



Provincia Autonoma di Trento
Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente



L'ACCIAIO

Caratteristiche, tipologie, tecnologie di produzione,
migliori tecniche disponibili per il controllo degli impatti



a cura di
Maurizio Tava

I.D. Studio e analisi dei processi tecnologici e produttivi

2013

L'ACCIAIO

0	I COMPONENTI	2
1	IL FERRO, ELEMENTO BASE DELL'ACCIAIO	3
2	STORIA DELLA SIDERURGIA	5
2.1	L'ETÀ DEL FERRO	6
2.2	ARCHEOMETALLURGIA DEL FERRO	8
2.3	SIDERURGIA INDUSTRIALE	11
3	I PROCESSI SIDERURGICI	16
3.1	IL CICLO INTEGRALE	16
3.2	IL FORNO ELETTRICO AD ARCO (EAF)	19
3.3	LAMINAZIONE	25
4	CLASSIFICAZIONE E DESIGNAZIONE DEGLI ACCIAI	27
4.1	CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI IN BASE AI COMPONENTI	27
4.2	DESIGNAZIONE DEGLI ACCIAI IN BASE ALL'IMPIEGO	29
4.3	DESIGNAZIONE IN BASE ALLA COMPOSIZIONE CHIMICA	30
5	LE M.T.D. NEL SETTORE SIDERURGICO – (B.A.T.)	31
5.1	GENERALITÀ DEL SETTORE SIDERURGICO	32
5.2	LA SIDERURGIA AL FORNO ELETTRICO AD ARCO (EAF) VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI AMBIENTALI DEL SETTORE	33
5.3	SINTESI DEI DATI DI INPUT/OUTPUT DEL FORNO ELETTRICO	39
6	MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI PER IL CONTENIMENTO DEGLI INQUINANTI	40
6.1	CONCETTO GENERALE DI MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI	40
6.2	MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI (M.T.D.) DI PORTATA GENERALE PER IL SETTORE SIDERURGICO	41
6.3	MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI SPECIFICHE NEL PROCESSO DI PRODUZIONE DI ACCIAIO CON FORNI ELETTRICI AD ARCO	43
6.4	TECNICHE EMERGENTI	46
6.5	CRITERI DI INDIVIDUAZIONE E UTILIZZAZIONE DELLE M.T.D.	47

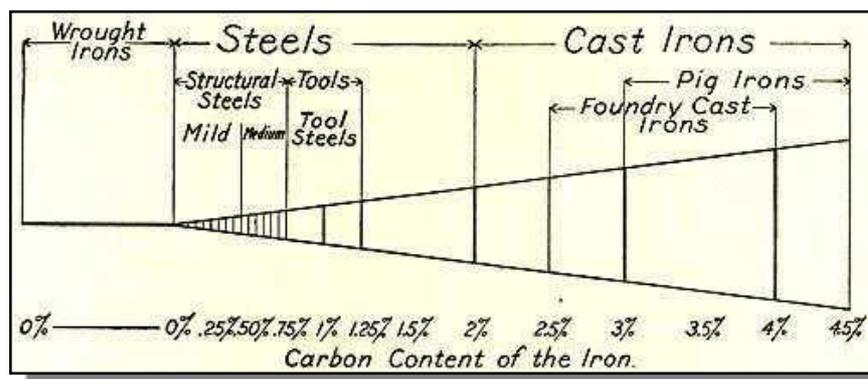
L'ACCIAIO

0 I COMPONENTI

L'**acciaio** è una lega, ottenuta per trattamento a caldo di minerali di ferro, composta principalmente da **ferro** e **carbonio**. Si parla di **acciaio** per tenori di carbonio compresi fra circa 0,05% e 1%.

Per tenori di carbonio superiori al 2,06% e fino al limite di saturazione del 6,67% (Fe_3C - *Cementite* o *Carburo di Ferro*) le proprietà del materiale cambiano e la lega assume la denominazione di **ghisa**.

Classificazione
delle leghe
Ferro-Carbonio



In base al tasso di carbonio gli acciai si dividono in:

- **acciai extradolci** (Carbonio fino a 0,15%);
- **dolci** (Carbonio 0,15 ÷ 0,25 %);
- **semiduri** (Carbonio 0,25 ÷ 0,60 %);
- **duri** (Carbonio oltre 0,60%).

Oltre al carbonio nell'acciaio possono essere presenti ulteriori **elementi alliganti**, aggiunti per lo più sotto forma di ferroleghes, al fine di migliorarne le caratteristiche chimico-fisiche.

La possibilità di legare l'acciaio con altri elementi lo rende un materiale estremamente versatile. I principali elementi di lega, presenti naturalmente o aggiunti per conferire caratteristiche specifiche, sono i seguenti:

- **nichel** *Ni* (alta o bassa dilatazione termica, tenacità),
- **manganese** *Mn* (tenacità, resistenza a trazione, abbassa temperatura di tempra),
- **cobalto** *Co* (riduce penetrazione della tempra),
- **rame** *Cu* (saldabilità, resistenza agli agenti atmosferici),
- **azoto** *N* (riduce invecchiamento),
- **alluminio** *Al* (deossidante),
- **cromo** *Cr* (durezza, inossidabilità),
- **molibdeno** *Mo* (temprabilità, durezza),
- **silicio** *Si* (resistenza a fatica e snervamento, acciai per molle),
- **titanio** *Ti* (deossidante, deazoturante, forma carburi),
- **vanadio** *V* (durezza a temperature elevate, per utensili da tornio),
- **tungsteno** *W* (durezza, resistenza al calore),
- **piombo** *Pb* (lavorabilità, truciolabilità),
- **boro** *B* (temprabilità, per acciai speciali da costruzione e bulloneria alta resistenza).

Sono elementi dannosi lo **zolfo S** (fragilità), il **fosforo P** (annulla la resilienza), l'**ossigeno O** (poco solubile produce inclusioni) e l'**idrogeno H** (riduce le caratteristiche meccaniche).

