell'alluminio e il basso punto di fusione lo rendono altamente lavorabile e versatile. Inoltre, la capacità di formare numerose leghe ne esalta la versatilità e l'elevata resistenza alla corrosione ne costituisce un punto di forza. L'alluminio è completamente riciclabile e riutilizzabile un numero infinito di volte e, per questo, è il secondo metallo più utilizzato nella società moderna.
La Figura 21 descrive brevemente la catena del valore della bauxite e dell'alluminio per l'UE. Le frecce indicano le importazioni e le esportazioni disponibili dell'UE – in tonnellate – in media nel periodo 2012-2016.

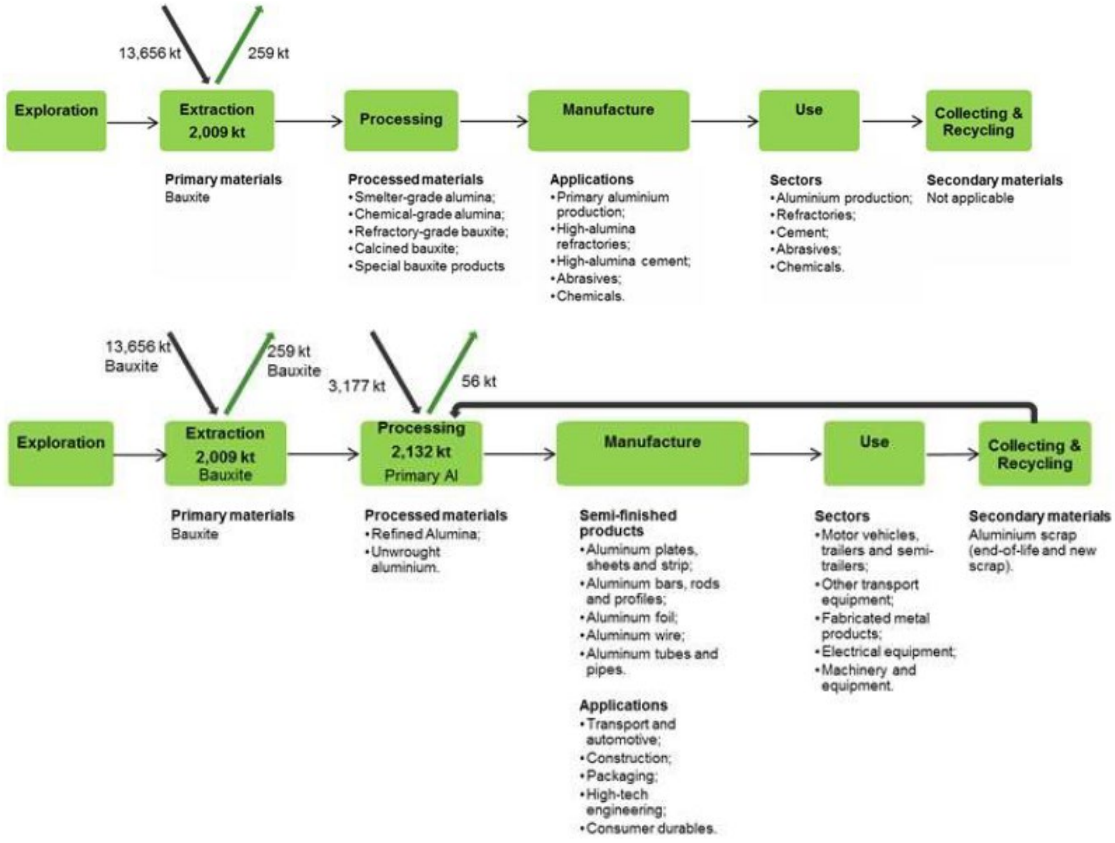


Figura 22 Catena del valore semplificata per bauxite (sopra) e alluminio (sotto) per l'UE

(Fonte: European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2023), Factsheets on Critical Raw Materials)

La Figura 22 riassume le principali informazioni relative al mercato dell'alluminio primario e secondario.

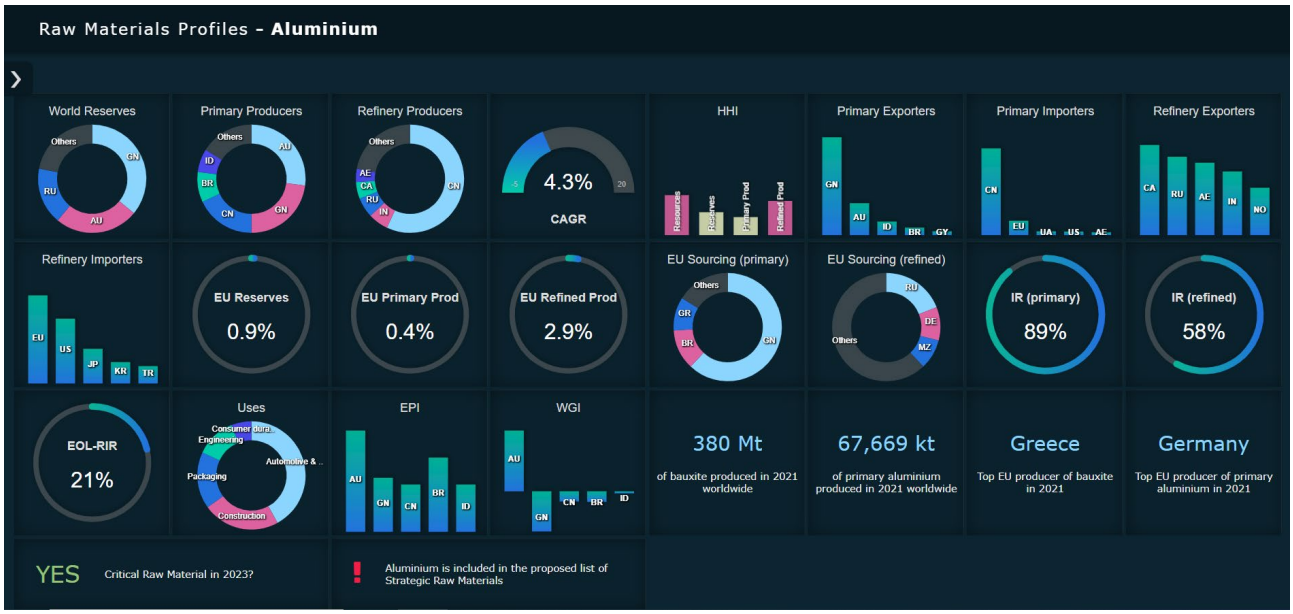


Figura 23 Il profilo dell'alluminio: dati di sintesi

Fonte: RMIS (ultimo accesso: 29.03.2024)

