



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Centro Interdipartimentale
per l'Energia, l'Ambiente e i Trasporti
Giacomo Ciamician



APPENDICE A

**TECNOLOGIE DI PRODUZIONE
DI ACCIAIO E PROGETTI
DI INNOVAZIONE AZIENDALI**

Appendice A

Tecnologie di produzione di acciaio e progetti di innovazione aziendali

A.1 LA PRODUZIONE DI ACCIAIO TRADIZIONALE

L'acciaio viene definito come una lega metallica con una quantità di carbonio inferiore al 2,1% in peso, mentre al di sopra di questa percentuale si parla di ghisa. Oltre al carbonio che determina le proprietà della lega come la durezza e la fragilità, l'acciaio contiene anche altri elementi in quantità variabili (Ni, Cr, Mg, ecc.) che ne determinano caratteristiche fisiche, comportamentali e di utilizzo.

La produzione di prodotti in acciaio è comunemente legata a siti altamente integrati, che seguono principalmente due cicli di produzione: il ciclo integrale con partenza da minerale e il ciclo a forno elettrico con partenza da rottame.

A. 1.1 Ciclo integrale (BF-BOF)

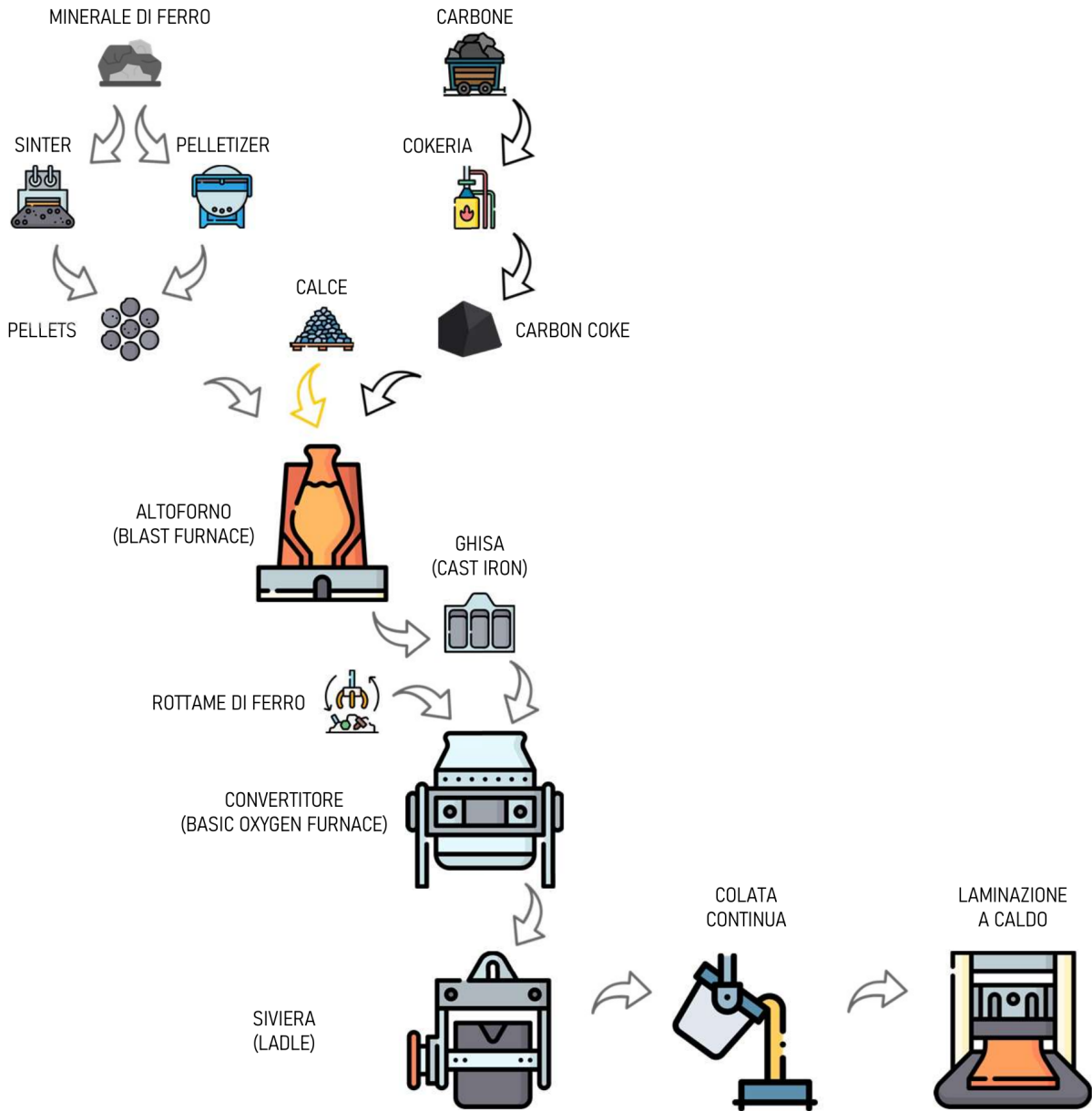
Questi siti includono normalmente la generazione di ghisa calda tramite altoforno (Blast Furnace – BF), la riduzione della ghisa ad acciaio in fornaci basiche ad ossigeno (Basic Oxygen Furnace – BOF), l'affinazione in siviera con colata continua e la successiva laminazione a caldo (Figura 1).

La materia prima per il ciclo integrale è il minerale di ferro che viene ridotto a ferro metallico tramite l'utilizzo di carbon fossile e alcuni minerali (calcare, silice, ...), che vengono pretrattati per renderli idonei all'utilizzo nell'altoforno (BF). I minerali vengono lavati, macinati e portati alla pezzatura idonea al processo chimico della riduzione in altoforno, legato a fenomeni diffusivi del carbonio all'interno del minerale. All'interno delle cokerie, il carbone fossile viene trasformato in coke metallurgico attraverso un processo termico di distillazione e viene poi caricato nell'altoforno insieme al minerale di ferro di pezzatura idonea. Il minerale di pezzatura troppo fine, viene sottoposto ad un pretrattamento di sinterizzazione all'interno dell'impianto di agglomerazione, al fine di ottenere una pezzatura omogenea. All'interno dell'altoforno, il processo di combustione del coke porta la temperatura fino a 1.600 °C e trasforma il minerale di ferro in una lega ferro-carbonio, la ghisa, con un tenore di carbonio che si aggira intorno al 4-5%.

La ghisa fusa in uscita dall'altoforno viene colata all'interno di contenitori semoventi su rotaie, denominati carri siluro, che trasportano il materiale al forno basico ad ossigeno (Basic Oxygen Furnace – BOF) dove avviene il processo di affinazione. La trasformazione della ghisa in acciaio avviene mediante l'insufflazione di ossigeno puro che abbassa il contenuto di carbonio e di impurezze (principalmente zolfo e fosforo) e ossida (totalmente o in parte) elementi come il silicio, il fosforo e il manganese. Oltre alla ghisa, la carica del forno viene arricchita con l'aggiunta di ridotte quantità di rottame e di ulteriori componenti che consentono di ottenere la tipologia di acciaio desiderata. Il calore necessario per portare il bagno di ghisa liquida alla temperatura necessaria per le lavorazioni successive (trattamenti fuori forno, solidificazione per colaggio) viene fornito dalle reazioni di ossidazione esotermiche.

Questo processo fornisce acciaio di ottima qualità ed è molto versatile poiché permette di dosare ciascun componente della lega in maniera precisa. Di contro, il processo è caratterizzato da un'elevata complessità e richiede lunghi periodi di esercizio senza soluzione di continuità, con elevate portate e grandi dimensioni delle apparecchiature. Gli elevati consumi di energia, sono spesso mitigati dal recupero dei gas emessi come sottoprodotti che vengono recuperati per la produzione di energia elettrica.¹

Figura 1: Produzione di acciaio tramite ciclo integrale (BF-BOF)

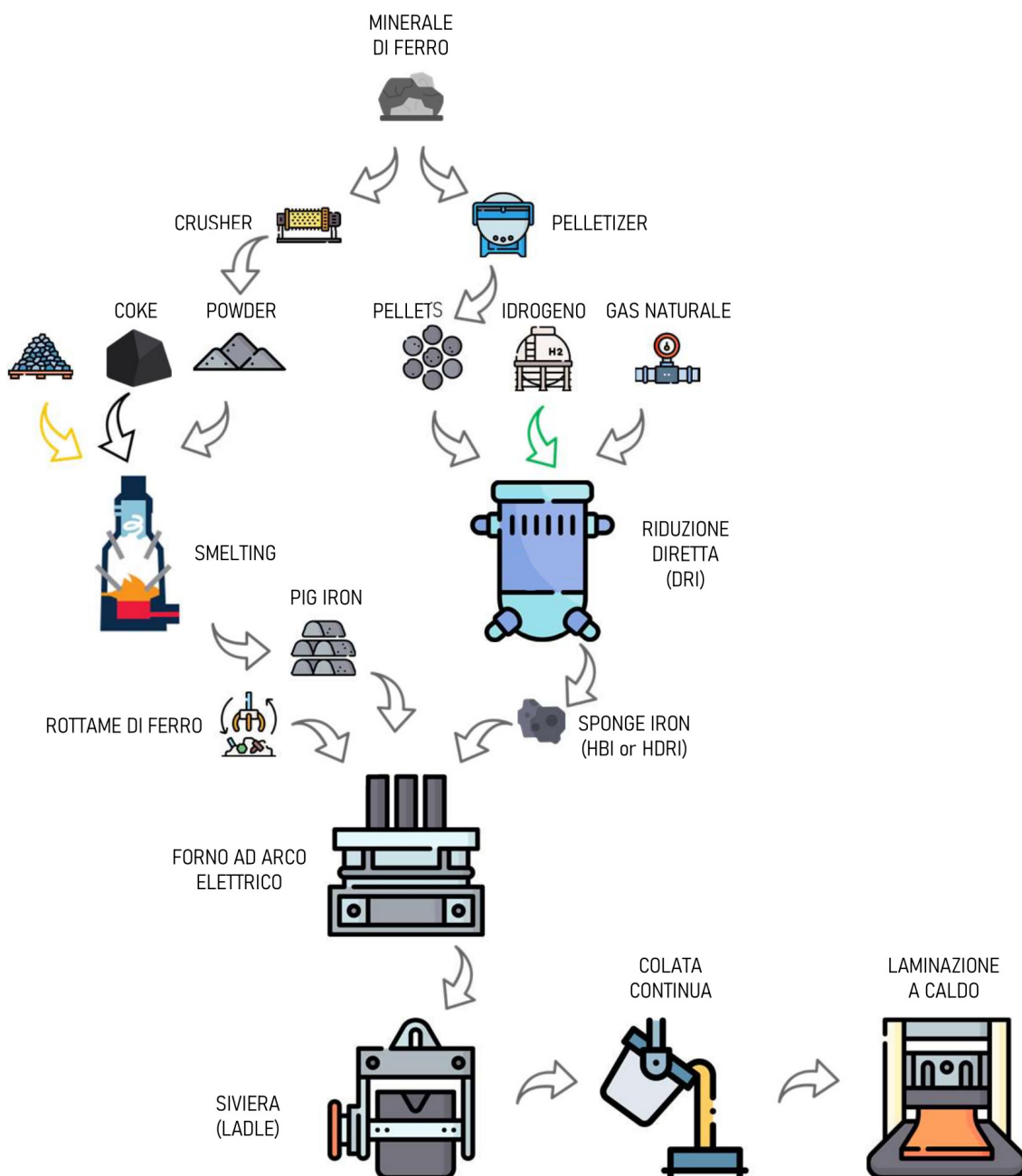


A.1.2 Ciclo a Forno Elettrico (EAF)

Il ciclo di produzione dell'acciaio attraverso il forno elettrico fonde direttamente i rottami di acciaio (opportunamente preparati e selezionati) per ottenere una nuova lega senza passare per la produzione di ghisa ed è quindi più compatto e meno complesso rispetto al ciclo integrale (Figura 2). Il forno elettrico può essere di due tipologie: il forno ad "arco elettrico" che genera un arco elettrico all'interno del crogiolo per generare calore, ed il forno "ad induzione" che fonde i rottami attraverso il passaggio di un intenso flusso elettromagnetico tra un circuito primario e un circuito secondario costituito dalla carica metallica che si vuole fondere. Oltre all'utilizzo di elettricità, è spesso previsto l'impiego di gas naturale per pre-riscaldare il rottame o di ossigeno insufflato direttamente all'interno del crogiolo.

