

Carlo Mapelli, Silvia Barella, Davide Mombelli, Andrea Gruttadauria

Il ciclo integrato di produzione dell'acciaio e le fonti inquinanti

Dipartimento di Meccanica - Politecnico di Milano, Milano (Italy)

RIASSUNTO. La presente memoria è focalizzata sulla descrizione del ciclo integrato per la produzione dell'acciaio (Figura 1). Vengono presi in considerazione i principali impianti che compongono il sistema finalizzato all'agglomerazione dei minerali di ferro, alla lavorazione del carbon fossile, alla produzione della ghisa e alla conversione di quest'ultima in acciaio. Durante la descrizione di questi impianti e dei processi che vi si realizzano si è posta attenzione ad evidenziare le principali fonti di inquinamento. Infine, è stata realizzata anche una sintetica presentazione degli impianti di riduzione dei minerali basati sull'utilizzo del gas naturale.

Parole chiave: altoforno, convertitore a ossigeno, agglomerazione, coke, inquinanti.

ABSTRACT. *THE INTEGRATED ROUTE FOR THE STEELMAKING AND THE POLLUTION SOURCES. This paper is focused on the description of the integrated route for the steel production (Figure 1). The main plants involved in such a route have been treated and the main process steps have been described: sintering of the iron ores, coal treatment to obtain the coke, pig iron production by the blast furnace and its conversion to steel by the basic oxygen furnace. During the description of these plants and processes, the main pollution source have been pointed out. Finally, a synthetic presentation of the plants used for the reduction of the iron ores by natural gas has been performed.*

Key words: *blast furnace, oxygen converter, sintering, coke, pollutants.*

Introduzione

A partire dalla metà del XIX secolo è andato sempre più affermandosi per motivi di razionalizzazione tecnologica dei cicli e di economia dei costi, il principio di concentrare le attività produttive siderurgiche in pochi stabilimenti di grandi dimensioni, nei quali svolgere tutta una serie di operazioni che comprendono la preparazione dei minerali, la loro riduzione e successiva conversione in acciaio e quindi, mediante lavorazioni plastiche a caldo e a freddo, la trasformazione in una vasta gamma di prodotti finiti.

Questi stabilimenti, cosiddetti a ciclo integrato, in seguito agli scambi commerciali sempre più intensi tra i vari paesi, alle scoperte di giacimenti di grande entità di carbone e soprattutto di minerali ricchi di ferro in paesi dell'Africa, dell'America Meridionale e dell'Australia, e all'enorme sviluppo dei mezzi di trasporto via mare con navi di grande tonnellaggio, sono stati ubicati in zone costiere in prossimità di porti. In tal modo gli stabilimenti siderurgici, disponendo di banchine e di mezzi di scarico propri, possono realizzare elevate economie nelle spese di trasporto e di manipolazione sia delle materie prime che dei prodotti ottenuti e destinati all'esportazione. Sono state così superate quelle condizioni che in passato hanno favorito il formarsi di concentrazioni industriali in vicinanza delle miniere e pertanto paesi come l'Italia, quasi privi di materie prime, hanno potuto realizzare produzioni di acciaio economicamente competitive con paesi che dispongono dei materiali indispensabili nella fabbricazione dell'acciaio.

Negli stabilimenti a ciclo integrato l'energia necessaria allo svolgimento di tutto il ciclo produttivo è fornita essenzialmente dal carbon fossile trasformato in coke, sia mediante il suo impiego diretto sia tramite i gas di recupero che vengono messi a disposizione anche alle centrali elettriche; è opportuno rilevare che nel ciclo integrato la produzione di acciaio si effettua a partire da un efficiente sviluppo di calore dato che i recuperi dei gas prodotti durante la preparazione del coke, la riduzione del minerale ed eventualmente la conversione della ghisa, servono a garantire l'alimentazione di molteplici utenze e il bilancio energetico di tutto lo stabilimento si basa essenzialmente su questi recuperi, poiché

si tende a fare in modo che l'apporto di energia dall'esterno abbia solo carattere integrativo. In Figura 1 è riportato in modo estremamente succinto uno schema di ciclo integrato.

Negli stabilimenti a ciclo integrato l'altoforno è quindi il cuore di tutto il complesso siderurgico ed attorno ad esso sorgono tutta una serie di apparecchiature e impianti ausiliari che vanno dalla preparazione delle materie prime, ai preriscaldatori dell'aria, ai depuratori dei gas, ecc.

La ghisa liquida proveniente dall'altoforno passa in acciaieria per la successiva conversione ed una volta che l'acciaio ha raggiunto la composizione chimica e la temperatura desiderate, viene versato in apposite siviere ed è pronto per le operazioni di colata in continuo o nei lingotti. Negli impianti a ciclo integrale sono pure previsti i reparti di lavorazione per deformazione plastica a caldo ed a freddo che permettono la realizzazione di una vasta gamma di prodotti laminati.