1 IL FERRO, ELEMENTO BASE DELL'ACCIAIO

Nel linguaggio comune con la parola *ferro* vengono indicate le leghe di ferro a bassa resistenza, definiti *acciai dolci*. Infatti il ferro, che allo stato puro ha scarsissime proprietà tecnologiche e presenta un'elevata facilità ad ossidarsi, è sempre legato ad altri elementi, quali il carbonio, il silicio, il manganese, il cromo, il nichel, ed altri ancora.

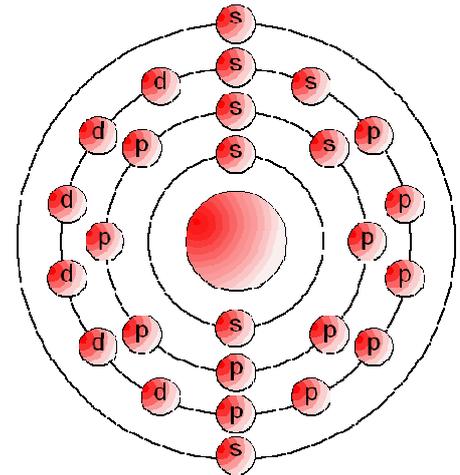
Il **ferro** è il metallo più abbondante all'interno della Terra: esso costituisce il 4,75% della crosta terrestre ed il 34,6% della massa del nostro pianeta. Si stima che sia il decimo elemento per abbondanza nell'intero universo.

Il ferro è l'elemento chimico con numero atomico 26. Il suo simbolo *Fe* deriva da *ferrum*, il suo nome latino.

Esso ha una densità di **7,874 g/cm³** (7874 kg/m³), fonde ad una temperatura di circa **1538°C** e bolle a circa **3070°C**.

È un metallo molto importante nella tecnologia per le sue caratteristiche meccaniche e la sua lavorabilità che presenta caratteristiche polimorfiche:

- fino a 769°C è stabile la forma α , ferromagnetica, con un reticolo cristallino cubico centrato;
- tra 769 e 910°C è stabile la forma β , che ha lo stesso reticolo ma non è più ferromagnetica;
- tra 910 e 1390°C è stabile la forma γ con reticolo cubico a facce centrate;
- tra 1390°C e il punto di fusione è stabile la forma δ , con reticolo simile a quello della forma α .



Configurazione elettronica
[Ar]3d⁶4s²

La proprietà polimorfica è di importanza fondamentale nella metallurgia del ferro.

Inoltre il ferro ha la proprietà di magnetizzarsi se sottoposto all'azione di un campo magnetico.

La storia dell'impiego e della produzione del ferro è strettamente connessa a quella delle sue leghe *ghisa* ed *acciaio*. In natura infatti non si rinviene ferro puro (nativo), ma lo si deve estrarre da minerali nei quali il ferro si trova nello stato ossidato, procedendo alla riduzione chimica del minerale ed alla rimozione delle impurità.

I principali minerali contenenti *ossidi di ferro* sono: **ematite, magnetite, limonite, wüstite, taconite**.



ematite
 Fe_2O_3

magnetite
 Fe_3O_4

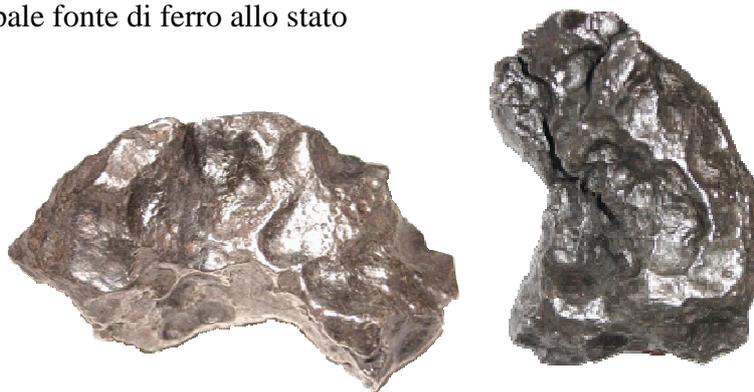
limonite
 $FeO(OH)$

wüstite
 FeO

taconite
 $Fe_3O_4 + Fe_2O_3$

Benché rare, le **meteoriti** sono la principale fonte di ferro allo stato metallico reperibile in natura.

Meteoriti ferrose



Per il suo basso costo e la sua ottima resistenza (nella forma di acciaio) il ferro è in assoluto il metallo più usato dall'umanità: attualmente da solo rappresenta circa il 95% della produzione di metalli del mondo. Viene utilizzato come materiale da costruzione (armature del C.A. ed elementi portanti di edifici), per la meccanica, per la realizzazione di veicoli e scafi di navi, ecc..

Oltre che nelle forme di **ghisa** (di prima fusione con 4 - 5 % di carbonio, o di seconda fusione con il 2 - 3,5% di carbonio) e di **acciaio al carbonio** (con 0,1 - 1,65% di carbonio), il ferro viene prodotto ed impiegato anche come:

- **ferro puro** (il cosiddetto **Ferro Armco**), per applicazioni che richiedono resistenza alla corrosione, una elevatissima permeabilità magnetica (attitudine a magnetizzarsi) ed una isteresi magnetica trascurabile (ritardo nella risposta alla magnetizzazione), quali vasche di zincatura, elettrodi per soluzioni saline, dispersori per impianti di messa a terra, guarnizioni metalliche, ecc.;
- **ossido di ferro (III)** (Fe_2O_3), nelle varietà *magnetite* e *maghemite*, per la produzione di supporti magnetici di memorizzazione, come nastri magnetici.



Applicazioni in ferro ARMCO (ferro puro):

- *crogiolo per tempra in bagno di sali,*
- *vasca di zincatura a caldo per fili.*



Ossido di ferro

2 STORIA DELLA SIDERURGIA

In passato il ferro fu tanto importante da dare il nome ad un intero periodo storico, la cosiddetta *età del ferro*, ultimo periodo della preistoria. Tuttavia, ancorché non sia noto quale fra i popoli antichi per primo abbia consapevolmente prodotto il ferro, è comunque certo che questo metallo venne impiegato molto prima dell'*età del ferro*.