I principali vantaggi sono legati alla dimensione ridotta, alla versatilità nella modalità d'esercizio e nei volumi di produzione e alla possibilità di diversificazione dell'approvvigionamento della materia prima secondaria, che può essere reperita sia nel mercato interno, che attraverso importazioni. Gli svantaggi sono rappresentati principalmente dall'elevato consumo di energia elettrica.¹

Figura 2: Ciclo a Forno Elettrico (EAF) da rottame, smelting e Direct Reduced Iron (DRI)



A.2 PROCESSI DI PRODUZIONE DI ACCIAIO NON-TRADIZIONALI

Questa sezione contiene una descrizione dei processi di produzione di acciaio non-tradizionali, che si suddividono in ottimizzazioni/refitting e in sostituzione completa degli impianti di produzione con tecnologie a minor emissione di carbonio.

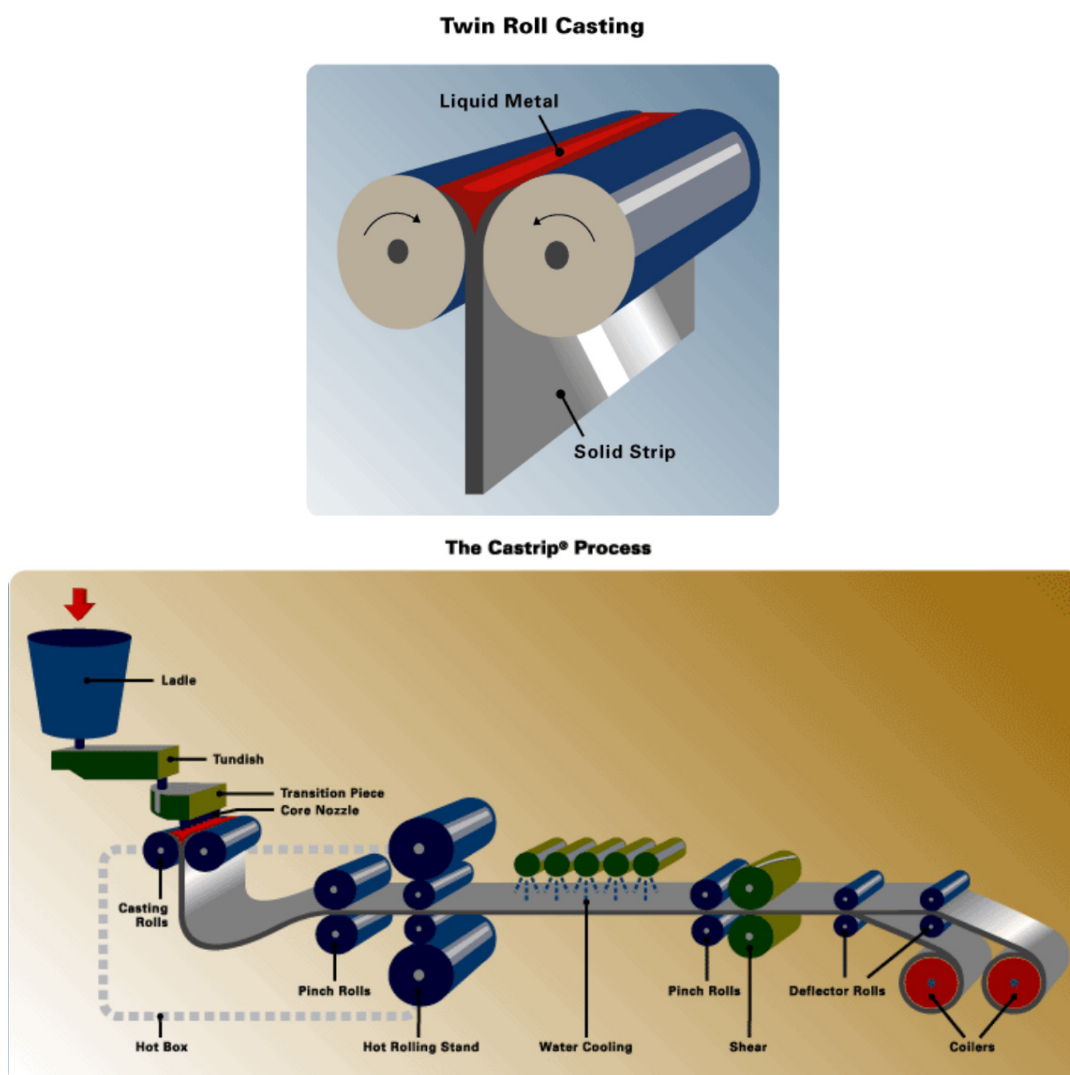
A.2.1 Ottimizzazione o refitting dei processi tradizionali esistenti

Questo paragrafo riporta le tecnologie innovative che non prevedono una sostituzione dell'impianto di produzione, ma integrano e migliorano alcune parti pre-esistenti.

A.2.1.1 Near net shape casting

La formatura “Near-net-shape” consiste in una serie di tecnologie di forgiatura, pressatura e calandratura, che permette di ottenere in fase molto anticipata componenti molto simili alla loro forma finale. Questa tecnologia si traduce in un accorciamento significativo della catena di lavorazioni che trasformano l'acciaio liquido nel prodotto finale. Questo processo permette di sostituire il tradizionale processo di laminazione a caldo (20% delle emissioni del processo di produzione dell'acciaio), poiché la calandratura diretta a temperature molto elevate (maggiori di 900 °C, al di sopra del punto di ricristallizzazione per la maggior parte degli acciai) consente una lavorazione più efficace e più semplice. Un esempio di questo processo è rappresentato dal processo Castrip® (Figura 3) utilizzato per la produzione di lamiere molto sottili di acciaio al carbonio e di acciaio inossidabile. Questo processo consente ai produttori di acciaio di ottenere laminati sottili riducendo gli step necessari rispetto al processo convenzionale, risparmiando denaro sia sui costi di capitale (CAPEX) che operativi (OPEX).²

Figura 3: Processo Castrip per la laminazione e calandratura del metallo fuso

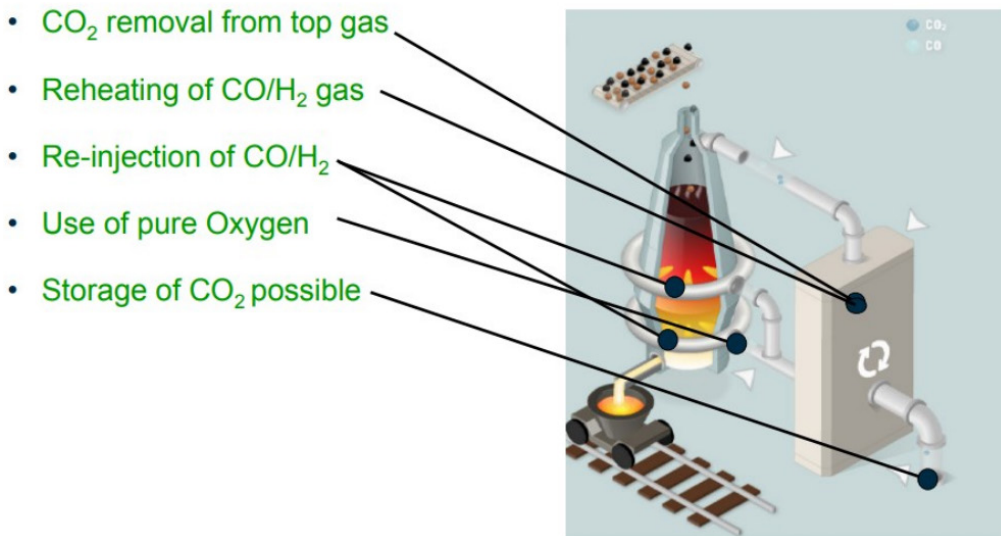


A.2.1.2 Top gas recycling (TGR - BF)

Il processo di riciclo del gas di testa (TGR) prevede di riutilizzare gli agenti riducenti contenuti nel gas in uscita dalla parte superiore dell'altoforno (BF). In questo processo, la CO_2 viene rimossa dalla corrente gassosa per riciclare gli agenti riducenti, come il monossido di carbonio (CO) e l'idrogeno (H_2). Questa modifica riduce la domanda di coke e di energia dell'altoforno e le emissioni associate alla cokeria. Le modifiche da apportare al BF convenzionale prevedono l'insufflazione di CO e H_2 tramite ugelli e lance direttamente nell'altoforno, l'introduzione di minori quantità di coke, l'utilizzo di ossigeno puro per sostenere la combustione del coke al posto di aria per evitare eccessive diluizioni dei gas all'interno dell'altoforno, e la cattura e lo stoccaggio della CO_2 dai gas in uscita in testa al BF.³

Un esempio di una tecnologia attualmente disponibile è rappresentato dal processo ULCOS-BF⁴ (Ultra Low CO_2 Steelmaking – Blast Furnace), riportata in Figura 4.

Figura 4: Processo ULCOS-BF legato alla tecnologia TGR-BF⁴



A.2.1.3 Iniezione diretta di polvere di carbone (PCI) o gas naturale nell'altoforno

Per quanto riguarda la riduzione delle emissioni di BF, possono essere considerate due opzioni: la prima è l'iniezione di polvere di carbone (PCI) direttamente nella fornace, la seconda è l'iniezione diretta di gas naturale, che implica una significativa riduzione delle emissioni di CO_2 . Queste soluzioni permettono di dosare in maniera ottimale la quantità di carbonio introdotta nel BF, al fine di limitare le emissioni legate all'utilizzo del coke, che viene caricato in largo eccesso.

A.2.1.4 Smelting reduction process

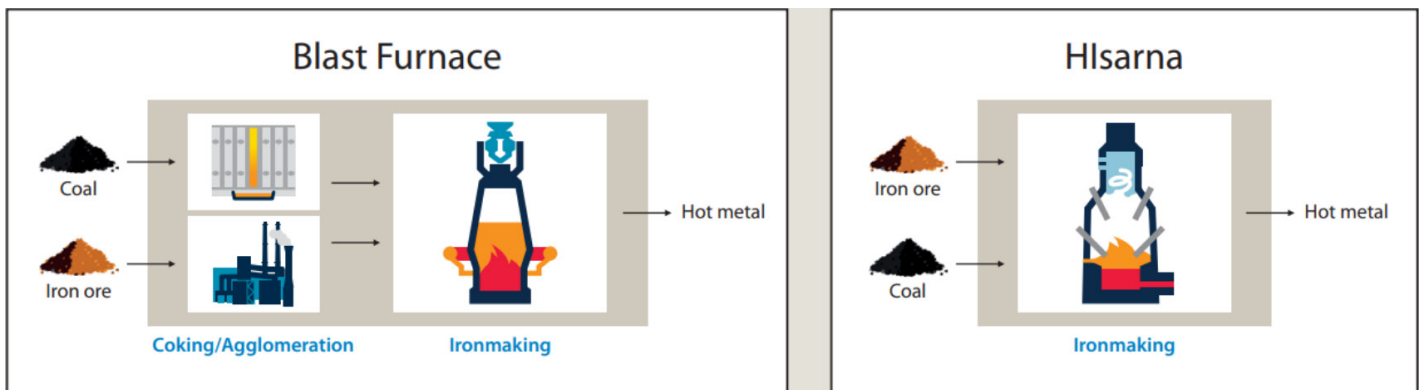
Lo smelting è un processo di fusione che utilizza carbone o coke come agente riducente per separare il ferro dagli altri materiali presenti nel minerale e convertirlo in una lega con contenuto di carbonio nell'ordine di 4-5% (ed altri costituenti in quantità più ridotte) che prende il nome di "pig iron" (Figura 2).