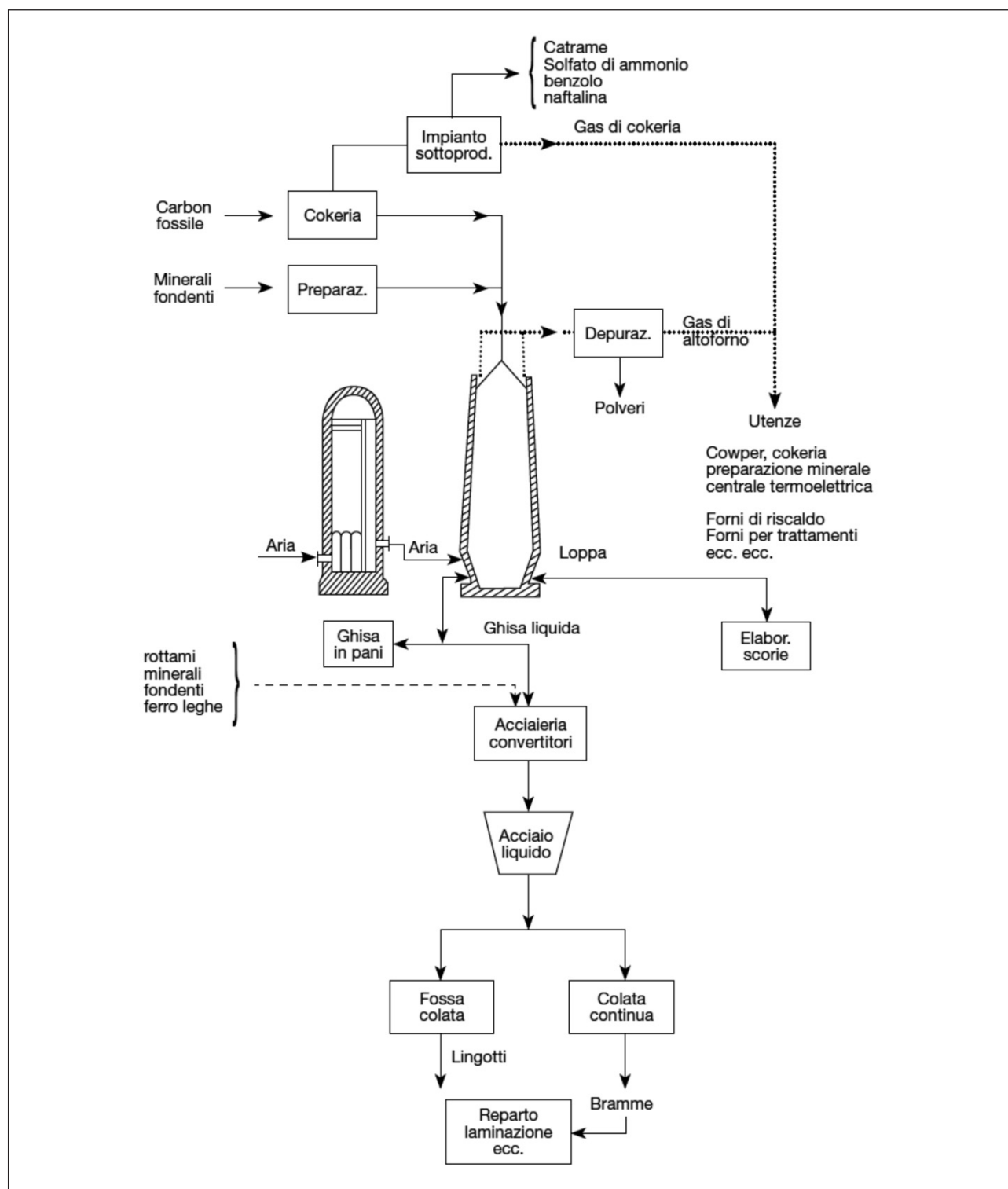


Figura 1. Schema sintetico del ciclo integrato di produzione dell'acciaio

Materie prime e processi di sinterizzazione e cokefazione

L'agglomerazione

L'agglomerazione è necessaria quando si hanno minerali in pezzatura fine, oppure polveri provenienti dall'applicazione di arricchimenti magnetici o di flottazione, oppure da altri processi come nel caso delle polveri di recupero dalla depurazione dei gas d'altoforno, ceneri di pirite, oppure dagli sfridi che si ottengono sempre nelle manipolazioni dei minerali.

Se nel materiale di carica esistono, o si formano durante il processo, delle specie chimiche a basso punto di fusione, come in generale i silicati complessi, allora una delle possibili spiegazioni dell'unione tra i pezzi è l'incipiente fusione di esse, con la funzione di legante tra le diverse particelle. In questo caso il processo non è più una vera e propria agglomerazione ma una sinterizzazione.

La quantità delle sostanze facilmente fusibili non deve però essere eccessiva per non compromettere la porosità

dell'agglomerato. In generale la formazione dell'agglomerato è più complessa poiché, in aggiunta, o in luogo del meccanismo suaccennato, si verifica una vera e propria ricristallizzazione con nucleazione e accrescimento di nuove fasi. I cristalli che si ottengono possono risultare o dalla solidificazione di sostanze fuse anche localmente in corrispondenza degli innumerevoli centri di combustione, ove la temperatura può salire oltre quella media, oppure si possono generare anche a temperature inferiori al punto di fusione dei cristalli originatisi dai noti fenomeni di diffusione allo stato solido, che alle elevate temperature richiedono tempi relativamente brevi.

L'elemento essenziale del processo di sinterizzazione, per l'agglomerazione di miscele di minerale e carbone di piccola granulometria è una griglia mobile tipo Dwight-Lloyd (Figura 2), sulla quale viene caricata la miscela in dosaggio opportuno che costituisce il letto di sinterizzazione. Nella zona di accensione e combustione avviene l'unione delle parti fini (unitamente ad un arrostitimento). Il prodotto finale, dopo la rottura del grosso piastrone sinterizzato, una massa spugnosa di forma irregolare e abba-