La maggior parte della bauxite estratta in tutto il mondo viene raffinata in allumina, mentre la restante parte viene consumata direttamente per applicazioni non metallurgiche (es. refrattari, cemento, abrasivi e prodotti chimici). L'eccellente combinazione di proprietà dell'alluminio (leggero, adattabile, resistente alla corrosione, ecc.) insieme al suo relativo rapporto costo-efficacia hanno portato al suo utilizzo diffuso in una varietà di applicazioni. Infatti, l'alluminio è molto utilizzato nel settore dei trasporti e dell'automotive, nell'edilizia, per gli imballaggi e nell'ingegneria high-tech. La Figura 23 mostra la distribuzione percentuale degli usi di bauxite e alluminio nel mercato europeo. A livello nazionale, l'Italia si distingue per una produzione di alluminio basata al 100% sul riciclo, con la filiera del packaging che a livello di raccolta e riciclo supera già attualmente gli obiettivi comunitari (73,6% a fronte del 50% fissato dall'UE al 2025 e il 60% al 2030. Gli impieghi dell'alluminio in edilizia rappresentano circa il 23% degli usi finali della produzione sia italiana sia europea. Diversi semi-lavorati in alluminio, principalmente laminati ed estrusi, vengono infatti impiegati nella produzione di una grande varietà di componenti e prodotti, quali infissi, serramenti, rivestimenti di facciate e coperture, elementi per la realizzazione di pareti divisorie interne, sistemi di schermatura solare, impianti di climatizzazione, pannelli solari, etc. (Tabella 8). Come richiamato, l'alluminio presenta difatti diverse caratteristiche prestazionali vantaggiose ai fini di una progettazione architettonica orientata alla sostenibilità ambientale e alla circolarità: l'elevato rapporto resistenza/peso, che lo rende particolarmente idoneo come materiale strutturale; la durabilità e resistenza alla corrosione, che può essere incrementata grazie a diversi tipi di trattamenti superficiali; la flessibilità in termini di produzione e quindi la varietà di componenti realizzabili; l'elevata capacità di riflessione di luce visibile e calore, che lo rende idoneo a riflettere la luce solare ai fini del risparmio energetico; la riciclabilità e la possibilità, tramite rifusione, di risparmiare fino al 92% dell'energia energia necessaria per la produzione di alluminio primario; la sicurezza in

ottica di bio ed eco-compatibilità, poiché i prodotti in alluminio e i loro trattamenti superficiali non rappresentano un pericolo per gli occupanti o per l'ambiente circostante durante l'uso. Tra i diversi impieghi dell'alluminio in edilizia, attualmente i più rilevanti riguardano infissi e serramenti, strutture per facciate continue e supporti per gli impianti di condizionamento, riscaldamento, fotovoltaici. Tra gli utilizzi industrialmente più importanti troviamo gli infissi: nel 2021, gli infissi in alluminio prodotti in Italia hanno raggiunto il massimo storico pari a più del 25% del mercato europeo (dati *Eurostat-Prodcom*, 2022), con una produzione trainata ulteriormente nel 2022 dagli incentivi fiscali.

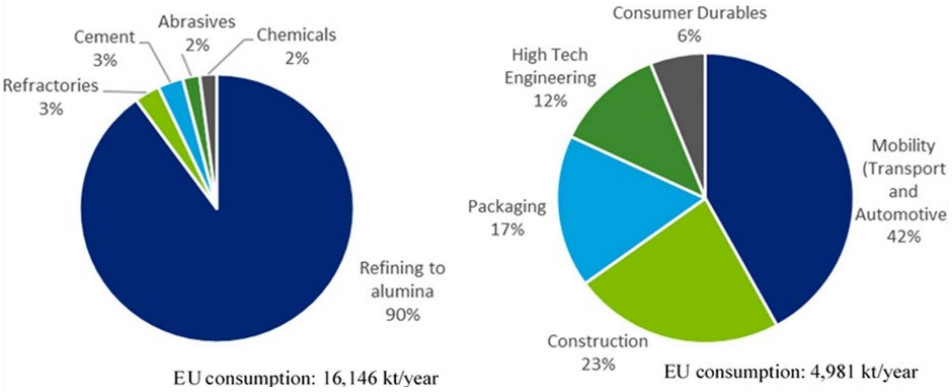


Figura 24 Usi di bauxite (a sinistra) e alluminio (a destra) nel mercato europeo

(Fonte: European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2023), Factsheets on Critical Raw Materials)

Tabella 8 Principali applicazioni dei semi-lavorati in alluminio per la produzione di prodotti per l'edilizia

Prodotti semi-lavorati in alluminio	**Applicazioni**
Lamiere e lastre	Coperture e rivestimenti di facciate e tetti, insegne e decorazioni murali, tende e schermi, canaline per HVAC, grondaie e pluviali, armature elettriche
Fogli	Sistemi HVAC, sistemi per la cattura della luce diurna, dispositivi solari
Prodotti estrusi	Finestre e porte, lucernari, curtain wall e facciate, serre solari, tende e schermature, strutture e tettoie per edifici sportivi, mobili e decorazioni, tubi e condotti, dispositivi per le energie rinnovabili (pannelli fotovoltaici e dispositivi fotovoltaici integrati, microturbine eoliche, pannelli solari termici, etc.)
Prodotti forgiati	Componenti di finestre, porte, facciate, curtain wall e altri sistemi strutturali; mobili e decorazioni
Fili e cavi	Sistemi elettrici, sistemi di illuminazione
Prodotti di fusione/fonderia	Componenti di finestre, porte, facciate, facciate continue e altri sistemi strutturali; mobili e decorazioni
Paste e polveri	Rivestimenti, paste per dispositivi elettrici ed elettronici

(Fonte: Rielaborazione da The Aluminium Association, Aluminium in Green Buildings. A Guide to Green Building Development and Certification with Aluminium Products, 2015)

Dopo un lungo negoziato, Bauxite/Alluminio è stato inserito anche nella Lista delle Materie Prime Strategiche nel CRMA.

