

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria dei Materiali per l'Industria 4.0**

Tesi di Laurea Magistrale:

Analisi dell'impiego di DRI/HBI nel processo EAF



**Politecnico
di Torino**

Tutor:

Daniele Ugues

Candidato:

Mattia Mozzone

Indice

1. Introduzione	1
2. Definizione e inquadramento del preridotto di ferro DRI/HBI	3
2.1. Descrizione DRI	3
2.2. Processi industriali per la formazione del preridotto	3
2.2.1. Il processo MIDREX	4
2.2.1.1. Il reattore shaft furnace	5
2.2.1.2. Unità di reforming gas naturale	6
2.2.1.3. Circuito di ricircolo e condizionamento del gas	6
2.2.1.4. Integrazione funzionale dei sottosistemi	7
2.2.2. Il processo HYL	8
2.2.2.1. Elementi distintivi dell'HYL rispetto alle config. MIDREX	9
2.2.2.2. Diffusione industriale e confronto con MIDREX	9
2.3. Riduzione diretta del minerale di ferro nella produzione di DRI	10
2.3.1. Principi fondamentali della riduzione diretta	10
2.3.2. Riduzione diretta del DRI nel shaft furnace	12
2.4. Caratterizzazione chimico-fisica del preridotto DRI/HBI	13
2.5. Confronto chimico-fisico tra preridotto, rottame e ghisa	14
2.6. Tipologie di preridotto commerciali	15
3. Il forno elettrico ad arco – EAF	16
3.1. Struttura del forno ad arco elettrico	16
3.1.1. Unità fusoria	17
3.1.2. Generatore di potenza e sistema di regolazione elettrica	17
3.1.3. Sistema di alimentazione e dosaggio materiali	18
3.1.4. Sistema di apporto energia chimica e ossigeno	18
3.2. Ciclo operativo del forno ad arco elettrico	19
3.2.1. Carica del forno	20
3.2.2. Fase di fusione	21
3.2.3. Fase di affinazione	21
3.2.4. Spillaggio	22
3.3. Bilanci di massa ed energia del processo di fusione	22
3.3.1. Bilancio di massa del Fe nel forno EAF con DRI	23
3.3.2. Bilancio energetico del forno con DRI	25
3.4. Ruolo del DRI sull'operatività nel forno EAF	27
4. Aspetti ambientali e decarbonizzazione	31
4.1. Inquadramento delle emissioni di CO ₂ nelle principali rotte siderurgiche	31
4.2. Fattori che influenzano le emissioni di CO ₂ nel ciclo EAF e ruolo del DRI	32
4.3. Valutazione Life Cycle Assessment della rotta DRI-EAF	34
5. Prospettive future per la rotta DRI-EAF	36
5.1. Confronto tra produzione NG-DRI e H ₂ -DRI	36
5.2. Impiego di materiali carboniosi alternativi nel forno EAF	38

6. Conclusioni	40
Riferimenti bibliografici	43

1. Introduzione

Nel contesto della transizione energetica e delle politiche industriali orientate alla neutralità climatica, il settore siderurgico si trova oggi ad affrontare una delle sfide più complesse del panorama manifatturiero globale: ridurre in modo sostanziale le emissioni di CO₂ mantenendo al contempo competitività, qualità del prodotto e sicurezza degli approvvigionamenti. Il settore siderurgico rappresenta, infatti, uno dei principali comparti industriali responsabili delle emissioni climalteranti; secondo World Steel Association, esso contribuisce a circa il 7–9% delle emissioni globali di CO₂ [1]. La produzione di acciaio è, infatti, fortemente legata all'impiego di combustibili fossili, in particolare nella fase di riduzione del minerale di ferro. Parallelamente, la crescente scarsità di rottame di qualità e l'aumento della domanda di acciai ad elevate prestazioni impongono una riflessione strategica sulle materie prime ferrose impiegate nei cicli produttivi. In questo scenario, la riduzione diretta del minerale di ferro DRI e il suo impiego nel forno elettrico ad arco-EAF assumono un ruolo strategico. La configurazione DRI-EAF si colloca tra il ciclo integrale tradizionale e la rifusione di solo rottame, offrendo la possibilità di adottare materie prime ferrose a composizione controllata e di contenere l'intensità emissiva rispetto all'altoforno, soprattutto se associata a vettori energetici a minore contenuto di carbonio.

Gli studi disponibili in letteratura mettono in evidenza come l'introduzione del preridotto nel forno elettrico influenzi in modo diretto i bilanci di massa ed energia, la formazione e gestione della scoria, la resa metallurgica del ferro e, più in generale, l'efficienza tecnico-ambientale del processo [2,3]. In parallelo, le principali roadmap internazionali per la decarbonizzazione della siderurgia individuano nel DRI prodotto con idrogeno un'evoluzione necessaria nel percorso verso il green steel, a condizione di un progressivo allineamento con sistemi energetici a basse emissioni [4,5,6].

Alla luce di tali considerazioni, il presente lavoro si propone di analizzare in maniera sistematica il preridotto DRI/HBI e il suo ruolo nel funzionamento del forno elettrico ad arco, con particolare attenzione agli effetti sui bilanci di massa ed energia, sull'operatività del forno EAF e sulle emissioni di CO₂, per poi discutere le prospettive future legate all'impiego di DRI prodotto con idrogeno e all'integrazione con fonti energetiche rinnovabili e materiali alternativi. L'obiettivo è fornire un inquadramento tecnico-ingegneristico che colleghi aspetti metallurgici, energetici ed ambientali in un'unica visione coerente sul tema.

La struttura della tesi è la seguente:

- Il Capitolo 2 introduce i principi della riduzione diretta del minerale di ferro, descrivendone i fondamenti chimico-termodinamici e le caratteristiche chimico-fisiche del preridotto, con confronto rispetto a rottame e ghisa.
- Il Capitolo 3 analizza il forno elettrico ad arco, soffermandosi sulla struttura impiantistica, sui bilanci di massa ed energia e sul ruolo operativo del DRI nella carica, con particolare attenzione alla resa del ferro e alla gestione della scoria.
- Il Capitolo 4 affronta gli aspetti ambientali, discutendo le emissioni di CO₂ nel ciclo EAF con e senza preridotto e inquadrando il confronto attraverso strumenti di Life Cycle Assessment.

- Il Capitolo 5 approfondisce le prospettive future verso una siderurgia a basse emissioni, con riferimento al DRI a idrogeno e alle possibili integrazioni con fonti energetiche rinnovabili e materiali alternativi.
- Il Capitolo 6 riporta le conclusioni del lavoro, sintetizzando i principali risultati emersi dall'analisi del preridotto DRI/HBI, del suo impiego nel forno elettrico ad arco e delle relative implicazioni metallurgiche, energetiche e ambientali.

2. Definizione e inquadramento del preridotto di ferro DRI-HBI

2.1 Descrizione DRI

Il preridotto di ferro, noto comunemente come Direct Reduced Iron (DRI), è un materiale ferroso ottenuto dalla trasformazione degli ossidi di ferro mediante un processo di riduzione allo stato solido, nel quale il minerale non viene portato a fusione. Durante questo trattamento l'ossigeno viene progressivamente rimosso dal minerale grazie all'azione di gas riducenti, mentre lo stato solido del materiale viene sostanzialmente preservato.

Il prodotto finale si presenta come un aggregato poroso costituito prevalentemente da ferro metallico, accompagnato da una quantità limitata di ossidi residui e dalle componenti non ferrose presenti nel minerale originario. Questa particolare configurazione strutturale, spesso descritta come ferro spugnoso, distingue il DRI sia dalla ghisa ottenuta in altoforno sia dal rottame ferroso comunemente impiegato nei forni elettrici.

Dal punto di vista del ciclo siderurgico, il DRI è concepito come materia prima per i processi di acciaieria elettrica, in particolare per il forno elettrico ad arco. Il suo impiego consente di introdurre nel processo una fonte di ferro “vergine”, caratterizzata da composizione chimica controllata e da un contenuto estremamente ridotto di elementi residui, difficilmente eliminabili durante la fusione del rottame [7,8]. Nel contesto attuale della siderurgia, il DRI occupa una posizione sempre più rilevante come complemento al rottame nel forno elettrico ad arco: la sua diffusione è favorita dalla crescita della produzione di acciaio via EAF, dalla progressiva limitazione della disponibilità di rottame di elevata qualità e dall'esigenza di soddisfare requisiti ambientali sempre più stringenti [7].

Attualmente, la via di fabbricazione dell'acciaio basata su forno elettrico alimentato con rottame ferroso e DRI rappresenta circa il 26% della produzione mondiale di acciaio, con prospettive di crescita fino a circa il 50% entro il 2050 [9]. Tale tendenza trova riscontro anche nei dati produttivi più recenti: nel 2024 la produzione mondiale di DRI ha raggiunto circa 140,8 milioni di tonnellate, con India e Iran come principali Paesi produttori, responsabili complessivamente di oltre il 60% della produzione globale [10].

2.2 Processi industriali per la formazione del preridotto

A livello mondiale, la produzione industriale di preridotto di ferro si è sviluppata secondo differenti tipologie di processo, riconducibili principalmente a tecnologie a gas naturale, a carbone solido e, in misura più limitata, a soluzioni ibride o sperimentali. Tra queste, i processi a gas in forno a tino hanno progressivamente assunto un ruolo dominante grazie alla maggiore efficienza energetica, alla qualità metallurgica del prodotto ottenuto e alla loro naturale integrazione con il forno elettrico ad arco (EAF). In letteratura, tali configurazioni risultano infatti responsabili di oltre l'82% della produzione mondiale di ferro da riduzione diretta, con MIDREX e HYL-ENERGIRON indicati come i due processi industriali principali [11].

Nei processi di riduzione diretta basati sul gas, la trasformazione degli ossidi di ferro in ferro metallico avviene attraverso una sequenza di reazioni allo stato solido, in cui il monossido di carbonio e l'idrogeno svolgono il ruolo di agenti riducenti. Il minerale di ferro, sotto forma di pellet o lump ore, viene alimentato in un reattore verticale a flusso controcorrente, dove incontra il gas riducente che risale dal basso verso l'alto. Tale configurazione consente di realizzare uno scambio termico efficiente tra le due fasi e di sfruttare in modo ottimale il potere riducente del gas lungo l'altezza del tino.

L'efficienza del processo dipende in modo critico dalla composizione del gas riducente, dalla distribuzione termica nel reattore e dalla qualità del minerale alimentato. In questo quadro generale si inseriscono le tecnologie MIDREX e HYL, che rappresentano due soluzioni industriali mature: esse condividono i medesimi principi termo-chimici di base, ma presentano differenze significative dal punto di vista impiantistico, gestionale e di integrazione con le utilities di stabilimento.

2.2.1 Il processo MIDREX

Il processo MIDREX costituisce oggi una delle tecnologie di riferimento per la produzione industriale di DRI mediante riduzione diretta a gas naturale. La sua diffusione su scala mondiale è riconducibile a una serie di fattori tecnici e impiantistici. In primo luogo, il processo presenta una configurazione relativamente flessibile, in quanto consente di ottenere diverse forme commerciali di preridotto, quali CDRI, HDRI e HBI, adattandosi sia a impianti integrati con forno elettrico ad arco sia a configurazioni orientate al trasporto e alla commercializzazione del prodotto. In secondo luogo, l'efficienza energetica del processo è favorita dall'integrazione tra reformer, reattore di riduzione e circuito di ricircolo del gas, consentendo di recuperare e riutilizzare parte del gas esausto proveniente dal reattore. Dal punto di vista tecnico, il processo può essere descritto come l'integrazione funzionale di tre sottosistemi principali:

- il reattore verticale di riduzione (shaft furnace);
- l'unità di reforming del gas naturale;
- il circuito di ricircolo e condizionamento del gas di processo. La Figura 2.1 riassume schematicamente tali sottosistemi e i principali flussi di materia ed energia che li collegano.

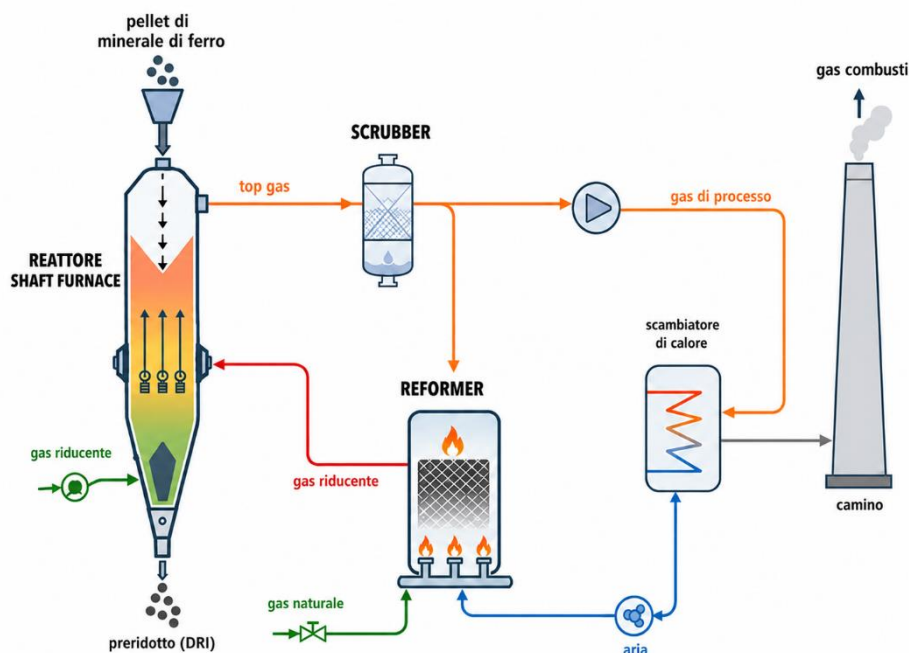


Figura 2.1: Schema funzionale semplificato del processo MIDREX. La figura evidenzia l'integrazione tra reattore shaft furnace, reformer alimentato a gas naturale, scrubber del top gas e circuito di ricircolo del gas riducente. Le frecce rappresentano i principali flussi di materia ed energia, dall'alimentazione del minerale di ferro fino all'ottenimento del preridotto. Figura elaborata tramite IA a partire da [11].

2.2.1.1 Reattore shaft furnace

Il reattore verticale, o shaft furnace, rappresenta il cuore del processo MIDREX, poiché al suo interno avviene la trasformazione degli ossidi di ferro in ferro metallico allo stato solido. Esso è costituito da una colonna cilindrica rivestita internamente con materiali refrattari, progettata per operare in continuo secondo una configurazione a letto mobile. Il minerale di ferro, sotto forma di pellet o lump ore, viene alimentato dalla parte superiore mediante un sistema di carica che consente una distribuzione il più possibile uniforme del materiale sulla sezione del reattore. Il solido scende quindi per gravità lungo la colonna, attraversando progressivamente zone caratterizzate da preriscaldamento, pre-riduzione e conversione a metallo.

Il gas riducente caldo, costituito principalmente da H_2 e CO , viene immesso nella parte inferiore della zona cilindrica del reattore e fluisce in controcorrente rispetto al solido discendente. Nei processi MIDREX convenzionali, il gas riducente viene introdotto a temperature dell'ordine di $800-870\text{ }^{\circ}C$, così da garantire condizioni favorevoli sia al trasferimento termico sia alle reazioni di riduzione degli ossidi di ferro. Questa configurazione consente un efficace sfruttamento del calore sensibile del gas: il materiale in ingresso viene progressivamente riscaldato nella parte alta del tino, mentre il gas in risalita si raffredda cedendo calore al letto solido. Dal punto di vista operativo, il controllo della portata del gas, della temperatura di ingresso e della distribuzione del flusso è fondamentale per garantire l'uniformità di conversione a metallo, la stabilità del letto mobile e la regolarità del processo.

Il materiale ridotto attraversa successivamente una zona di transizione e raggiunge la parte inferiore del reattore, dove può essere raffreddato oppure scaricato a caldo in funzione della configurazione impiantistica adottata. Il prodotto finale è generalmente caratterizzato da elevato grado di conversione a metallo, tipicamente dell'ordine del 93–94%, con contenuto di carbonio variabile in funzione delle condizioni operative e dell'eventuale introduzione di gas naturale nella zona di raffreddamento [8]. Il DRI può quindi essere estratto come DRI freddo (CDRI), trasferito a caldo verso il forno elettrico come HDRI oppure compattato per la produzione di HBI, in base all'integrazione con l'acciaieria e alle esigenze logistiche.

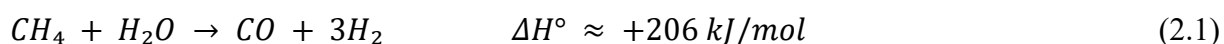
2.2.1.2 Unità di reforming del gas naturale

Il secondo sottosistema fondamentale è il reformer MIDREX, nel quale il gas naturale viene convertito in una miscela riducente ricca in idrogeno e monossido di carbonio. Il metano non viene, infatti, impiegato direttamente nel reattore di riduzione, poiché presenta un potere riducente inferiore rispetto a H_2 e CO e può favorire fenomeni indesiderati di deposizione di carbonio solido (carbon soot). Per questo motivo, il gas naturale viene preventivamente sottoposto a reforming, in modo da ottenere un gas con maggiore efficacia riducente.