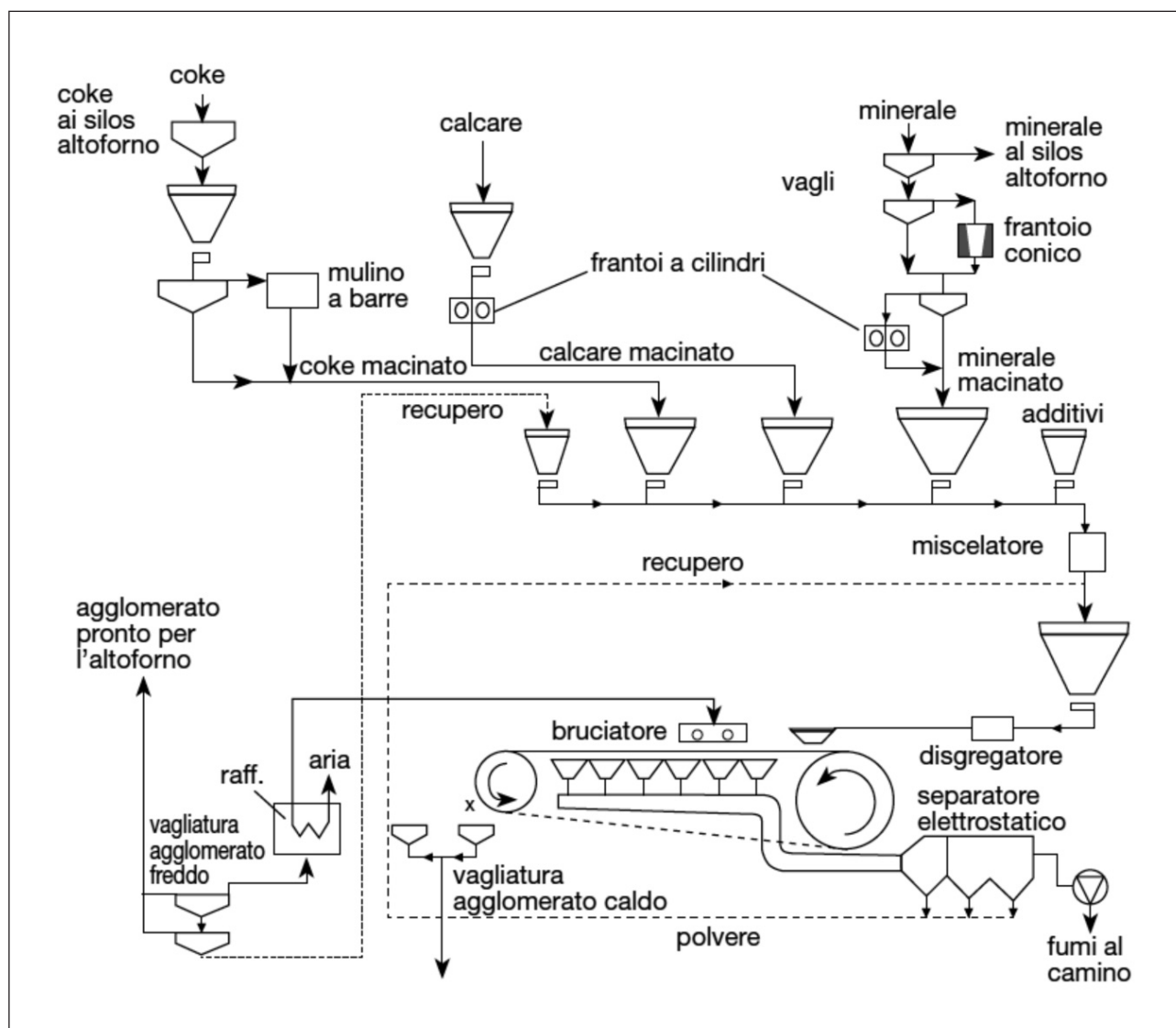


Figura 2. Il processo di agglomerazione dei minerali

stanza friabile, quindi è sconsigliato il trasporto a grande distanza e si preferisce operare la sinterizzazione presso i punti di utilizzo. Il processo di agglomerazione comporta la formazione di diossine che devono essere captate adeguatamente mediante l'installazione ed il mantenimento in esercizio di opportuni impianti di aspirazione.

Il processo di pelletizzazione non comporta la formazione di diossine, perché adatto all'agglomerazione di minerale di consistenza polverulenta, difficilmente sinterizzabile con i normali impianti. Il processo porta alla produzione di un agglomerato di forme tondeggianti con dimensioni di 10-25 mm di diametro, detto appunto "pellet".

Per meglio evidenziare come in generale i due processi ora visti non siano in concorrenza tra loro, si riportano in Tabella I due esempi di distribuzione granulometrica adatta per ciascun processo di pelletizzazione. Le operazioni principali della pelletizzazione consistono in un impasto dei "fini" con opportuno dosaggio di acqua e agglomerante sopra dischi o tamburi rotanti nei quali si ha la formazione delle pallottole sferoidali di dimensioni volute (dette "pellets verdi") e in un essiccamento di queste in forni fino ad ottenere la consistenza desiderata; il forno continuo a griglia, tipo Dwight-Lloyd.

Il processo di cokefazione

Il combustibile che dall'inizio del XVIII secolo ha avuto una generale diffusione per l'alimentazione degli altoforni è il coke.

In Figura 3 è riportata la successione schematica delle principali operazioni di preparazione del coke. Dalle tramogge la miscela viene presa e introdotta in uno speciale carro di carica, che scorre sui binari disposti sulla batteria

Tabella I. Distribuzione granulometrica dei materiali sinterizzati e pelletizzati

Dimensioni delle particelle (mm)	Per la sinterizzazione (%)	Per la pelletizzazione (%)
>8	7,4	-
3 ÷ 8	12,7	-
1 ÷ 3	28,1	-
0,15 ÷ 0,1	43,6	0,4
0,1 ÷ 0,15	3,9	7,6
0,075 ÷ 0,1	3,8	13,3
<0,075	0,5	78,7

dei forni a coke. Dopo che i coperchi delle aperture di carico sono stati rimossi, le tramogge vengono messe in posizione (pos. A); il carbone, fatto cadere dalle varie tramogge dentro la camera del forno (pos. B), si dispone in mucchi; viene quindi introdotta nel forno attraverso una apposita apertura (pos. C) la barra di livellamento; successivamente, estratta la barra, tutte le aperture vengono chiuse e iniziano le operazioni di cokizzazione. Al termine del processo di distillazione, il coke viene spinto fuori da ogni cella (pos. D e E) a mezzo di una grande macchina sfornatrice scorrevole su binario disposta in senso trasversale ai forni (dopo che la macchina stessa abbia provveduto ad aprire dal proprio lato la porta della cella e che una macchina guida-coke abbia aperto la porta della cella dal lato opposto, cioè di uscita del coke).

Il coke prodotto va a riempire un carro che è trasportato sotto la torre di spegnimento a pioggia d'acqua. Appena spento, il coke viene gradualmente convogliato su nastri di gomma che lo trasportano all'impianto di frantu-