5.1 Risorse e riserve

Si stima che le risorse di bauxite siano comprese tra 55 e 75 miliardi di tonnellate, distribuite in Africa (32%), Oceania (23%), Sud America e Caraibi (21%), Asia (18%) e altrove (6%). In Figura 24 sono riportati, oltre alle riserve di bauxite, i dati relativi alla produzione globale di allumina e di bauxite.

	Alumina production[5]		Bauxite production		Bauxite reserves[6]
	2022	2023[e]	2022	2023[e]	
United States	[e]920	780	W	W	20,000
Australia	19,500	19,000	102,000	98,000	[7]3,500,000
Brazil	[e]10,000	10,000	[e]30,000	31,000	2,700,000
Canada	1,360	1,600	—	—	—
China	81,900	82,000	[e]90,000	93,000	710,000
Germany	[e]1,000	720	—	—	—
Greece	861	860	[e]1,200	1,200	—
Guinea	340	330	[e]100,000	97,000	7,400,000
India	[e]7,500	7,300	[e]24,000	23,000	650,000
Indonesia	[e]1,200	1,200	[e]21,000	20,000	1,000,000
Ireland	1,630	1,200	—	—	—
Jamaica	634	1,500	4,370	6,000	2,000,000
Kazakhstan	1,340	1,300	4,400	4,300	160,000
Russia	3,080	2,400	5,780	5,800	480,000
Saudi Arabia	[e]1,900	1,800	[e]4,800	4,600	180,000
Spain	1,340	640	—	—	—
Turkey	300	290	2,800	2,000	63,000
Ukraine	300	—	—	—	—
United Arab Emirates	2,430	2,300	—	—	—
Vietnam	1,430	1,400	[e]3,900	3,700	5,800,000
Other countries	1,200	880	5,900	5,600	5,100,000
World total (rounded)	140,000	140,000	[8]400,000	[8]400,000	30,000,000

Figura 25 Produzione mondiale di allumina e bauxite, riserve di bauxite

(Fonte: USGS 2024)

5.2 Riciclabilità

La bauxite viene consumata durante tutti i suoi usi e, pertanto, non è disponibile per il riciclo. La maggior parte degli usi della bauxite danno come risultato una sostanza che viene successivamente trasformata in un prodotto diverso, ad es. cemento nel calcestruzzo o allumina nell'alluminio metallico (workshop SCRREEN 2019). Pertanto, la bauxite non è disponibile per il riciclo. Sebbene alcuni prodotti refrattari vengano successivamente riciclati, ciò avviene generalmente per ulteriori applicazioni refrattarie e la quantità che viene recuperata è minima rispetto alla produzione globale di bauxite.

All'estremo opposto, l'alluminio è riciclabile infinite volte senza che se ne disperda la qualità. Infatti, l'alluminio secondario viene prodotto dalla fusione dei rottami di alluminio. I rottami utilizzati nella produzione di alluminio secondario sono costituiti sia da "rottami nuovi" - generati durante la produzione e la fabbricazione di prodotti lavorati e fusi - che da "rottami vecchi", recuperati da articoli al termine della loro vita utile come lattine per bevande usate, imballaggio ecc. Il riciclo dell'alluminio richiede solo il 5% dell'energia originariamente utilizzata per la produzione primaria, con evidenti vantaggi finanziari e ambientali. Più di un terzo di tutto l'alluminio prodotto a livello globale proviene da rottami. Secondo la *European Aluminium Association*, nel 2017 il 37% del fabbisogno di lingotti di alluminio in Europa è

stato coperto da alluminio riciclato (European Aluminium Association, 2019). L'elevato valore dei rottami di alluminio è un incentivo chiave e un significativo stimolo economico per il riciclaggio (IAI, 2009). Secondo lo studio di Passarini et al. (2018) sull'alluminio dalla quantità totale di vecchi rottami (4.338.000 tonnellate di Al) circa 2.986.000 tonnellate di Al sono state raccolte per il riciclaggio. Ciò si traduce in un tasso di riciclaggio a fine vita (EOL-RR) del 69% per l'alluminio. Tuttavia, va considerato che una parte considerevole dell'alluminio secondario a fine vita raccolto per il riciclo viene esportato dall'UE. Se si esclude tale frazione l'EOL-RIR diventa del 51% (Tabella 9). Nonostante la completa riciclabilità, la crescente domanda di alluminio, unita alla lunga durata di molte applicazioni (ad esempio edifici, mobilità) impedisce alla produzione riciclata di coprire la domanda, rendendo ancora necessaria la produzione primaria (Dessart e Bontoux, 2017).

Tabella 9 Flussi di materiali rilevanti per l'EOL-RIR dell'alluminio*

MSA Flusso	Valore (kton)
B.1.1 Produzione di materia prima come prodotto principale nell'UE inviato alla lavorazione in UE	495.523
B.1.2 Produzione di materiale primario come sottoprodotto nell'UE inviato alla lavorazione nell'UE	0
C.1.3 Importazioni nell'UE di materie prime	4,458.156
C.1.4 Importazioni nell'UE di materiale secondario	268.253
D.1.3 Importazioni nell'UE di materiale lavorato	10,478.176
E.1.6 Prodotti a fine vita nell'UE raccolti per il trattamento	4,337.805
F.1.1 Esportazioni dall'UE di prodotti a fine vita	0
F.1.2 Importazioni nell'UE di prodotti a fine vita	0
G.1.1 Produzione di materiale secondario da riciclo funzionale post-consumo nell'UE inviato alla lavorazione nell'UE	2,209.139
G.1.2 Produzione di materiale secondario da riciclo funzionale post-consumo nell'UE inviato alla produzione in UE	0

(Fonte: Passarini et al. 2018)

*EoL-RIR=(G.1.1+G.1.2)/(B.1.1+B.1.2+C.1.3+D.1.3+C.1.4+G.1.1+G.1.2)

5.3 Sostituibilità

La produzione di allumina da fonti diverse dalla bauxite è teoricamente possibile da concentrati di nefelina e la produzione commerciale è stata segnalata in Russia, tuttavia le informazioni sui costi, sulle prestazioni e sui livelli di produzione sono limitate. Altri potenziali sostituti della bauxite per la fornitura di allumina sono l'anortosite, l'alunite, il caolino e l'argilla di bassa qualità e le ceneri volanti di carbone.