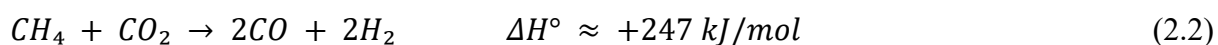
Il reformer è costituito da tubi catalitici, generalmente contenenti catalizzatori a base di nichel, riscaldati esternamente per favorire le reazioni endotermiche attraverso cui il metano reagisce con vapore acqueo e CO_2 formando una miscela riducente ricca in H_2 e CO [8,12].

Le principali reazioni coinvolte, i cui valori di entalpia sono stati presi da tabelle termochimiche NIST-JANAF, possono essere schematizzate come segue:

- steam reforming (2.1), in cui il metano reagisce con vapore acqueo producendo monossido di carbonio e idrogeno:



- dry reforming (2.2), in cui il metano reagisce con anidride carbonica producendo monossido di carbonio e idrogeno:



La funzione del reformer è quindi duplice: da un lato generare una miscela gassosa con un adeguato rapporto H_2/CO , dall'altro fornire al gas riducente una temperatura compatibile con l'ingresso nello shaft furnace. Il controllo della composizione del gas riformato costituisce un parametro operativo essenziale, poiché un'elevata frazione di H_2 e CO consente di mantenere alto il potere riducente, mentre concentrazioni eccessive di specie ossidanti, quali CO_2 e H_2O , riducono l'efficacia della riduzione degli ossidi di ferro.

2.2.1.3 Circuito di ricircolo e condizionamento del gas

Il terzo elemento distintivo del processo MIDREX è il circuito chiuso del gas di processo. Il gas esausto in uscita dalla sommità del reattore, denominato top gas, contiene ancora una

frazione significativa di componenti riducenti non reagiti, principalmente H_2 e CO , oltre ai prodotti della riduzione, in particolare H_2O e CO_2 . Anziché essere scaricato completamente, esso viene inviato a un sistema di raffreddamento e depolverazione, scrubber, dove vengono rimosse le particelle solide trascinate e parte dell'umidità condensabile. Successivamente, una quota del gas trattato viene compressa e riciclata verso la sezione di reforming, dove viene miscelata con gas naturale. In questa fase, il metano reagisce con le specie ossidate presenti nel gas riciclato, in particolare H_2O e CO_2 , contribuendo alla formazione di una nuova miscela riducente ricca in H_2 e CO , che viene poi inviata nuovamente al reattore di riduzione. Questo schema consente di migliorare l'efficienza energetica complessiva del processo, riducendo il consumo specifico di gas naturale e valorizzando il potenziale riducente residuo del top gas.

2.2.1.4 Integrazione funzionale dei sottosistemi

Dal punto di vista operativo, il MIDREX si caratterizza per funzionamento continuo, elevata affidabilità e flessibilità operativa. L'integrazione tra reformer, reattore e circuito gas consente di mantenere condizioni stazionarie di equilibrio termo-chimico nel reattore, garantendo elevata conversione a metallo e stabilità del prodotto. Il processo MIDREX risulta particolarmente diffuso in contesti industriali caratterizzati da disponibilità di gas naturale e da una consolidata produzione di DRI, come Medio Oriente, Nord America e alcune aree dell'America Latina [10]. Nelle configurazioni più recenti, il sistema è stato progressivamente adattato all'impiego crescente di idrogeno, riducendo il contenuto carbonioso del gas e le emissioni dirette di CO_2 ; tuttavia, la struttura impiantistica di base – reattore shaft, reformer e circuito di ricircolo – rimane il nucleo tecnologico del processo.



Figura 2.2: Vista esterna di un impianto industriale per la produzione di DRI mediante processo MIDREX. Sono visibili la struttura verticale del reattore di riduzione, le linee di trasporto dei materiali e parte delle infrastrutture ausiliarie del circuito gas. Immagine presa dal sito web: primetals.com

2.2.2 Il processo HYL

Il processo HYL, sviluppato originariamente in Messico e oggi commercializzato come Energiron, è considerato la principale alternativa industriale al MIDREX nell'ambito della riduzione diretta a gas naturale. L'obiettivo impiantistico è analogo: produrre DRI in modo continuo attraverso un reattore verticale a letto mobile alimentato con gas riducente. Tuttavia, rispetto alle configurazioni MIDREX convenzionali, il processo HYL/Energiron presenta alcune specificità impiantistiche e operative, legate soprattutto alla gestione del gas di processo, al controllo della pressione e alla regolazione del grado di conversione a metallo e del contenuto di carbonio del prodotto.

Come schematizzato in Figura 2.3, l'impianto HYL/Energiron può essere interpretato come un sistema integrato costituito da tre blocchi funzionali principali: il reattore verticale a tino, o shaft furnace, sede della riduzione diretta allo stato solido; la sezione di generazione e condizionamento del gas riducente; e il circuito di recupero e ricircolo del gas esausto, denominato top gas, comprensivo degli stadi di raffreddamento, depolverazione e condizionamento.

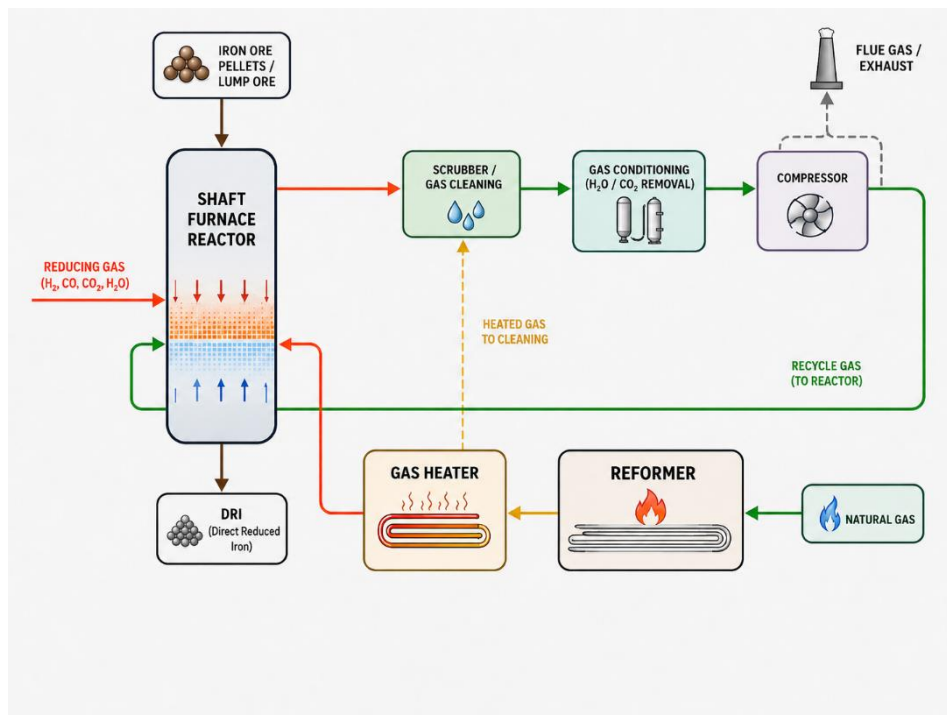


Figura 2.3: Schema funzionale semplificato del processo HYL III, oggi evoluto nella tecnologia Energiron. La figura evidenzia i principali sottosistemi dell'impianto, tra cui reattore shaft furnace, reformer, gas heater, scrubber, unità di condizionamento del gas e circuito di ricircolo. Figura elaborata con AI a partire da [8].

Dal punto di vista operativo, il minerale di ferro viene caricato dall'alto del tino e avanza verso il basso per gravità, mentre il gas riducente viene introdotto nella parte inferiore del reattore e risale in controcorrente rispetto al solido. Il gas in uscita dalla sommità del reattore viene quindi inviato alla sezione di trattamento e, in quota parte, ricircolato nel circuito per essere nuovamente impiegato dopo opportuno condizionamento. La possibilità di alimentare il

processo con differenti fonti gassose, quali gas naturale, syngas o coke oven gas, costituisce un elemento di flessibilità impiantistica della tecnologia Energiron [13].

2.2.2.1 Elementi distintivi dell'HYL rispetto alle configurazioni MIDREX

Pur condividendo con il MIDREX la logica generale basata su reattore shaft furnace e circuito di ricircolo del gas, il processo HYL/Energiron si distingue per alcune soluzioni impiantistiche specifiche:

- Esercizio in pressione del reattore. Un primo elemento distintivo è rappresentato dal funzionamento del sistema in condizioni pressurizzate. Rispetto alle configurazioni MIDREX convenzionali, l'HYL opera infatti a pressioni più elevate, con conseguenti implicazioni sulla progettazione delle apparecchiature, delle linee di processo, dei sistemi di tenuta e degli organi di regolazione. Tale scelta consente, tuttavia, una gestione più compatta ed efficiente del circuito gas, favorendo il controllo delle condizioni operative del reattore e della composizione del gas riducente [8].
- Rimozione selettiva della CO₂ dal circuito gas. Un secondo aspetto caratterizzante riguarda la possibilità di rimuovere selettivamente la CO₂ dal gas ricircolato. La separazione della CO₂ consente di ridurre la presenza di specie ossidanti nel circuito, migliorando il controllo del potere riducente del gas e dei rapporti H₂/H₂O e CO/CO₂. Nelle configurazioni Energiron più recenti, questa impostazione permette, inoltre, di ottenere una corrente di CO₂ più concentrata, potenzialmente integrabile con sistemi di cattura, utilizzo o stoccaggio della CO₂ [13].
- Separazione tra reformer e circuito del gas ricircolato. A differenza del MIDREX, nel quale una quota del gas di processo trattato viene reinviata al reformer, nel processo HYL il gas ricircolato non attraversa nuovamente la sezione di reforming. Il reformer ha, quindi, principalmente la funzione di generare gas riducente fresco a partire dal gas naturale, mentre il gas riciclato viene raffreddato, depolverizzato, condizionato, compresso e successivamente riscaldato prima del reingresso nel reattore. Questa separazione contribuisce a rendere più stabile il funzionamento del reformer e a preservare il catalizzatore [8].
- Gestione distinta delle sezioni di riduzione e raffreddamento/carburizzazione. Un'ulteriore differenza riguarda l'organizzazione interna del reattore. Nel processo HYL, la parte superiore del reattore è destinata prevalentemente alla riduzione degli ossidi di ferro, mentre la parte inferiore svolge funzioni di raffreddamento e carburizzazione del DRI. Questa configurazione consente di controllare in modo più indipendente il grado di conversione metallica e il contenuto finale di carbonio del preridotto, adattando le caratteristiche del prodotto alle esigenze metallurgiche del forno elettrico [8].

2.2.2.2 Diffusione industriale

Il processo HYL ha trovato storicamente ampia applicazione in Messico, paese di origine della tecnologia, e successivamente in aree caratterizzate da disponibilità di gas naturale e integrazione con acciaierie elettriche, come India, Medio Oriente e alcune regioni dell'America Latina. In tali contesti, la flessibilità nella gestione del gas di processo, il funzionamento in

pressione e la predisposizione a configurazioni a elevato contenuto di idrogeno rendono l'HYL/Energiron una soluzione competitiva per la produzione di DRI di qualità elevata e per scenari di progressiva decarbonizzazione del ciclo produttivo [13]. Il confronto con i dati produttivi più recenti conferma tuttavia la prevalenza industriale del processo MIDREX: nel 2024 gli impianti MIDREX hanno prodotto circa 76,2 Mt di DRI, pari a circa il 54% della produzione mondiale complessiva di preridotto [10].

2.3 Riduzione diretta del minerale di ferro nella produzione di DRI

2.3.1 Principi fondamentali della riduzione diretta

Dal punto di vista chimico, il termine riduzione indica un processo nel quale una specie perde ossigeno o, in senso più generale, acquista elettroni. Nel caso del minerale di ferro, tale processo consiste nella progressiva rimozione dell'ossigeno legato al ferro negli ossidi, principalmente ematite, magnetite e wüstite, fino all'ottenimento di ferro metallico. In ambito siderurgico, la riduzione diretta è quindi un processo metallurgico nel quale gli ossidi di ferro vengono trasformati in ferro metallico allo stato solido mediante agenti riducenti gassosi, senza l'impiego del carbone coke che, nel ciclo altoforno, svolge simultaneamente il ruolo di combustibile, agente riducente e supporto meccanico della carica.

La trasformazione avviene attraverso una sequenza di reazioni eterogenee solido-gas, nelle quali il monossido di carbonio e l'idrogeno riducono progressivamente le diverse fasi ossidiche del ferro. In condizioni industriali, il processo può essere schematizzato mediante le reazioni (2.3) – (2.8), che descrivono il passaggio dalla fase più ossidata, l'ematite, fino alla formazione di ferro metallico.

Riduzione dell'ematite a magnetite:



Riduzione della magnetite a wüstite:



Riduzione della wüstite a ferro metallico:



L'avanzamento delle reazioni di riduzione è governato dall'equilibrio termodinamico tra la fase solida e la fase gassosa, il quale dipende dalla temperatura e dal rapporto tra specie riducenti e ossidanti presenti nel gas. Nei processi industriali di riduzione diretta, le temperature operative

sono generalmente comprese tra 800 e 1.050 °C: a temperature inferiori la cinetica di riduzione risulta troppo lenta, mentre valori eccessivamente elevati possono favorire fenomeni di sinterizzazione del solido, con perdita di porosità e conseguente diminuzione della reattività complessiva del materiale.

In questo intervallo di temperatura, i diagrammi di equilibrio di Baur–Glässner per i sistemi $Fe-O-C$ e $Fe-O-H$ costituiscono uno strumento utile per interpretare le condizioni locali all'interno del reattore di riduzione diretta. Tali diagrammi mettono in relazione la temperatura con il potenziale riducente del gas, espresso dai rapporti $CO/(CO + CO_2)$ e $H_2/(H_2 + H_2O)$, e consentono di individuare i campi di stabilità delle diverse fasi del sistema ferro-ossigeno. Come mostrato in Figura 2.4, dal diagramma si ricava che, a circa 1000 °C, la riduzione della wüstite a ferro metallico richiede, in termini approssimativi, una frazione di H_2 dell'ordine del 58% nel sistema H_2/H_2O e una frazione di CO prossima al 72% nel sistema CO/CO_2 .

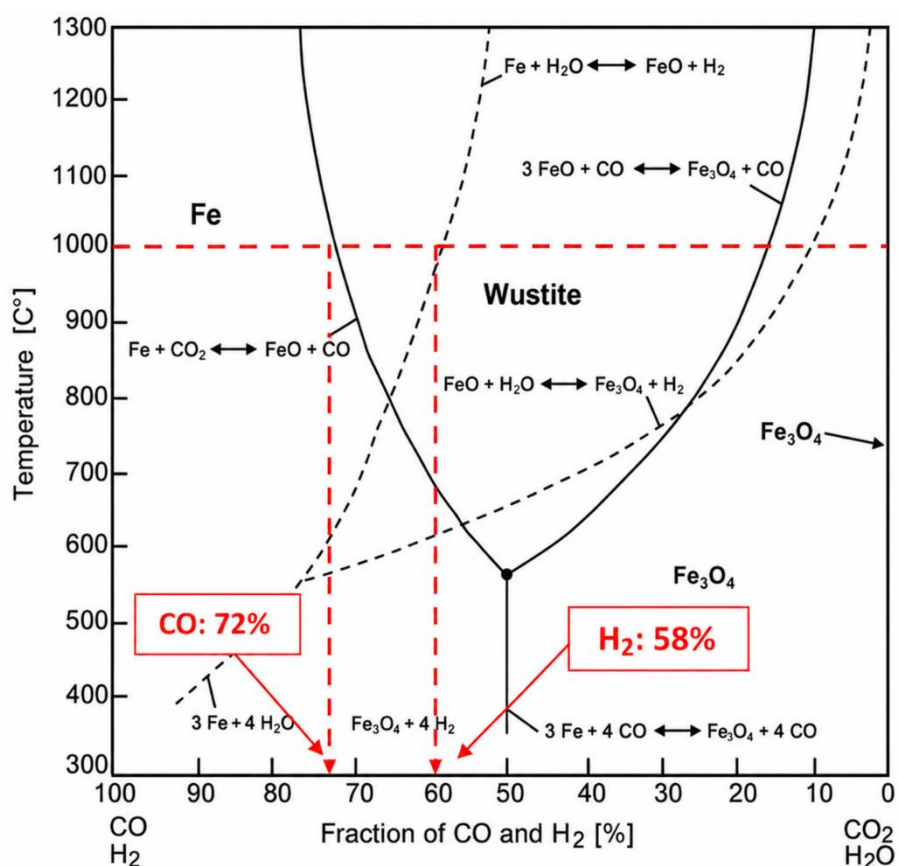


Figura 2.4: Rappresentazione schematica del diagramma di equilibrio di Baur–Glässner per la riduzione degli ossidi di ferro mediante miscele CO/CO_2 e H_2/H_2O . Sono evidenziate, a circa 1000 °C, le condizioni approssimate richieste per la riduzione della wüstite a ferro metallico. Figura adattata da [14].

Inoltre, dall'analisi comparativa dei diagrammi di equilibrio emerge come, nell'intervallo di temperatura considerato, l'idrogeno presenti condizioni termodinamicamente più favorevoli rispetto al monossido di carbonio per la riduzione degli ossidi di ferro. A ciò si aggiunge il vantaggio ambientale legato al prodotto della reazione: mentre la riduzione con CO genera CO_2 , l'impiego di H_2 porta alla formazione di H_2O , riducendo le emissioni dirette associate alla fase di riduzione.