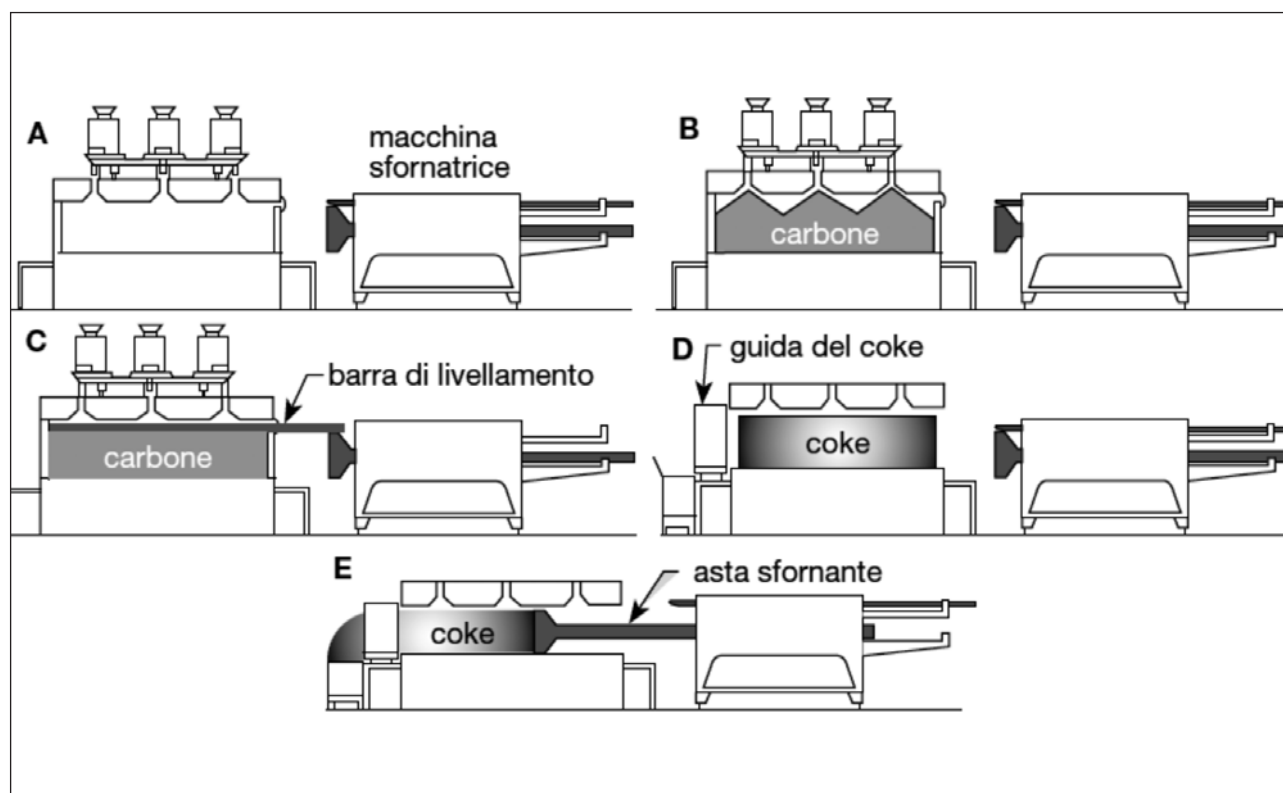


Figura 3. Schema degli stadi dell'operazione di cokefazione

mazione. Durante il processo di spegnimento è bene non ricorrere ad un sistema di spegnimento ad azoto, noto Coke Dry Quenching (CDQ) in modo da evitare la dispersione nell'ambiente di polveri e specie chimiche tossiche. Tale sistema utilizza una corrente di azoto come mezzo raffreddante e prevede il recupero di calore per la produzione di energia elettrica.

Il processo di cokefazione avviene in forni a camere, ciascuna delle quali ha indicativamente dimensioni di 7 m di altezza, tra 14 e 16 m di lunghezza e una larghezza variabile tra 0,35 e 0,5 m, così che sono in grado di caricare una quantità variabile di carbon fossile da 15 a 30 t.

Il carbone adatto per la cokizzazione deve possedere un contenuto di volatili inferiore al 10-32%, una concentrazione di ceneri inferiore al 7% e una concentrazione percentuale in zolfo inferiore al 3-5%, mentre la pezzatura ottimale per il caricamento varia in un intervallo tra 3 e 40 mm.

Il trattamento ha una durata compresa tra 14 e 22 ore ad una temperatura di 1000-1100 °C: maggiori sono il tempo e la temperatura di cokizzazione più elevata risulterà l'accendibilità del coke; non è detto che una superiore attitudine a bruciare rappresenti una condizione favorevole all'esercizio dell'altoforno, poiché può comportare un consumo troppo rapido del coke, che può essere compensato solo attraverso l'aggiunta di una massa maggiore.

Durante il processo di cokizzazione si sviluppano diversi sottoprodotti: solfuri, benzolo, catrame, ammoniaca e naftalina, che vengono convogliati presso altri impianti chimici di raccolta e trattamento, dove sono utilizzati come materie prime. Il maggiore pericolo è la dispersione di benzo(a)pirene prodotto durante la distillazione del coke e che può essere disperso nell'ambiente sia all'apertura delle porte sia durante la cokefazione nel caso in cui i telai delle porte non siano adeguatamente mantenuti.

Differenti reazioni si verificano in corrispondenza di diversi intervalli termici durante la distillazione del carbon fossile:

- 100 °C evaporazione dell'acqua igroscopica;
- 200 °C inizio della decomposizione del carbone;
- 250-340 °C inizio di sviluppo di gas combustibili e rammollimento;
- 290 °C decomposizione dei bitumi oleosi;
- 325-450 °C sviluppo del carbone primario;
- 350-600 °C il carbone è caratterizzato da una significativa pastosità;
- 600 °C termina lo sviluppo del catrame e il processo di solidificazione della massa pastosa con formazione del cosiddetto semi-coke (carbone cokizzato solo parzialmente);
- 1000-1100 °C il processo di cokizzazione si completa realizzando una tipica consistenza porosa.

Preparazione di fondenti e calcare

È opportuno pure un brevissimo cenno sulla preparazione dei fondenti in genere e del calcare in particolare, essendo questo un argomento molto importante per uno stabilimento siderurgico a ciclo integrale. È quindi facile intuire l'opportunità per uno stabilimento di grandi proporzioni, di avere una fonte propria per l'approvvigionamento

del calcare ed un impianto centralizzato per la sua preparazione. Si ricorda in proposito il notevole fabbisogno di questo prodotto non solo per la carica dell'altoforno e per il processo di agglomerazione, ma anche quanto la calce sia necessaria per l'affinazione dell'acciaio.

Generalmente queste quantità vengono fornite da un impianto di calcinazione costruito in modo da soddisfare le esigenze quantitative, qualitative e granulometriche delle singole acciaierie.

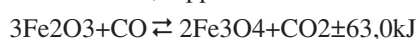
L'altoforno

L'altoforno rappresenta di gran lunga il sistema impiantistico di riduzione e prima fusione predominante in siderurgia per quantità di metallo prodotto. Il 65% della produzione di acciaio dipende dalla produzione di ghisa da parte degli altoforni. Esso è un forno soffiato a tino nel quale dall'alto vengono introdotti come materiali di carica il minerale, il coke, i fondenti oltre ad eventuali aggiunte che costituiscono il cosiddetto letto di fusione, mentre nella parte bassa attraverso gli ugelli viene soffiata dell'aria calda spesso arricchita in ossigeno, denominata vento, che serve ad innescare e sostenere la combustione del coke.