L'alluminio può essere sostituito dalla plastica rinforzata con fibra di carbonio nel settore trasporti, dall'acciaio, dalla plastica (come PVC o vinile) e dal legno nell'edilizia. Negli imballaggi dal vetro, dalla carta, dalla plastica e dall'acciaio. Inoltre, nelle applicazioni ingegneristiche ad alta tecnologia, il rame può sostituire l'alluminio nelle linee elettriche per la trasmissione e la distribuzione di energia, nonché nelle applicazioni di scambio termico, ma i costi attuali del rame sono superiori a quelli dell'alluminio. Infine, la ghisa e l'acciaio fuso possono anche sostituire l'alluminio in applicazioni specifiche con costi e prestazioni

simili, ma il peso specifico è molto diverso. La Tabella 10 mostra i possibili sostituti dell'alluminio.

Tabella 10 Usi e possibili sostituti

Uso	%*	Sostituti	Condivisione secondaria	Costo	Performance
Automotive	19%	Compositi	15%	Molto alto (più più di 2 volte)	Simile
Automotive	19%	Acciaio	70%	Simile o inferiore	Ridotta
Automotive	19%	Magnesio	3%	Alto (fino a due volte)	Simile
Automotive	19%	Titanio	2%	Molto alto (più più di 2 volte)	Simile
Attrezzature per il trasporto	19%	Compositi	15%	Molto alto (più più di 2 volte)	Simile
Attrezzature per il trasporto	19%	Acciaio	70%	Simile o inferiore	Ridotta
Attrezzature per il trasporto	19%	Magnesio	3%	Alto (fino a due volte)	Simile
Attrezzature per il trasporto	19%	Titanio	2%	Molto alto (più più di 2 volte)	Simile
Costruzioni	21%	Acciaio	35%	Simile o inferiore	Simile
Costruzioni	21%	Plastica (PVC, vinile, ecc.)	15%	Simile o inferiore	Simile
Costruzioni	21%	Legno	49%	Simile o inferiore	Simile
Packaging	15%	Vetro	47%	Simile o inferiore	Simile
Packaging	15%	Plastica	38%	Simile o inferiore	Simile
Packaging	15%	Acciaio	12%	Simile o inferiore	Simile
High tech	11%	Rame	17%	Molto alto (più più di 2 volte)	Simile
High tech	11%	Ghisa	17%	Simile o inferiore	Simile
High tech	11%	Acciaio fuso	16%	Simile o inferiore	Simile

*Stima delle quote globali di utilizzo finale dell'alluminio nel periodo 2016-2020 (scheda informativa CRM, 2022; risultati del workshop di convalida degli esperti SCRREEN, 2022)

5.4 Criticità (tecnologiche, normative, di mercato)

Come per le altre materie prime oggetto di questo documento, anche l'alluminio è stato oggetto di discussioni all'interno del Tavolo Nazionale Materie Prime Critiche. Il Tavolo ha ritenuto significativo sottolineare come l'Alluminio, segnalato come critico per il tessuto industriale italiano anche se non incluso nella lista CRM 2020, sia stato poi incluso invece nella lista CRM 2023. Questo perché la materia prima presenta molteplici criticità anche se con tassi di riciclo decisamente più alti, come evidenziato qui di seguito. Si sottolinea inoltre come, anche grazie alla partecipazione attiva dell'Italia ai negoziati per il CRMA, l'Alluminio è stato poi inserito anche nella Lista delle SRMs.

Dal punto di vista ambientale, una criticità specifica della produzione di alluminio da fonte primaria è legata alla natura dei depositi di bauxite (stratificati, orizzontali e poco profondi): infatti, per garantire il corretto svolgimento dell'attività estrattiva, sono necessarie ampie aree di terreno. Spesso le miniere si trovano all'interno o in prossimità di aree naturali protette, foreste tropicali e/o terre indigene, il che implica impatti significativi sulla biodiversità e sulle comunità locali. Un altro problema ambientale critico è la gestione dei residui di bauxite (fanghi rossi), insieme al consumo di energia, alla gestione dell'acqua e all'impronta fisica degli impianti. Per quanto riguarda la produzione secondaria, i principali problemi ambientali sono le potenziali emissioni di polveri, PCDD/F e rifiuti solidi.

Dal punto di vista normativo, gli stakeholder segnalano invece che, nell'ambito degli attuali processi REACH, le aziende europee stanno ritardando gli investimenti in nuovi impianti di riciclo a causa delle discussioni in corso su una potenziale classificazione/autorizzazione del piombo metallico in forma solida. Tale metallo è infatti contenuto come impurezza nelle leghe di alluminio e di rame che rientrerebbero, quindi, nelle nuove regole, qualora fossero definitivamente approvate.

5.5 Proposte di superamento degli ostacoli

Gli stakeholder della filiera dei metalli non ferrosi propongono innanzitutto di rafforzare e rendere vincolanti nell'ambito del Regolamento europeo sulle spedizioni dei rifiuti le previsioni per assicurare che tutti i rifiuti esportati verso Paesi extra UE siano gestiti in modo ecologicamente corretto dall'impianto di ricezione, garantendo l'applicazione di standard ambientali sociali e di salute e sicurezza equivalenti a quelli adottati in UE.

Una seconda proposta riguarda invece le filiere dell'alluminio e del rame e mira a superare la criticità normativa evidenziata nel par. 5. In particolare, nel quadro attuale del Regolamento REACH, gli stakeholder delle filiere indicate propongono di introdurre una fase di screening preliminare al processo esistente nel REACH, con l'obbiettivo di portare ad una gestione del rischio più rapida e procedure mirate, incoraggiando così gli investimenti.

6 CONCLUSIONI

L'analisi delle risorse e delle sfide relative alle materie prime critiche e/o strategiche sottolinea l'importanza della collaborazione tra attori locali e nazionali per promuovere l'economia circolare. La transizione verso pratiche più sostenibili richiede un forte supporto politico come facilitatore del cambiamento, con politiche incentrate sulla gestione responsabile delle materie prime. In particolare, il litio, il rame e l'alluminio/bauxite giocano un ruolo chiave nelle filiere di produzione italiane, influenzando settori come le Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche e la Mobilità Sostenibile, nonché la Costruzione e Demolizione.