Infatti il primo ferro utilizzato, quando ancora non era possibile fonderlo, fu quello presente nei meteoriti, come dimostra l'alto tenore di nichel dei reperti archeologici di età più antica.

Ci sono prove dell'utilizzo del *ferro meteoritico* già 4000 anni prima di Cristo presso i Sumeri, gli Ittiti e gli antichi Egizi, che lo impiegavano per piccoli oggetti come gioielli, ornamenti e punte di lancia.

Per gli Egizi il *ferro* era il "*metallo caduto dal cielo*", un dono degli dei, ed aveva un valore cinque volte maggiore rispetto all'oro e quattro volte maggiore dell'argento.

Dal greco *sider* (= stella) deriva il termine **siderurgia** ad indicare la tecnologia del ferro.

Il *ferro meteoritico* è riconoscibile dalla sua composizione, che mostra sempre una significativa presenza di Nichel (dal 5 al 25%) e di elementi in tracce quali Gallio, Germanio ed Iridio, la cui analisi consente la determinazione del corpo celeste progenitore, normalmente asteroidi.



Ferro meteoritico

Ahnighito (30,9 t) e Agpalilik (o the Man 20 t), i due maggiori frammenti del cosiddetto meteorite di Capo York (Groenlandia, regione di Thule), caduto circa 10000 anni fa e la cui massa complessiva conosciuta è di circa 58,2 tonnellate.

*Composizione: Fe 91%; Ni 7,58%; Ga 19,2 ppm;
Ge 36 ppm; Ir 5 ppm.*



Foto d'epoca del meteorite Willamette

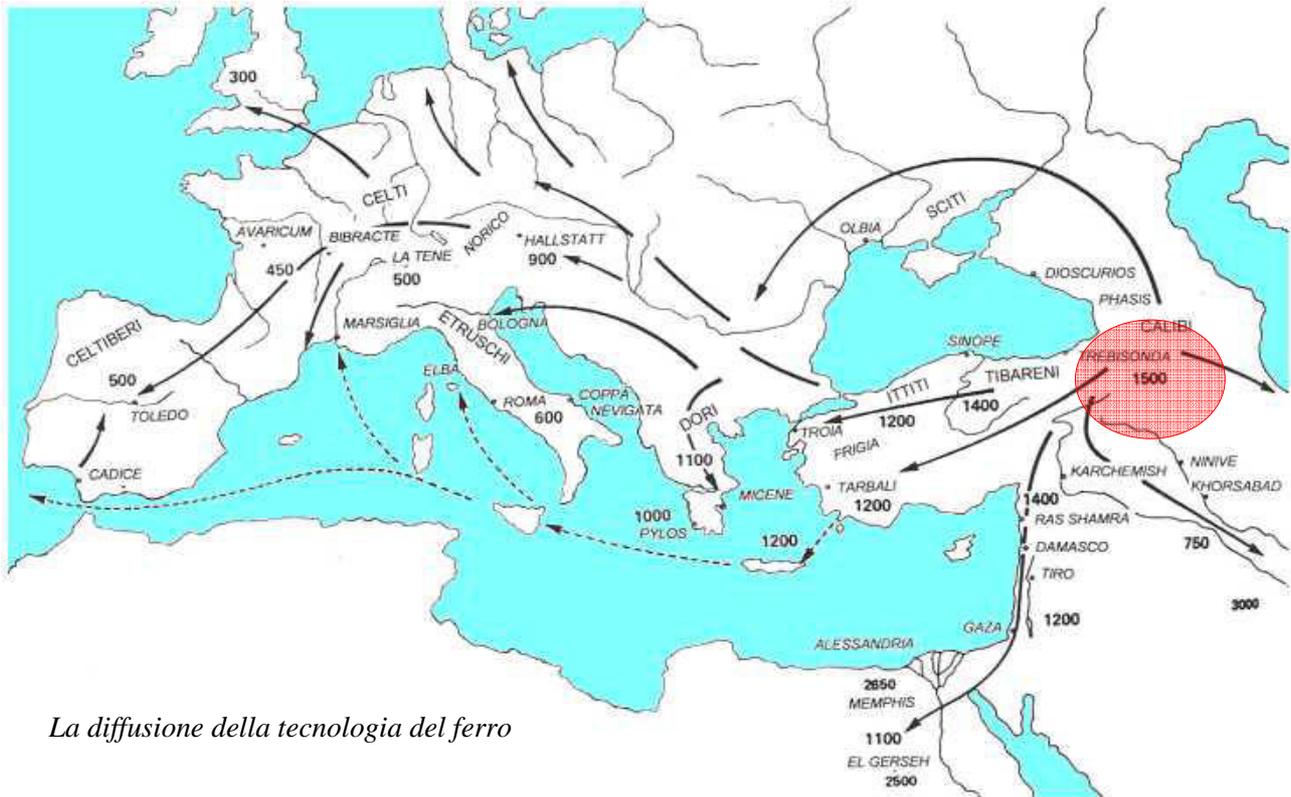


Meteorite di Willamette (Oregon – USA) - Rinvenuta nel 1902, è un blocco in nickel-ferro del peso di 15,5 tonnellate. La lunga esposizione agli agenti atmosferici ha conferito alla superficie un singolare aspetto con molte cavità. È stata a lungo al centro di una controversia di proprietà fra tribù indiane dell'Oregon ed il Museo di Storia Naturale di New York, conclusasi nel 2000 con il riconoscimento dei diritti delle tribù indiane, per le quali il grande meteorite è un oggetto di culto, venerato fin da epoche remote, prima dell'arrivo degli europei sul continente americano.

2.1 L'ETÀ DEL FERRO

L'Età del ferro segue all'Età del bronzo (3300 ÷ 1200 a.C.), precedendo l'ingresso delle culture nel periodo storico, caratterizzato dalla presenza di fonti scritte.

L'età del ferro nel bacino mediterraneo inizia intorno al XII secolo a.C. a partire dal Medio Oriente e dalla Grecia. Allo stesso periodo è riconducibile l'uso di strumenti in ferro nell'Africa occidentale subsahariana (Niger), nell'Iran e nell'India. In Europa l'età del ferro inizia più tardi, fra il XI e l'VIII secolo a.C. nell'Europa centrale e nel VI secolo a.C. nell'Europa settentrionale.