Nella Figura 4 è riportato il profilo di un altoforno, ossia l'intersezione della superficie interna con un piano verticale passante per l'asse di simmetria; si distinguono in esso le seguenti parti che si susseguono procedendo dal basso:

- il crogiolo, avente forma cilindrica, nel quale si raccolgono la ghisa prodotta e le scorie fuse che la sovrastano poiché possiedono una densità (circa 2400-2600 kg/m³) inferiore rispetto a quella del bagno metallico. Nella parte superiore del crogiolo sono praticati i fori per il passaggio degli ugelli, appena sopra la suola sono praticati i fori di colata per la ghisa e per evacuare la loppa;
- la sacca, tronco di cono leggermente aperto verso l'alto;
- il ventre, che è la zona di massimo diametro, normalmente costituita da un brevissimo tratto cilindrico, ma che può talvolta ridursi anche alla semplice circonferenza di intersezione della sacca con il tino (il tratto cilindrico di massimo diametro viene anche chiamato tino cilindrico);
- il tino, secondo tronco di cono con altezza molto maggiore e conicità invertita rispetto alla sacca;
- la bocca, costituita da un breve tratto cilindrico, che può pure ridursi talvolta alla semplice circonferenza terminale del tino. Attraverso la bocca si opera l'introduzione dei materiali di carica.

La riduzione dei minerali di ferro all'altoforno avviene per opera del CO e quindi è necessario prendere in considerazione i successivi equilibri di riduzione degli ossidi di ferro con CO, rappresentati dalle reazioni:



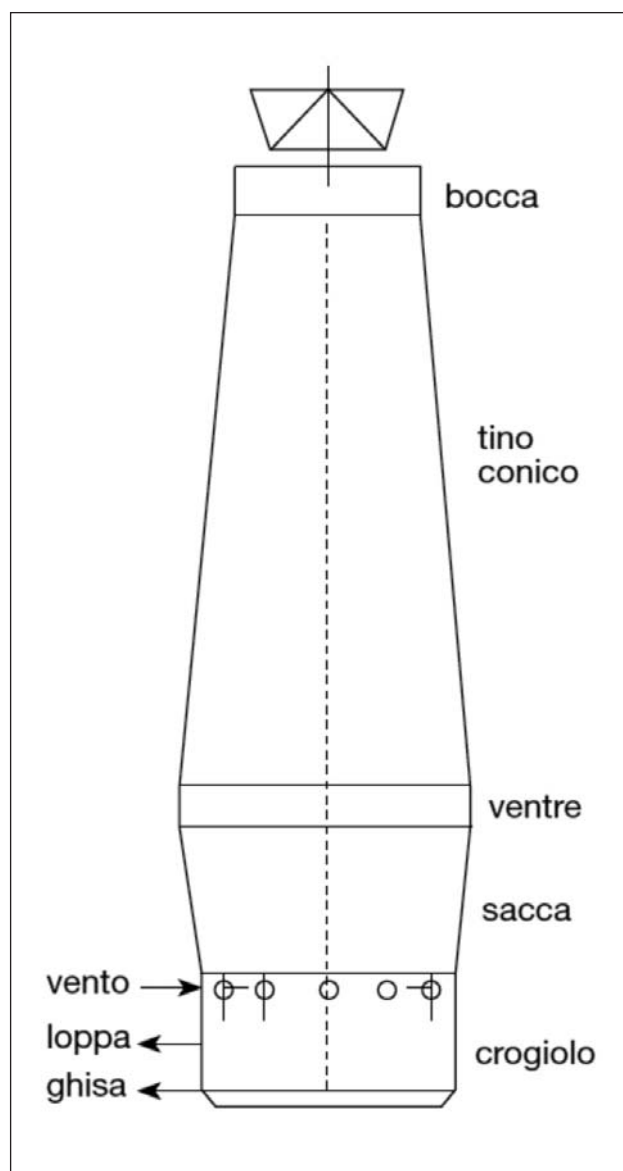


Figura 4. Profilo di un altoforno

Nei processi di fusione la scoria si differenzia dagli altri prodotti: in essa si raccolgono la ganga dei minerali, le ceneri dei combustibili (ove questi sono aggiunti come minerali nella carica) ed i fondenti. Questi ultimi sono aggiunti proprio al solo scopo di correggere la composizione della scoria portandola entro quei limiti che sono desiderati.

A seconda delle ghise prodotte e dei tipi di marcia, la composizione chimica della scoria finale dell'altoforno, o loppa, deve rispondere a particolari requisiti:

- basso costo unitario (essenzialmente per i fluidificanti);
- minimo peso possibile per tonnellata di prodotto onde rendere minimi, a parità di tutto il resto, sia il consumo di combustibile necessario per il suo riscaldamento, sia le perdite di metalli pregiati (naturalmente se la scoria non torna in ciclo o non viene ulteriormente sfruttata in altro modo specifico);
- basse temperature di formazione e di fusione ed elevata fluidità alle temperature di lavoro, onde poter

svolgere nel migliore dei modi la sua funzione di raccolta durante il percolamento tra gli interstizi della carica.

La scoria d'altoforno è del tutto inerte dal punto di vista chimico e viene utilizzata come materia prima nei cementifici. Le scorie d'altoforno allo scarico possono essere lasciate raffreddare lentamente, così da formare una massa dura e densa (1940 kg/m^3) che viene successivamente frantumata, oppure vengono fatte raffreddare attraverso iniezione controllata di acqua, aria, vapore che induce una morfologia cellulare nelle scorie con la realizzazione di un prodotto poco denso (da 800 a 1040 kg/m^3) e con morfologia tipica delle schiume. Se la scoria viene raffreddata e fatta solidificare velocemente attraverso l'azione di aria e acqua all'interno di tamburi rotanti è possibile ottenere frammenti di dimensione controllata (pellets).

Conversione della ghisa in acciaio

La fabbricazione dell'acciaio per conversione della ghisa mediante un agente ossidante gassoso ha mostrato subito il grande vantaggio della rapidità del processo e poiché esso è termochimicamente bilanciato non vi è alcuna necessità di somministrare calore dall'esterno, vincolo questo limitativo alle prestazioni produttive di tutti gli altri tipi di forno.