A differenza dell'altoforno che utilizza il coke come combustibile e agente riducente per convertire il minerale di ferro in ghisa grezza (che viene poi ulteriormente convertita in acciaio), il processo di smelting fornisce un prodotto (il "pig iron") che viene ulteriormente fuso (solitamente in EAF) e ossidato da una corrente d'aria per eliminare le impurezze ed ottenere acciaio.

In genere, il processo di smelting inizia con la selezione del minerale che viene poi macinato fino a diventare una polvere fine, mescolato con altri materiali di supporto, come ad esempio carbone o coke, e un agente fondente, solitamente della calce. Quindi, a differenza del processo basato su BF, non richiede un pre-trattamento delle materie prime e una sinterizzazione e pellettizzazione del minerale di ferro. La miscela di minerale, carbone o coke e agente fondente viene riscaldata a temperature elevate fino a quando il metallo si separa dagli altri materiali e viene raccolto nella parte inferiore del forno.

Un esempio di questo processo è rappresentato dalla tecnologia HISarna[®] (Figura 5), che elimina totalmente il pre-trattamento del minerale, che può essere caricato direttamente nell'altoforno insieme ad una percentuale fino al 50% di rottame per ottenere "pig iron". Poiché la corrente in uscita dal processo di smelting contiene un'alta concentrazione di CO_2 , è possibile ipotizzare di catturarla e stoccarla, al fine di ridurre ulteriormente le emissioni dirette di questo processo.⁵

Figura 5: Processo Hisarna per lo smelting del minerale di ferro

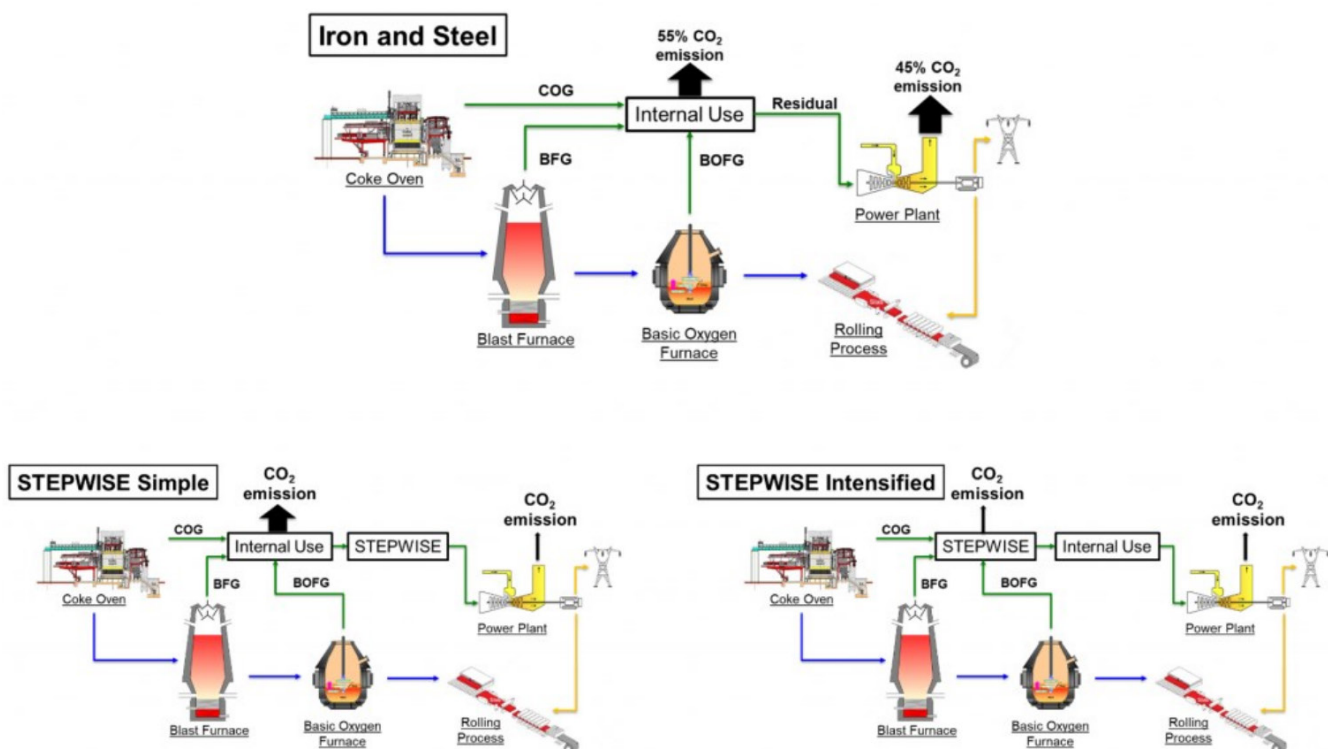


A.2.1.5 Cattura, uso e stoccaggio dell'anidride carbonica (CCUS)

L'anidride carbonica emessa durante il processo di produzione dell'acciaio può essere catturata in tutte e tre le fonti puntuali di CO₂ del processo convenzionale BF-BOF (cokeria, BF e BOF), riducendo le emissioni di circa il 70%.³ Questo permetterebbe di effettuare un retrofitting dei processi esistenti, mantenendo le apparecchiature già in esercizio senza dismettere integralmente il processo BF-BOF.^{6,7}

Fra i numerosi esempi di progetti che si focalizzano su questa tecnologia, si può citare il processo STEPWISE,⁸ finanziato dall'UE tramite i fondi Horizon 2020. Il progetto si è concentrato sullo sviluppo di una tecnologia di cattura pre-combustione di CO₂ basata sul processo SEWGS (Sorption Enhanced Water Gas Shift)⁹, come schematizzato in Figura 6. Il processo combina l'adsorbimento della CO₂ sulla superficie di un solido poroso e la reazione di water gas shift (WGS) che converte CO e H₂O in CO₂ e H₂. Poiché la CO₂ viene adsorbita sul mezzo poroso, si spinge l'equilibrio verso i prodotti, raggiungendo alte conversioni e ottenendo una resa in idrogeno elevata in un'unica operazione, con un guadagno complessivo in termini di efficienza energetica. L'unità pilota è situata presso gli stabilimenti di Swerea Mefos a Luleå, in Svezia ed è alimentata dall'adiacente acciaieria SSAB. L'ipotesi del progetto è di utilizzare l'idrogeno in una turbina per ottenere elettricità, sebbene l'idrogeno prodotto potrebbe essere utilizzato in maniera più efficiente come agente riducente in processi alternativi di produzione di acciaio.

Figura 6: Processo SEWGS per la cattura di CO₂ e la produzione di idrogeno

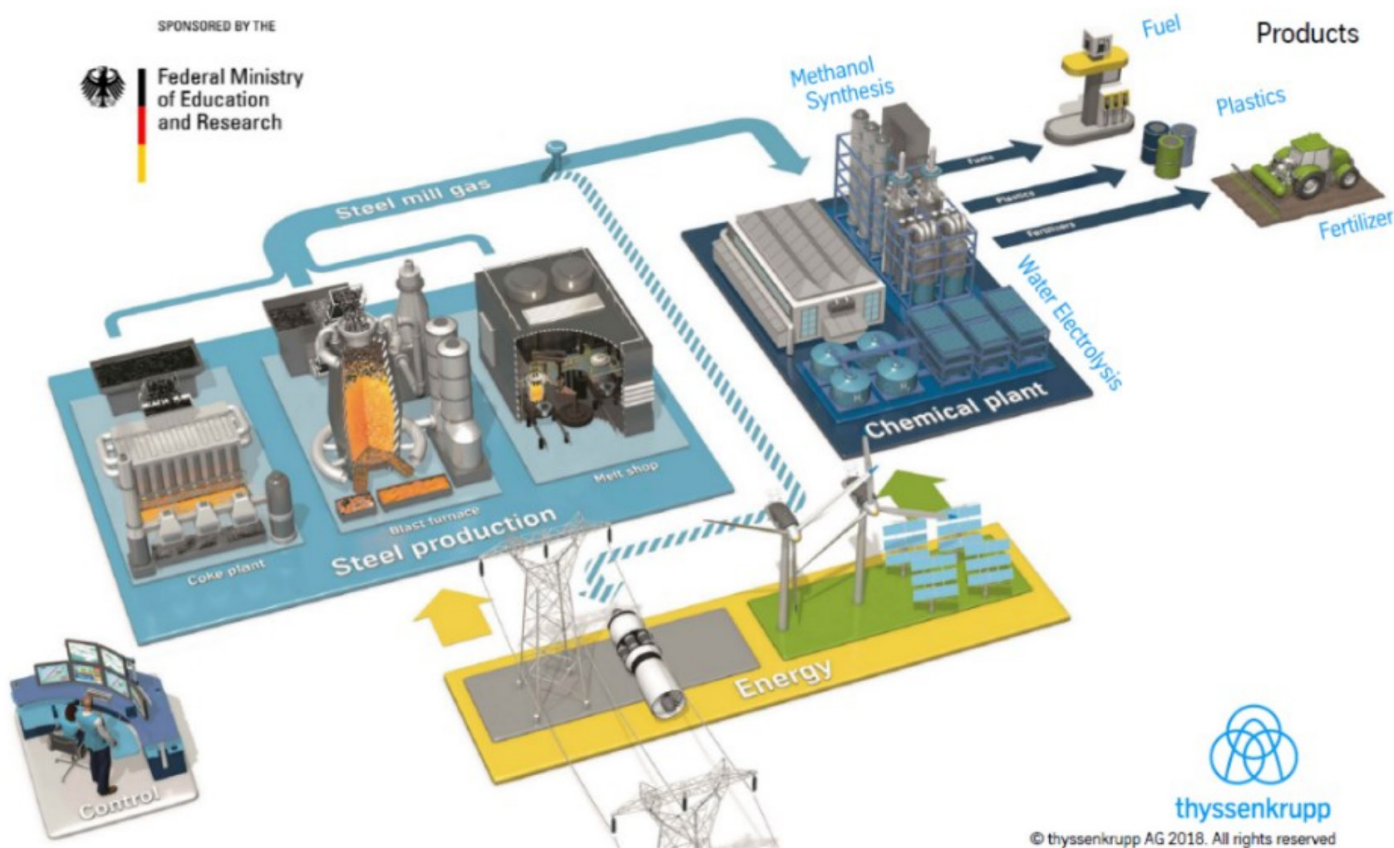


Un'ulteriore cattura dell'anidride carbonica proveniente dalle acciaierie a ciclo integrato può avvenire dove vengono convogliati i gas della cokeria, il BF e il BOF per bruciarli contemporaneamente in un impianto di cogenerazione (CHP) per ottenere calore ed energia elettrica. La CO₂ contenuta nel flusso di gas in uscita dall'impianto di cogenerazione può essere catturata tramite la tecnologia di cattura che si basa sulla separazione della CO₂ mediante assorbimento chimico in un solvente. La separazione della CO₂ con assorbimento chimico utilizza generalmente solventi basati su ammine (monoetanolamina – MEA, dietanolamina – DEA, diglicolamina - DGA) o su sali metallici (NaOH, K₂CO₃) tutte tecnologie basate su processi noti e già presenti sul mercato.^{10,11}