2.3.2 Riduzione diretta del DRI nel reattore a tino

Nel reattore DRI, ovvero l'unità impiantistica in cui si realizza operativamente la riduzione diretta degli ossidi di ferro allo stato solido, il materiale ferroso, sotto forma di pellet o lump ore, viene caricato dalla sommità e scende per gravità lungo la colonna del reattore, mentre il gas riducente preriscaldato viene introdotto nella parte inferiore e fluisce in controcorrente. Questa configurazione garantisce un intenso scambio termico e di massa tra fase gassosa e fase solida e consente di stabilire lungo l'altezza del reattore un gradiente controllato di temperatura, composizione del gas e grado di conversione a metallo.

All'ingresso superiore, il materiale presenta una temperatura relativamente bassa e un contenuto di ossigeno elevato, prevalentemente associato alla presenza di Fe_2O_3 . In questa prima regione il fenomeno dominante è il preriscaldamento del solido per effetto del gas caldo in risalita; solo una volta raggiunte temperature sufficienti iniziano le reazioni di pre-riduzione. Procedendo verso la zona intermedia, la temperatura del solido aumenta fino ai valori operativi tipici e le condizioni locali diventano progressivamente più favorevoli alla rimozione dell'ossigeno residuo dagli ossidi di ferro. In questa regione avviene una parte significativa della trasformazione della wüstite in ferro metallico, che rappresenta lo stadio più rilevante dal punto di vista metallurgico.

Nella parte inferiore del reattore si raggiunge il massimo grado di conversione a metallo: il gas, appena immesso e preriscaldato, possiede il più alto potere riducente e consente il completamento della conversione degli ossidi residui in ferro metallico. Dal punto di vista operativo, questa zona è cruciale per garantire un'elevata conversione finale a metallo e una qualità omogenea del preridotto in uscita. Lo schema riportato in Figura 2.5 sintetizza tale articolazione operativa, evidenziando le diverse zone del reattore e le trasformazioni predominanti in ciascuna di esse.

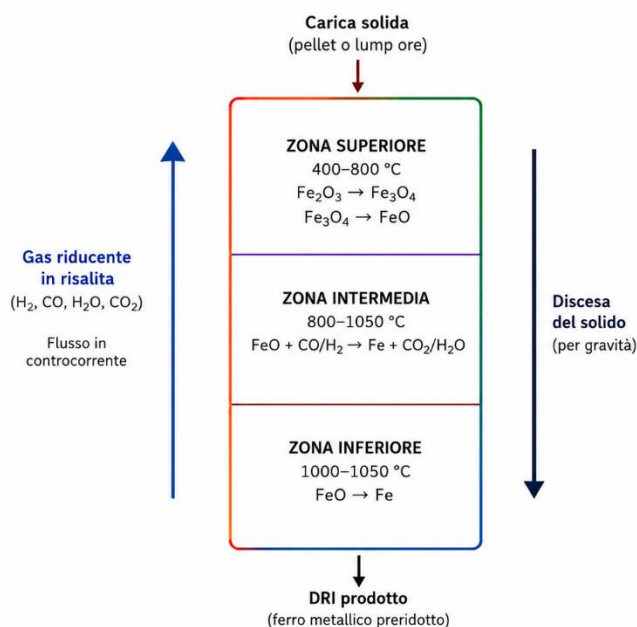


Figura 2.5: Schema funzionale semplificato del reattore a tino per la produzione di DRI.

2.4 Caratterizzazione chimico-fisica del preridotto DRI/HBI

Il preridotto DRI, grazie alle sue proprietà chimico-fisiche, è oggi ampiamente utilizzato nella carica del forno fusorio ad arco elettrico. Dal punto di vista metallurgico esso si configura come un ferro spugnoso caratterizzato da elevata porosità interna, microstruttura eterogenea e composizione chimica controllata dal processo di riduzione. Quando sottoposto a compattazione a caldo, il DRI assume la forma di Hot Briquetted Iron (HBI), con struttura più densa e maggiore stabilità meccanica.

La composizione chimica tipica del preridotto è costituita da una frazione elevata di ferro totale, generalmente compresa tra 88 e 94%, con grado di conversione a metallo compreso tra 90 e 95%. Una parte del ferro rimane sotto forma di ossidi residui, prevalentemente wüstite (FeO), in percentuali variabili tra 2 e 8% a seconda del grado di riduzione raggiunto. Sono inoltre presenti ganghe minerali (SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO) derivate dal minerale originario, normalmente in quantità complessive inferiori al 4–5%. Nel caso di preridotto carburato può essere presente carbonio in percentuali dell'ordine dell'1–3% [7]. Le principali grandezze compositive del preridotto sono riassunte in Tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Composizione chimica tipica del preridotto DRI. Gli intervalli riportati sono indicativi e possono variare in funzione della qualità del minerale alimentato e delle condizioni operative del processo [7].

Componente	Intervallo tipico (% in massa)
Ferro totale (Fe)	88–94
Ferro metallico (Fe^0)	85–92
FeO residuo	2–8
Carbonio totale	0–3
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}$	3–5
Elementi residui (Cu, Sn, Ni, Cr)	Tracce

Dal punto di vista chimico, il preridotto presenta un'elevata omogeneità compositiva, poiché la sua composizione è strettamente correlata alla qualità del minerale di partenza e ai parametri di controllo del processo di riduzione. Ciò consente di limitare la presenza e la variabilità degli elementi residui indesiderati, quali Cu, Sn, Zn, Pb e As, garantendo una maggiore prevedibilità del comportamento metallurgico in forno e una migliore riproducibilità delle caratteristiche finali dell'acciaio prodotto rispetto alla produzione con solo rottame selezionato [8].

Un ulteriore elemento distintivo del DRI è la sua struttura altamente porosa. Durante la riduzione allo stato solido, la progressiva rimozione dell'ossigeno dalla matrice ossidica comporta una riorganizzazione strutturale del pellet, con formazione di una rete di micropori interconnessi distribuiti nella matrice metallica. Questa morfologia spugnosa è il risultato della progressiva conversione degli ossidi in ferro metallico e determina un'elevata superficie specifica interna. Tale caratteristica assume rilevanza nel successivo impiego in forno elettrico ad arco, poiché può favorire un riscaldamento più rapido del materiale, una migliore interazione con il bagno metallico e una più efficace partecipazione del DRI alle reazioni con la scoria durante la fusione.

Il DRI può inoltre essere sottoposto a un processo di compattazione a caldo, dal quale si ottiene l'Hot Briquetted Iron (HBI). In questo caso, la chiusura parziale dei pori e la deformazione plastica dei grani metallici determinano un aumento della densità apparente e una riduzione della superficie specifica esposta. La maggiore densità dell'HBI migliora la resistenza meccanica del materiale, ne riduce la tendenza alla degradazione durante movimentazione, trasporto e stoccaggio e limita la reattività superficiale rispetto al DRI non compattato [8].

2.5 Confronto chimico-fisico tra preridotto, rottame e ghisa

Nella carica del forno elettrico, preridotto, rottame e ghisa presentano caratteristiche profondamente differenti sotto il profilo chimico e strutturale. Il preridotto si distingue per una composizione relativamente controllata e per un basso contenuto di elementi residui, in quanto deriva direttamente dal minerale e non da cicli ripetuti di rifusione. Il rottame, al contrario, presenta una marcata variabilità compositiva legata alla provenienza e può contenere elementi residui, quali Cu, Sn e Zn, difficilmente eliminabili nelle successive fasi di affinazione. La ghisa, prodotta in altoforno, è costituita da ferro già ridotto e presenta un contenuto di carbonio tipicamente compreso tra 3,5 e 4,5%, risultando, quindi, fortemente arricchita in carbonio rispetto alle altre due tipologie di carica.

Anche sul piano strutturale emergono differenze significative. Il preridotto, nella forma DRI, mantiene una struttura porosa e spugnosa, con densità apparente ridotta; il rottame è costituito da frammenti metallici compatti, con morfologia irregolare e assenza di porosità intrinseca significativa; la ghisa si presenta invece come materiale massivo e denso, caratterizzato da una microstruttura tipica delle leghe ferro-carbonio ad alto tenore di carbonio.

Tabella 2.2 – Confronto chimico-fisico tra preridotto, rottame e ghisa. Gli intervalli riportati sono indicativi e sono stati elaborati sulla base dei valori tipici di composizione e proprietà delle principali cariche ferrose impiegate in EAF [7,8].

Parametro	Preridotto (DRI/HBI)	Rottame	Ghisa
Ferro totale	88–94%	92–98%	92–94%
Carbonio	0–3%	Variabile	3,5–4,5%
Ossidi residui	2–8% FeO	Trascurabili	Assenti
Porosità	Elevata	Bassa	Nulla
Variabilità compositiva	Bassa	Elevata	Bassa
Densità apparente	5,0–5,8 g/cm ³	~7,5–7,8 g/cm ³	~7,2–7,6 g/cm ³

Le differenze riportate in Tabella 2.2 assumono particolare rilevanza nella successiva fase di fusione in forno elettrico, poiché influenzano il fabbisogno energetico, la qualità chimica del bagno metallico e la gestione delle reazioni tra metallo, scoria e gas.

2.6 Tipologie di preridotto commerciali

Nel panorama industriale attuale, il preridotto non è commercializzato come un prodotto unico, ma in forme differenti, sviluppate per rispondere a esigenze operative, logistiche ed energetiche specifiche. Le principali tipologie diffuse su scala internazionale sono il DRI freddo, o Cold Direct Reduced Iron (CDRI), il DRI caldo, o Hot Direct Reduced Iron (HDRI), e l'Hot Briquetted Iron (HBI). Sebbene la matrice metallurgica di base sia la medesima, costituita da ferro metallico ottenuto per riduzione allo stato solido, le modalità di scarico dal reattore, il trattamento termico successivo e la gestione del materiale determinano differenze sostanziali in termini di impiego, movimentazione e integrazione con il forno elettrico. Le tre configurazioni commerciali sono rappresentate in Figura 2.7.

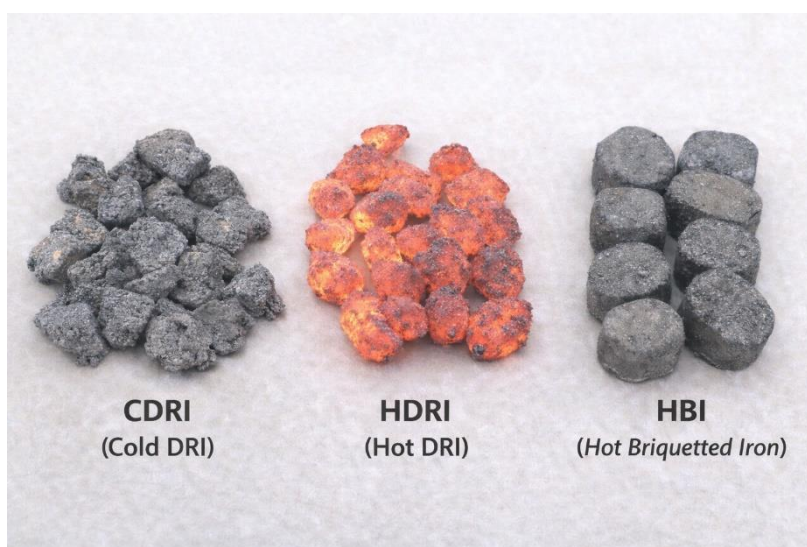


Figura 2.6: Rappresentazione schematica delle principali forme commerciali del preridotto: CDRI, HDRI e HBI. Figura generata con il supporto di IA.

Il CDRI rappresenta la forma più semplice dal punto di vista impiantistico: al termine del processo di riduzione, il materiale viene raffreddato fino a temperatura ambiente prima dello scarico e può essere stoccato o trasferito all'acciaieria. L'HDRI viene invece trasferito al forno elettrico mantenendo una temperatura elevata, così da sfruttare il calore sensibile accumulato durante la riduzione e ridurre il fabbisogno elettrico dell'EAF; tale configurazione richiede tuttavia un'elevata integrazione tra unità DRI e acciaieria, oltre a sistemi adeguati alla movimentazione di materiali ad alta temperatura. L'HBI, infine, è ottenuto mediante compattazione a caldo ed è destinato soprattutto a contesti in cui siano richiesti stoccaggio prolungato, maggiore stabilità del prodotto e trasporto su lunga distanza.

La scelta della tipologia di preridotto dipende dall'assetto impiantistico, dalla strategia logistica e dagli obiettivi energetici dell'operatore, confermando come il DRI non sia soltanto una materia prima metallurgica, ma anche un prodotto industriale il cui valore è strettamente connesso alla configurazione del sistema produttivo in cui viene inserito.

3. Il forno ad arco elettrico – EAF

3.1 Struttura e funzionamento del forno ad arco elettrico

Il forno elettrico ad arco-EAF costituisce l'unità fusoria centrale nel ciclo siderurgico basato su rottame e preridotto. Il principio di funzionamento si fonda sulla generazione di un arco elettrico tra elettrodi in grafite e carica metallica, con sviluppo di temperature estremamente elevate nella zona dell'arco, tali da consentire la rapida fusione del materiale e l'avvio delle reazioni di affinazione.

Sul piano funzionale, l'EAF può essere interpretato come un impianto integrato articolato in quattro sottosistemi principali: l'unità fusoria, nella quale avvengono la fusione della carica, la formazione del bagno metallico e la gestione della scoria; l'apparato elettrico di potenza e regolazione dell'arco; il sistema di alimentazione e dosaggio dei materiali metallici, delle ferroleghe e dei fondenti; e l'insieme dei dispositivi per l'apporto di energia chimica, basato sull'impiego controllato di ossigeno, bruciatori e iniezione di carbonio. La configurazione generale del forno è rappresentata in Figura 3.1

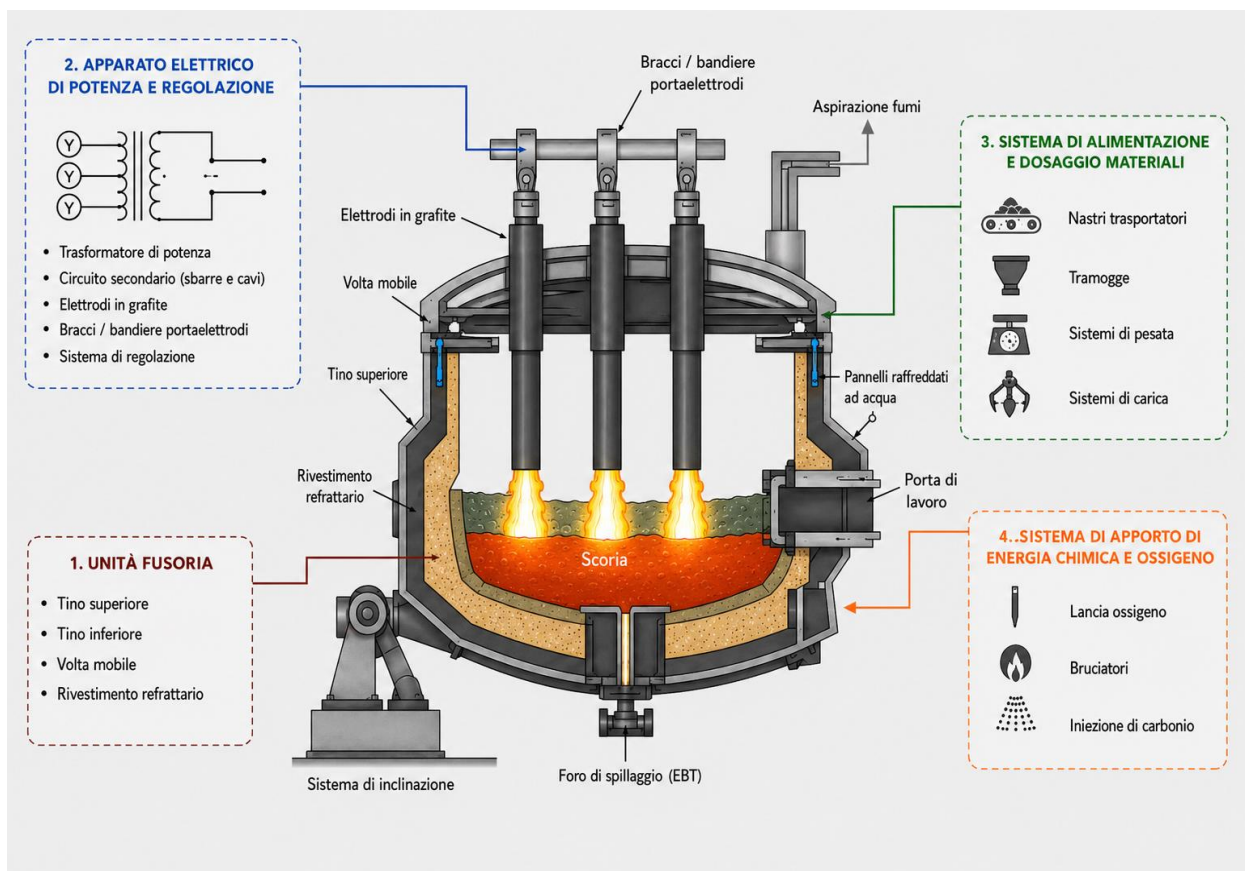


Figura 3.1: Schema tecnico semplificato del forno elettrico ad arco con indicazione delle principali componenti strutturali, figura elaborata tramite IA.