Mentre il litio emerge come cruciale per lo sviluppo delle tecnologie energetiche e la transizione verso la mobilità sostenibile, la produzione primaria di litio ha un impatto ambientale significativo come l'esaurimento delle risorse idriche e l'inquinamento delle acque. Per quanto riguarda il rame, le sfide tecnologiche legate alla fusione, precisione, malleabilità e ossidazione richiedono approcci innovativi, come l'uso di diverse leghe e tecnologie di lavorazione avanzate come la stampa 3D. Infine, l'alluminio e la bauxite, sebbene vantaggiosi per la loro versatilità e riciclabilità, presentano sfide sia in termini di impatti ambientali legati all'estrazione e alla gestione dei residui, sia normativi, come evidenziato dal Regolamento REACH. Affrontare queste criticità richiede un impegno globale per promuovere pratiche sostenibili lungo l'intera catena del valore, dalla produzione all'uso e al riciclo, al fine di garantire una gestione responsabile di queste risorse, fondamentali per il futuro industriale e ambientale.

Gestire in modo efficace le risorse significa adottare un approccio ecosistemico integrato che consideri gli aspetti tecnici, normativi e operativi. Questo richiede investimenti nella ricerca e nello sviluppo di tecnologie sostenibili per l'estrazione, la lavorazione e il riciclo, di pari passo con politiche che favoriscano l'adozione di pratiche industriali più sostenibili. Inoltre, è fondamentale garantire la transizione ecologica e digitale come pilastri per garantire la sostenibilità economica nel lungo periodo.

Il futuro della gestione delle materie prime critiche e/o strategiche dipende dalla collaborazione tra tutti gli attori coinvolti, dalla leadership politica e dalla possibilità tecnica e normativa di adottare approcci innovativi e sostenibili lungo l'intera catena del valore.

7 BIBLIOGRAFIA

7.1 Litio

ACEA. (n.d.). New EU car sales by power source. Retrieved December 19, 2023, from https://www.acea.auto/figure/fuel-types-of-new-passenger-cars-in-eu/

Albemarle. (n.d.). Air conditioners / Gas and Air Treatment. Retrieved December 19, 2023, from https://www.albemarle.com/offerings/lithium/markets--applications/air-conditioners--gas--air-treatment

Amato, A., Becci, A., Villen Guzman, M., Vereda Alonso, C., & Beolchini, F. (2021). Challenges for sustainable lithium supply: A critical review. Journal of Cleaner Production, 300, 126954. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126954

Baum, Z. J., Bird, R. E., Yu, X., & Ma, J. (2022). Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. ACS Energy Letters, 7(2), 712–719. https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02602

Becci, A., Amato, A., Fonti, V., Karaj, D., & Beolchini, F. (2020). An innovative biotechnology for metal recovery from printed circuit boards. Resources, Conservation and Recycling, 153(October 2019). https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104549

Becci, A., Amato, A., Rodríguez-Maroto, J. M., & Beolchini, F. (2021). Bioleaching of End-of-Life Printed Circuit Boards: Mathematical Modeling and Kinetic Analysis. Industrial and Engineering Chemistry Research, 60(11), 4261–4268. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c05566

Bertau, M., & Martin, G. (2019). Integrated Direct Carbonation Process for Lithium Recovery from Primary and Secondary Resources. Materials Science Forum, 959, 69–73. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.959.69

Bogossia, J. (2021). Hard Rock Lithium Deposits. https://www.geologyforinvestors.com/hard-rock-lithium-deposits/

Brückner, L., Frank, J., & Elwert, T. (2020). Industrial recycling of lithium-ion batteries—A critical review of metallurgical process routes. Metals, 10(8), 1–29. https://doi.org/10.3390/met10081107

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D., Dias, A., Cavalli, P., Georgitzikis, A., Grohol, K., Kuzov, A., Latunussa, T., Lyons, C., Maury, G., & Somers, T. (2023). Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU-A foresight study JRC Science for Policy Report. In JRC Science for Policy Report Carrara,. https://doi.org/10.2760/334074

CirbaSolution. (n.d.). Lithium Safety. Retrieved December 19, 2023, from https://www.cirbasolutions.com/lithium-safety/

COBAT. (2020). Hydrometallurgical process for the treatment of lithium batteries and recovery of metals contained therein (EP3746575A1).

Corner, W. D. (2021). Sustainable strategies for the exploitation of end-of-life permanent magnets. Processes, 9(857). https://doi.org/10.3390/ pr9050857

Dini, A., & Alla, U. (2023). Litio : dal Big Bang alla transizione energetica. August.

Duesenfeld. (2023). Ecofriendly Recycling of Lithium-Ion Batteries. https://www.duesenfeld.com/recycling_en.html#:~:text=Ecofriendly Recycling of Lithium-Ion,rates with low energy consumption.

ERION. (2023). Batterie al litio, ecco cosa manca per renderle riciclabili. https://erion.it/it/news/batterie-al-litio-ecco-cosa-manca-per-renderle-riciclabili/

EU Commission. (2023). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on circularity requirements for vehicle design and on management of end-of-life vehicles, amending Regulations (EU) 2018/858 and 2019/1020 and repealing Directives 2000/53/EC and 2005. Official Journal of the European Union, 0284, 1–23.

European Commission. (n.d.). Critical Raw Materilas. Retrieved December 19, 2023, from https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en

European commission JRC. (2023). Raw Materials Profiles- Lithium. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/

European Parliament. (2023). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials and amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724.

Evans, K. (2014). Lithium. In Critical Metals Handbook (Issue March, pp. 230–260). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118755341.ch10

Fastmarkets. (2023). European battery regulations to restrict black mass exports to secure raw materials. https://www.fastmarkets.com/insights/european-battery-regulations-to-restrict-black-mass-exports/

Ferg, E. E., Schuldt, F., & Schmidt, J. (2019). The challenges of a Li-ion starter lighting and ignition battery: A review from cradle to grave. Journal of Power Sources, 423(January), 380–403. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.03.063

Fox Davies Resources Specialist 2013, Lithium Market Outlook 2017, Roskill Information, The Lithium Market, September2013.

Frédéric, S. (2023). EU urged to restrict export of ‘black mass’ from used electric vehicles.

Fu, L., Engqvist, H., & Xia, W. (2020). Glass – Ceramics in Dentistry : A Review.

Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., & Reck, B. K. (2015). On the materials basis of modern society. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(20), 6295–6300. https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110

Grant, A., Deak, D., & Pell, R. (2020). The CO2 Impact of the 2020s’ Battery Quality Lithium Hydroxide Supply Chain.