Rimane il problema relativo ai siti di stoccaggio della CO₂, poiché i siti idonei non sono dislocati in maniera omogenea sul territorio italiano ed è necessario installare delle infrastrutture (tubazioni, unità di pressurizzazione e pompaggio) che la trasportino nei luoghi dedicati allo stoccaggio (miniere dismesse, cavità saline, giacimenti esausti). Si evidenzia come spesso l'insufflazione di CO₂ avvenga all'interno di giacimenti di petrolio esausti allo scopo di favorire la fuoriuscita della fonte fossile rimanente (EOR - Enhanced Oil Recovery), stimolando quindi la produzione di petrolio e vanificando quindi gli sforzi fatti per limitare le emissioni dai processi produttivi. Inoltre, l'iniezione di fluidi nel sottosuolo può essere causa di sismicità indotta e/o innescata, proporzionalmente a quanto le aree siano sismicamente attive, acuendo le criticità di un territorio ad alto rischio sismico come l'Italia. Attualmente, l'unico progetto CCS su larga scala nel settore siderurgico è il progetto Al Reyadah CCS ad Abu Dhabi. Il progetto è operativo dal 2016 e cattura 0,8 MtCO₂/anno. La CO₂ viene trasportata tramite un oleodotto di 43 km al giacimento petrolifero di Rumaitha ai fini dell'Enhanced Oil Recovery (EOR).¹²

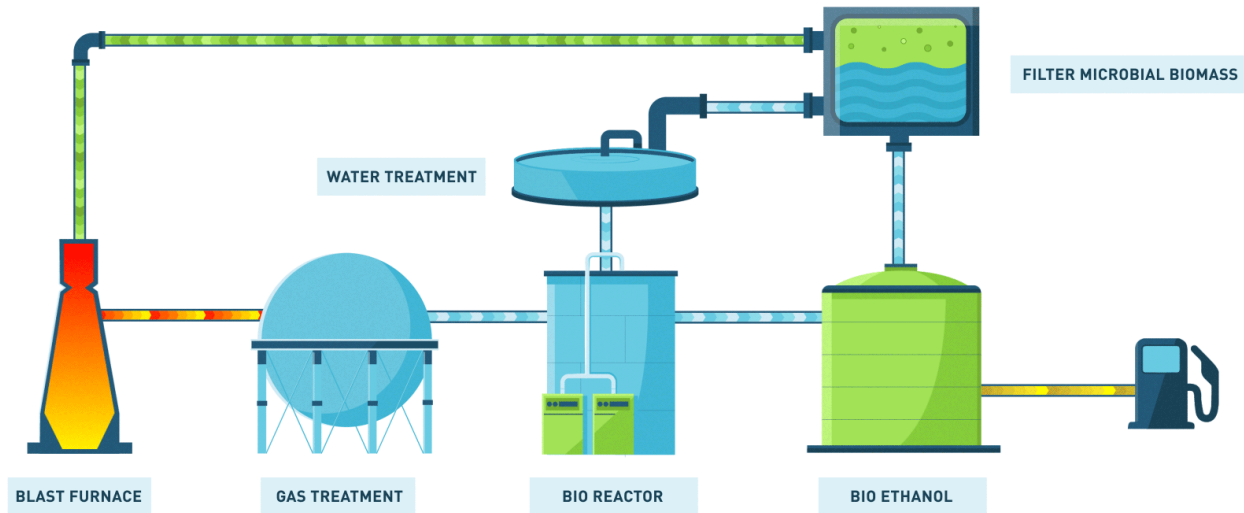
Per contrastare questa tendenza, l'anidride carbonica può essere utilizzata per produrre altri materiali tramite la cattura e la conversione in altre sostanze utili (CCU).¹³ Un esempio di questa applicazione è il progetto Carbon2Chem[®] guidato da Thyssenkrupp, che mira a utilizzare i gas provenienti dal processo di produzione dell'acciaio (N₂, CO, CO₂, H₂ e CH₄) per produrre sostanze chimiche dal valore aggiunto come ammoniaca e metanolo (Figura 7). L'impianto pilota di Duisburg, operativo da marzo 2018, ha avuto successo nella produzione di ammoniaca, metanolo e alcoli superiori dai gas di processo dell'acciaieria. Oltre ai gas di acciaieria, questi processi richiedono un apporto di idrogeno aggiuntivo, che viene prodotto utilizzando un elettrolizzatore alcalino (AEC) da 2 MW alimentato da elettricità prodotta da fonti rinnovabili. La seconda fase del progetto (finanziata dal governo tedesco con 75 M€ fino al 2024) prevede un ampliamento del processo e l'applicazione ad altri settori industriali e una commercializzazione della tecnologia. Si prevede che Carbon2Chem[®] contribuirà a ridurre del 30% le emissioni di CO₂ nell'acciaieria di Thyssenkrupp entro il 2030.¹⁴

Figura 7: Progetto Carbon2Chem per la conversione di anidride carbonica in metanolo e altre sostanze



Il progetto Steelanol¹⁵ è un altro esempio di CCU applicato all'industria siderurgica. Questo processo si basa sulla produzione di etanolo presso l'acciaieria di Ghent, in Belgio, utilizzando una tecnologia sviluppata da LanzaTech, in base alla quale i gas prodotti durante le reazioni chimiche associate al processo di produzione dell'acciaio (principalmente CO al 24-56%) vengono fermentati da microorganismi che secernono etanolo (Figura 8). L'impianto è entrato in funzione nel 2022 e produrrà 80M litri di etanolo in regime di produzione massima. Il primo impianto di questo genere è entrato in funzione nel 2018 in Cina, con una produttività di 30M litri di etanolo nel primo anno.

Figura 8: Processo Steelanol per la conversione di CO in etanolo tramite microorganismi



Altri impianti siderurgici che attualmente (Marzo 2023)¹⁶ sono in funzione o in progettazione sono riportati nell'elenco seguente:

- Un impianto dimostrativo analogo a quello di Abu Dhabi in Venezuela che però libera la CO₂ catturata in atmosfera
- Un impianto DRI in Messico cattura la CO₂ per convertirla in altri prodotti (CCUS), fra cui CO₂ per uso alimentare
- Il progetto Carbon4PUR, intrapreso da un consorzio di 11 partner in tutta Europa, tra cui ArcelorMittal, sta sperimentando la conversione dei gas di scarico dell'industria siderurgica in schiume e rivestimenti poliuretani con una produttività prevista di 20 t/anno.¹⁷
- Il progetto FReSMe, un consorzio di partner europei tra cui Tata Steel e SSAB, sta sperimentando la conversione del gas di altoforno in metanolo con una produttività prevista di 1 t/giorno.

A.2.1.6 Utilizzo di biomassa come combustibile o agente riducente (biomass cofiring)

Questo processo utilizza la biomassa (biomassa secondaria, ad esempio, residui delle lavorazioni agricole) o biogas come agente riducente o combustibile alternativo. La biomassa è generalmente caratterizzata da un elevato contenuto di umidità e componenti volatili e deve quindi subire trattamenti termici di essiccazione preliminari prima del suo impiego. Questa alternativa dipende dalla regione in cui è situata l'acciaieria ed è più rilevante nelle aree in cui l'approvvigionamento di biomassa è ampiamente disponibile. In Italia, la disponibilità di biomassa probabilmente non è sufficiente per ridurre le emissioni di carbonio su larga scala, ma può essere di supporto per ridurre le emissioni di CO₂ derivanti dal pre-riscaldamento del rottame ferroso all'interno dell'EAF.

Quando in un processo di produzione entrano però in gioco le biomasse, si deve fare sempre grande attenzione al ritorno dell'investimento energetico (Energy Return On Energy Invested - EROEI) legato alla raccolta ed al trasporto delle biomasse: basti qui ricordare che il valore di EROEI per i biocombustibili oscilla tra 1 ed 1.6¹⁸, raggiungendo valori più alti (attorno a 8-10) solo per casi molto particolari (canna da zucchero in Brasile) che non sposta il giudizio di bassa efficienza energetica dell'uso delle biomasse, a cui vanno anche sommati i poco sostenibili impatti ambientali connessi alla filiera produttiva.

Questa tecnologia è stata studiata nel progetto GREENEAF²⁹, dove è stato analizzato il ciclo EAF per sostituire parzialmente o totalmente il carbone (insufflato in polvere) e il gas naturale con carbone vegetale e syngas prodotti dalla pirolisi di biomasse.

A.2.2 Installazione di tecnologie di produzione innovative

Questo paragrafo presenta quelle tecnologie che prevedono una sostituzione della tecnologia di produzione attualmente utilizzata (BF-BOF) con un'alternativa più sostenibile.

A.2.2.1 Sostituzione di BF con Electric Arc Furnaces (EAF)

Il processo legato al EAF si basa sull'elettificazione del processo di fusione e la sua decarbonizzazione si ottiene attraverso una riduzione delle emissioni indirette legate al mix energetico utilizzato per la produzione di energia elettrica. La disponibilità a buon mercato di energia proveniente da fonti rinnovabili giocherà un ruolo fondamentale nelle performance ambientali di questa tecnologia in futuro.

Il vantaggio principale della tecnologia basata sul EAF risiede nell'utilizzo di rottame in sostituzione del minerale di ferro. Il riciclo di una tonnellata di acciaio permette di risparmiare fino a 1,5 tCO₂, 1,4 t di minerale, 740 kg di carbone e 120 kg di calcare, rispetto all'utilizzo della tecnologia BF-BOF²⁰. L'utilizzo di una maggiore quantità di rottame richiede tuttavia il reperimento di quantità sempre maggiori di materiale secondario, che deve soddisfare requisiti sempre maggiori di qualità, principalmente legate alla presenza di impurezze indesiderate (principalmente rame). Il miglioramento delle qualità del rottame può avvenire sia nella fase di fine vita attraverso una selezione e separazione migliore del rifiuto, sia nella fase di progettazione, attraverso l'implementazione di un design ottimale per il disassemblaggio.²¹ Per quanto riguarda il mercato italiano, la conversione dell'unico impianto a ciclo integrale (Acciaierie d'Italia di Taranto) con la tecnologia basata sul EAF che utilizzi rottame come materia prima non appare una scelta strategicamente conveniente, poiché legherebbe l'intera produzione di acciaio italiano all'approvvigionamento di rottame. Sarebbe auspicabile invece accoppiare la tecnologia EAF ad altre tecnologie di produzione di materie prime (vedi DRI del paragrafo seguente), prevedendo un mix di materie prime di carica al forno elettrico costituito da diverse fonti (rottame, sponge iron, pig iron, ecc.)

A.2.2.2 Direct Reduced Iron (DRI)

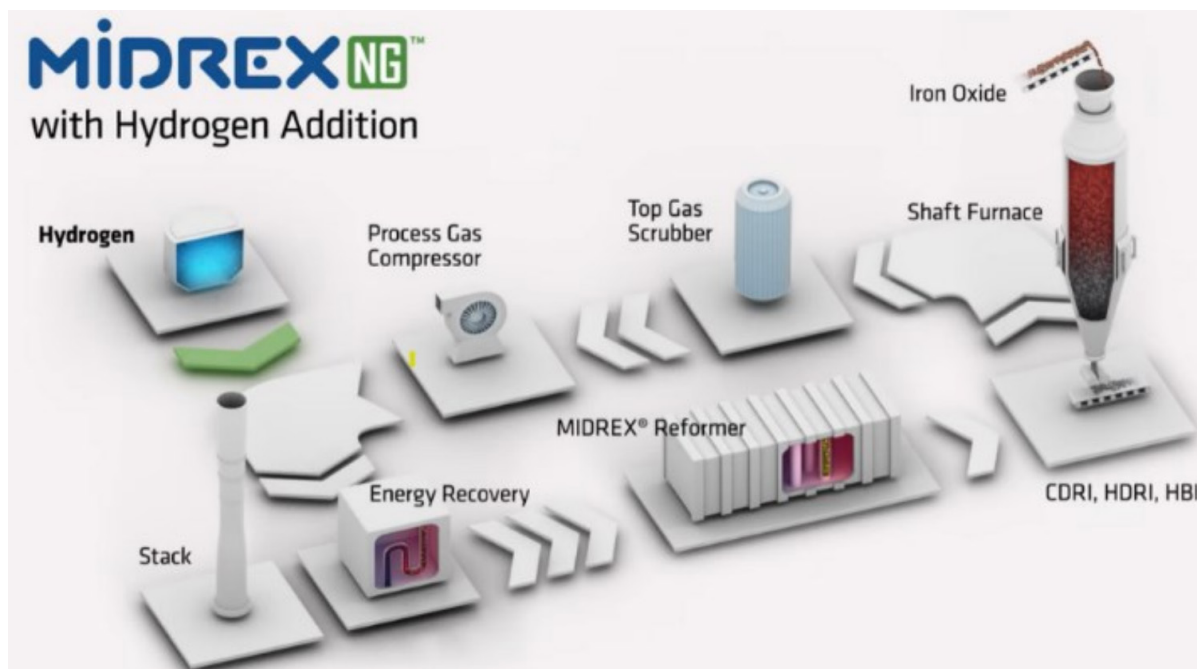
L'utilizzo di questa tecnologia prevede l'impiego di un agente riducente per la riduzione del minerale di ferro a ferro metallico, senza raggiungere la temperatura di fusione del minerale. Come agente riducente può essere utilizzato il gas naturale (nel breve termine) o idrogeno (a lungo termine): le performance ambientali saranno quindi fortemente dipendenti dalla disponibilità di idrogeno verde e quindi di elettricità da fonti rinnovabili.