3.1.1 Unità fusoria

Il forno fusorio costituisce il nucleo strutturale dell'EAF ed è l'unità nella quale avvengono la fusione della carica metallica, la formazione del bagno liquido e l'interazione con la scoria. Dal punto di vista costruttivo, esso è costituito da una struttura cilindrica in carpenteria metallica, generalmente suddivisa in tino inferiore, tino superiore e volta mobile.

Il tino inferiore rappresenta la parte più sollecitata del forno, poiché contiene il bagno metallico e la scoria durante le fasi di fusione e affinazione. La struttura esterna è realizzata in acciaio di elevato spessore, mentre la superficie interna è protetta da un rivestimento refrattario multistrato, progettato per resistere alle elevate temperature, all'erosione meccanica, alla corrosione chimica della scoria e agli shock termici ciclici. Tale rivestimento può essere distinto in uno strato di sicurezza, posto a protezione della carpenteria metallica, e in uno strato di usura, direttamente esposto al contatto con acciaio liquido e scoria.

Lo strato di sicurezza svolge prevalentemente una funzione isolante e strutturale ed è generalmente costituito da materiali refrattari ad elevata stabilità termomeccanica, quali refrattari a base di allumina o magnesite. Lo strato di usura, direttamente a contatto con acciaio liquido e scoria, è generalmente costituito da refrattari basici ad alto contenuto di MgO , selezionati per la loro resistenza alle elevate temperature, all'attacco chimico della scoria e all'usura termo-meccanica.

Il tino superiore è esposto principalmente all'irraggiamento dell'arco elettrico, all'azione dei gas caldi e alle sollecitazioni associate alla movimentazione della carica. Nelle configurazioni moderne, questa parte del forno è frequentemente dotata di pannelli raffreddati ad acqua, costituiti da elementi tubolari o pannelli modulari, che consentono di limitare la temperatura delle strutture metalliche e di ridurre il consumo di refrattari nelle aree più critiche.

La volta mobile chiude superiormente il forno e ospita il passaggio degli elettrodi in grafite, generalmente disposti secondo configurazione triangolare nei forni trifase. Essa è normalmente costituita da una porzione centrale refrattaria, attraversata dagli elettrodi, e da una porzione periferica raffreddata ad acqua. La possibilità di sollevare e ruotare la volta consente le operazioni di carica dall'alto, mentre appositi condotti permettono l'aspirazione dei fumi prodotti durante il ciclo di fusione.

L'intero forno è installato su una struttura basculante, che permette l'inclinazione controllata dell'unità fusoria per lo spillaggio dell'acciaio liquido e per l'evacuazione della scoria. Tale configurazione consente di gestire in modo sequenziale le principali fasi operative del ciclo EAF, garantendo al tempo stesso accessibilità, sicurezza impiantistica e continuità del processo.

3.1.2 Generatore di potenza e sistemi di regolazione elettrica

L'impianto elettrico costituisce il sistema attraverso il quale l'energia elettrica viene fornita al forno e trasformata in calore mediante la formazione dell'arco tra gli elettrodi in grafite e la carica metallica. Esso comprende principalmente il trasformatore di potenza, il circuito secondario, i bracci portaelettrodi, gli elettrodi in grafite e il sistema di regolazione dell'arco.

Il trasformatore rappresenta l'elemento principale dell'impianto elettrico, poiché consente di adattare l'energia proveniente dalla rete alle condizioni richieste dal forno. In particolare, esso riduce la tensione primaria a valori idonei alla generazione dell'arco e rende disponibili correnti di elevata intensità nel circuito secondario. La possibilità di variare la tensione secondaria consente di adeguare il funzionamento del forno alle diverse fasi del ciclo operativo, nelle quali cambiano le condizioni della carica, la stabilità dell'arco e il grado di fusione del materiale.

Dal trasformatore, la corrente viene trasferita al forno attraverso il circuito secondario, costituito da sbarre, cavi flessibili raffreddati ad acqua e bracci porta elettrodi. Questi ultimi svolgono una duplice funzione: da un lato sostengono e movimentano gli elettrodi in grafite, garantendone il corretto posizionamento rispetto alla carica e al bagno metallico; dall'altro, attraverso componenti conduttivi generalmente realizzati in rame e raffreddati ad acqua, assicurano il passaggio della corrente elettrica verso gli elettrodi. Poiché nel circuito secondario circolano correnti molto elevate, i suoi componenti devono essere progettati per limitare le perdite elettriche, contenere il riscaldamento e resistere alle sollecitazioni meccaniche ed elettrodinamiche generate durante il funzionamento.

La regolazione dell'arco è affidata a un sistema automatico di movimentazione degli elettrodi, che ne modifica la posizione in funzione delle condizioni operative del forno, in modo da rendere stabile e uniforme il trasferimento di energia alla carica metallica e al bagno liquido.

3.1.3 Sistemi di alimentazione e dosaggio materiali

L'impianto di gestione delle ferroleghie e dei materiali ausiliari comprende l'insieme delle apparecchiature dedicate allo stoccaggio, al dosaggio e al trasferimento controllato dei materiali solidi impiegati durante il ciclo EAF. Esso è generalmente costituito da silos o tramogge di accumulo, sistemi di estrazione, dispositivi di pesatura automatica e linee di trasporto meccanizzate, quali nastri trasportatori, coclee o sistemi pneumatici, che convogliano i materiali verso il forno oppure verso la siviera nelle successive fasi di affinazione.

Le linee di alimentazione sono normalmente integrate con il sistema di supervisione dell'impianto, che consente di selezionare il materiale da introdurre, impostarne la quantità e controllarne il momento di aggiunta in funzione della fase del ciclo operativo. Questa configurazione permette una gestione ordinata delle ferroleghie, dei fondenti e degli altri materiali ausiliari, garantendo continuità di alimentazione e ripetibilità delle operazioni.

Poiché la movimentazione di materiali granulari o polverulenti può generare dispersioni, l'impianto è spesso dotato di sistemi di captazione e filtrazione delle polveri localizzati in corrispondenza dei punti di scarico, trasferimento e dosaggio. Tali dispositivi consentono di limitare le emissioni diffuse, recuperare parte del materiale trascinato e mantenere più pulite e sicure le aree operative.

3.1.4 Sistema di apporto energia chimica e ossigeno

Il sistema di apporto di energia chimica e ossigeno comprende l'insieme dei dispositivi installati sul forno per l'introduzione controllata di ossigeno, combustibili gassosi e, quando previsto,

materiali carboniosi. Tali dispositivi sono generalmente collocati sulle pareti del tino superiore o in prossimità delle zone operative maggiormente interessate dalla fusione della carica e dall'interazione con il bagno metallico.

Dal punto di vista impiantistico, il sistema può includere bruciatori ossi-combustibili, lance a ossigeno, iniettori di carbonio, linee di alimentazione dei gas, valvole di regolazione e strumenti di controllo delle portate. Nei forni moderni, alcune di queste funzioni possono essere integrate in dispositivi combinati, in grado di operare sia come bruciatori durante le prime fasi del ciclo sia come sistemi di insufflazione nelle fasi successive.

L'ossigeno può essere prodotto mediante unità dedicate di separazione dell'aria oppure fornito da reti centralizzate, per poi essere distribuito al forno attraverso una rete di tubazioni e organi di controllo. La configurazione del sistema è progettata per garantire continuità di alimentazione, sicurezza operativa e regolazione delle portate in funzione delle diverse fasi del ciclo EAF.

3.2 Ciclo operativo del forno elettrico ad arco

Il funzionamento del forno elettrico ad arco non è continuo, ma organizzato secondo un ciclo produttivo ripetitivo, nel quale i diversi sottosistemi descritti in precedenza intervengono in momenti differenti. Le principali fasi operative comprendono la carica del materiale metallico, la fusione, l'affinazione del bagno e lo spillaggio dell'acciaio liquido. Ciascuna fase è caratterizzata da specifiche esigenze energetiche, metallurgiche e operative, che richiedono il coordinamento tra potenza elettrica, apporto di ossigeno, aggiunte di materiali e movimentazioni meccaniche.

La configurazione temporale tipica del ciclo di lavoro è schematizzata in Figura 3.2.

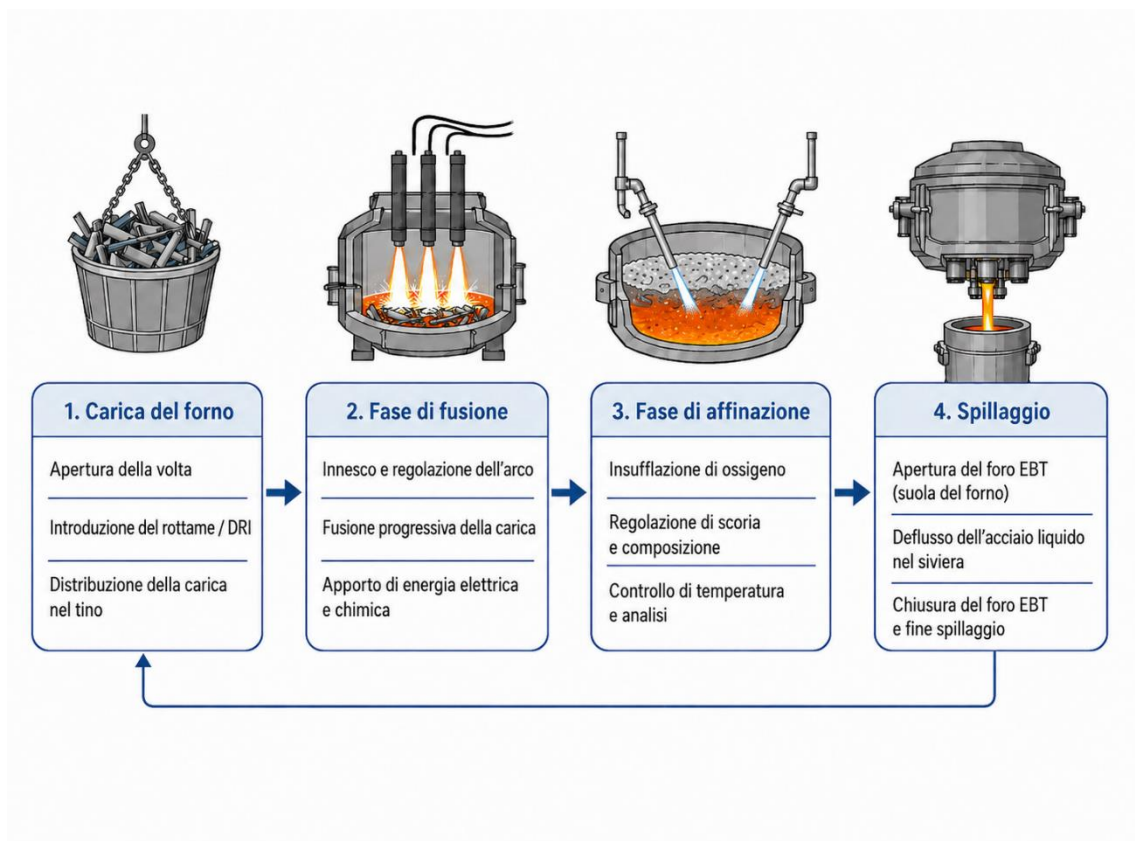


Figura 3.2: Schema qualitativo delle principali fasi operative del ciclo EAF: carica del forno, fusione, affinazione e spillaggio mediante foro eccentrico di fondo. Figura elaborata tramite IA.

3.2.1 Carica del forno

Il ciclo operativo del forno elettrico ad arco ha inizio con l'apertura della volta e l'introduzione della carica metallica nel tino mediante cesta movimentata da carroponte. Nei moderni impianti EAF, la fase di carica non si limita al semplice trasferimento del materiale nel forno, ma comprende il confezionamento della cesta secondo criteri definiti in funzione della ricetta metallurgica, della tipologia di acciaio da produrre e del mix di materiali disponibili. Il rottame viene generalmente classificato in base a pezzatura, densità apparente e qualità chimica, distinguendo ad esempio tra rottame pesante, rottame leggero, rottame frantumato e rottame selezionato a basso contenuto di elementi residui.

La disposizione del materiale all'interno della cesta rappresenta un aspetto rilevante per la regolarità delle fasi successive. Il rottame più pesante e compatto viene normalmente collocato nella parte inferiore, in modo da garantire stabilità meccanica al momento dello scarico nel tino, mentre il materiale più leggero o voluminoso viene disposto superiormente per favorire una fusione progressiva e ridurre il rischio di proiezioni o cedimenti improvvisi della carica. Una corretta distribuzione del rottame consente inoltre di limitare la formazione di ponti solidi, migliorare la penetrazione dell'arco e ridurre i tempi iniziali di perforazione della carica.

Nel caso di cariche miste, al rottame possono essere affiancati preridotto o HBI. Il preridotto può essere introdotto insieme al rottame oppure alimentato in modo continuo durante la fusione, in funzione della configurazione del forno e della strategia operativa adottata.

Nei forni di grande capacità, il ciclo può prevedere due o più cestate successive, con riapertura della volta e completamento della carica dopo una prima fase di fusione parziale. La fase di carica si conclude con la chiusura della volta e il riposizionamento degli elettrodi al centro di essa. Questi vengono quindi abbassati progressivamente fino all'innesco dell'arco, che segna l'avvio effettivo della fase di fusione.

3.2.2 Fase di fusione

La fase di fusione è caratterizzata dal progressivo riscaldamento e dalla fusione della carica solida e rappresenta uno dei momenti a maggiore richiesta energetica del ciclo EAF. In questa fase può essere adottata una regolazione dell'arco orientata a massimizzare il trasferimento di energia alla carica solida, sfruttando anche l'effetto schermante del rottame nei confronti delle pareti del tino superiore e dei pannelli raffreddati.

Nelle fasi iniziali, gli elettrodi tendono a perforare la carica, favorendo la formazione di cavità e canali di penetrazione attraverso cui l'arco può svilupparsi in modo progressivamente più stabile. Tale comportamento consente di concentrare l'apporto energetico all'interno della massa metallica e di ridurre il rischio di instabilità dovute a cedimenti improvvisi del materiale. La progressiva fusione della carica porta alla formazione dei primi volumi di metallo liquido, che si raccolgono sul fondo del tino dando origine al cosiddetto piede liquido.

Parallelamente al contributo dell'arco elettrico, i bruciatori ossi-combustibili e gli altri sistemi di apporto di energia chimica possono fornire calore supplementare nelle zone più fredde del forno e nelle aree non direttamente investite dall'arco. Questo apporto favorisce il riscaldamento del rottame periferico, accelera la fusione della carica e contribuisce a contenere il consumo specifico di energia elettrica.

Con l'aumentare della frazione liquida e l'ampliarsi del bagno metallico, il processo evolve verso una condizione più stabile. La presenza del piede liquido e la progressiva formazione della scoria consentono una migliore distribuzione del calore e attenuano le oscillazioni dell'arco, creando le condizioni per il passaggio alla successiva fase di affinazione.

3.2.3 Fase di affinazione

Una volta completata la fusione della carica e stabilizzato il bagno metallico, il processo entra nella fase di affinazione, finalizzata al raggiungimento della composizione chimica e della temperatura richieste per il grado di acciaio da produrre. In questa fase l'EAF non svolge soltanto una funzione fusoria, ma consente anche una prima regolazione metallurgica del bagno attraverso il controllo dell'ossigeno, della scoria e delle aggiunte correttive.

L'ossigeno viene insufflato nel bagno mediante lance o iniettori ad alta velocità con una duplice funzione energetica e metallurgica. Da un lato, le reazioni di ossidazione degli elementi presenti

nel metallo liquido sono generalmente esotermiche e contribuiscono quindi al bilancio termico del forno; dall'altro, consentono di modulare la composizione chimica del bagno, favorendo la diminuzione del tenore di elementi quali carbonio, silicio, manganese e, quando necessario, fosforo. Nel caso del carbonio, l'ossidazione porta alla formazione di monossido di carbonio, il cui sviluppo favorisce l'agitazione del bagno e contribuisce alla formazione della scoria schiumosa, migliorando la copertura dell'arco e l'efficienza del trasferimento energetico [8].

Parallelamente vengono effettuate aggiunte di ferroleghe e correttivi di scoria. Le ferroleghe consentono di riportare la composizione dell'acciaio entro i valori richiesti dalla specifica produttiva, mentre calce, dolomite e altri fondenti permettono di regolare la basicità e le proprietà della scoria. Quest'ultima deve essere in grado di inglobare gli ossidi formati durante l'affinazione e contribuire al controllo delle impurità, oltre a garantire adeguata protezione del bagno metallico.

Il controllo della temperatura e della composizione del bagno avviene mediante la modulazione coordinata della potenza elettrica, dell'apporto di ossigeno e delle aggiunte solide, supportata da misure periodiche e campionamenti del metallo liquido prima dello spillaggio.

3.2.4 Spillaggio

Raggiunti i parametri metallurgici richiesti in termini di composizione chimica e temperatura, il forno viene predisposto per lo spillaggio dell'acciaio liquido in siviera. Lo spillaggio avviene generalmente attraverso un foro eccentrico di fondo, EBT, che consente il deflusso controllato del metallo e favorisce una migliore separazione tra acciaio e scoria rispetto ai sistemi di spillaggio tradizionali.