La diffusione della tecnologia del ferro

Come per gli altri periodi della preistoria i suoi limiti cronologici variano considerevolmente secondo il contesto geografico e culturale. Alcune civiltà, come quelle precolombiane, pur avendo avuto un notevole sviluppo tecnico e sociale, non hanno mai conosciuto l'età del ferro.

I primi oggetti in ferro fuso, distinguibili dal ferro meteoritico per l'assenza di nichel, furono realizzati in Anatolia e Mesopotamia già nella media età del bronzo (2000 – 1800 a.C.) con un **ferro spugnoso**, probabilmente sottoprodotto casuale della raffinazione del rame.

Sembra che il ferro sia comparso per la prima volta presso i Calibi, antichi abitanti del Ponto Eusino, la regione caucasica a sud-est del Mar Nero. Soltanto con la scoperta delle tecniche di estrazione e lavorazione (attorno al 1300 a.C.) l'uso del ferro dal Medio Oriente si diffuse in tutta l'Asia e verso il Mediterraneo, soppiantando in breve il bronzo, di più difficile reperimento.

In Cina il ferro si diffuse nel X secolo a.C. (Xinjiang), nel IX sec. (Manciuria), nel VI (Yangzi), per raggiungere una buona tecnica nel 350 a.C.. Introdotto con il commercio nel IV secolo a.C., in Corea la produzione del ferro fu avviata nel II secolo a.C., mentre in Giappone sembra che il ferro sia stato conosciuto soltanto dopo il 250 d.C..

In Europa, come già anticipato, la lavorazione del ferro venne introdotta intorno al 1000 a.C., dalle regioni caucasiche e dall'Anatolia e attraverso la Grecia e la Scizia (comprendente i territori a nord del Mar Nero corrispondenti all'attuale Ucraina), e lentamente si diffuse verso ovest e verso nord per i successivi 500 anni, con le culture di Haltstatt (~ 900 a.C.) e di La Tène (~ 500 a.C.).

In Italia i primi popoli che impiegarono il ferro furono gli Etruschi Villanoviani (Toscana, Lazio, Emilia, Marche, Campania, Lucania) ed i Veneti (nell'area ad est di Verona). Successivamente l'espansione romana in Italia ed in Europa favorì la diffusione della tecnologia del ferro, tanto che nell'Europa del Nord si individua un'*Età del Ferro pre-romana* ed un'*Età del Ferro romana*.

La scoperta del ferro ha dato alle popolazioni che seppero sviluppare le tecniche siderurgiche diversi vantaggi. Il ferro è molto più resistente, più diffuso e meno costoso del bronzo e dei suoi componenti (stagno e rame). Ciò consentì una rapida espansione militare delle popolazioni che seppero produrre le più robuste ed efficienti armi in ferro, ma anche maggiore produttività agricola, grazie alla maggiore resistenza degli strumenti agricoli realizzati in ferro.

Il ferro è stato probabilmente la più antica **materia prima strategica**, che ha creato conflitti ed ha favorito scambi commerciali e culturali fra popoli, inducendo l'accelerazione del progresso tecnico e scientifico dell'intera umanità.

I primi manufatti sono perlopiù punte di lancia, giavellotti, frecce (hastae, lanceae, pila, sagittae) o asce ed elementi taglienti.



*Reperto bordato di bronzo
(Aquincum Museum – Budapest H)*



Ascia celtica - Gotland (S)



*Punta di lancia decorata con anelli in bronzo
Hermann Historica – Monaco -D)*



Puntale rivestito in bronzo



Punte di lancia (Limesmuseum Aalen - D)



*Punte di lancia (I sec d.C)
(Hermann Historica – Monaco - D)*



*Puntale terminale (spiculum)
(Rom-Museum - D)*



*Punta di lancia a sezione quadra con alette
(Limesmuseum Aalen - D)*



*Punta di lancia a forma di arpione
(Vindonissa Museum - CH)*

2.2 ARCHEOMETALLURGIA DEL FERRO

I primi manufatti in ferro, realizzati con **ferro meteoritico** attorno al 4000 a.C. da Egizi e Sumeri, non essendo ancora possibile la fusione, venivano prodotti con semplici **lavorazioni di battitura**. Si trattava di oggetti ornamentali o cerimoniali a cui veniva attribuito valore magico e simbolico.

Soltanto dal III millennio a.C. il metallo comincia ad essere impiegato per fabbricare oggetti d'uso, come punte di lancia o elementi taglienti, sempre con lavorazione di battitura a freddo.

*Ancora verso 1000 d.C. il popolo groenlandese di Thule cominciò a fabbricare arpioni e altri strumenti affilati con pezzi del **meteorite di Capo York**, utilizzandoli anche come bene di scambio con altre popolazioni antiche: manufatti realizzati con parti del meteorite di Capo York furono trovati in siti archeologici distanti più di 1600 km.*

La nascita della siderurgia, intesa come capacità di estrarre il ferro dal minerale e sottoporlo ai vari processi di lavorazione sino ad ottenere manufatti, può esser fatta risalire ad un periodo compreso fra il 2000 ed il 1500 a.C. quando i popoli del Caucaso Meridionale, i *Calibi* e gli *Ittiti* in particolare, cominciarono ad utilizzarlo per fabbricare armi.

A riprova dell'abilità delle genti anatoliche, nella realizzazione di ferri e acciai di qualità, si narra che presso il popolo dei Calibi un maestro di forgia, cui Giulio Cesare aveva risparmiato la vita, riuscì a fabbricare per il generale romano un'invincibile spada utilizzando un blocco di siderite caduto dal cielo: la meteora, trovata su un ghiacciaio dell'Ararat, fu passata per il fuoco, battuta incessantemente per tre giorni e tre notti e poi temprata nel sangue di un leone.