La riduzione diretta del ferro tramite gas naturale per la produzione di acciaio primario permette di sostituire il coke all'interno dell'altoforno, che si traduce in una riduzione di circa il 66% dei gas serra emessi rispetto al BF tradizionale.⁵ Questa tecnologia risulta favorevole per Paesi produttori di gas naturale (Paesi Mediorientali, Russia, Nordamerica) poiché richiede un flusso continuo di gas naturale a prezzo ridotto, che però dovrà essere sostituito sul lungo periodo dall'idrogeno.

L'idrogeno può infatti essere utilizzato al posto del gas naturale per ridurre il minerale di ferro negli impianti di riduzione diretta, eliminando totalmente le emissioni di CO₂ dal processo. Il prodotto di questa fase (denominato "sponge iron") deve quindi essere ulteriormente fuso in acciaio grezzo in un forno elettrico ad arco, dove può essere aggiunta anche una quota di rottame. Se l'idrogeno e l'energia elettrica utilizzate in questo processo sono prodotti interamente da fonti rinnovabili, allora questo processo di produzione (DRI e fusione in EAF) può essere considerato effettivamente carbon neutral (Figura 2). Un prodotto si definisce carbon neutral, quando il produttore compensa tutte le emissioni legate alla sua produzione con attività che sequestrano lo stesso quantitativo emesso (progetti di riforestazione) oppure con attività che ne hanno evitato una pari emissione (progetti di conservazione delle foreste naturali, progetti di produzione di energie rinnovabili, ecc.).

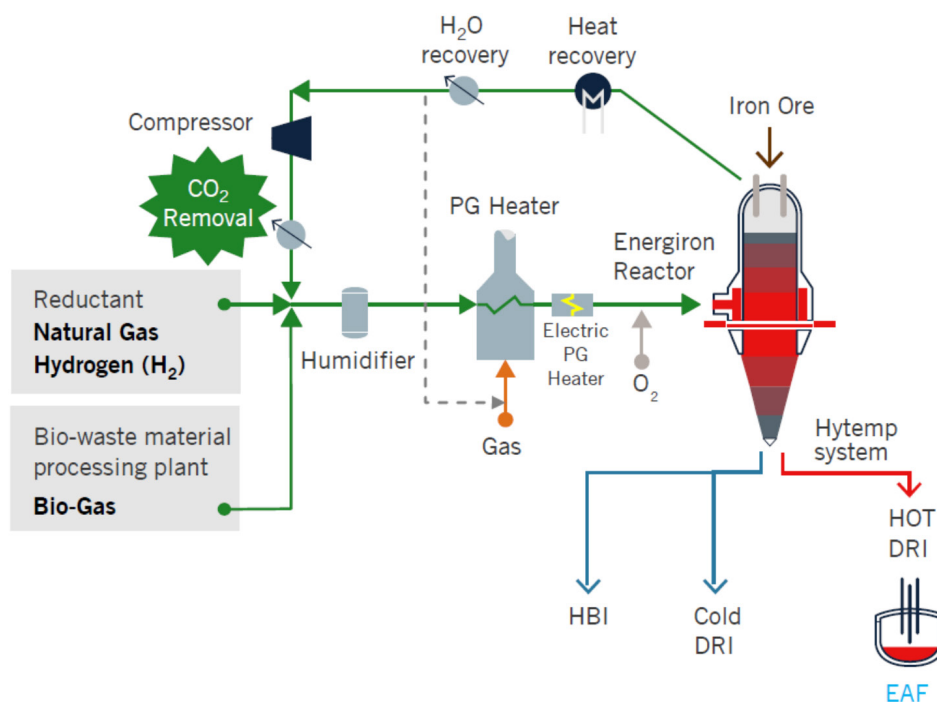
Un esempio di questa tecnologia è il processo Midrex[®] che prevede sia l'utilizzo del gas naturale, che quello di idrogeno. Lo schema in Figura 9, prevede l'utilizzo di gas naturale in combinazione con l'idrogeno, ma le configurazioni sono molteplici e permettono di eliminare la presenza del gas naturale senza apportare modifiche significative all'impianto. I prodotti del forno di riduzione possono essere Cold Direct Reduced Iron (CDRI) a circa 50°C per una conversione in acciaio successiva, Hot Direct Reduced Iron (HDRI) a 650°C da convertire direttamente in EAF e Hot Briquettes Iron (HBI) che derivano da una compressione del HDRI per facilitarne il trasporto.

Figura 9: Processo Midrex per la riduzione diretta del minerale di ferro (DRI).



Un'altra configurazione impiantistica del DRI è quella prevista nell'impianto HyL, conosciuto anche con il nome Energiron ZR[®] (Figura 10). Entrambe le tecnologie si basano sull'azione riducente di CO e H₂, ma mentre nel processo Midrex vengono prodotte in un reformer e poi introdotte nel reattore di riduzione, in HyL il gas naturale viene immesso direttamente nel reattore di riduzione e la formazione di CO e H₂ avviene direttamente nel reattore di riduzione. Anche in questo caso è possibile introdurre solamente H₂ nel reattore, evitando l'utilizzo di CO, sebbene questa configurazione possa diminuire la cinetica della reazione di riduzione e la produttività dell'impianto. Inoltre, la sola riduzione con H₂ non consente una corretta carburazione del ferro ridotto, prevedendo quindi l'introduzione di una fonte di carbonio aggiuntiva durante altre fasi di produzione dell'acciaio.

Figura 10: Processo HyL (Energiron ZR) per la riduzione diretta del minerale di ferro (DRI).



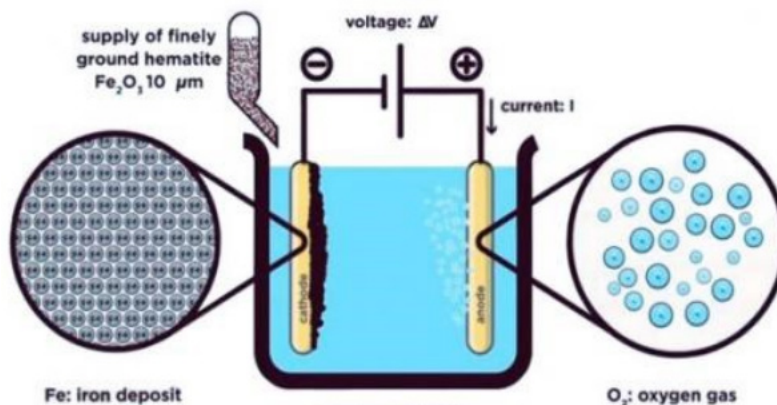
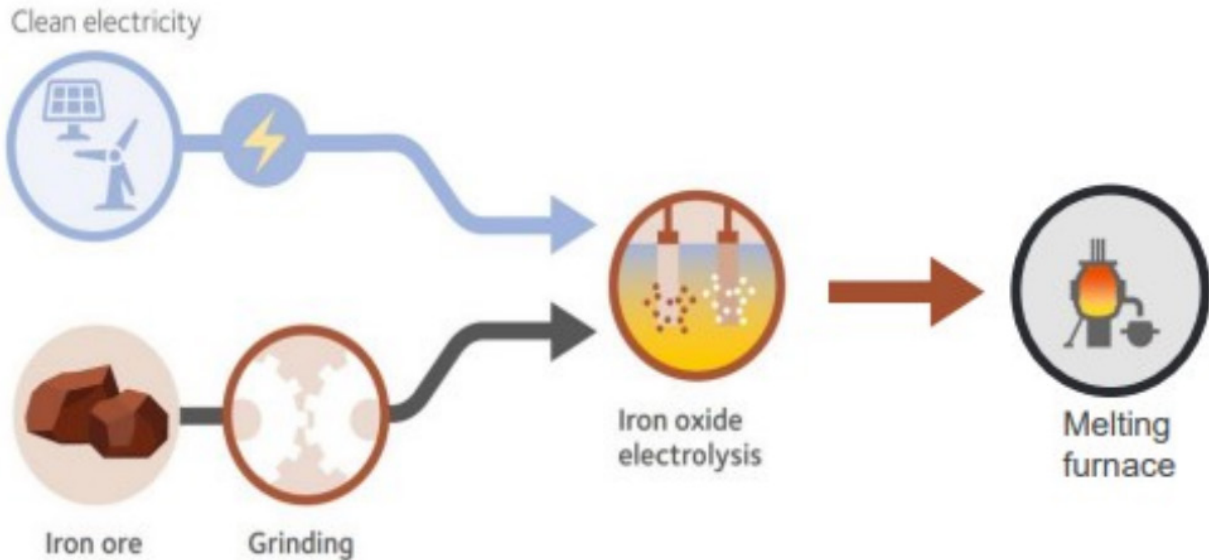
Esistono impianti di produzione di DRI che hanno già effettuato (o stanno implementando²²) la sostituzione totale del gas naturale con idrogeno e diversi altri progetti attivi che si stanno occupando di mettere in pratica questa tecnologia.

A.2.2.3 Raffinazione elettrolitica o elettrowinning (EW)

È in fase di sviluppo un'ulteriore tecnologia legata alla riduzione diretta del minerale di ferro, denominata "raffinazione elettrolitica" o elettrowinning. Questa tecnologia prevede la macinazione del minerale e la sua miscelazione in sospensione all'interno di un elettrolizzatore che, sotto l'azione di una differenza di potenziale, separa il metallo (che si deposita al catodo) dalle impurezze, che precipitano o rimangono in soluzione.

Un esempio di questo processo deriva dal progetto **SIDERWIN23** (Development of new methodologies for Industrial CO₂-free steel production by electrowinning), sponsorizzato da ArcelorMittal, che si è concluso a marzo 2023 e ha raggiunto un TRL 6 (Figura 11).