Durante questa fase è fondamentale limitare il trascinamento della scoria in siviera, poiché la sua presenza può influenzare negativamente le successive operazioni di metallurgia secondaria e la qualità finale dell'acciaio. Al termine dello spillaggio, il forno viene riportato nelle condizioni operative necessarie alla gestione della scoria residua e alla preparazione della carica successiva, completando così il ciclo operativo.

3.3 Bilanci di massa ed energia del processo di fusione

L'analisi dei bilanci di massa ed energia del forno elettrico ad arco costituisce uno strumento utile per comprendere, in termini quantitativi, i principali fenomeni che governano il processo fusorio. Nel presente lavoro, non essendo disponibili dati sperimentali di impianto, i bilanci sono impostati in forma semplificata, con lo scopo di evidenziare i principali contributi di massa ed energia associati alla fusione in EAF e, in particolare, l'effetto dell'introduzione di DRI nella carica [3].

Il forno può essere trattato come un volume di controllo riferito al singolo ciclo di colata, nel quale valgono i principi di conservazione della massa e dell'energia. In tale approccio, gli ingressi comprendono la carica metallica, i fondenti, gli additivi, i gas di processo e l'energia fornita al sistema; le uscite includono acciaio liquido, scoria, fumi, polveri e perdite termiche.

3.3.1 Bilancio di massa del Fe nel forno EAF con DRI

Il bilancio di massa complessivo per ciclo (3.1) può essere espresso in forma generale come:

$$M_{in} = M_{out} + \Delta M \quad (3.1)$$

Dove:

- M_{in} rappresenta la massa totale introdotta nel forno (carica metallica, fondenti, additivi, gas di processo ed elettrodi);
- M_{out} rappresenta la massa totale in uscita (acciaio liquido, scoria, polveri, fumi e perdite varie);
- ΔM rappresenta l'eventuale accumulo o variazione interna del sistema (hot heel, scoria residua).

Poiché il ferro costituisce l'elemento principale del processo siderurgico in EAF, il suo bilancio assume un ruolo centrale nell'analisi tecnica della fusione, soprattutto quando la carica comprende preridotto. In forma semplificata, il bilancio del ferro per singolo ciclo (3.2) può essere espresso come:

$$Fe_{in} = Fe_{acciaio} + Fe_{scoria} + Fe_{polveri} + \Delta Fe_{hot\ heel} \quad (3.2)$$

Dove:

- Fe_{in} rappresenta il ferro totale introdotto nel forno con rottame, preridotto e ferroleghe;
- $Fe_{acciaio}$ rappresenta il ferro effettivamente recuperato nell'acciaio liquido spillato;
- Fe_{scoria} indica la quota di ferro trattenuta nella scoria, prevalentemente sotto forma di FeO;
- $Fe_{polveri}$ tiene conto delle perdite di ferro per trascinamento nei sistemi di aspirazione e abbattimento fumi;
- $\Delta Fe_{hot\ heel}$ rappresenta la variazione del ferro contenuto nel bagno residuo tra un ciclo e il successivo.

Nel caso in cui la quantità di hot heel sia assunta costante tra un ciclo e il successivo, il termine $\Delta Fe_{hot\ heel}$ può essere trascurato.

Per una carica costituita esclusivamente da rottame, il ferro in ingresso coincide sostanzialmente con ferro già in forma metallica. Le principali perdite sono quindi associate all'ossidazione del ferro nel bagno, con formazione di FeO in scoria, e ai trascinamenti meccanici di gocce metalliche nelle polveri.

La situazione si modifica quando nella carica è presente DRI. In questo caso, il ferro introdotto con il preridotto può essere distinto (3.3) in una quota già metallica e in una quota ancora legata agli ossidi residui:

$$Fe_{DRI} = Fe_O + Fe_{FeO} \quad (3.3)$$

Dove Fe_O è la frazione di ferro metallico e Fe_{FeO} la frazione presente come ossido. Il grado di conversione metallica del preridotto (3.4) è definito come:

$$M = \left(\frac{FeO}{Fe_{tot}} \right) * 100 \quad (3.4)$$

dove:

- Fe_{tot} rappresenta il ferro totale contenuto nel preridotto.

Il grado di metallizzazione esprime quindi la percentuale di ferro già ridotto rispetto al ferro complessivamente introdotto con il DRI. La presenza Fe_{FeO} implica che una parte del ferro introdotto non sia immediatamente disponibile come metallo, ma debba essere ulteriormente ridotta nel bagno liquido. Tale riduzione (3.5) può essere schematizzata mediante la reazione:



Qualora tale riduzione non sia completa, una quota di ferro permane nella scoria come FeO, incrementando il termine Fe_{scoria} e penalizzando la resa metallurgica.

Questo aspetto è particolarmente rilevante nel caso di cariche contenenti DRI, poiché il grado di conversione metallica del preridotto è inferiore al 100% e una frazione del ferro viene quindi introdotta nel forno ancora legata agli ossidi residui. Un basso grado di conversione metallica comporta una maggiore quantità di FeO da ridurre nel forno elettrico; per questo motivo, i migliori risultati operativi sono generalmente associati a valori di conversione metallica del DRI compresi indicativamente tra 94 e 96% [3].

L'introduzione di DRI modifica, inoltre, il bilancio del ferro anche attraverso l'aumento della massa di scoria, dovuto alla presenza di ganga e ossidi residui nel preridotto. L'incremento della fase scorificante può determinare maggiori perdite di ferro, sia perché una parte del FeO può rimanere disciolta nella scoria, sia perché un maggiore volume di scoria aumenta la quantità complessiva di ferro potenzialmente trattenuta o trascinata durante la sua gestione.

L'effetto della quota di DRI sulla resa metallica è evidenziato anche da simulazioni condotte su un EAF alimentato con miscele variabili di rottame e preridotto: all'aumentare della percentuale di DRI nella carica, la resa tende a ridursi, mentre aumentano i contributi legati alla riduzione del FeO residuo e alla formazione della scoria. In un caso studio relativo a un forno alimentato con 90% DRI e 10% rottame, con DRI caratterizzato da circa 93% di metallizzazione e 8,3% di FeO, il modello calcola una resa metallica pari all'87,5% e una massa specifica di scoria pari a 119 kg/t [3]. Andamento mostrato in Figura 3.3.

Tali valori non devono essere assunti come universali, poiché dipendono dalla composizione del DRI, dal grado di metallizzazione, dal contenuto di ganga e dalle condizioni operative del forno. Essi confermano, tuttavia, il legame tra FeO residuo, aumento della massa di scoria e riduzione della resa metallurgica del ferro. In termini generali, la resa aumenta al crescere della conversione metallica del preridotto e tende ad avvicinarsi ai valori ottenibili con rottame di buona qualità quando la quota di ferro introdotta come ossido diventa limitata.

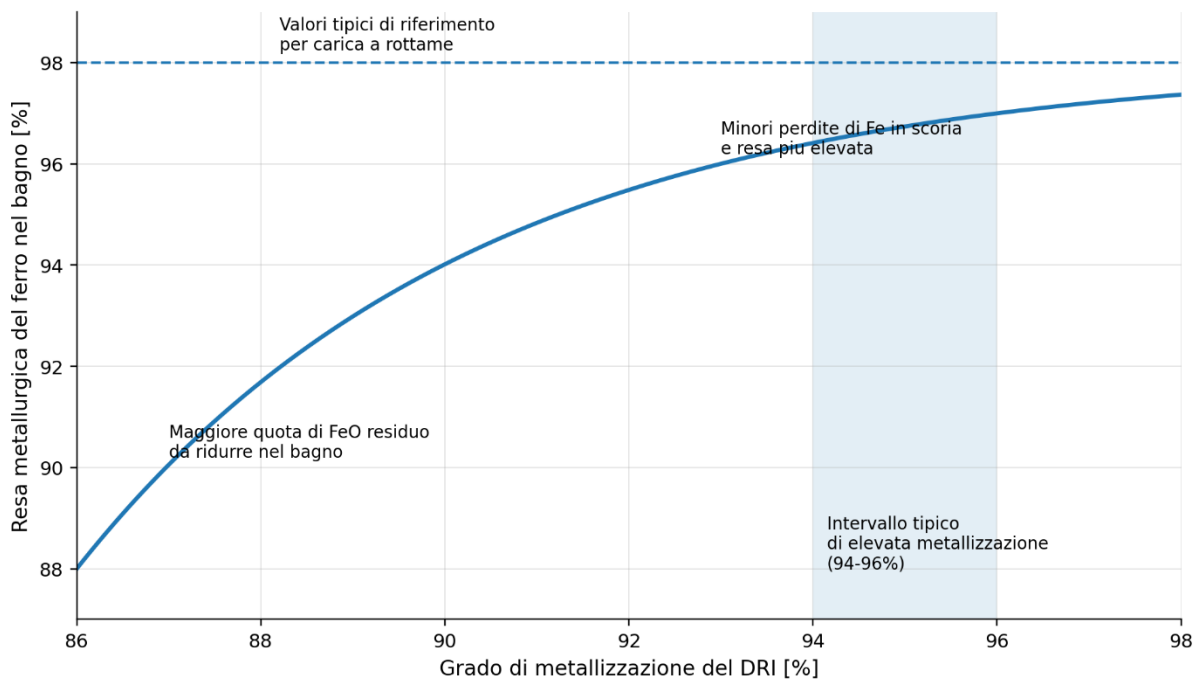


Figura 3.3: Rappresentazione qualitativa dell'effetto del grado di metallizzazione del preridotto sulla resa del ferro nel bagno metallico. All'aumentare del grado di conversione metallica diminuisce la quota di FeO residuo da ridurre nel forno, con conseguente riduzione delle perdite di ferro in scoria e tendenza della resa ad avvicinarsi ai valori tipici di una carica a rottame. Schema elaborato dall'autore sulla base delle considerazioni riportate in [3].

3.3.2 Bilancio energetico del forno con DRI

Il bilancio energetico del forno elettrico ad arco può essere impostato considerando i principali contributi energetici in ingresso e in uscita dal volume di controllo. In forma semplificata, riferita al singolo ciclo di colata, esso può essere espresso come:

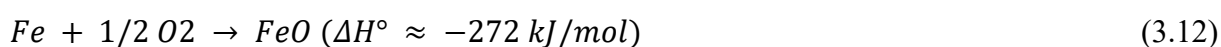
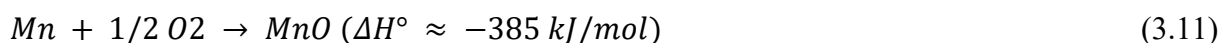
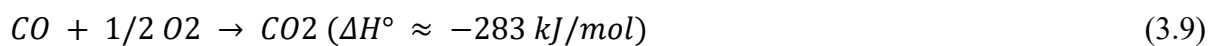
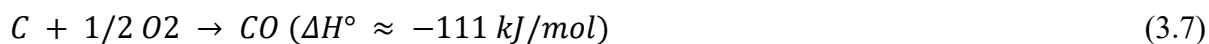
$$E_{el} + E_{chimica} + H_{in} = H_{acciaio} + H_{scoria} + H_{fumi} + E_{endo} + E_{perdite} \quad (3.6)$$

Dove:

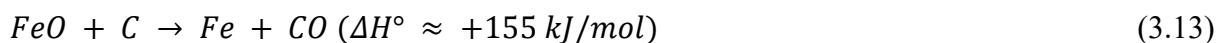
- E_{el} rappresenta l'energia elettrica fornita al bagno mediante l'arco;
- $E_{chimica}$ rappresenta l'energia chimica sviluppata dalle reazioni esotermiche;
- H_{in} rappresenta l'entalpia dei materiali introdotti (rilevante ad esempio in presenza di ghisa liquida o HDRI);
- $H_{acciaio}$ e H_{scoria} rappresentano le entalpie dell'acciaio e della scoria liquide allo spillaggio;
- H_{fumi} rappresenta l'entalpia dei gas esausti;
- E_{endo} raccoglie i contributi endotermici di reazione e trasformazione;
- $E_{perdite}$ include le dispersioni termiche verso l'ambiente e i sistemi di raffreddamento.

Tra i principali contributi esotermici che alimentano il termine $E_{chimica}$ rientrano le reazioni di ossidazione degli elementi presenti nel bagno metallico e nella fase gassosa. In forma

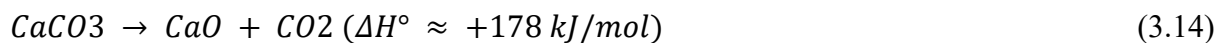
semplificata, le principali reazioni (3.7) – (3.12) possono essere rappresentate come segue; i valori di ΔH° sono riferiti alle condizioni standard, presi dalle tabelle termochimiche NIST-JANAF, e devono quindi essere considerati indicativi rispetto alle condizioni reali del forno [15]:



I principali contributi endotermici, raccolti nel termine E_{endo} , comprendono invece le reazioni e le trasformazioni che assorbono energia. Nel caso di cariche contenenti DRI, assume particolare rilevanza la riduzione del FeO residuo mediante carbonio (3.13):



Un ulteriore contributo endotermico può derivare dalla decomposizione del carbonato di calcio (3.14), qualora vengano impiegati fondenti carbonatici:



A tali contributi devono essere aggiunti il riscaldamento e la fusione del rottame o del preridotto dalla temperatura di carica fino alla temperatura di spillaggio, nonché il riscaldamento e la fusione degli ossidi di ganga e dei fondenti.

L'introduzione del DRI modifica il bilancio energetico rispetto a una carica costituita esclusivamente da rottame. La presenza di FeO residuo incrementa il termine E_{endo} poiché una parte del ferro deve essere ulteriormente ridotta nel bagno liquido prima di contribuire alla massa metallica finale. Inoltre, la ganga contenuta nel preridotto aumenta la quantità di ossidi da riscaldare e fondere, con conseguente incremento dell'entalpia associata alla scoria, H_{scoria} . Per questo motivo, a parità di altre condizioni operative, l'aumento della quota di DRI nella carica tende ad accrescere la richiesta energetica complessiva del forno, soprattutto quando il grado di conversione metallica è basso o il contenuto di ganga è elevato [3].

Le simulazioni riportate per forni EAF alimentati con miscele rottame-DRI mostrano che l'incremento della percentuale di DRI può comportare un aumento del fabbisogno di energia elettrica, legato alla riduzione endotermica del FeO, alla maggiore massa di scoria e alla minore resa metallica rispetto a una carica a rottame. Tale effetto può essere parzialmente compensato dall'apporto di energia chimica, in particolare quando il DRI contiene carbonio disponibile per l'ossidazione e per la generazione di CO nel bagno. Di conseguenza, l'impatto energetico del DRI non dipende solo dalla sua percentuale nella carica, ma anche dal grado di conversione

metallica, dal contenuto di carbonio, dalla quantità di FeO residuo e dalla composizione della ganga [3].

3.4 Ruolo del DRI sull'operatività nell'EAF

L'impiego del preridotto nella carica del forno elettrico ad arco modifica in modo sostanziale l'equilibrio termico, chimico e operativo del processo fusorio rispetto a una configurazione basata esclusivamente su rottame. Il DRI non rappresenta, infatti, un semplice sostituto del rottame, ma introduce nel sistema una diversa distribuzione delle fasi, costituite da ferro metallico, ossidi residui e ganga, che si riflette direttamente sulle dinamiche di fusione, sulla formazione e gestione della scoria e sull'evoluzione compositiva del bagno. Studi di processo sull'impiego del DRI in EAF evidenziano come elevate percentuali di preridotto richiedano pratiche operative specifiche, poiché la presenza di FeO residuo, ganga e carbonio nel DRI modifica il bilancio energetico, la formazione della scoria e le condizioni di fusione rispetto a una carica costituita prevalentemente da rottame [3].

Dal punto di vista della fusione, il preridotto presenta caratteristiche fisiche differenti rispetto al rottame compatto, in particolare per la maggiore porosità e per la diversa densità apparente. Tali proprietà favoriscono il riscaldamento del materiale, ma richiedono una strategia di carica e di apporto energetico coerente con la sua modalità di fusione e assimilazione nel bagno. Il momento di introduzione del DRI nel ciclo operativo assume quindi un ruolo rilevante. Nel caso di carica mediante cesta, il preridotto può essere introdotto insieme al rottame entro percentuali generalmente limitate, dell'ordine del 30% della carica totale; in tali condizioni il materiale viene distribuito tra strati di rottame, così da favorirne la protezione e l'assimilazione durante la fusione. Quando invece l'impianto è dotato di sistemi di alimentazione continua, il DRI può essere aggiunto progressivamente durante il ciclo, consentendo di raggiungere percentuali più elevate, tipicamente dell'ordine del 50–60% o anche superiori [8].

Per cariche con quote elevate di preridotto assume particolare importanza la disponibilità di un bagno metallico già formato. La pratica dell'hot heel, che consiste nel mantenere nel forno una parte di acciaio liquido dalla colata precedente, consente di disporre fin dall'inizio del ciclo di una massa liquida capace di favorire il trasferimento termico e l'assimilazione del DRI. L'introduzione del preridotto deve inoltre essere coordinata con la capacità di fusione del forno: la letteratura evidenzia infatti che, in funzione della temperatura del DRI e della capacità di melting disponibile, la velocità di alimentazione deve essere controllata per evitare la formazione di accumuli solidi o parzialmente fusi, indicati come “icebergs” o “ferrobergs”, che possono compromettere la stabilità del processo [16].