GreaseMonkeyDirect. (n.d.). What is lithium grease used for? Retrieved December 19, 2023, from https://www.greasemonkeydirect.com/blogs/news/grease-guide-what-is-lithium-grease-used-for#:~:text= The physical properties of lithium,grease demonstrates excellent heat resistance.

Haga, Y., Saito, K., & Hatano, K. (2018). Waste Lithium-Ion Battery Recycling in JX Nippon Mining & Metals Corporation (pp. 143–147). https://doi.org/10.1007/978-3-319-72131-6_12

Harvey, L. D. D. (2018). Resource implications of alternative strategies for achieving zero greenhouse gas emissions from light-duty vehicles by 2060. Applied Energy, 212(August 2017), 663–679. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.074

Hemant P. Meshram, Lenina SVB, T. J. (2018). Lithium-Ion Battery Control System for Hybrid-Electric vehicle. ISSRD International Conference, June, 0–5. https://www.researchgate.net/publication/326972638_Lithium-Ion_Battery_Control_System_for_Hybrid-Electric_vehicle

Heuberger, S., & Morgenthaler, J. (2023). Lithium in geothermal brines. March.

Hielscher Ultrasonics. (2023). Ultrasonics for the Recycling of Lithium Ion Batteries. https://www.hielscher.com/ultrasonics-for-the-recycling-of-lithium-ion-batteries.htm

Horizon Programme. (2020). SCRREEN2. In Corporate Governance (Bingley) (Vol. 10, Issue 1).

IEA. (n.d.). Battery demand for EVs continues to rise. Retrieved December 19, 2023, from https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-batteries

IEA Global EV Outlook 2023. https://iea.blob.core.windows.net/assets/dacf14d2-eabc-498a-8263-9f97fd5dc327/GEVO2023.pdf

JRC - European Commission. (n.d.). Raw Materials Profiles - Lithium. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/Lithium

Khakmardan, S., Rolinck, M., Cerdas, F., Herrmann, C., Giurco, D., Crawford, R., & Li, W. (2023). Comparative Life Cycle Assessment of Lithium Mining, Extraction, and Refining Technologies: a Global Perspective. Procedia CIRP, 116, 606–611. https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.102

Kinnaird, J. A., & Nex, P. A. M. (2020). Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. Routledge Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development, 13–33. https://doi.org/10.4324/9781003001317-3

Krantz, P. (2023). Europe's quest for home-grown lithium. https://www.theparliamentmagazine.eu/news/article/lithium-mining-race-europe-china-supply-chains#:~:text= According to a briefing prepared,predominantly use lithium-powered batteries.

Larouche, F., Tedjar, F., Amouzegar, K., Houlachi, G., Bouchard, P., Demopoulos, G. P., & Zaghib, K. (2020). Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-Ion batteries and beyond. Materials, 13(3). https://doi.org/10.3390/ma13030801

Matos, C.T.; Ciacci, L; Godoy León, M.F.; Lundhaug, M.; Dewulf, J.; Müller, D.B.; Georgitzikis, K.; Wittmer, D.; Mathieux, F. (2020). Material System Analysis of five batteryrelated raw materials: Cobalt, Lithium, Manganese, Natural Graphite, Nickel . https://doi.org/10.2760/519827

Moazzam, P., Boroumand, Y., Rabiei, P., Baghbaderani, S. S., Mokarian, P., Mohagheghian, F., Mohammed, L. J., & Razmjou, A. (2021). Lithium bioleaching: An

emerging approach for the recovery of Li from spent lithium ion batteries. Chemosphere, 277, 130196. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130196

Park, S. H., Kim, J. H., Moon, S. J., Jung, J. T., Wang, H. H., Ali, A., Quist-Jensen, C. A., Macedonio, F., Drioli, E., & Lee, Y. M. (2020). Lithium recovery from artificial brine using energy-efficient membrane distillation and nanofiltration. Journal of Membrane Science, 598(November 2019), 117683. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117683

Schulz, K. J. (2017). Critical mineral resources of the United States: economic and environmental geology and prospects for future supply. In K. J. Schulz (Ed.), Geological Survey (p. 1802). https://doi.org/10.3133/pp1802

Sethurajan, M., & Gaydardzhiev, S. (2021). Bioprocessing of spent lithium ion batteries for critical metals recovery – A review. Resources, Conservation and Recycling, 165(October 2020), 105225. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105225

Shekhar, A. R., Parekh, M. H., & Pol, V. G. (2022). Worldwide ubiquitous utilization of lithium-ion batteries: What we have done, are doing, and could do safely once they are dead? Journal of Power Sources, 523(October 2021), 231015. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231015

TEHA. (2023). Materie prime critiche e produzioni industriali italiane I.

Tenova. (2023). Lithium. https://tenova-com/technologies/hydrometallurgy/lithium?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=it&_x_tr_hl=it&_x_tr_pto=tc

Tercero Espinoza, L. A., Hummen, T., Brunot, A., Pena Garay, I., Velte, D., Smuk, L., Todorovic, J., Eijk, C. van der, & Joce, C. (2015). CRM InnoNet substitution of critical raw materials. In Pagecount. https://doi.org/10.24406/publica-fhg-298436

Theodoridis, T., & Kraemer, J. (n.d.). Study on the Critical Raw Materials for the EU.

Tompson, A. F. B. (2016). Born from a flood: The Salton Sea and its story of survival. Journal of Earth Science, 27(1), 89–97. https://doi.org/10.1007/s12583-016-0630-7

Treccani. (n.d.). Litio. In Treccani. https://www.treccani.it/enciclopedia/litio/

U.S. Department of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2023). U.S. Department of Energy Analysis Confirms California's Salton Sea Region to Be a Rich Domestic Lithium Resource. https://www.energy.gov/eere/articles/us-department-energy-analysis-confirms-californias-salton-sea-region-be-rich-domestic#:~:text= The commission's final report notes,geothermal brines in the region.

UltraLithium. (n.d.). Lithium Uses: Glass and Ceramics. Retrieved December 19, 2023, from https://ultralithium.com/lithium-uses-glass-ceramics/

Umicore. (2023). Umicore Battery Recycling: Capturing profitable growth and enabling a circular and low-carbon battery value chain. https://www.umicore.com/en/newsroom/umicore-battery-recycling/

Vasconcelos, D. da S., Tenório, J. A. S., Botelho Junior, A. B., & Espinosa, D. C. R. (2023). Circular Recycling Strategies for LFP Batteries: A Review Focusing on Hydrometallurgy Sustainable Processing. Metals, 13(3), 543. https://doi.org/10.3390/met13030543

Zhang, Y., Wang, L., Sun, W., Hu, Y., & Tang, H. (2020). Membrane technologies for Li+/Mg2+ separation from salt-lake brines and seawater: A comprehensive review.

Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 81, 7–23. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.09.002

7.2 Rame

[1] A. Lossin, Copper, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry (2001). https://doi.org/10.1002/14356007.A07_471.

[2] S. Northey, N. Haque, G. Mudd, Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining, J Clean Prod 40 (2013) 118–128. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.09.027.

[3] Copper Wire Market Size, Share, Growth, Trends - Forecast 2024-2028, (n.d.). https://www.technavio.com/report/copper-wire-market-analysis# (accessed March 14, 2024).

[4] Resource Library - Copper Alliance, (n.d.). https://copperalliance.org/trends-and-data/resource-library/ (accessed March 14, 2024).

[5] The environmental profi le of copper products A "cradle-to-gate" life-cycle assessment for copper tube, sheet and wire produced in Europe, (n.d.).

[6] The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions – Analysis - IEA, (n.d.). https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions (accessed March 14, 2024).

[7] Solutions for CRitical Raw materials - a European Expert Network 2 | SCRREEN2 | Project | Fact sheet | H2020 | CORDIS | European Commission, (n.d.). https://cordis.europa.eu/project/id/958211 (accessed March 14, 2024).

[8] World Mining Data - World Mining Data, (n.d.). https://www.world-mining-data.info/ (accessed March 14, 2024).

[9] Anwendungen – Kupferverband, (n.d.). https://kupfer.de/anwendungen/ (accessed March 14, 2024).

[10] Selected Copper Statistics – International Copper Study Group, (n.d.). https://icsg.org/selected-copper-statistics/ (accessed March 14, 2024).

[11] Product - Eurostat, (n.d.). https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-datasets/-/SBS_NA_IND_R2 (accessed March 14, 2024).

[12] BGS, World Mineral Production 2016-2020, (2016).

[13] J.M. Hammarstrom, M.L. Zientek, H.L. Parks, C.L. Dicken, U.S.G.S.G.C.M.R.A. Team, Assessment of undiscovered copper resources of the world, 2015, Scientific Investigations Report (2019). https://doi.org/10.3133/SIR20185160.

[14] Rapporto Paese Cile 2021 | Atradius, (n.d.). https://atradius.it/pubblicazioni/rapporto-paese-sud-america-cile-maggio-2021.html (accessed March 14, 2024).

[15] K. Rasilainen, P. Eilu, T. Halkoaho, T. Heino, I. Huovinen, M. Iljina, H. Juopperi, T. Karinen, N. Kärkkäinen, A. Karvinen, A. Kontinen, O. Kontoniemi, J. Kousa, L.S. Lauri, K. Lepistö, J. Luukas, H. Makkonen, T. Manninen, T. Niiranen, J. Nikander, K. Pietikäinen, J. Räsänen, P. Sipilä, P. Sorjonen-Ward, M. Tiainen, M. Tontti, T. Törmänen, K. Västi, Assessment of undiscovered metal resources in Finland, Ore Geol Rev 86 (2017) 896–923. https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2016.09.031.

[16] E.G. Hertwich, T. Gibon, E.A. Bouman, A. Arvesen, S. Suh, G.A. Heath, J.D. Bergesen, A. Ramirez, M.I. Vega, L. Shi, Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies, Proc Natl Acad Sci U S A 112 (2015) 6277–6282. https://doi.org/10.1073/PNAS.1312753111/SUPPL_FILE/PNAS.1312753111.SAPP.PDF.

[17] K. Stadler, R. Wood, T. Bulavskaya, C.J. Södersten, M. Simas, S. Schmidt, A. Usubiaga, J. Acosta-Fernández, J. Kuenen, M. Bruckner, S. Giljum, S. Lutter, S. Merciai, J.H. Schmidt, M.C. Theurl, C. Plutzar, T. Kastner, N. Eisenmenger, K.H. Erb, A. de Koning, A. Tukker, EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables, J Ind Ecol 22 (2018) 502–515. https://doi.org/10.1111/JIEC.12715.

[18] T. Watari, S. Northey, D. Giurco, S. Hata, R. Yokoi, K. Nansai, K. Nakajima, Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world, Resour Conserv Recycl 179 (2022) 106118. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.106118.

[19] Rame, cobalto, litio e zinco: la caccia alle materie prime in Italia - Il Sole 24 ORE, (n.d.). https://www.ilsole24ore.com/art/rame-cobalto-litio-e-zinco-caccia-materie-prime-italia-AEGCgRND?refresh_ce=1 (accessed March 14, 2024).

[20] R. Merli, M. Preziosi, A. Acampora, How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review, J Clean Prod 178 (2018) 703–722. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.112.

[21] R.M. Izatt, C. Hagelüken, Recycling and Sustainable Utilization of Precious and Specialty Metals, Metal Sustainability: Global Challenges, Consequences, and Prospects (2016) 1–22. https://doi.org/10.1002/9781119009115.CH1.

[22] J.P. Schöggl, L. Stumpf, R.J. Baumgartner, The narrative of sustainability and circular economy - A longitudinal review of two decades of research, Resour Conserv Recycl 163 (2020) 105073. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105073.

[23] L.W. Hall, M.C. Scott, W.D. Killen, Ecological risk assessment of copper and cadmium in surface waters of Chesapeake Bay watershed, Environ Toxicol Chem 17 (1998) 1172–1189. https://doi.org/10.1002/ETC.5620170626.

[24] M. Soulier, M. Pfaff, D. Goldmann, R. Walz, Y. Geng, L. Zhang, L.A. Tercero Espinoza, The Chinese copper cycle: Tracing copper through the economy with dynamic substance flow and input-output analysis, J Clean Prod 195 (2018) 435–447. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.04.243.

[25] M. Ruhrberg, Assessing the recycling efficiency of copper from end-of-life products in Western Europe, Resour Conserv Recycl 48 (2006) 141–165. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2006.01.003.

[26] S. Glöser, M. Soulier, L.A. Tercero Espinoza, Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation, Environ Sci Technol 47 (2013) 6564–6572. https://doi.org/10.1021/ES400069B/SUPPL_FILE/ES400069B_SI_001.PDF.