Figura 11: Processo SIDERWIN per l'implementazione della tecnologia DRI basata sull'elettrolisi



A.3 PROGETTI DI CONSORZI DI AZIENDE IN EUROPA E NEL MONDO

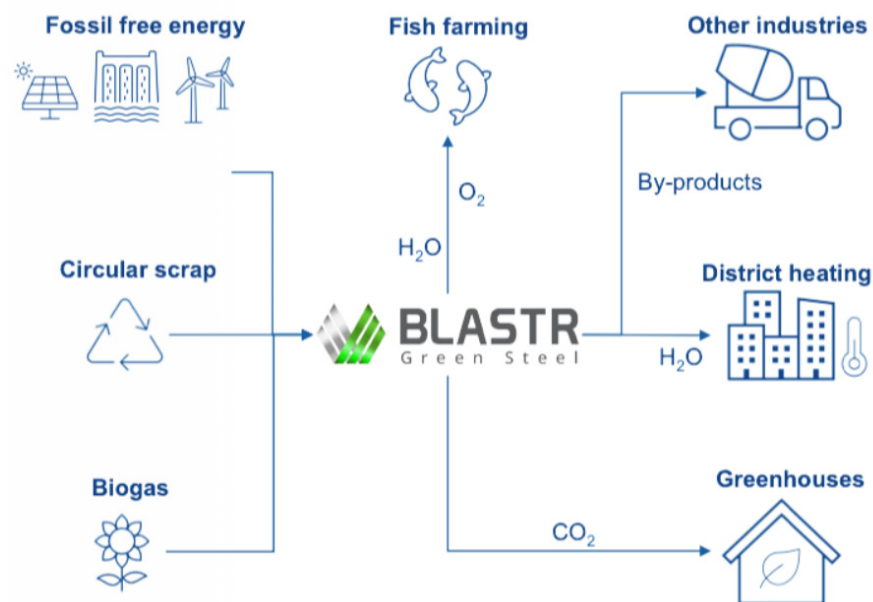
Il settore siderurgico europeo ha sviluppato diversi progetti industriali dedicati alle nuove tecnologie per la produzione integrata di acciaio. Il focus principale è lo sviluppo della tecnologia DRI (Direct Reduced Iron) per l'utilizzo di idrogeno verde per ottenere la riduzione diretta del minerale ferroso, evitando l'utilizzo del carbone e le conseguenti emissioni di CO₂.

A.3.1 BLASTR Green Steel

BLASTR Green Steel è una start-up norvegese nata nel 2021 che, coadiuvata da diversi partner, si dedica alla conversione dei forni a coke tradizionali utilizzati nella produzione di acciaio in Europa, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di carbonio del settore siderurgico di 4,6 Mt CO₂ all'anno, producendo acciaio in un impianto siderurgico in Finlandia.

Il progetto mira a sostituire il carbone e il coke, fonti di energia utilizzate nei forni tradizionali (BF), con l'idrogeno verde prodotto da fonti rinnovabili come l'energia solare ed eolica. Il progetto intrapreso dall'azienda si occuperà di reperire il minerale di ferro in Norvegia, per poi trasportarlo ad un sito produttivo siderurgico finlandese con una potenzialità di 2,5 Mton all'anno a partire dal 2026 (Figura 12).

Figura 12: Progetto BLASTR



Il progetto BLASTR prevede l'installazione di un sistema di produzione di idrogeno verde ad alta temperatura (elettrolizzatori a ossidi solidi - SOEC) all'interno dei forni a coke tradizionali che consente di produrre idrogeno a partire da vapore acqueo ed utilizzarlo nella riduzione diretta del minerale ferroso. Non sono ancora disponibili ulteriori informazioni sulle tecnologie che verranno utilizzate.

A.3.2 GravitHy

Il progetto GravitHy è stato proposto nel 2022 da un consorzio di diversi partner industriali nel settore siderurgico ed energetico ed è in parte finanziato dalla Unione Europea tramite l'European Green Hydrogen Acceleration Center (EGHAC), sponsorizzato da Breakthrough Energy. Il progetto prevede la costruzione in Francia di un impianto per la produzione di green steel da 2 Mton utilizzando la tecnologia di riduzione diretta (DRI) per il 2027.

L'obiettivo di GravitHy è quello di produrre acciaio a bassa emissione di carbonio utilizzando idrogeno prodotto tramite energia rinnovabile o a basso contenuto di carbonio, che venga poi utilizzato per la produzione di ferro ridotto. Il prodotto potrà essere poi venduto come ferro spugnoso o utilizzato per la successiva produzione di acciaio all'interno dello stabilimento.

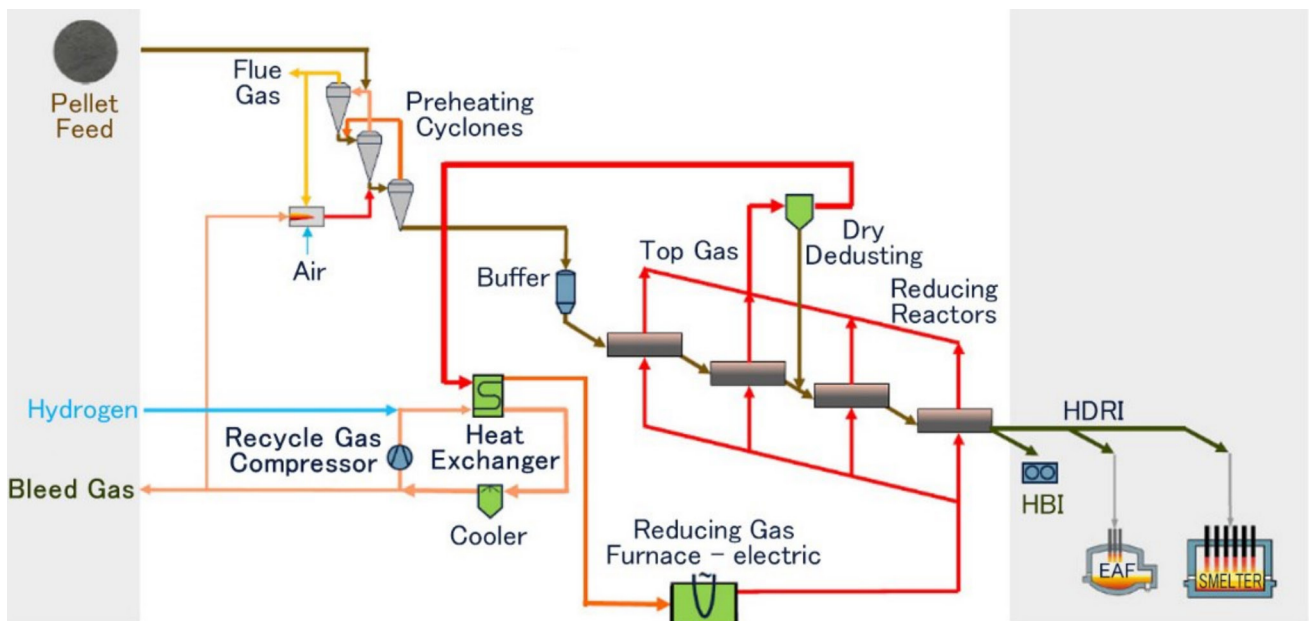
A.3.3 HYFOR - HYdrogen-based Fine-Ore Reduction

HYFOR è un progetto di ricerca nato nel 2016 focalizzato alla produzione di acciaio a basse emissioni di CO₂. Superata la fase di laboratorio, un impianto pilota è stato costruito nel 2021 in Austria e la fase di implementazione industriale è programmata nel 2025. Il progetto è stato avviato da un consorzio di sei aziende tedesche appartenenti al settore dell'acciaio e dell'energia ed è finanziato dal Ministero federale tedesco dell'Economia e dell'Energia.

La tecnologia principale utilizzata da HYFOR è la riduzione diretta del minerale di ferro utilizzando idrogeno, permettendo un controllo preciso del processo produttivo e un migliore recupero degli scarti di produzione. La riduzione del minerale ferroso avviene in un reattore a letto fluido, che permette di evitare le fasi preliminare di agglomerazione, sinterizzazione e pellettizzazione del minerale. Questa innovazione permette di utilizzare anche polveri di diversa qualità provenienti dai processi estrattivi, che ad oggi necessitano di un pretrattamento per aumentarne la granulometria.

Il progetto HYFOR mira a dimostrare la fattibilità della produzione di acciaio a basse emissioni di CO₂ su scala industriale e a fornire soluzioni concrete per la transizione verso una società a basse emissioni di carbonio (Figura 13).

Figura 13: Progetto HYFOR



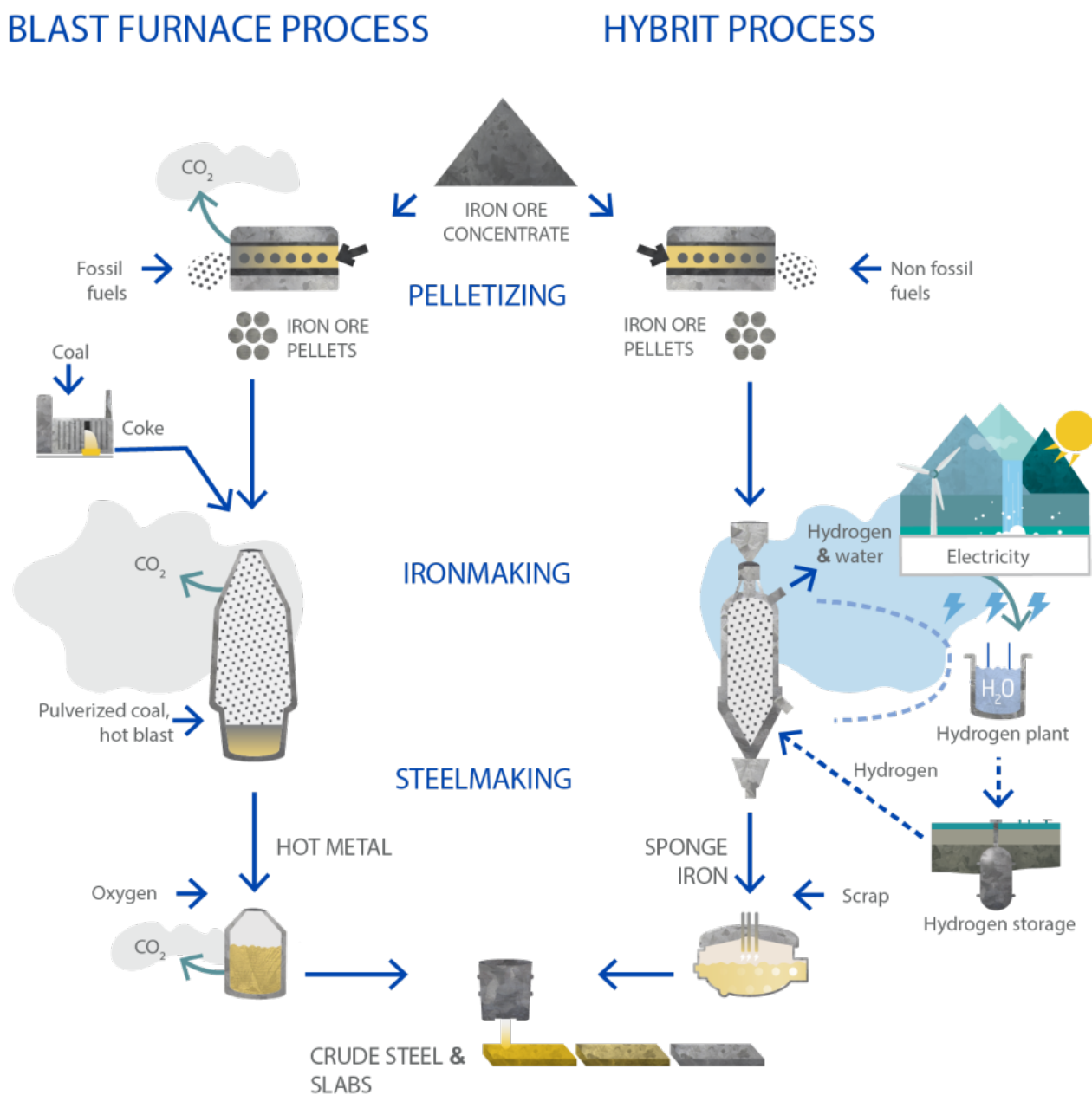
A.3.4 HYBRIT - Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology

Il progetto HYBRIT²⁴ è un'iniziativa avviata in Svezia nel 2016, con l'obiettivo di creare una produzione di acciaio senza emissioni di CO₂ entro il 2026. Il progetto HYBRIT è stato avviato in collaborazione tra la società svedese di acciaio SSAB, l'azienda mineraria LKAB e la compagnia energetica Vattenfall. Il progetto è stato sostenuto anche dal governo svedese, che ha stanziato finanziamenti per la ricerca e lo sviluppo della tecnologia dell'idrogeno, e dall'Unione Europea.