Definito il corretto momento di introduzione, anche il punto di immissione assume carattere critico. Il materiale deve essere alimentato in prossimità delle zone a maggiore disponibilità energetica del forno, comunemente indicate come hot spot, in modo da assicurare un'adeguata capacità di fusione e minimizzare la formazione di accumuli solidi. In termini pratici, ciò implica il controllo della velocità e della quantità di alimentazione, la modulazione della potenza elettrica e il mantenimento di un hot heel sufficiente a favorire il contatto termico tra materiale solido e bagno liquido [8,16].

Anche la durata del ciclo operativo risente dell'impiego di DRI nella carica. L'effetto si manifesta soprattutto sulla fase di fusione e sul power-on time del forno, poiché la presenza di

FeO residuo richiede una successiva riduzione nel bagno liquido mediante reazioni endotermiche, mentre la ganga introdotta con il preridotto contribuisce all'aumento della massa di scoria. Questi contributi possono ridurre la velocità effettiva di fusione rispetto a una carica costituita prevalentemente da rottame e richiedono un adeguato coordinamento tra potenza elettrica, apporto di ossigeno e iniezione di carbonio.

Il confronto tra dati medi industriali relativi a forni EAF alimentati a rottame e forni EAF con cariche DRI-based mostra un incremento del power-on time da 39 a 57 min e del consumo elettrico specifico da 391 a 570 kWh/t acciaio; nel caso DRI-based, i dati si riferiscono a forni con circa 80% DRI, metallizzazione media pari al 92,5% e contenuto di carbonio del 2% [3]. L'andamento indicativo di tale correlazione è riportato in Figura 3.4.

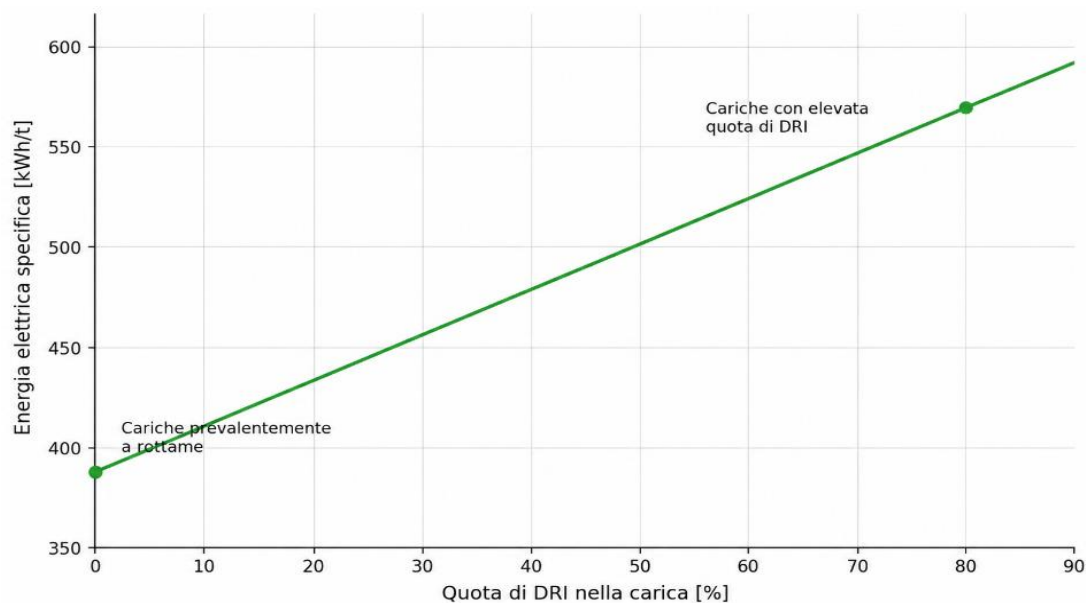


Figura 3.4: Andamento indicativo del consumo elettrico specifico e del power-on time al variare della quota di DRI nella carica. Il grafico è ottenuto per interpolazione qualitativa dei dati medi industriali relativi a pratiche scrap-based e DRI-based riportati in [3] e non rappresenta una legge generale di progetto.

L'impiego di HDRI può attenuare parzialmente tali effetti grazie all'entalpia fisica del materiale caldo introdotto nel forno; tuttavia, il beneficio dipende dalla temperatura del preridotto, dalla continuità dell'alimentazione e dall'integrazione impiantistica tra unità DRI ed EAF [3].

Per quanto riguarda la gestione della scoria, l'impiego di DRI introduce un duplice effetto. Da un lato, la presenza di FeO residuo nel preridotto rende necessaria una successiva riduzione nel bagno liquido mediante carbonio disciolto o iniettato. Tale processo, già richiamato nei bilanci precedenti, porta alla formazione di CO, il cui sviluppo gassoso può favorire la schiumosità della scoria. Se opportunamente controllata, la scoria schiumosa migliora la copertura dell'arco elettrico, riduce l'irraggiamento diretto verso pareti e volta e contribuisce a una maggiore stabilità del trasferimento energetico.

Questo effetto positivo dipende, tuttavia, dall'equilibrio tra FeO disponibile, carbonio presente nel bagno o iniettato, ossigeno insufflato e caratteristiche fisico-chimiche della scoria. Una gestione non ottimizzata può, infatti, portare a un eccessivo tenore di FeO nella scoria, con conseguenze sfavorevoli sia sulla resa metallurgica sia sull'efficienza energetica. In queste condizioni, una parte del ferro resta trattenuta nella fase scorificante anziché essere recuperata nel bagno metallico, mentre l'aumento della quantità di scoria comporta un maggiore assorbimento di calore e maggiori perdite durante la sua gestione.

Dall'altro lato, l'introduzione di DRI tende ad aumentare la massa complessiva di scoria per effetto degli ossidi di ganga che accompagnano il ferro totale, in particolare SiO_2 e Al_2O_3 . Questi ossidi conferiscono alla scoria un carattere più acido e richiedono quindi un controllo più stringente della basicità, ottenuto mediante aggiunte di calce e/o dolomite. In particolare, negli studi dedicati alla fusione del DRI in EAF, la gestione della scoria viene normalmente orientata al mantenimento di un rapporto (CaO/SiO_2) compreso indicativamente tra 1,8 e 2,1, intervallo funzionale al controllo della basicità e alla limitazione dell'attacco del rivestimento refrattario [2].

Il mantenimento in questo intervallo consente di garantire condizioni favorevoli di viscosità della scoria, capacità di assorbimento degli ossidi e stabilità della schiuma, aspetti fondamentali per il corretto svolgimento del processo. L'incremento dei fondenti comporta, inoltre, un ulteriore fabbisogno energetico, poiché tali materiali devono essere riscaldati e portati in soluzione durante il ciclo di fusione, contribuendo così all'aumento del consumo energetico e, in alcuni casi, del power-on time del forno.

Il confronto tra pratiche a rottame e pratiche con elevata quota di preridotto conferma questa tendenza: l'aumento della ganga e del FeO associati al DRI determina un incremento della massa di scoria e una maggiore richiesta di fondenti basici. Tale differenza è evidenziata in Figura 3.5, che confronta i consumi specifici di calce e dolomite in pratiche scrap-based e DRI-based. Di conseguenza, la gestione della scoria diventa uno degli aspetti più rilevanti nei cicli EAF ad alta percentuale di preridotto, poiché influenza contemporaneamente resa metallica, consumo energetico, stabilità dell'arco e consumo di materiali ausiliari.

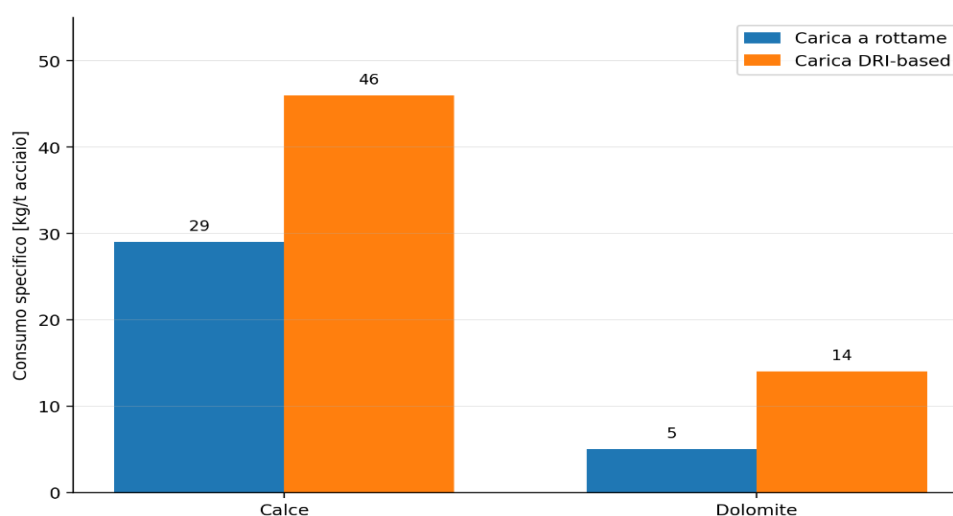


Figura 3.5: Confronto indicativo del consumo specifico di calce e dolomite tra pratiche EAF a rottame e pratiche DRI-based. I dati DRI-based si riferiscono a forni con circa 80% DRI, metallizzazione media pari al 92,5% e contenuto di carbonio del 2%; elaborazione grafica sulla base dei dati riportati in [3].

Sulla composizione chimica del bagno, l'introduzione di DRI consente di aumentare la quota di clean iron units, ossia unità di ferro a composizione controllata e caratterizzate da un basso contenuto di elementi residuali. Questo aspetto assume particolare importanza nel ciclo EAF, dove il rottame rappresenta tradizionalmente la principale fonte metallica, ma può presentare una composizione variabile in funzione della provenienza, della selezione e dei precedenti cicli di utilizzo del materiale.

La criticità principale associata al rottame riguarda la possibile presenza di elementi residuali, spesso indicati come tramp elements, quali Cu, Sn, Ni, Cr e Mo. Molti di questi elementi sono difficilmente rimovibili durante le normali operazioni di affinazione, poiché presentano una tendenza all'ossidazione inferiore rispetto al ferro o non vengono trasferiti in modo efficace alla scoria. Di conseguenza, essi tendono ad accumularsi nel bagno metallico e possono compromettere il rispetto delle specifiche chimiche richieste per acciai di qualità elevata o per applicazioni particolarmente sensibili alla presenza di residuali.

Il preridotto, derivando direttamente dalla riduzione del minerale di ferro e non da materiale metallico riciclato, presenta una composizione più prevedibile e generalmente più povera di tali contaminanti. La sua introduzione nella carica consente, quindi, di diluire la concentrazione degli elementi residui provenienti dal rottame e di migliorare la stabilità chimica tra colate successive. In questo senso, il DRI non svolge soltanto una funzione di apporto metallico, ma rappresenta anche uno strumento di controllo qualitativo della carica, particolarmente utile quando si vogliono produrre acciai con requisiti più stringenti in termini di purezza chimica [8].

Dal punto di vista operativo, l'impiego di DRI può ridurre la dipendenza da rottami selezionati ad alto costo e limitare la necessità di correzioni compositive a fine ciclo. La maggiore prevedibilità della carica permette, infatti, una gestione più stabile della composizione del bagno, migliorando la ripetibilità del processo e la flessibilità metallurgica dell'impianto.

Parallelamente, l'impiego di DRI richiede comunque un controllo accurato del bilancio ossigeno-carbonio nel bagno. La presenza di FeO residuo nel preridotto comporta la necessità di completarne la riduzione durante il ciclo EAF, con consumo di carbonio disciolto o iniettato. Tuttavia, il carbonio eventualmente contenuto nel DRI può contribuire a tale equilibrio, partecipando sia alla riduzione degli ossidi residui sia alla generazione di CO utile alla formazione della scoria schiumosa. Ne deriva che il DRI, pur migliorando la qualità chimica di base del ferro introdotto, richiede una gestione integrata di metallizzazione, FeO residuo, carbonio disponibile e insufflazione di ossigeno.

4. Aspetti ambientali e decarbonizzazione

4.1 Inquadramento delle emissioni di CO₂ nelle principali vie di produzione siderurgiche

La produzione di acciaio rappresenta uno dei settori industriali a maggiore intensità energetica ed emissiva, poiché richiede elevate quantità di energia termica ed elettrica e, nelle vie tradizionali di manifattura, l'impiego di carbonio come agente riducente. Nel ciclo integrale altoforno-convertitore, BF-BOF, le emissioni di CO₂ sono strettamente legate all'utilizzo del coke e del carbone per la riduzione degli ossidi di ferro e per il mantenimento delle condizioni termiche necessarie al processo. In letteratura sono riportati consumi tipici dell'ordine di 350 kg di coke per tonnellata di ghisa, ai quali si aggiungono apporti di carbone polverizzato iniettato generalmente compresi tra 125 e 175 kg/t di ghisa [8]. Tali consumi rappresentano una delle principali cause dell'elevata intensità emissiva della manifattura BF-BOF. Al contrario, il forno elettrico ad arco consente di produrre acciaio a partire da materiali già in forma metallica, come il rottame, oppure da materiali preridotti, come DRI e HBI, eliminando l'impiego diretto del coke metallurgico come agente riducente principale. Nel processo EAF vengono comunque impiegati materiali carboniosi, ma in quantità decisamente inferiori rispetto al ciclo altoforno, generalmente dell'ordine di poche decine di kg/t acciaio [3].

Tuttavia, l'EAF non può essere considerato automaticamente una tecnologia a basse emissioni. L'impatto ambientale effettivo dipende, infatti, da diversi fattori: la composizione della carica, la quota di rottame o preridotto utilizzata, l'intensità emissiva dell'energia elettrica, il consumo di gas naturale e materiali carboniosi, nonché le emissioni associate alle fasi a monte della filiera. In particolare, quando il DRI viene introdotto nella carica, il confronto ambientale non può limitarsi alla sola fase di fusione, ma deve includere anche la produzione del preridotto, che richiede a sua volta energia e gas riducente.

Un confronto quantitativo tra le principali vie produttive permette di evidenziare l'ordine di grandezza delle differenze. In letteratura sono riportati intervalli complessivi di emissione, ottenuti dal confronto di dati di processo e bilanci di carbonio raccolti in diversi studi, pari a circa 360–470 kgCO₂/t acciaio per la produzione EAF basata prevalentemente su rottame, 560–1450 kgCO₂/t acciaio per la via basata su DRI-EAF e 1630–1960 kgCO₂/t acciaio per il ciclo BF-BOF [3]. Tali intervalli mostrano come l'EAF a rottame rappresenti generalmente la configurazione industriale a minore intensità emissiva, mentre la via DRI-EAF occupa una posizione intermedia tra lo scrap-EAF e il ciclo integrale tradizionale. La rappresentazione grafica di questi intervalli è riportata in Figura 4.1.

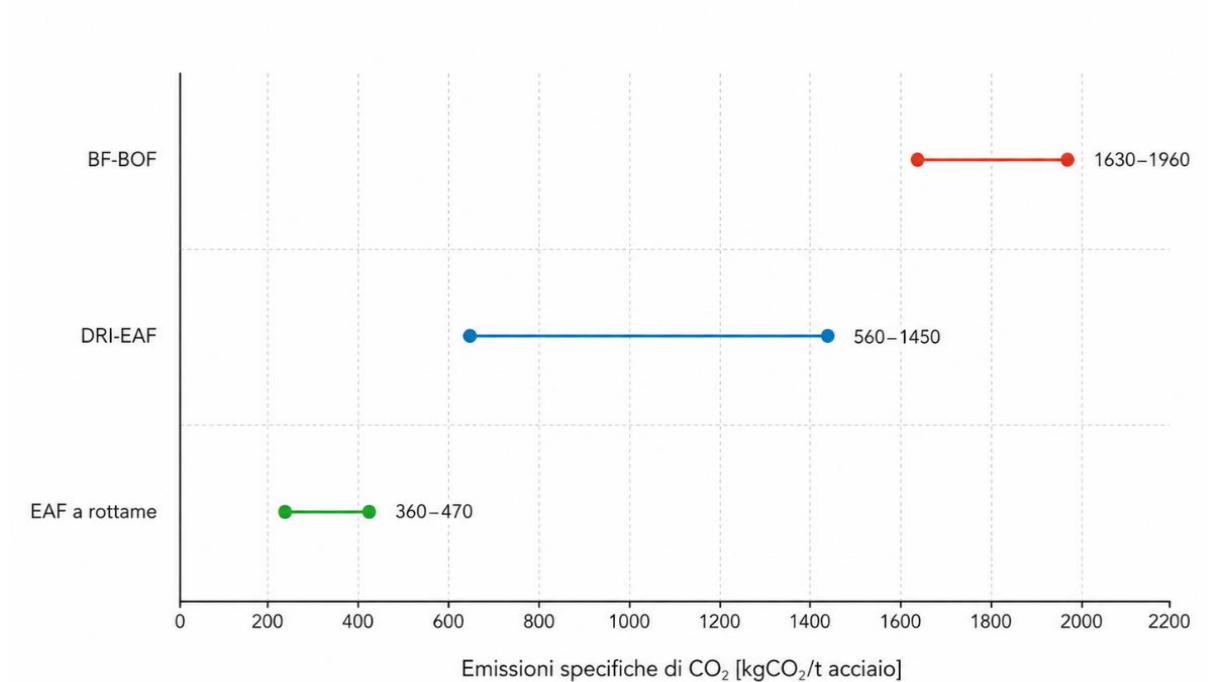


Figura 4.1: Confronto indicativo degli intervalli di emissione specifica di CO₂ per tre vie di produzione siderurgica: EAF a rottame, DRI-EAF e BF-BOF. I valori sono espressi in kgCO₂/t acciaio ed elaborati sulla base dei range riportati in [3]. Tale rappresentazione ha valore orientativo, poiché i risultati dipendono dal perimetro di analisi, dalla quota di DRI, dal mix elettrico e dalla tecnologia di riduzione diretta adottata.