I processi di conversione con ossigeno ad elevata purezza non incontrano gli inconvenienti dei convertitori ad aria. Poiché viene meno l'azione raffreddante dell'azoto, si può conseguire il desiderato bilanciamento termico senza pressoché alcuna limitazione nei confronti della composizione della ghisa che, in particolare, può essere a basso tenore sia in silicio sia in fosforo. Anzi, la disponibilità termica, per il calore proveniente dalle reazioni di ossidazione degli elementi accompagnatori presenti nella ghisa consente di riscaldare e di fondere una parte rilevante di carica solida. L'acciaio non risente di inquinamenti da azoto, anzi, nell'acciaio prodotto con il convertitore ad ossigeno si mantiene a livelli ($0,002 \div 0,005\%$) inferiori a quelli dell'acciaio prodotto con gli altri processi, nonostante a volte si inietti azoto dai setti porosi posti nella suola del convertitore per mantenere il bagno agitato durante la prima parte della conversione, mentre nell'ultima parte di essa si applica l'agitazione con argon.

Sulla rapida affermazione di questo processo dalla metà del secolo scorso, hanno agito non solo questi vantaggi tecnologici, ma anche l'incremento generale delle produzioni siderurgiche in tale periodo e gli investimenti ingenti operati nel settore.

Per una descrizione sia pure schematica degli impianti delle acciaierie ad ossigeno conviene riferirsi alla sezione trasversale di un'acciaieria riportata in Figura 5, condotta con un piano compreso tra i convertitori che può ben rappresentare lo schema generale di queste acciaierie. Il fabbricato è diviso in tre o quattro campate principali: campata rottami (a destra in figura), campata convertitori (al centro) e una o due campate di colata.

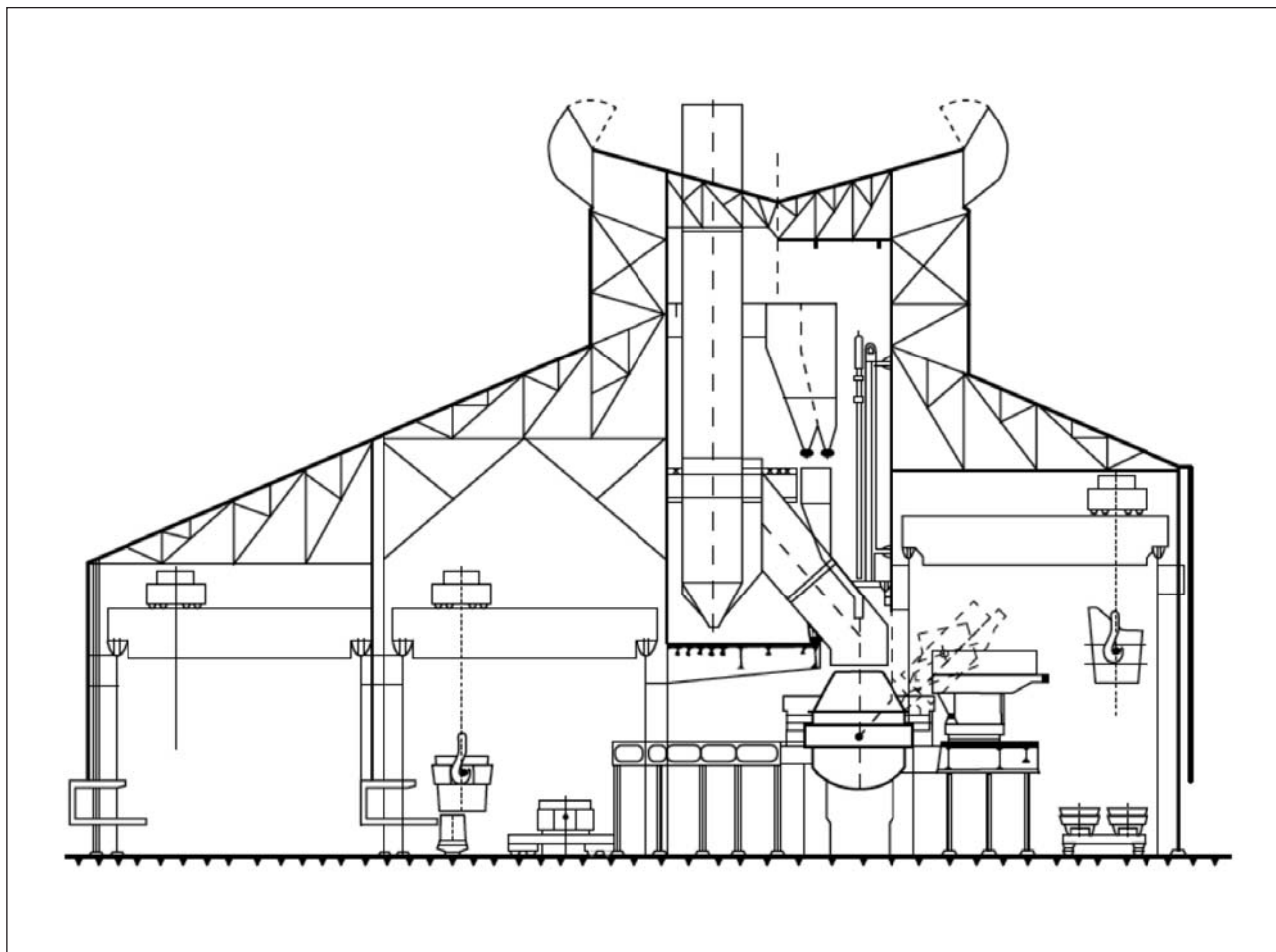


Figura 5. Sezione di un'acciaiaeria dotata di convertitori a ossigeno

Nella campata rottami, dove il lavoro si svolge al piano terra, trovano posto le attrezzature per la carica del rottame e della ghisa. In generale nelle acciaierie a ciclo integrale il rottame è tutto di riciclo (residui di colaggio, spuntature varie, ecc.).

L'accumulo del rottame e la sua preparazione viene eseguita generalmente all'esterno dell'acciaiaeria in appositi piazzali, ove per mezzo di vagoni si provvede al suo trasporto in acciaiaeria dove viene scaricato con carroponti a magnete in apposite casse di carica ed opportunamente pesato.

La ghisa liquida proveniente dall'altoforno, trasportata con siviere o più frequentemente con carri-siluro, viene pesata prima di essere versata nel convertitore.