Il progetto prevede l'utilizzo di idrogeno verde al posto del carbone, usato come combustibile per la produzione di acciaio. L'idrogeno viene prodotto attraverso l'elettrolisi dell'acqua (500 MW) utilizzando energia rinnovabile, come l'energia fotovoltaica o eolica.

Il primo passo del progetto HYBRIT è stato la costruzione di una centrale pilota per la produzione di idrogeno verde presso la sede di LKAB a Malmberget. La centrale pilota ha iniziato a funzionare nel 2020, producendo idrogeno verde utilizzando energia eolica. Inoltre, la SSAB ha avviato un progetto pilota per la produzione di acciaio a basso tenore di carbonio utilizzando l'idrogeno verde (Figura 14).

Figura 14: Progetto HYBRIT

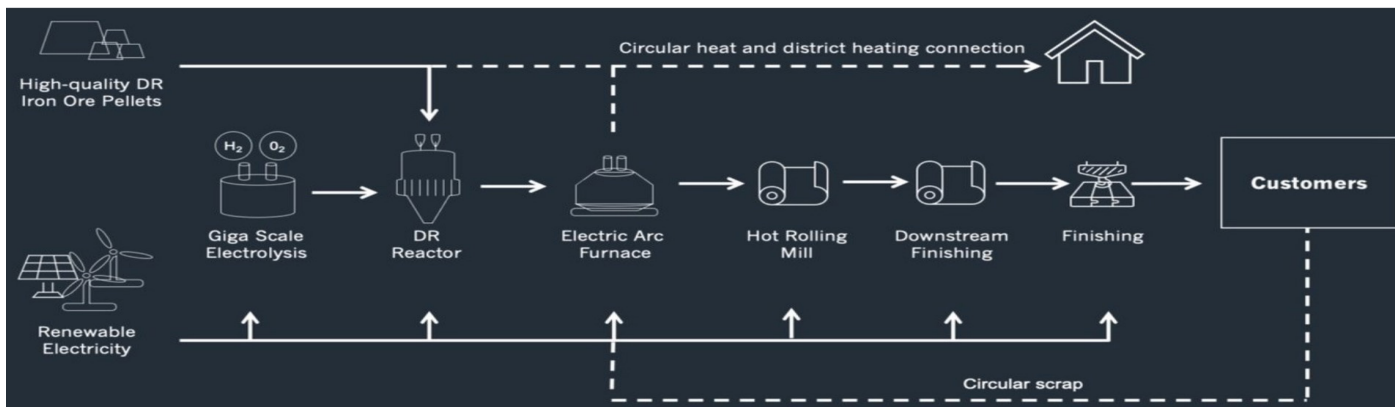


A.3.5 H2 Green Steel

Il progetto H2 Green Steel utilizza l'idrogeno verde come agente riducente per la produzione di acciaio al posto del coke.

Il progetto H2 Green Steel prevede la costruzione di un impianto pilota di riduzione diretta (DRI) in Svezia per portarlo su scala industriale (5 Mton all'anno) entro il 2030. L'impianto utilizzerà l'idrogeno verde prodotto attraverso l'elettrolisi dell'acqua utilizzando energia rinnovabile e sarà integrato con il tessuto economico e sociale circostante, fornendo acqua calda sanitaria tramite teleriscaldamento (Figura 15).

Figura 15: Progetto H2 Green Steel



A.4 ATTIVITÀ DI DECARBONIZZAZIONE PROMOSSE DA ACCIAIERIE ITALIANE

A differenza delle aziende europee e mondiali focalizzate sull'introduzione di nuove tecnologie produttive, i progetti delle aziende italiane sono principalmente dedicati al risparmio energetico, poiché maggiormente legate alla tecnologia EAF. In parallelo a progetti riguardanti la digitalizzazione dei processi aziendali (ottenimento di dati più puntuali, utilizzo IoT e IA per strategie di controllo, ottimizzazione degli scambi energetici e del layout delle operazioni unitarie, promozione smartworking), diverse industrie siderurgiche italiane hanno promosso attività e progetti riguardanti la sostenibilità ambientale. Si riporta un elenco dei progetti elencati nei Rapporti di Sostenibilità 2021¹ e 2023²⁵ di Federacciai.

A.4.1 Acciaieria Arvedi S.p.A.

Ha sviluppato un progetto che prevede la realizzazione di un impianto di preparazione/trattamento di rottame e la realizzazione di un mulino di macinazione e separazione degli elementi indesiderati. Questo permette l'utilizzo di una maggiore quantità di rottame post-consumo e riduce i consumi energetici durante il processo fusorio in EAF.

A.4.2 ACCIAIERIE D'ITALIA HOLDING S.p.A.

Ha definito un Piano di Sviluppo Sostenibile da attuarsi in 10 anni che prevede:

- l'introduzione dell'idrogeno nel processo produttivo per produzione di acciaio da minerale;
- la garanzia del mantenimento dei livelli occupazionali anche grazie a riqualificazione del personale;
- il rispetto della sostenibilità economica al fine di produrre acciaio a prezzi concorrenziali;
- il miglioramento del prodotto finale con un aumento delle quote di mercato.

Il raggiungimento degli obiettivi prevede un'iniziale ottimizzazione dei consumi energetici, seguita dall'implementazione della cattura della CO₂ e da una sperimentazione nell'uso dell'idrogeno. A questa prima fase dovrebbe seguire l'elettificazione dell'area a caldo con l'installazione progressiva di due DRI accoppiati a EAF. Si prevede che i DRI sfruttino il gas naturale come riducente, ma si ipotizza che possa essere introdotto anche l'idrogeno verde sul lungo periodo.

A.4.3 Acciaierie Venete S.p.A.

Acciaierie Venete di Sarezzo ha condotto una prova industriale per sostituire il carbone come agente schiumogeno con la gomma vulcanizzata granulata (GVG) proveniente dal riciclo degli pneumatici a fine vita. I risultati della prova hanno evidenziato una riduzione del 20% delle emissioni di CO₂, grazie al minor tenore di carbonio e alla presenza della frazione da biomassa. Dal 2023 la GVG è impiegata a regime, riducendo le emissioni annuali di circa 4.000 tonCO₂ (-10%).

A.4.4 AFV Beltrame Group

L'azienda ha lanciato il prodotto Chalibria, definendolo carbon neutral per le emissioni di Scope 1, 2 e 3 (upstream) lungo la catena del valore "cradle-to-gate". Le emissioni vengono quantificate per ogni stabilimento tramite una piattaforma che permette di avere KPI specifici sulle emissioni di CO₂ ed i calcoli sono stati verificati da RINA secondo la norma ISO14064-1. L'approccio di Chalibria copre oltre l'80% delle emissioni di CO₂ dell'intero ciclo di vita del prodotto e comprende anche una stima delle emissioni downstream, risultate inferiori al 20% del totale emesso dal gruppo.

Il gruppo si impegna a migliorare ulteriormente le proprie performance ambientali attraverso una strategia basata su quattro pilastri:

1. Efficienza produttiva: migliorare i processi produttivi con iniziative chiave come il revamping dei forni di riscaldamento, l'uso di sistemi di controllo digitale e il miglioramento delle procedure operative;
2. Pratiche di economia circolare: migliorare la qualità del rottame e delle materie prime, riutilizzare gli scarti dei processi produttivi e sostituire materie prime con materiali riciclati;
3. Utilizzo di energie rinnovabili: sviluppare impianti di energia rinnovabile per l'autoconsumo e stipulare contratti di acquisto di energia verde. Nel 2022 è stata costituita "Renewability", una community di consumatori di energia rinnovabile, per investire in impianti di generazione da energia solare;
4. Soluzioni a idrogeno: prepararsi all'uso dell'idrogeno verde come combustibile nei forni, con una prospettiva di lungo termine dal 2026 in poi, prevedendo un mix di 80% gas naturale e 20% idrogeno verde.

Per le emissioni non eliminabili tramite i progetti del Piano di Decarbonizzazione, la neutralità carbonica di Chalibria è stata ottenuta compensando le emissioni di CO₂ attraverso l'acquisto di crediti di carbonio, in linea con la certificazione PAS2060.

Il gruppo si impegna a ridurre le emissioni della value chain "cradle-to-gate", riducendo così l'acquisto di crediti di carbonio. Questo impegno sarà rivisto annualmente con l'aggiornamento dell'inventario GHG e la verifica delle riduzioni delle emissioni da parte di terzi.

A.4.5 Alfa Acciai

I progetti si focalizzano principalmente sulla simbiosi industriale e sul recupero energetico dei cascami

A.4.6 ASOFORGE S.r.l

L'azienda ha installato un impianto fotovoltaico di potenza pari a 1,19 MWp, che dovrebbe sopperire al 16% dei consumi di stabilimento. Le emissioni sono diminuite del 11,8% dal 2018.

A.4.7 ASONEXT S.p.A

L'azienda si sta occupando di ottimizzare i consumi energetici e di introdurre combustibili alternativi, al fine di ridurre le emissioni dirette di CO₂, che sono diminuite del 52,9% rispetto al 2018.

A.4.8 DRI d'Italia S.p.A

Si occupa di progettare, installare e gestire impianti di riduzione diretta (DRI). Al momento sta sviluppando la progettazione di un impianto DRI a gas naturale nell'area a caldo di Taranto, ma si prospetta di convertirlo ad idrogeno sul lungo periodo per una produzione complessiva di 2 Mton di acciaio all'anno.

A.4.9 Dufenco Travi e Profilati

Ha costruito un nuovo laminatoio (Smart Beam Manufacturing) in linea con le future BAT (Best Available Technologies) accoppiato ad un accordo PPA (Power Purchase Agreement) pluriennale di acquisto a prezzo fisso di energia elettrica siglato con un produttore di energia eolica, che permetterà di alimentare l'intero sito di San Zeno Naviglio per 65 GWh di energia rinnovabile, con un conseguente risparmio annuale di 28000 tonCO₂. Inoltre, l'azienda si è dotata di un impianto fotovoltaico da 5 MWp e ha ottimizzato la movimentazione interna dei semilavorati.

A.4.10 FACS Fucine S.r.l.

La riduzione dei consumi di gas combustibile è stata ottenuta attraverso l'ottimizzazione del ciclo di riscaldamento utilizzando un software di simulazione numerica agli elementi finiti.

A.4.11 Feralpi Group S.p.A.

Nel 2021 il gruppo stava sviluppando un progetto finanziato tramite il Bando RFCS (Research Fund for Coal and Steel) concentrato sull'analisi di possibili soluzioni per sostituire sia il polverino di carbone iniettato che quello caricato insieme al rottame con materiali alternativi derivati da rifiuti plastici da testare in forno ad Arco Plasma per fusione del rottame (EAF). Esistono quattro principali problematiche da affrontare per raggiungere questi due obiettivi:

- è necessario valutare se la quantità di carbone caricato nella cesta rispetta gli standard e se ha un effetto riducente sufficiente;
- è necessario valutare se l'iniezione di schiumogeni tramite la parete può avviare correttamente il processo di formazione di scorie schiumose;
- bisogna verificare se ci sono eventuali problematiche di reattività anomala;
- è importante valutare eventuali variazioni dell'impatto ambientale.

Nel rapporto del 2023 l'azienda si è posta l'obiettivo di soddisfare il 20% dei suoi consumi interni tramite l'installazione di impianti fotovoltaici per un totale di 120 MWp, oltre a valutare l'applicabilità di biometano ed idrogeno.

A.4.12 Forge Fedriga S.r.l.

L'azienda ha installato un impianto fotovoltaico di potenza complessiva pari a 280 kWp.