4.2 Fattori che influenzano le emissioni di CO₂ nel ciclo EAF e ruolo del DRI

Nel forno elettrico ad arco alimentato prevalentemente a rottame, le emissioni di CO₂ derivano da diversi contributi, non riconducibili esclusivamente alla fase di fusione. Una prima componente è rappresentata dalle emissioni indirette associate alla produzione dell'energia elettrica consumata dal forno. Questo contributo dipende sia dal consumo specifico di energia, espresso in *kWh/t* acciaio, sia dall'intensità carbonica del mix elettrico utilizzato. A parità di prestazioni del forno, quindi, due impianti EAF possono presentare impronte emissive molto diverse se alimentati da reti elettriche caratterizzate da quote differenti di combustibili fossili o fonti rinnovabili.

Accanto al contributo elettrico, sono presenti emissioni dirette legate all'impiego di materiali carboniosi e combustibili ausiliari. Nel ciclo EAF vengono, infatti, utilizzati carbone iniettato, carbon coke, elettrodi in grafite e, in alcuni casi, gas naturale nei bruciatori ossi-combustibile. Tali materiali contribuiscono al bilancio energetico e metallurgico del forno, ma generano emissioni di CO₂ per ossidazione del carbonio o combustione del gas. A questi contributi si aggiungono le emissioni associate alla produzione e al consumo di materiali ausiliari, come calce e dolomite, e quelle legate alla preparazione e al trasporto delle materie prime.

Nel caso di una carica costituita esclusivamente o prevalentemente da rottame, il vantaggio ambientale principale deriva dal fatto che il ferro è già disponibile in forma metallica. Il forno deve, quindi, fornire l'energia necessaria alla fusione, al surriscaldamento del bagno e alle operazioni di affinazione, senza dover sostenere una nuova fase di riduzione del minerale di ferro. Per questo motivo, la via di produzione scrap-EAF presenta generalmente emissioni inferiori rispetto alle configurazioni basate su materie prime vergini. Tuttavia, anche in questo caso l'impatto emissivo può variare sensibilmente: in letteratura sono riportati valori compresi tra circa 245 e 680 $kgCO_2/t$ acciaio per un EAF alimentato con 100% rottame, in funzione soprattutto della fonte di energia elettrica utilizzata [9]. Una sintesi dei valori indicativi è riportata in Tabella 4.1.

Tabella 4.1-Valori indicativi di emissione specifica di CO_2 per diverse configurazioni EAF, in funzione della carica metallica e del contributo energetico considerato. Dati elaborati da [9].

Configurazione EAF	Condizione considerata	Emissioni indicative [$kgCO_2/t$ acciaio]
EAF 100% rottame	Elettricità a bassa intensità carbonica	circa 245
EAF 100% rottame	Elettricità a maggiore intensità carbonica	fino a circa 680
EAF con 80% DRI e 20% rottame	DRI prodotto con processo convenzionale	circa 885–1125

L'introduzione di DRI modifica questo quadro, poiché al bilancio emissivo del ciclo EAF si aggiunge il contributo legato alla produzione del preridotto. Una parte delle emissioni complessive non è quindi generata direttamente nel forno, ma nelle fasi a monte di riduzione diretta del minerale di ferro. Tale contributo dipende dalla tecnologia di riduzione diretta adottata, dal tipo di gas riducente, dall'eventuale utilizzo di gas naturale, dal grado di conversione metallica del prodotto e dall'energia impiegata negli impianti ausiliari.

Oltre al contributo upstream, il DRI può influenzare anche le emissioni associate alla fase EAF. Come discusso nel Capitolo 3, la presenza di FeO residuo richiede una successiva riduzione nel bagno liquido, mentre la ganga contenuta nel preridotto aumenta la massa di scoria e la richiesta di fondenti basici. Questi effetti possono determinare un incremento del fabbisogno elettrico del forno e dei consumi di materiali ausiliari, con conseguenze sia energetiche sia emissive. Pertanto, la quota di DRI nella carica rappresenta una variabile non solo metallurgica e operativa, ma anche ambientale.

L'effetto della quota di DRI sulle emissioni diventa particolarmente evidente quando il preridotto è prodotto mediante processi convenzionali basati su gas naturale. In tali condizioni, l'aumento della percentuale di DRI nella carica EAF tende a incrementare le emissioni complessive rispetto a una pratica basata esclusivamente su rottame. A titolo indicativo, per una miscela costituita da 80% DRI e 20% rottame sono riportati valori di emissione compresi tra 885 e 1125 $kgCO_2/t$ acciaio [9]. Questo intervallo mostra come l'impiego del preridotto possa collocare la via produttiva DRI-EAF su livelli emissivi superiori allo scrap-EAF, pur rimanendo generalmente inferiori rispetto al ciclo integrale BF-BOF.

La prospettiva cambia quando il DRI viene prodotto mediante idrogeno a basse emissioni e il forno EAF è alimentato da elettricità rinnovabile o caratterizzata da bassa intensità carbonica. In tali condizioni, la via produttiva H₂-DRI-EAF può raggiungere riduzioni molto significative delle emissioni rispetto al ciclo BF-BOF, come discusso più approfonditamente nel Capitolo 5.

Nel complesso, l'introduzione del DRI modifica il profilo emissivo del ciclo EAF perché aggiunge il contributo della produzione del preridotto e può influenzare il consumo elettrico e l'impiego di materiali ausiliari nel forno. L'entità di tale effetto dipende dalla quota di DRI nella carica, dalla tecnologia di riduzione diretta, dal mix elettrico e dalle condizioni operative adottate.

4.3 Valutazione Life Cycle Assessment della rotta DRI-EAF

Per valutare correttamente l'impatto ambientale della rotta DRI-EAF, come già sottolineato nel paragrafo precedente, è necessario adottare un approccio esteso all'intera filiera produttiva, in grado di includere non solo la fase di fusione nel forno elettrico, ma anche le operazioni a monte associate alla produzione del preridotto e al trasporto delle materie prime. Una valutazione limitata alle sole emissioni dirette dell'EAF rischierebbe, infatti, di sottostimare il contributo della riduzione diretta, che rappresenta una fase energeticamente ed emissivamente rilevante.

Per affrontare questa complessità si ricorre alla metodologia Life Cycle Assessment, LCA, che consente di quantificare gli impatti ambientali associati a un prodotto o processo lungo un perimetro definito. Nel caso della produzione di acciaio, l'approccio LCA permette di considerare in modo integrato la produzione del DRI, la fusione in EAF, il consumo di energia elettrica, l'impiego di fondenti e materiali ausiliari e le emissioni dirette e indirette associate al processo. Tra gli indicatori più rilevanti per questo tipo di analisi rientra il Global Warming Potential, GWP100, che esprime il contributo complessivo delle emissioni climalteranti in termini di CO₂ equivalente, considerando un orizzonte temporale di 100 anni. Tale impostazione è particolarmente utile per la via produttiva DRI-EAF, poiché consente di collegare gli effetti operativi discussi nel Capitolo 3 con le conseguenze ambientali analizzate nel presente capitolo.

Uno studio recente dedicato alla rotta natural gas based DR-EAF ha applicato un approccio LCA con perimetro cradle-to-gate a un impianto teorico localizzato in Germania, assumendo come unità funzionale 1 tonnellata di acciaio grezzo. Il sistema analizzato include l'impianto di riduzione diretta, il forno elettrico ad arco e la colata continua, considerando anche i contributi upstream associati ai principali input di processo, come la produzione dei pellet di minerale di ferro. Lo studio utilizza il metodo CML 2001 e sviluppa un modello flessibile del forno EAF, con l'obiettivo di valutare l'effetto di tre diverse composizioni della carica sui risultati ambientali. In particolare, viene confrontata una configurazione DR-EAF con elevata quota di preridotto, pari a 80% DRI e 20% rottame, con una configurazione EAF convenzionale basata prevalentemente su rottame, utilizzata come riferimento per valutare l'effetto della variazione della carica [17].

Il confronto mostra che l'introduzione di una quota elevata di DRI influenza in modo diretto il GWP100 attraverso le variazioni operative che essa determina nel forno. Rispetto allo scenario scrap-based, l'impiego di 80% DRI comporta un incremento complessivo del GWP100 dell'ordine di 0,11 tCO_{2eq}/t acciaio. Tale incremento è attribuito principalmente al maggiore

fabbisogno elettrico del forno, pari a circa $0,080 \text{ tCO}_2\text{eq/t acciaio}$, seguito dall'aumento delle aggiunte di fondenti, pari a circa $0,027 \text{ tCO}_2\text{eq/t acciaio}$, e dalle maggiori emissioni dirette dell'EAF, pari a circa $0,018 \text{ tCO}_2\text{eq/t acciaio}$ [17].

Tabella 4.2 – Contributi all'incremento del GWP100 associati all'impiego di 80% DRI nella carica EAF rispetto a uno scenario scrap-based. Dati elaborati da [17].

Contributo associato alla variazione della carica	Incremento del GWP100 [$\text{tCO}_2\text{eq/t acciaio}$]
Maggiore fabbisogno elettrico del forno	0,080
Maggiori aggiunte di fondenti	0,027
Maggiori emissioni dirette dell'EAF	0,018
Incremento complessivo stimato	circa 0,110

Questi risultati sono coerenti con quanto discusso nei capitoli precedenti. L'incremento del consumo elettrico deriva dalla necessità di completare la riduzione degli ossidi residui e di gestire una maggiore quantità di scoria; l'aumento dei fondenti è legato alla presenza di ossidi di ganga nel preridotto, mentre le maggiori emissioni dirette dipendono dalle reazioni di riduzione e dall'impiego di materiali carboniosi nel forno. La LCA conferma quindi che l'impatto ambientale della via di produzione DRI-EAF non dipende soltanto dalla produzione del preridotto a monte, ma anche dagli effetti che il DRI produce sull'operatività del forno elettrico.

L'identificazione dei contributi dominanti permette, inoltre, di individuare le principali leve di miglioramento ambientale. La riduzione del consumo elettrico specifico del forno, l'ottimizzazione della gestione della scoria e la limitazione delle aggiunte di fondenti rappresentano interventi rilevanti per ridurre l'impatto della fase EAF. Tuttavia, poiché la via di produzione DRI-EAF comprende anche la produzione del preridotto, il risultato complessivo dipende fortemente da tutti quei fattori relativi alla produzione del preridotto e che in questo studio non sono stati presi in considerazione.

5. Prospettive future per la rotta DRI-EAF

Il concetto di green steel si riferisce allo sviluppo di percorsi produttivi in grado di ridurre in modo significativo l'impronta carbonica della produzione di acciaio, intervenendo sia sulle emissioni dirette dei processi siderurgici sia sulle emissioni indirette associate all'energia e alle materie prime impiegate. In questa prospettiva, la rotta DRI-EAF rappresenta una delle configurazioni più promettenti, poiché consente di combinare la riduzione diretta del minerale di ferro con la fusione in forno elettrico ad arco, potenzialmente alimentato da energia elettrica a bassa intensità carbonica.

Come emerso nel Capitolo 4, tuttavia, l'impiego del DRI non garantisce automaticamente una produzione a basse emissioni. Il confronto LCA tra una configurazione EAF basata su rottame e una configurazione con elevata quota di preridotto mostra infatti che l'introduzione di 80% DRI nella carica può determinare un incremento indicativo del GWP100 dell'ordine del 12% rispetto allo scenario scrap-based [17]. Questo risultato conferma che il beneficio ambientale della rotta DRI-EAF dipende non solo dall'impiego del forno elettrico, ma anche dal modo in cui viene prodotto il preridotto e da come esso viene gestito nella successiva fase di fusione.

Di conseguenza, lo sviluppo futuro della rotta DRI-EAF deve agire su due livelli complementari. Il primo riguarda l'abbattimento del contributo upstream della produzione del DRI, attraverso la progressiva sostituzione dei gas riducenti di origine fossile con idrogeno a basse emissioni. Il secondo riguarda l'ottimizzazione dell'impiego del DRI nel forno EAF, intervenendo sui principali contributi che ne condizionano l'impatto ambientale nella fase di fusione: consumo elettrico del forno, richiesta di fondenti ed emissioni dirette associate al processo. In quest'ultimo ambito si colloca anche il possibile impiego di materiali carboniosi alternativi, tra cui biomasse, biochar o biopolimeri, valutabili come sostituti parziali delle fonti carboniose fossili normalmente utilizzate per la riduzione degli ossidi residui e per la gestione della scoria schiumosa.

5.1 Confronto tra produzione NG-DRI e H₂-DRI

Come discusso nel Capitolo 2, la riduzione diretta del minerale di ferro avviene mediante l'impiego di gas riducenti, generalmente ottenuti da gas naturale attraverso reforming. In tali condizioni, la riduzione degli ossidi avviene attraverso il contributo combinato di H₂ e CO, con formazione rispettivamente di H₂O e CO₂ come prodotti di reazione.

L'impiego di idrogeno come unico agente riducente nella produzione di DRI rappresenta una configurazione alternativa rispetto ai processi convenzionali basati su gas naturale. La differenza fondamentale non riguarda il prodotto solido finale, che rimane un preridotto costituito prevalentemente da ferro metallico e ossidi residui, ma la natura del gas riducente e dei prodotti gassosi generati durante il processo. Nel caso della riduzione mediante idrogeno, il prodotto principale della reazione non è CO₂, ma vapore acqueo. Questo aspetto rende la via

produttiva H₂-DRI particolarmente interessante dal punto di vista ambientale, purché l'idrogeno impiegato sia prodotto mediante fonti a bassa intensità carbonica.

Un confronto utile tra le due configurazioni è fornito da uno studio tecnico-economico dedicato a impianti integrati DRI-EAF alimentati rispettivamente con gas naturale e idrogeno. Lo studio considera un impianto NG-DRI-EAF come caso di riferimento e lo confronta con diverse configurazioni H₂-DRI, nelle quali l'idrogeno sostituisce il gas naturale sia come agente riducente nel reattore a tino sia, in alcuni scenari, come combustibile per le utenze termiche dell'impianto [18].

Nel caso NG-DRI, il gas naturale viene convertito in gas di sintesi mediante reformer e la miscela H₂/CO prodotta viene inviata al reattore di riduzione. Il gas esausto viene in parte ricircolato e in parte utilizzato come combustibile nel sistema di reforming. Questa configurazione rappresenta una tecnologia industrialmente consolidata, ma mantiene una quota significativa di emissioni dirette legate sia alla produzione del gas riducente sia alla combustione del gas naturale impiegato nei diversi sottosistemi dell'impianto.

Nel caso H₂-DRI, invece, il reattore a tino viene alimentato con idrogeno, eliminando la necessità del reformer. Questo rappresenta uno dei principali cambiamenti impiantistici rispetto alla configurazione a gas naturale. L'eliminazione del reformer consente di semplificare una parte dell'impianto e di ridurre le emissioni dirette associate alla produzione del gas di sintesi. Tuttavia, la riduzione con idrogeno presenta anche nuove esigenze operative: poiché la reazione di riduzione con H₂ è endotermica, l'idrogeno deve essere preriscaldato prima dell'ingresso nel reattore, e diventa necessario controllare con attenzione la temperatura del gas, il ricircolo del top gas e l'eccesso di idrogeno richiesto per mantenere condizioni riducenti adeguate.

I risultati dello studio mostrano che la sola sostituzione del gas riducente convenzionale con idrogeno rinnovabile nel reattore di riduzione diretta può ridurre le emissioni dirette di CO₂ dell'impianto del 76,3% rispetto alla configurazione NG-DRI di riferimento. Se l'idrogeno viene impiegato anche per sostituire il gas naturale nelle principali utenze termiche dell'impianto, la riduzione delle emissioni dirette può arrivare fino all'84,9% [18]. Questi valori confermano il ruolo dell'idrogeno come leva principale per abbattere il contributo emissivo upstream associato alla produzione del preridotto. Una sintesi del confronto tra le configurazioni considerate è riportata in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 – Confronto tra configurazione NG-DRI-EAF e configurazioni H₂-DRI-EAF in termini di riduzione delle emissioni dirette di CO₂. Dati elaborati da [18].