La tecnologia del ferro si diffuse progressivamente, dapprima verso oriente (Mesopotamia, Egitto, Persia, Cina), poi verso occidente (Grecia, Italia, Penisola Iberica) e più tardi nel Nord Europa (Gallie, Isole Britanniche), coinvolgendo nella cosiddetta *Età del Ferro* (I millennio a.C.) le più importanti e sviluppate civiltà del mondo antico.

Note le tecniche per la riduzione dei minerali di rame e di lavorazione alla fucina utilizzate per produrre il bronzo, il passo per giungere alla fusione dei minerali di ferro non era molto lungo.

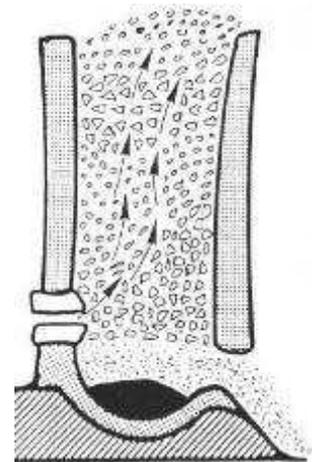
Così nella preistoria il ferro veniva ricavato direttamente dal minerale per **riduzione** nei cosiddetti **bassifuochi** a ventilazione naturale e con l'utilizzo di carbone di legna (*metodo diretto*): con il calore gli *ossidi di ferro* presenti nei minerali venivano ridotti in *ferro metallico*.

In un primo tempo i *bassifuochi*, forni "a fossa" o "a pozzetto" realizzati in pietra ed argilla, erano a tiraggio naturale; più tardi il tiraggio fu assicurato da mantici a mano.

L'arte siderurgica si è sviluppata soprattutto nei luoghi dove venivano scoperti i minerali di ferro facilmente riducibili ed era disponibile il legname per produrre il carbone di legna.

Preliminarmente il minerale estratto veniva sottoposto ad operazioni di preparazione, quali pesta, lavaggio, arrostimento. Successivamente veniva introdotto a strati alternati con carbone di legna nella *fornaci di riduzione* per separare il metallo dal materiale sterile (*ganga*), che si raccoglieva in forma di scorie liquide.

Le temperature di 1100÷1300°C raggiunte nei *bassifuochi* erano insufficienti per arrivare alla fusione del ferro (~1538°C), cosicché il metallo scaturiva allo stato pastoso, in forma spugnosa (*bluma* o *fiore*), ancora ricco di scorie ed impurezze; diventava quindi indispensabile fucinarlo e sottoporlo a lunga battitura per riuscire a liberarlo dalle scorie aderenti ed incluse e renderlo compatto e malleabile (da cui il termine **ferro battuto**), trasformandolo di solito immediatamente in prodotti finiti.



Fornace arcaica:
bassofuoco

Quest'ultima operazione veniva fatta utilizzando i cosiddetti *fuochi di fucina* o *di forgia*, ove la *bluma* dapprima veniva raffinata e successivamente forgiata in utensile.

In conseguenza dell'imperfezione del processo di riduzione, le scorie presentavano ancora un altissimo contenuto di ferro, che poteva superare anche il 40%.

Il ferro che si otteneva mediante *metodo diretto* di riduzione del minerale aveva un ridotto tenore di carbonio ed anche dopo il processo di raffinazione della *bluma* era *dolce*, resistente ma privo della durezza necessaria per fabbricare armi o utensili. Ben presto tuttavia (VIII secolo a.C.) vennero scoperte le tecniche della *carburazione* (o *carbo cementazione*) e della *tempra*.

La *carburazione* si otteneva riscaldando a lungo il metallo ricoperto da uno strato di polvere di carbone, che, cedendo carbonio, lo rendeva molto più flessibile con la superficie assai più tenace e temprabile.

La *tempra*, che lo rendeva ancora più duro e resistente, si effettuava mediante un raffreddamento rapido del metallo rovente in acqua.

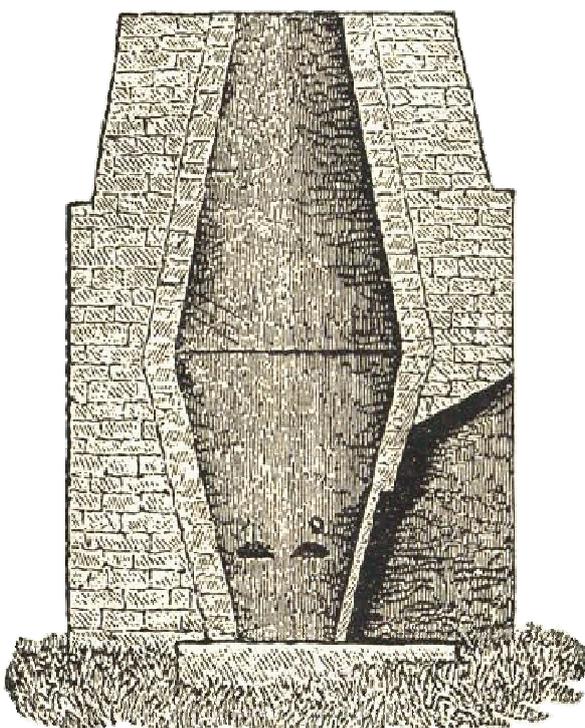
Questo procedimento rimase pressoché invariato fino al Medioevo.

Nelle fornaci più primitive, *a pozzetto* o *a fossa*, in cui la ventilazione avveniva da fondo della fornace stessa, la scoria non veniva separata e si raccoglieva sul fondo assieme al metallo.

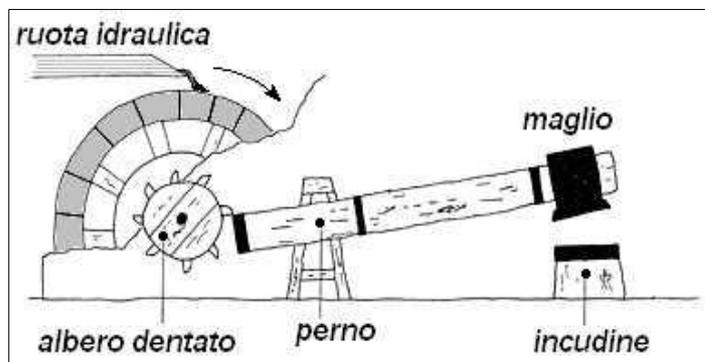
Nelle fornaci più evolute la scoria era invece allontanata dalla massa di metallo realizzando una apertura laterale alla base del catino della fornace (*fornaci a scorie colate*), ovvero un apposito pozzetto sotto il catino stesso nel quale la scoria si accumula separatamente dal metallo (*fornaci con pozzetto per le scorie*). In entrambi i casi la produttività era limitata ed occorreva periodicamente interrompere la produzione per estrarre la *bluma*.