A.4.13 Forgiatura San Giorgio S.p.A.

L'azienda ha implementato un sistema di recupero di calore dai fumi

A.4.14 Forgital Italy S.p.A.

L'azienda ha installato il sistema E-Power, ovvero un sistema di controllo dell'energia che adatta dinamicamente il flusso di energia per bilanciare l'assorbimento di potenza nel sistema, massimizzando così l'efficienza energetica. I risultati ottenuti (riduzione dei consumi del 4%) ha spinto l'azienda a progettare ulteriori installazioni presso altri stabilimenti del gruppo.

A.4.15 Itla Bonaiti S.r.l.

L'azienda ha ottimizzato la supply chain, sostituendo tutti i trasporti su gomma con trasporti su rotaia.

A.4.16 Industrie Riunite Odolesi I.R.O. S.p.A.

L'azienda ha stipulato un contratto di PPA (Power Purchase Agreement) con una società che gestisce un impianto idroelettrico, che ha fornito circa il 2,5% dei consumi aziendali nel 2022 e progetta l'installazione di un impianto fotovoltaico da 2 MWp.

A.4.17 Lucchini RS S.p.A.

L'azienda mira ad ottimizzare tutte le fasi produttive per aumentare il recupero energetico. A tal fine ha installato recentemente un nuovo forno rotante ad alta efficienza che sfrutta la tecnologia con riscaldamento rigenerativo dai fumi d'impianto.

A.4.18 Marcegaglia Ravenna S.p.A.

L'azienda ha aderito al piano di decarbonizzazione del polo industriale di Ravenna-Ferrara, che prevede di realizzare degli impianti di cattura dell'anidride carbonica per stoccarla nell'impianto off-shore di Ravenna gestito da ENI e SNAM. Il progetto prevede di applicare tale tecnologia all'impianto di cogenerazione presente nello stabilimento industriale.

A.4.19 O.R.I. Martin S.p.A.

L'azienda ha conseguito una certificazione ISO 14064 per l'attestazione della Carbon Footprint dei propri prodotti, al fine di identificare i principali hotspot nelle emissioni di CO₂.

In aggiunta, è stato avviato il progetto "HEATLEAP" finanziato dall'Unione Europea, che prevede l'installazione di una pompa di calore in grado di recuperare il calore dal circuito di raffreddamento del forno ad arco elettrico dell'acciaieria per produrre calore ad una temperatura più elevata che verrà poi ceduto alla rete di teleriscaldamento di Brescia. Nel rapporto del 2023, l'azienda dichiara di aver già installato impianti fotovoltaici per un totale di 5 MWp e progetta l'installazione di altri impianti che dovrebbero portare la potenza complessiva a 25 MWp.

A.4.20 Riva Acciaio S.p.A.

L'azienda ha installato un nuovo impianto di miscelazione a freddo per il rivestimento dello strato di usura della paniera che dovrebbe portare nel 2024 ad eliminare le emissioni dirette di anidride carbonica relative al processo di rifacimento dello strato di usura.

A.4.21 Rubiera Special Steel S.p.A.

L'azienda ha sostituito delle vecchie caldaie a vapore, riducendo i consumi di gas naturale.

A.4.22 Tenaris Dalmine S.p.A.

Tenaris ha dichiarato pubblicamente nel mese di gennaio 2021 la sua strategia per combattere il cambiamento climatico, stabilendo come obiettivo a medio termine (2030) di ridurre l'intensità delle proprie emissioni di CO₂ per tonnellata di acciaio rispetto ai risultati del 2018. Tale obiettivo riguarda la produzione di acciaio e le fabbriche di tubi senza saldatura e saldati dell'azienda.

Per raggiungere questo obiettivo, Tenaris adotterà diverse strategie, fra le quali:

- aumenterà la quantità di rottami utilizzati nei propri forni elettrici;
- investirà in progetti per migliorare l'efficienza energetica e per recuperare il calore prodotto durante il processo produttivo;
- aumenterà l'utilizzo di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili per alimentare i propri impianti.

L'obiettivo di ridurre le emissioni di CO₂ è solo il primo passo che Tenaris intende compiere per raggiungere la neutralità climatica di tutte le sue attività a lungo termine. Per raggiungere questo obiettivo, l'azienda prevede di utilizzare nuove tecnologie attualmente in fase di sviluppo, come l'uso di idrogeno e la tecnologia Carbon Capture and Use per catturare e riutilizzare le emissioni di CO₂.

Attualmente, Tenaris sta lavorando in collaborazione con SNAM ed Edison per sviluppare il progetto "Dalmine Zero Emissions", il cui obiettivo è individuare e implementare le soluzioni migliori per la produzione, la distribuzione e l'utilizzo di idrogeno verde presso il sito Tenaris di Dalmine.

Il progetto mira a generare idrogeno e ossigeno attraverso l'utilizzo di un elettrolizzatore da circa 20 MW, che verrà installato presso lo stabilimento di Dalmine. Inoltre, il processo produttivo dell'acciaio sarà adattato per utilizzare l'idrogeno verde al posto del gas naturale. Inizialmente, il progetto prevede anche la realizzazione di un sito di stoccaggio per l'accumulo di idrogeno ad alta pressione e l'utilizzo dell'ossigeno, prodotto localmente tramite l'elettrolisi, all'interno del processo fusorio.

Questo progetto si affianca ad ulteriori investimenti finalizzati a proteggere l'aria, migliorare l'efficienza energetica, ridurre il consumo di materie prime, aumentare l'utilizzo di materiali riciclati nei prodotti e valorizzare e riutilizzare i

propri sottoprodotti.

Inoltre, nel rapporto 2023, Dalmine S.p.A. dichiara di aver installato due impianti fotovoltaici dalla potenza complessiva di 12 MWp.

A.4.23 Trafital

L'azienda è focalizzata sul risparmio energetico e di materiali, le iniziative di compensazione delle emissioni di CO₂ e la produzione di energia da un impianto fotovoltaico.

A.4.24 Travi Pallanzeno

Le attività aziendali si concentrano ad una migliore gestione dei processi di combustione che avvengono all'interno del forno fusorio

Oltre ai progetti riportati nel Rapporti di Sostenibilità 2021 e 2023 di Federacciai, si riportano alcune innovazioni nel campo della decarbonizzazione che sono emerse nel 2023.

A.4.25 Arvzero

L'acciaieria Arvedi ha lanciato sul mercato un prodotto denominato Arvzero, certificato Carbon Neutral per Scopo 1 e Scopo 2 del GHG Protocol²⁶ tramite un ente certificatore di parte terza (RINA).

Le emissioni di CO₂ della produzione di laminati piani presso l'acciaieria Arvedi di Cremona tramite tecnologia EAF da rottame seguita da laminazione ESP (che indica una configurazione impiantistica ottimizzata) è stata ridotta a 0,133 kgCO₂eq/kg_{bobina laminata a caldo} grazie al recupero di calore ed efficientamento del processo, all'installazione di impianti fotovoltaici e all'accordo con il fornitore di energia elettrica (Enel X) per una fornitura di energia elettrica allo stabilimento 100% da fonti rinnovabili. La quota rimanente di emissioni è stata compensata attraverso l'acquisto di crediti volontari, ovvero l'acquisto corrispondente di CO₂ assorbita da nuova forestazione.

A.4.26 I-Smelt

Questa startup italiana propone un processo basato sulla tecnologia dello smelting, nel quale introdurre biocarbone e biogas per ridurre l'ossido di ferro a ghisa o sponge iron da introdurre poi nel EAF, alimentato da energia elettrica da fonti rinnovabili. Il biocarbone può essere ricavato dalla pirolisi della legna, da processi di produzione rivenienti dalla sansa o da fanghi delle acque reflue.

A.5 Riferimenti bibliografici

1. Federacciai. *Rapporto di sostenibilità 2021*. (2021).
2. Wang, B. New steel process is faster, lower cost, higher quality, uses 5-10 times less energy and enables new thinner sheets. <https://www.nextbigfuture.com/2017/03/new-steel-process-is-faster-lower-cost.html> (2017).
3. Keys, A., Hout, M. van & Daniëls, B. Decarbonisation options for the Dutch Steel Industry. *PBL Netherlands Environ. Assess. Agency* 63 (2019).
4. European Commission. *ULCOS Top Gas Recycling Blast Furnace Process (ULCOS TGRBF): Final Report*. (2014).
5. Agora Energiewende & Wuppertal Institut. Breakthrough Strategies for Industry in Europe Industry in Europe. 38 (2020).
6. Global CCS Institute. CCS: a necessary technology for decarbonising the steel sector. <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/ccs-a-necessary-technology-for-decarbonising-the-steel-sector/> (2017).
7. Sun, Y. *et al.* Decarbonising the iron and steel sector for a 2 °C target using inherent waste streams. doi:10.1038/s41467-021-27770-y.
8. STEPWISE Project. <https://www.stepwise.eu/>.
9. Petrescu, L. *et al.* Life cycle assessment of SEWGS technology applied to integrated steel plants. *Sustain.* **11**, (2019).
10. Barbera, E., Mio, A., Pavan, A. M., Bertucco, A. & Fermeglia, M. Fuelling power plants by natural gas: An analysis of energy efficiency, economical aspects and environmental footprint based on detailed process simulation of the whole carbon capture and storage system. *Energy Convers. Manag.* **252**, (2022).
11. Mio, A. *et al.* Carbon Dioxide Capture in the Iron and Steel Industry: Thermodynamic Analysis, Process Simulation, and Life Cycle Assessment. *Chem. Biochem. Eng. Q.* **36**, 255–271 (2022).
12. ADNOC. Al Reyadah CCS. <https://www.geos.ed.ac.uk/scs/project-info/622> (2022).
13. Kramer, D. Feedstock for the process industries and climate action – The potential of CO₂ utilization A brief overview. (2020).
14. Thyssenkrupp. Carbon2Chem®: First project phase completed. <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/carbon2chem--first-project-phase-successfully-completed-and-notice-of-funding-received-from-federal-government-for-second-phase-88707> (2020).
15. LanzaTech. Steelanol. <http://www.steelanol.eu/en>.
16. World Steel Association. *Carbon capture and storage (CCS). Fact Sheet* (2023) doi:10.1016/B978-0-08-102886-5.00031-1.
17. World Steel Association. *Carbon capture and use and storage (CCUS) Fact sheet*. (2023).
18. Gomiero, T. Are biofuels an effective and viable energy strategy for industrialized societies? A reasoned overview of potentials and limits. *Sustain.* **7**, 8491–8521 (2015).
19. Baracchini, G. *et al.* *Biochar for a sustainable EAF steel production (GREENEAF2) : final report*. (2018). doi:10.2777/708674.
20. Bellona. Climate action in the steel industry. (2021).
21. Joint Research Center - JRC. Decarbonisation of industrial heat: The iron and steel sector. 4 at ec.europa.eu/jrc/en (2020).
22. Tata Steel. Tata Steel opts for hydrogen route at its IJmuiden steelworks. <https://www.tatasteeleurope.com/corporate/news/tata-steel-opts-for-hydrogen-route-at-its-ijmuiden-steelworks> (2021).
23. Laguna, J. C., Duerinck, J., Meinke-Hubeny, F. & Valee, J. *Carbon-free steel production*. (2021).
24. Görnerup, M. *HYBRIT – Towards fossil free steelmaking*. (2018).
25. Federacciai. *Rapporto di sostenibilità 2023*. (2023).
26. Ranganathan, J. *et al.* *GHG Protocol*.

Rapporto commissionato dal WWF Italia



**5 milioni di sostenitori nel mondo.
Una rete globale attiva in oltre 100 Paesi.
1300 progetti di conservazione.
In Italia oltre 100 Oasi protette.
Migliaia le specie interessate dall'azione
del WWF sul campo.**

WWF Italia ETS
Via Po, 25/c
00198 Roma

Tel: 06844971
e-mail: wwf@wwf.it
sito: wwf.it