Configurazione considerata	Effetto principale sulle emissioni dirette
NG-DRI-EAF di riferimento	Configurazione di confronto
H ₂ impiegato nel reattore di riduzione diretta	Riduzione pari a circa 76,3%
H ₂ impiegato nel reattore e nelle principali utenze termiche	Riduzione fino a circa 84,9%

Dal punto di vista economico, lo studio introduce il concetto di costo di pareggio dell'idrogeno, cioè il prezzo massimo dell' H_2 che consentirebbe alla configurazione H_2 -DRI di mantenere un costo di produzione dell'acciaio comparabile con quello della configurazione NG-DRI di riferimento. Nel caso in cui l'idrogeno venga utilizzato come agente riducente nel reattore a tino, il costo di pareggio risulta pari a circa 1,70 \$/kg H_2 . Quando l'idrogeno viene impiegato anche nelle utenze termiche principali dell'impianto, il costo di pareggio si colloca intorno a 1,63 \$/kg H_2 [18]. Questo evidenzia come la competitività della rotta H_2 -DRI dipenda fortemente dalla disponibilità di idrogeno rinnovabile a basso costo. Tale valore può essere confrontato con il quadro economico attuale dell'idrogeno rinnovabile, che risulta ancora generalmente superiore alla soglia di pareggio individuata per la rotta H_2 -DRI. Secondo una recente analisi tecnico-economica, la produzione di idrogeno verde mediante elettrolisi si colloca oggi in un intervallo indicativo di circa 3,5–6,0 \$/kg H_2 , risultando sensibilmente superiore ai valori individuati precedentemente [21].

Il confronto tra NG-DRI e H_2 -DRI mostra, quindi, che l'idrogeno può ridurre in modo significativo le emissioni dirette legate alla produzione del preridotto, ma non rappresenta una semplice sostituzione del gas naturale a parità di impianto. La transizione verso H_2 -DRI richiede modifiche impiantistiche e gestionali rilevanti, tra cui l'eliminazione del reformer, l'introduzione di sistemi di preriscaldamento dell'idrogeno, il controllo del ricircolo del gas, la disponibilità di idrogeno a pressione adeguata e l'integrazione con una fornitura elettrica a bassa intensità carbonica.

Un ulteriore elemento da considerare riguarda la continuità di alimentazione dell'impianto. La produzione di idrogeno rinnovabile è, infatti, strettamente legata alla disponibilità di energia elettrica da fonti rinnovabili, che può essere variabile nel tempo. Per garantire il funzionamento continuo del reattore di riduzione diretta, possono quindi essere necessari sistemi di accumulo, compressione e distribuzione dell'idrogeno, oppure una rete di approvvigionamento esterna sufficientemente stabile. Di conseguenza, la rotta H_2 -DRI-EAF richiede non solo l'adattamento del processo metallurgico, ma anche lo sviluppo di un'infrastruttura energetica dedicata.

Infine, il passaggio da NG-DRI a H_2 -DRI può influenzare anche la successiva fase EAF. Il preridotto prodotto con idrogeno tende ad avere un contenuto di carbonio più basso rispetto al DRI convenzionale prodotto con gas naturale. Questo aspetto è rilevante perché il carbonio introdotto con il DRI contribuisce nel forno elettrico alla riduzione degli ossidi residui e alla formazione della scoria schiumosa. La riduzione del carbonio contenuto nel preridotto può quindi richiedere un diverso controllo del bilancio ossigeno-carbonio nel forno e apre il tema dell'eventuale impiego di fonti carboniose alternative nella fase EAF.

5.2 Impiego di materiali carboniosi alternativi nel forno EAF

Nel forno elettrico ad arco, il carbonio continua a svolgere funzioni operative rilevanti anche in scenari orientati alla decarbonizzazione. Esso partecipa alla riduzione degli ossidi residui, in particolare del FeO , favorisce la formazione di CO e contribuisce alla stabilizzazione della scoria schiumosa, oltre a intervenire nel bilancio energetico e chimico del processo. Nella prospettiva di una rotta H_2 -DRI-EAF, questo aspetto diventa ancora più significativo, poiché il preridotto prodotto mediante idrogeno può presentare un contenuto di carbonio inferiore rispetto al DRI convenzionale prodotto con gas naturale, come visto nel paragrafo precedente.

Di conseguenza, una parte del carbonio necessario al corretto svolgimento del processo EAF dovrà essere introdotta dall'esterno.

In questo contesto, l'impiego di materiali carboniosi alternativi rappresenta una possibile strategia per ridurre la dipendenza da fonti fossili, come carbone, coke o antracite. Tra le soluzioni più discusse rientrano biomasse trattate, charcoal, biochar e, più in generale, biocarbon ottenuti da risorse rinnovabili o da residui organici. L'interesse verso questi materiali deriva dalla possibilità di sostituire parzialmente il carbonio fossile impiegato nel forno con carbonio di origine biologica, cioè derivante da materia organica recente come piante o residui vegetali, riducendo così il contributo alle emissioni fossili dirette del processo.

La letteratura dedicata all'impiego della biomassa nei processi siderurgici evidenzia che la biomassa grezza non può essere considerata direttamente equivalente ai materiali carboniosi convenzionali. Le biomasse presentano, infatti, in genere, elevato contenuto di umidità, basso contenuto di carbonio fisso, alto contenuto di ossigeno e sostanze volatili, bassa densità energetica e possibili concentrazioni di elementi indesiderati. Queste caratteristiche ne limitano l'impiego diretto nei processi metallurgici e rendono necessario un trattamento preliminare di upgrading, finalizzato ad aumentare il contenuto di carbonio, migliorare il potere calorifico, ridurre l'umidità e stabilizzare le proprietà fisico-chimiche del materiale [19].

Tra i trattamenti più rilevanti rientrano essiccazione, torrefazione, pirolisi lenta e carbonizzazione. In particolare, la pirolisi, è necessaria perché consente di ottenere un residuo solido ricco di carbonio, come il biochar, con meno ossigeno rispetto alla biomassa di partenza, rendendolo più adatto all'impiego come materiale carbonioso in ambito metallurgico.

L'impiego di questi materiali è confermato da studi recenti dedicati specificamente all'utilizzo di biocarbon nella produzione EAF. Tali studi evidenziano che il biocarbon può rappresentare un possibile sostituto parziale delle fonti carboniose convenzionali impiegate nelle pratiche di iniezione del carbonio e nella formazione della scoria schiumosa. In queste applicazioni, il materiale carbonioso deve reagire con gli ossidi presenti nella scoria, contribuendo alla generazione di CO e alla stabilizzazione della schiuma. Il potenziale ambientale del biocarbon deriva, quindi, dalla possibilità di mantenere una funzione metallurgica necessaria al processo, riducendo allo stesso tempo l'impiego di carbonio di origine fossile [20].

L'impiego di biocarbon in EAF richiede, tuttavia, oltre alle caratteristiche viste precedentemente come elevato contenuto di carbonio fisso, basso residuo di umidità e assenza di elementi indesiderati, anche caratteristiche più specifiche come una reattività compatibile con le condizioni del forno, una granulometria idonea ai sistemi di alimentazione o iniezione. Una reattività troppo elevata o una densità troppo bassa possono, infatti, compromettere l'efficienza dell'iniezione, la penetrazione nel bagno o l'interazione con la scoria. Per questo motivo, il biocarbon deve essere valutato non solo in base alla sua origine rinnovabile, ma anche in funzione della sua effettiva compatibilità con le esigenze operative del forno elettrico [20].

Dal punto di vista ambientale, il vantaggio principale dei materiali carboniosi di origine biogenica è legato alla sostituzione di carbonio fossile con carbonio rinnovabile. Mentre la combustione o l'ossidazione del carbone fossile introduce nuova CO₂ nel ciclo atmosferico, il carbonio contenuto nella biomassa deriva da CO₂ precedentemente assorbita durante la crescita della materia organica. Per questo motivo, se la filiera di approvvigionamento è gestita in modo sostenibile, l'impiego di biochar, charcoal o biocarbon può contribuire alla riduzione delle emissioni fossili nette associate al processo siderurgico.

Questo beneficio deve essere valutato considerando l'intero ciclo di vita del materiale. La produzione, raccolta, trasporto, essiccazione e conversione termochimica della biomassa richiedono energia e possono generare emissioni indirette. Inoltre, la sostenibilità della materia prima dipende dalla disponibilità locale di biomassa, dalla competizione con altri usi e dagli eventuali effetti legati al cambiamento d'uso del suolo. Per questo motivo, l'impiego di materiali biogenici nel forno EAF non può essere considerato automaticamente neutro dal punto di vista climatico, ma deve essere valutato mediante un approccio coerente con la metodologia LCA [19].

6. Conclusioni

L'analisi sviluppata nei capitoli precedenti ha consentito di inquadrare il preridotto non solamente come semplice alternativa al rottame, ma come una variabile tecnologica capace di modificare in modo strutturale l'equilibrio metallurgico, energetico e ambientale del forno elettrico ad arco.

Dal punto di vista metallurgico, il DRI introduce nel sistema una fonte di ferro a composizione controllata e a basso contenuto di elementi residui. Questo aspetto rappresenta uno dei principali vantaggi strategici rispetto al rottame, la cui crescente variabilità compositiva e la possibile presenza di tramp elements, quali Cu, Sn, Ni e Cr, possono costituire un limite per la produzione di acciai di qualità elevata. L'impiego del preridotto consente quindi di stabilizzare la chimica del bagno, migliorare la ripetibilità tra colate e ridurre la dipendenza da rottami selezionati ad alto costo.

Tale beneficio compositivo è, tuttavia, accompagnato da implicazioni operative non trascurabili. A differenza del rottame, il DRI contiene una quota residua di ossido di ferro, prevalentemente FeO, e una frazione di ganga che influenzano direttamente i bilanci di massa ed energia del forno. Il grado di conversione metallica diventa pertanto un parametro chiave: al diminuire della metallizzazione aumenta la quantità di FeO da ridurre nel bagno liquido, con conseguente incremento del consumo di carbonio, maggiore richiesta energetica e possibile riduzione della resa metallurgica del ferro.

L'introduzione del preridotto modifica, inoltre, la gestione della scoria. La presenza di ossidi residui e di ganga tende ad aumentare la quantità complessiva di fase scorificante, richiedendo un controllo più accurato della basicità e un maggiore impiego di fondenti. Ne deriva che l'impiego del DRI non può essere valutato esclusivamente in termini di sostituzione percentuale del rottame, ma richiede un adattamento integrato delle pratiche operative, quali gestione dell'hot heel, modulazione della potenza elettrica, ottimizzazione dell'iniezione di ossigeno e carbonio e controllo della formazione della scoria schiumosa.

Sul piano energetico, l'effetto del DRI è ambivalente. Da un lato, l'utilizzo di HDRI consente di recuperare parte del contenuto entalpico del materiale e può contribuire al miglioramento dell'efficienza del ciclo; dall'altro, in configurazioni a freddo o con basso grado di metallizzazione, il preridotto può determinare un incremento del consumo specifico di energia elettrica e un allungamento del tempo di fusione. L'ottimizzazione del rapporto tra energia elettrica ed energia chimica assume, quindi, un ruolo centrale nella sostenibilità tecnica ed economica delle pratiche EAF con elevata quota di DRI.

Dal punto di vista ambientale, la via produttiva DRI-EAF si colloca oggi in una posizione intermedia tra il ciclo integrale BF-BOF e la rifusione di rottame in forno elettrico. L'analisi delle emissioni e il confronto LCA discussi nel Capitolo 4 mostrano, infatti, che l'impiego di DRI prodotto mediante gas naturale consente una riduzione significativa delle emissioni rispetto alla produzione primaria da altoforno, ma non garantisce automaticamente prestazioni ambientali migliori rispetto a un EAF alimentato prevalentemente o esclusivamente con

rottame. Al contrario, l'introduzione di elevate quote di preridotto può aumentare il consumo elettrico, la richiesta di fondenti e le emissioni dirette del forno, rendendo necessario valutare l'intera filiera produttiva e non la sola fase di fusione.

Questo risultato rafforza il carattere di tecnologia di transizione della via produttiva DRI-EAF. Nelle configurazioni attuali, essa consente di ampliare l'impiego del forno elettrico anche in contesti di limitata disponibilità di rottame di qualità, ma il suo reale contributo alla decarbonizzazione dipende dall'evoluzione del modo in cui il preridotto viene prodotto e utilizzato. Come discusso nel Capitolo 5, il passaggio a DRI prodotto con idrogeno a basse emissioni, l'impiego di energia elettrica rinnovabile e la sostituzione parziale del carbonio fossile con materiali carboniosi alternativi rappresentano le principali leve per trasformare la rotta DRI-EAF da soluzione intermedia a configurazione effettivamente orientata al green steel.

In sintesi, il DRI può essere interpretato come un elemento di equilibrio tra esigenze metallurgiche, vincoli di approvvigionamento e obiettivi di decarbonizzazione. Il suo ruolo nel forno elettrico non è neutro, ma sistemico: modifica i flussi di materia, energia ed emissioni e richiede una gestione consapevole dei compromessi tra resa metallica, consumo energetico, qualità dell'acciaio e impatto ambientale. La prospettiva futura della via produttiva DRI-EAF dipenderà quindi dalla capacità di combinare preridotto di qualità, pratiche operative ottimizzate, energia elettrica a bassa intensità carbonica e progressiva evoluzione verso processi di riduzione diretta basati su idrogeno e materiali carboniosi alternativi.

Bibliografia

- [1] World Steel Association (worldsteel), Sustainability Indicators Report 2024 e report su intensità emissive per rotta produttiva, 2019–2024.
- [2] Kirschen, M.; Hay, T.; Echterhof, T., Process Improvements for Direct Reduced Iron Melting in the Electric Arc Furnace with Emphasis on Slag Operation, *Processes*, 9(2), 402, 2021.
- [3] M. Kirschen, K. Badr, H. Pfeifer, “Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry”, *Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6146–6155, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.07.050.
- [4] V. Vogl, M. Åhman, L. J. Nilsson, “Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking”, *Journal of Cleaner Production*, 203 (2018) 736–745.
- [5] Y. Graupner, C. Weckenborg, T. S. Spengler, “Low-carbon primary steelmaking using direct reduction and electric arc furnaces: Prospective environmental impact assessment”, *Procedia CIRP*, 116 (2023) 696–701.
- [6] M. Stolte, A. Bourig, F. D. Minuto, A. Lanzini, “Energy-system optimization for hydrogen-based green steel production from medium-grade iron ore”, *Applied Energy*, vol. 410, 2026, doi: 10.1016/j.apenergy.2026.127563.
- [7] International Iron Metallurgy Association (IIMA), Use of Direct Reduced Iron (DRI) in the Electric Arc Furnace (EAF) for Steelmaking, Factsheet 11, edizioni 2014–2024.
- [8] A. Ghosh, A. Chatterjee, *Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice*, PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2008, ISBN 978-81-203-3289-8.
- [9] M. Shahabuddin, G. Brooks, M. A. Rhamdhani, “Decarbonisation and hydrogen integration of steel industries: Recent development, challenges and technoeconomic analysis”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 395, 136391, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136391.
- [10] Midrex Technologies, Inc., World Direct Reduction Statistics 2024, Midrex Technologies, 2025.
- [11] H. Hamadeh, O. Mirgaux, F. Patisson, “Detailed Modeling of the Direct Reduction of Iron Ore in a Shaft Furnace”, *Materials*, vol. 11, no. 10, 1865, 2018, doi: 10.3390/ma11101865.
- [12] K. Alhumaizi, A. Ajbar, M. Soliman, “Modelling the complex interactions between reformer and reduction furnace in a Midrex-based iron plant”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 90, no. 5, pp. 1120–1141, 2012, doi: 10.1002/cjce.20596.
- [13] Tenova, Energiron® – DR-Grade Pellets Reduction Technology / ZR & CO₂-capture-ready process descriptions, documentazione tecnica, 2010–2024.

- [14] D. Spreitzer, J. Schenk, “Reduction of Iron Oxides with Hydrogen—A Review”, *Steel Research International*, vol. 90, no. 10, article 1900108, 2019, doi: 10.1002/srin.201900108.
- [15] M.W. Chase Jr., *NIST-JANAF Thermochemical Tables*, 4th ed., American Institute of Physics, Woodbury, NY, 1998, doi: 10.18434/T42S31.
- [16] D. Ernst et al., “The Behavior of Direct Reduced Iron in the Electric Arc Furnace Hotspot”, *Metals*, 13(5), 978, 2023.
- [17] G. Krekel, J. Suer, N. Jäger, M. Traverso, “Life cycle assessment of natural gas based steelmaking via the direct reduction – Electric Arc Furnace route”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 31, art. 76, 2026, doi: 10.1007/s11367-026-02645-w
- [18] F. Rosner, D. Papadias, K. Brooks, K. Yoro, R. Ahluwalia, T. Autrey, H. Breunig, “Green steel: design and cost analysis of hydrogen-based direct iron reduction”, *Energy & Environmental Science*, vol. 16, pp. 4121–4134, 2023, doi: 10.1039/D3EE01077E.
- [19] H. Suopajärvi, K. Umeki, E. Mousa, A. Hedayati, H. Romar, A. Kemppainen, C. Wang, A. Phounglamcheik, S. Tuomikoski, N. Norberg, A. Andefors, M. Öhman, U. Lassi, T. Fabritius, “Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO₂ steel production technologies”, *Applied Energy*, vol. 213, pp. 384–407, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.01.060.
- [20] C. DiGiovanni, T. Echterhof, “Progress Toward Biocarbon Utilization in Electric Arc Furnace Steelmaking: Current Status and Future Prospects”, *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 10, no. 4, pp. 2047–2067, 2024, doi: 10.1007/s40831-024-00940-0.
- [21] E. Curcio, 2025, *Techno-Economic Analysis of Hydrogen Production: Costs, Policies, and Scalability in the Transition to Net-Zero*, *arXiv preprint*, arXiv:2502.12211.