Un significativo progresso ebbe luogo intorno all'anno 1000 d.C. in Germania ed in Austria: a seguito dell'impiego di mantici azionati dalla **forza idraulica**, che consentivano temperature più elevate, le fornaci furono progressivamente innalzate e comparvero i primi **Stückofen** (*forni a tino*), alti fino a 5 metri che inizialmente, come i *forni a riduzione diretta*, producevano i soliti blocchi spugnosi di acciaio, ma di dimensioni decisamente maggiori che vennero chiamati *lingotti*.

Di conseguenza anche per la fucinatura del *lingotto* la forza muscolare del fabbro fu sostituita dall'energia idraulica per azionare i *magli di fucinatura*.



Stückofen



Schema di maglio idraulico

Successivamente il migliore sfruttamento termico del **forno a tino** ha favorito la profonda e progressiva trasformazione tecnologica che ha condotto al **processo indiretto** con l'affermazione, attorno al 1500, del **Folssofen**, l'**altoforno** nel quale la massa plastica di ferro, raggiunta la temperatura di fusione, colava allo stato liquido.

Si tratta di un **processo indiretto**, in quanto rispetto all'acciaio ottenuto col **processo diretto** - direttamente dal minerale di ferro -, il ferro colato era **ghisa** con un forte contenuto di carbonio (attorno al 4%) e non fucinabile, che, per essere trasformata in acciaio, doveva venir affinata e purificata "bruciando" l'eccesso di carbonio ed altre impurezze di silicio, manganese, ecc., consentendo di ottenere prima ferro pastoso (XVIII secolo) e poi ferro liquido (XIX secolo).

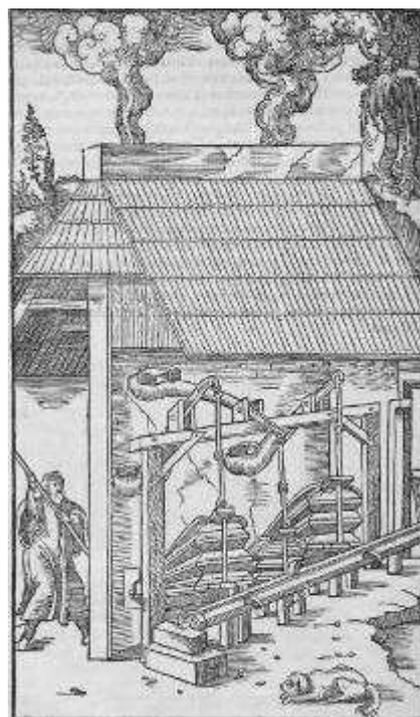
Già nel 1400 in Italia e Germania si facevano getti di ghisa per palle di cannone.

Nel '700 i progressi scientifici coinvolgono anche il settore siderurgico determinando un miglioramento dei processi a partire da Germania e Francia.

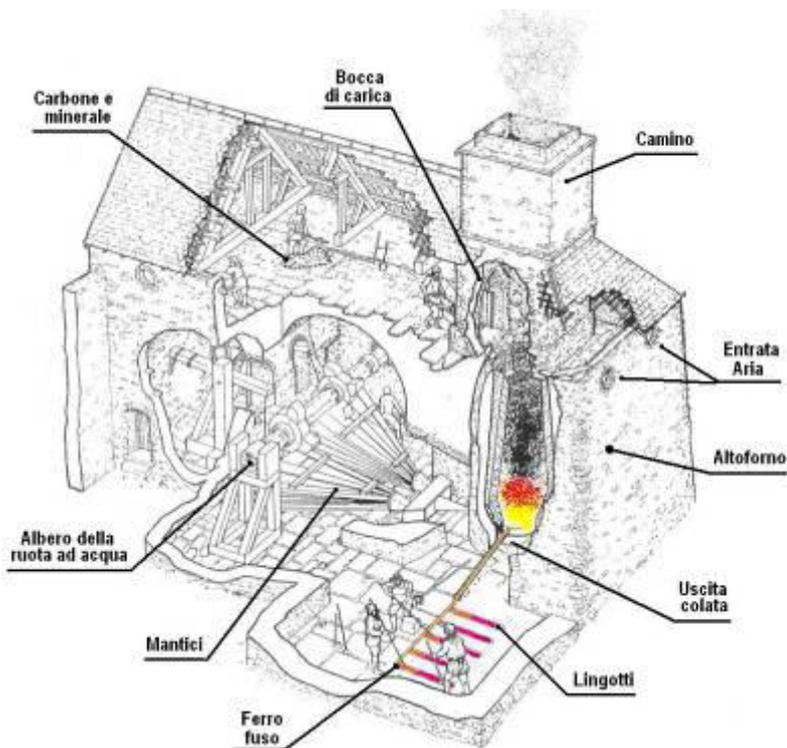
Con il contributo della chimica, poi, si giunse a comprendere meglio la struttura del ferro e delle sue due principali leghe **acciaio** e **ghisa**.

Nel corso della Rivoluzione Industriale in Inghilterra, per la scarsità di legname, in sostituzione del carbone di legna si diffuse l'uso del **carbone fossile** e del **carbone coke**, con i quali, in combinazione con il potenziamento dei sistemi di ventilazione, fu possibile raggiungere temperature elevatissime.

Le nuove prospettive offerte dal progresso tecnologico, dunque, fornirono le basi della moderna siderurgia con la nascita di processi industriali di produzione della ghisa e dell'acciaio, che permisero di incrementare le quantità prodotte e di prevedere e controllare le qualità dei materiali in funzione delle specifiche esigenze.