Nella campata convertitori trovano posto, oltre ai convertitori, i sili degli additivi completi dei sistemi di caricamento, l'impianto di captazione e raffreddamento fumi e tutte le attrezzature connesse al soffiaggio dell'ossigeno, alla riparazione del convertitore e alle relative apparecchiature di manovra.

Normalmente, sopraelevati nella campata vi sono diversi piani di lavoro:

- un piano di carica dei convertitori (a circa 10 m dal piano terra) dal quale si seguono le colate, eseguendo tutte le operazioni di controllo del processo di affinazione;
- un piano (a circa 20 m di quota) all'altezza della bocca

dei convertitori, per le operazioni relative al rivestimento refrattario dei convertitori;

- un terzo piano (a circa 35 m di quota) dove si trovano le tramogge pesatrici degli additivi;
- infine un quarto piano (a circa 50 m dal suolo) in corrispondenza del bordo superiore dei sili contenenti calce, fluorina e minerale di ferro.

Nella campata di colata, oltre alla macchina di colata continua, sono previste tutte le normali attrezzature di questo reparto comprese le siviere e gli equipaggiamenti connessi alle varie manutenzioni. I convertitori del processo L.D. (Linz-Domawitz, le città austriache dove fu sperimentato) (Figura 6), conosciuti anche con diverse altre terminologie anglosassoni: BOP (Basic Oxygen Process), BOS (Basic Oxygen Steelmaking), BOF (Basic Oxygen Furnace), ecc., sono sempre stati a cono simmetrico e a fondo chiuso, e costituiti nelle parti essenziali da: un anellone di sostegno con perni, cuscinetti d'appoggio e gruppo riduttore di rotazione; una struttura metallica in lamiera dello spessore delle colate, eseguendo tutte le operazioni di controllo del processo di affinazione.

Lo strato del refrattario di usura, durante l'esercizio, è a contatto con i materiali di carica e subisce una continua erosione sia di natura meccanica, per il movimento dei materiali durante il caricamento, sia di natura chimica per il contatto con la scoria ossidante di affinazione.

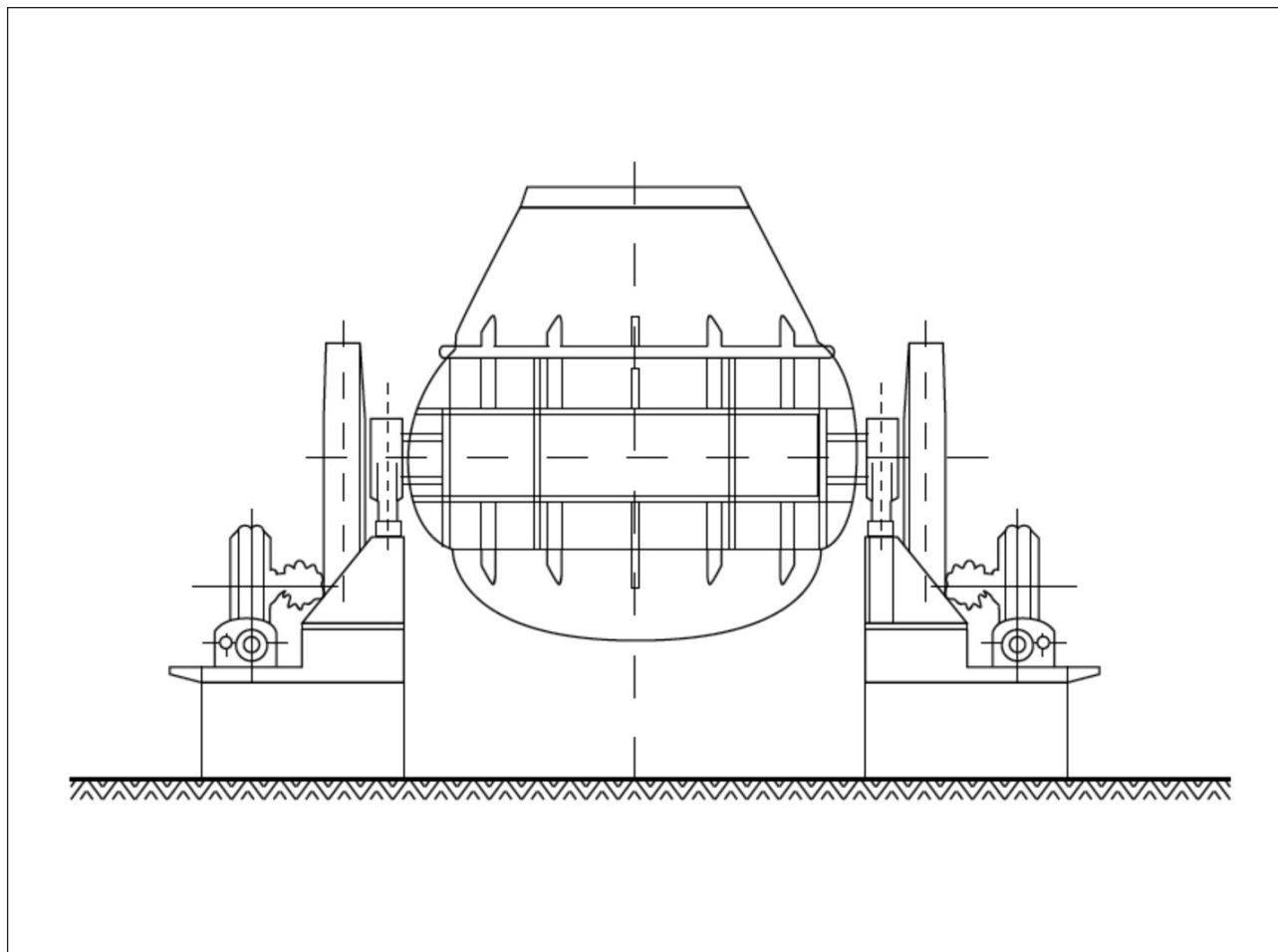


Figura 6. Vista frontale di un convertitore a ossigeno

Le parti maggiormente soggette a questa erosione sono la zona cilindrica e, per ovvie ragioni, il foro di colata. L'esercizio dell'acciaieria è continuo poiché, fermo un convertitore per manutenzione, deve esserne pronto un secondo per non interrompere la produzione.