[27] M.L.C.M. Henckens, E. Worrell, Reviewing the availability of copper and nickel for future generations. The balance between production growth, sustainability and recycling rates, J Clean Prod 264 (2020) 121460. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121460.

[28] C.B. Tabelin, I. Park, T. Phengsaart, S. Jeon, M. Villacorte-Tabelin, D. Alonzo, K. Yoo, M. Ito, N. Hiroyoshi, Copper and critical metals production from porphyry ores and E-wastes: A review of resource availability, processing/recycling challenges, socio-environmental aspects, and sustainability issues, Resour Conserv Recycl 170 (2021) 105610. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105610.

[29] T. Watari, K. Nansai, K. Nakajima, Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review, Resour Conserv Recycl 164 (2021) 105107. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105107.

[30] S. Carlotto, E. Mohebbi, F. Sedona, M. Lo Cicero, L. Colazzo, C. Mariani, M.G. Betti, M. Sambi, M. Casarin, An experimental and theoretical study of metallorganic coordination networks of tetrahydroxyquinone on Cu(111), New Journal of Chemistry 43 (2019) 19186–19192. https://doi.org/10.1039/C9NJ04884G.

[31] É. Lèbre, J.R. Owen, D. Kemp, R.K. Valenta, Complex orebodies and future global metal supply: An introduction, Resources Policy 77 (2022) 102696. https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2022.102696.

[32] S. Glöser, M. Soulier, L.A. Tercero Espinoza, Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation, Environ Sci Technol 47 (2013) 6564–6572. https://doi.org/10.1021/ES400069B/SUPPL_FILE/ES400069B_SI_001.PDF.

[33] M. Kumar, J. Bijwe, Non-asbestos organic (NAO) friction composites: Role of copper; its shape and amount, Wear 270 (2011) 269–280. https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2010.10.068.

[34] W. Liao, Z. Zhu, C. Feng, Z. Yan, Y. Hong, D. Liu, X. Jin, Toxicity mechanisms and bioavailability of copper to fish based on an adverse outcome pathway analysis, Journal of Environmental Sciences 127 (2023) 495–507. https://doi.org/10.1016/J.JES.2022.06.002.

[35] J.H.J. Hulskotte, H.A.C.D. van der Gon, A.J.H. Visschedijk, M. Schaap, Brake wear from vehicles as an important source of diffuse copper pollution, Water Science and Technology 56 (2007) 223–231. https://doi.org/10.2166/WST.2007.456.

[36] D.S.T. Hjortenkrans, B.G. Bergbäck, A. V. Häggerud, Metal emissions from brake linings and tires: Case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005, Environ Sci Technol 41 (2007) 5224–5230. https://doi.org/10.1021/ES070198O/SUPPL_FILE/ES070198OSI20070511_101853.PDF.

[37] V. Mahale, J. Bijwe, S. Sinha, A step towards replacing copper in brake-pads by using stainless steel swarf, Wear 424–425 (2019) 133–142. https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2019.02.019.

[38] Infographic: A new supercycle? Why commodities prices are surging in 2021 | S&P Global Commodity Insights, (n.d.). https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/oil/011821-infographic-a-new-supercycle-why-commodities-prices-surging-2021 (accessed March 14, 2024).

[39] Green Metals: Copper is the New Oil, (n.d.). https://www.goldmansachs.com/intelligence/pages/copper-is-the-new-oil.html (accessed March 14, 2024).

[40] Europe Auto Sales Resume Steep Decline in January After Reprieve - Bloomberg, (n.d.). https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-02-16/europe-auto-sales-resume-steep-decline-in-january-after-reprieve?embedded-checkout=true (accessed March 14, 2024).

[41] E. Food Safety Authority, Review of the existing maximum residue levels for copper compounds according to Article 12 of Regulation (EC) No 396/2005, EFSA Journal 16 (2018) e05212. https://doi.org/10.2903/J.EFSA.2018.5212.

[42] E. Food, S. Authority, Outcome of the consultation with Member States, the applicant and EFSA on the pesticide risk assessment for copper compounds copper(I), copper(II) variants namely copper hydroxide, copper oxychloride, tribasic copper sulfate, copper(I) oxide, Bordeaux mixture in light of confirmatory data, EFSA Supporting Publications 15 (2018) 1486E. https://doi.org/10.2903/SP.EFSA.2018.EN-1486.

7.3 Alluminio e Bauxite

Aluminium Association (2019). Aluminium 101, https://www.aluminium.org/aluminium-advantage/aluminium-101.
Dessart, F. J., & Bontoux, L. (2017). Non-ferrous Metals Manufacturing: Vision for 2050 and Actions Needed (No. JRC106071). Joint Research Centre (Seville site).
European Aluminium (2019) Vision 2050. A vision for strategic, low carbon and competitive aluminium. Available at: h ttps://www.european-aluminium.eu/resource-hub/vision-2050/.IAI 2009
European Commission, Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2023). Factsheets on Critical Raw Materials.
Eurostat-Prodcom (2022). Statistics on the production of manufactured goods (PRODCOM NACE Rev.2), Prodcom - Statistics by Product. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom
Georgitzikis, K., Mancini, L., Delia, E., & Vidal Legaz, B. (2021). Sustainability aspects of Bauxite and Aluminium. Luxembourg: Publications Office of the European Union, EUR, 30760.
Jorjani, E., & Amirhosseini, M. (2007). Alumina production process from nepheline ore in Razgah (Iran). Mineral Processing Technology (MPT 2007), 111-115.
Kuzvart, M. (2006). "Industrial minerals and rocks in British Columbia", pp. 552–556. Available at: http://www.ehu.eus/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_287.pdf.
Materia Rinnovabile, 2023. Insight. Alluminio, available at: https://www.renewablematter.eu/viewmag.php?id=199
OECD (2015), "Aluminium factsheet", pp. 108–118.
Passarini, F., Ciacci, L., Philip, N., & Simone, M. (2018). Material flow analysis of aluminium, copper, and iron in the EU-28.
The Aluminium Association, 2015. Aluminium in Green Buildings. A Guide to Green Building Development and Certification with Aluminium Products, available at: https://www.aluminum.org/sites/default/files/2021-10/GreenBuildingGuidelines_AluminumAssociation_2015_0.pdf
USGS (2024). Mineral Commodity Summaries 2024. U.S. Geological Survey
Vadim, S. (1996). Alumina production in Russia part I: historical background. JOM, 48(8), 24-26.