*Mantici idraulici
(stampa del 1556)*



Altoforno preindustriale

2.3 SIDERURGIA INDUSTRIALE

La svolta che ha dato avvio alla rivoluzione industriale nel settore siderurgico fu l'impiego del carbone e dal coke metallurgico, da esso derivato, per la produzione di ghisa.

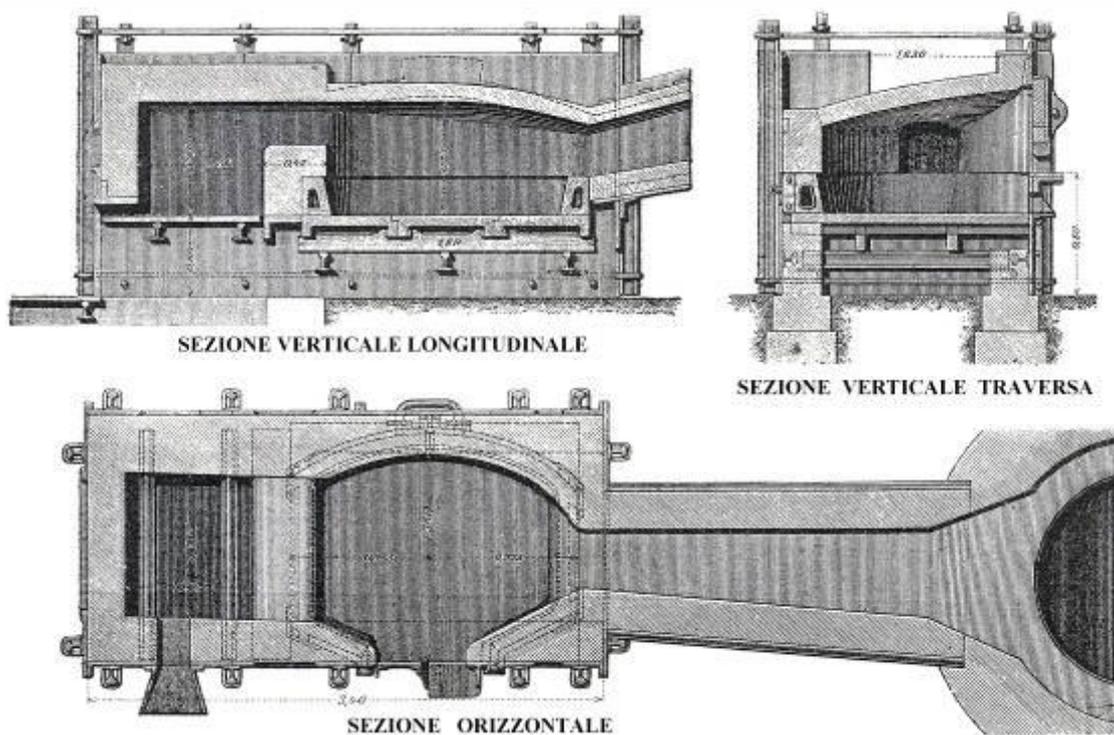
La tecnica, probabilmente inventata in Inghilterra da **Dud Dudley** già verso il 1620 nelle fucine di *Pensnett Chase* e più tardi impiegata da **Shadrach Fox** nella non lontana fornace di *Coalbrookdale*, fu adottata per la prima volta nel 1709 dal maniscalco **Abraham Darby I** - che dopo un incendio recuperò la fornace di *Coalbrookdale* -, ma fu messa a punto dal figlio **Abraham Darby II** verso il 1750 nelle ferriere di *Horsehay* e di *Ketley*.

Nel frattempo, nel 1740, **Benjamin Huntsman** riscoprì la tecnica dell'acciaio al crogiolo (*crucible steel*): realizzò una fornace in grado di raggiungere i 1600°C in cui era possibile inserire una dozzina di crogioli d'argilla, ciascuno contenente circa 15 kg di ferro dolce; portati a fusione, venivano aggiunti pezzi di ghisa per l'apporto di carbonio e dopo circa 3 ore l'acciaio fuso veniva colato in lingotti. Questo sistema risolveva anche il problema degli acciai semplicemente cementati, in quanto l'acciaio, con la fusione, raggiungeva una omogeneità superiore agli **acciai omogenei** ottenuti per fucinatura.

Gli anni successivi furono dedicati a risolvere il problema della fragilità e scarsa lavorabilità della ghisa, riducendo il tenore di carbonio e gli altri elementi indesiderati.

Peraltro tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo lo sviluppo della siderurgia trovò un nuovo potente aiuto nella macchina a vapore; questa venne impiegata non solo per migliorare il tiraggio, ma permise anche di costruire le macchine trasformatrici, come laminatoi e magli, in dimensioni molto maggiori e quindi con rendimento migliore.

La prima soluzione per l'affinazione della ghisa fu il **puddellaggio** (da *puddling* – mescolare), tecnica sperimentata da **William Hall** nel 1768, ma brevettata e impiegata a livello industriale da **Henry Cort** nel 1784. Nel puddellaggio di Cort si impiegavano *forni a riverbero* nei quali l'affinazione era innescata da una violenta reazione operata da minerali di ferro nella quale la ghisa grezza veniva decarburizzata (*affinatura umida*).