Il maggiore pericolo ambientale del processo di conversione della ghisa è associato all'insorgere del fenomeno di slopping che consiste nell'eruzione del materiale contenuto nel convertitore a causa di un repentino riscaldamento della ghisa, della rapida formazione di bolle di monossido di carbonio che rimangono intrappolate nella scoria fredda. La scoria si gonfia progressivamente sino a dar luogo all'eruzione e ad intense fumate rosse che si propagano anche al di fuori dell'acciaieria. Anche se la granulometria della dispersione è ampia e le specie chimiche emesse non risultano tossiche o nocive si tratta di un fenomeno fastidioso e che rischia di sporcare le aree circostanti l'impianto con materiali di colorazione rossastra. Al crescere della concentrazione di silicio (e di manganese) nella ghisa aumenta anche il rischio che questo evento si verifichi.

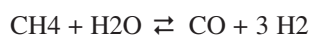
Alternative all'utilizzo del carbone per la riduzione del metallo

In questi processi viene impiegato come agente riduttore del gas di reforming in un reattore verticale a più

zone ed è possibile utilizzare una vasta gamma di materiali di carica come pellets e minerale in varia pezzatura (compreso anche un 10% di fini). La finalità del processo è evitare la cokefazione del carbone che risulta essere la lavorazione più critica dal punto di vista ambientale. Sia le caratteristiche chimiche della carica che quelle fisiche, condizionano i parametri del processo le cui principali componenti sono: l'impianto di reforming, la fornace verticale a lancia e l'unità di recupero del calore (Figura 7).

L'impianto di reforming può essere di vari tipi: nella maggior parte delle realizzazioni vengono utilizzati reforming stechiometrici che consentono un risparmio di energia rispetto a quelli convenzionali.

Le reazioni che avvengono nel reformer sono le seguenti:



Per evitare la deposizione di carbonio piroforico occorre operare con un rapporto H_2/CO superiore a 1,5.

L'efficienza termica del processo è controllata dall'unità di recupero del calore costituita da due serie di fasci tubieri attraversati dai gas caldi in uscita dal reforming. È possibile così riscaldare (a circa 675 °C) l'aria necessaria alla combustione nel reformer come pure (a

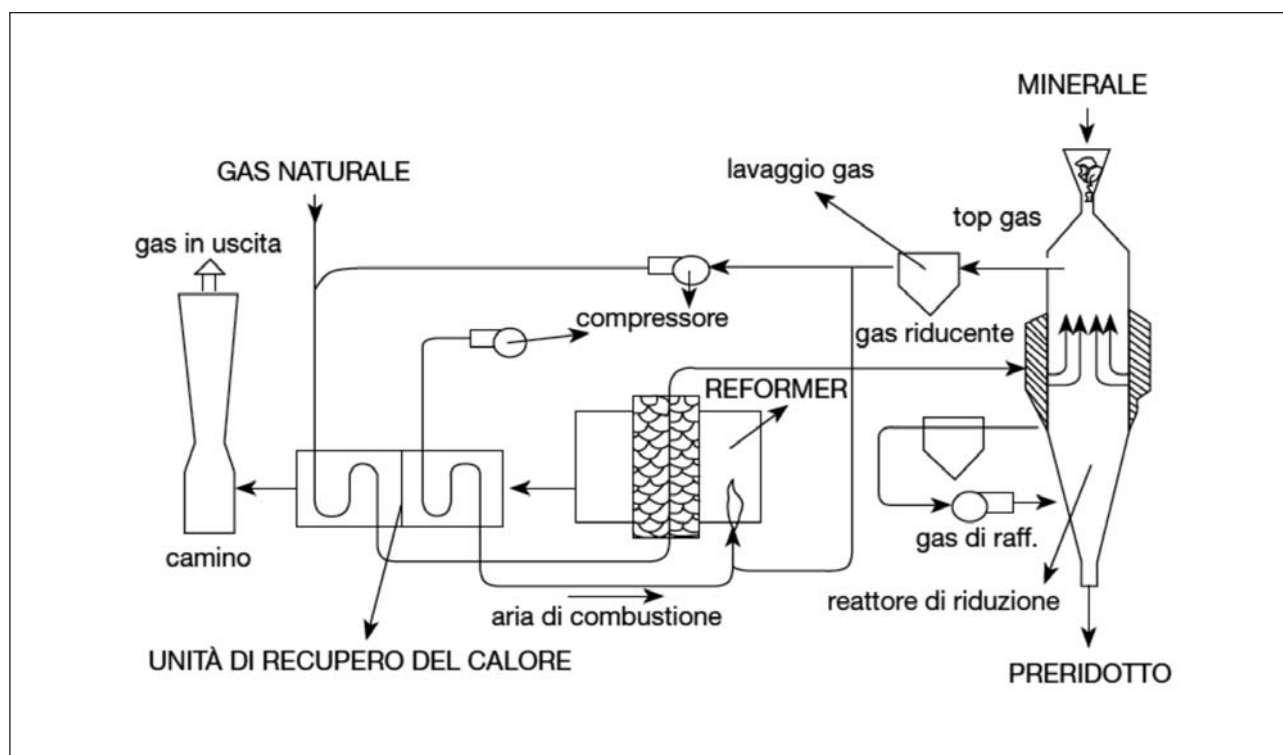


Figura 7. Schema di un processo di riduzione diretta con utilizzo di gas naturale

circa 540 °C) la miscela dei gas naturali e riducenti uscenti dalla parte superiore della fornace e destinati anch'essi al reformer. Un interesse fondamentale riveste il forno verticale a forma di lancia, generalmente di 5-6 metri di diametro, suddiviso in varie zone: zona di carica degli ossidi di ferro, zona di riduzione, zona di transizione, zona di raffreddamento e zona di scarico del preridotto che risulta essere poi caricabile nei forni elettrici senza che questi soffrano del problema dello slopping.

Bibliografia

- 1) Nicodemi W, Mapelli C. Siderurgia. AIM, 2011.
- 2) Rainer Remus, Miguel A. Aguado-Monsonet, Serge Roudier, Luis Delgado Sancho. Reference Document for Iron and Steel Production Industrial Emissions Directive 2010/75/EU Integrated Pollution Prevention and Control, European Commission Joint Research Centre Institute for prospective technological studies, 2013.
- 3) Barella S, Gruttadauria A, Mapelli C, Mombelli D. Journal Ironmaking & Steelmaking, Volume 39, 2012 - Issue 6.

Corrispondenza: Carlo Mapelli, Dipartimento di Meccanica - Politecnico di Milano, via La Masa 1, 20156 Milano (Italy), E-mail: carlo.mapelli@polimi.it