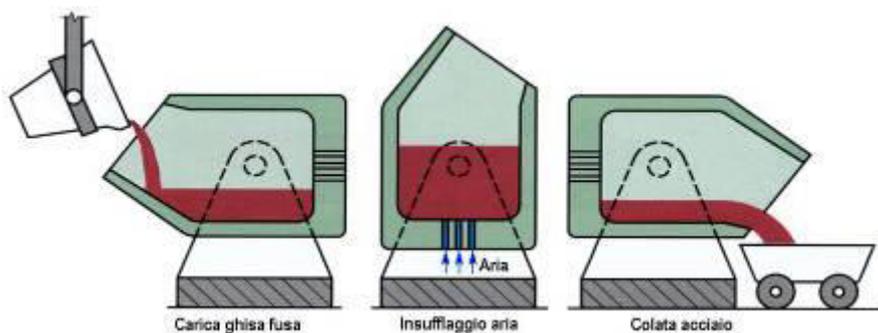


forno di puddellaggio

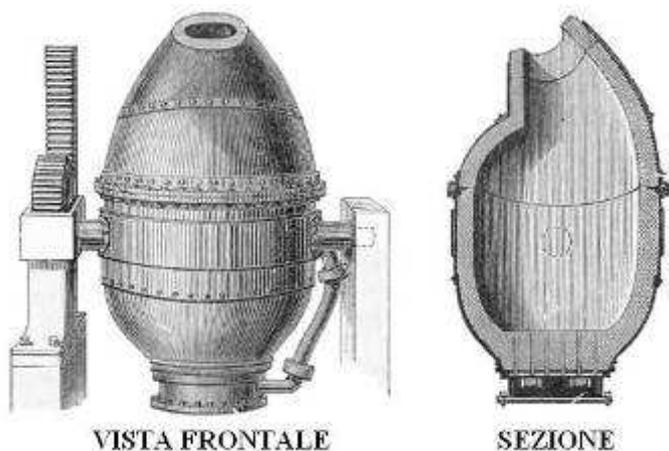
Nel 1828 **James Beaumont Neilson** in Scozia brevettò il *sistema a vento caldo*, mediante il quale si ottenevano notevoli risparmi energetici con riduzione dei costi di produzione: l'aria di combustione soffiata nella fornace veniva preriscaldata mediante il calore recuperato dalla combustione del CO contenuto nei gas esausti. Il sistema recuperativo è stato poi migliorato da **Edward Alfred Cowper** nel 1857, e da lui ha preso il nome (*recuperatori Cowper*).

Nel 1854 l'americano **William Kelly**, dopo tre anni di esperimenti condotti nel *Kentucky (U.S.A.)*, riuscì a produrre l'acciaio direttamente dalla ghisa liquida insufflando dell'aria nella massa fusa o semifusa; tuttavia la sua scoperta non ebbe successo nel mondo industriale americano dell'epoca.

Invece in Inghilterra nel 1855 **Henry Bessemer** brevettò un analogo procedimento per la produzione di acciaio, nel quale il carbonio veniva eliminato dalla ghisa liquida utilizzando un forno rivestito di refrattario siliceo (acido) con il fondo forato dal quale veniva iniettata aria in pressione, che in breve tempo provocava la riduzione del carbonio.



Il *convertitore Bessemer ad aria* in circa mezz'ora poteva trasformare 25 tonnellate di ghisa grezza in acciaio, e permise di abbandonare il *puddellaggio*, metodo lungo e dispendioso, diffondendosi anche in America.

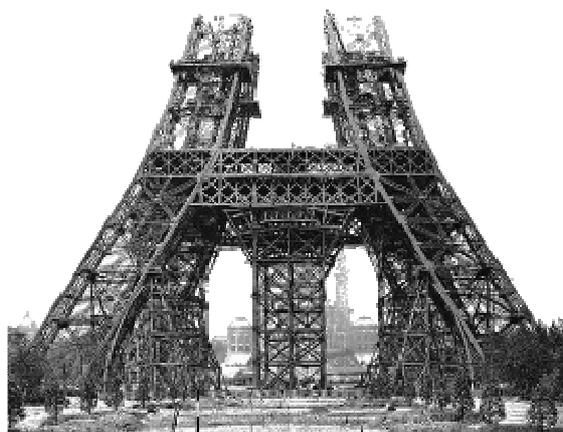


convertitore Bessemer



Il *processo di Bessemer* fu perfezionato nel 1879 da **Sidney Gilchrist Thomas** per trattare le ghise fosforese: il rivestimento siliceo del convertitore fu sostituito da carbonato di calcio e di magnesio impastato con silicati solubili. La scoria fosforosa ottenuta poteva essere impiegata come concime.

*Il processo Bessemer rese l'acciaio economico e producibile su larga scala: fra gli anni 1887 e 1889 furono costruiti la **Tour Eiffel** a Parigi ed il **Tower Building** di New York, le prime grandi costruzioni in acciaio.*



La Tour Eiffel in costruzione nel 1888

Nel frattempo tra il 1850 ed il 1857 **Wilhelm Siemens**, assieme al fratello **Friedrich**, mise a punto un sistema rigenerativo di affinazione della ghisa su suola, che consente di risparmiare fino all'80% del combustibile. Nel 1865 **Pierre-Emile Martin** acquistò il brevetto, che prese anche il suo nome (*forno Martin-Siemens*), e per la prima volta lo applicò industrialmente.

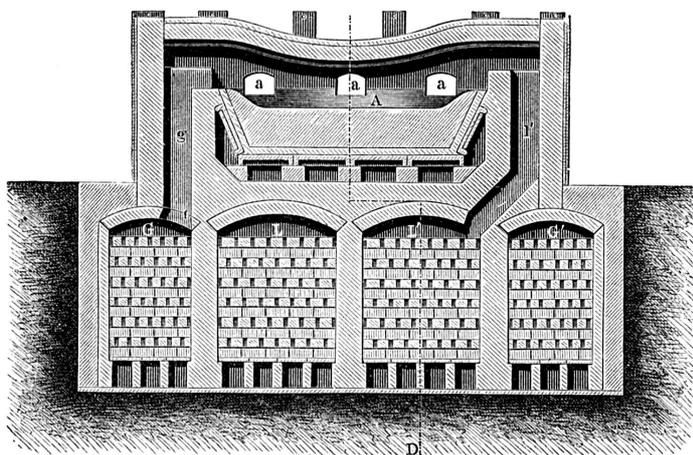
Inizialmente il processo utilizzava ghisa e rottami di ferro (*scrap-process*), poi si pensò di fondere ghisa con minerali di ferro (*ore-process*).

Il forno, la cui dimensione usuale è di 50÷100 tonnellate, è un forno a riverbero con suola refrattaria a pianta rettangolare a bassa profondità con il fondo leggermente inclinato verso il foro di colata posteriore.

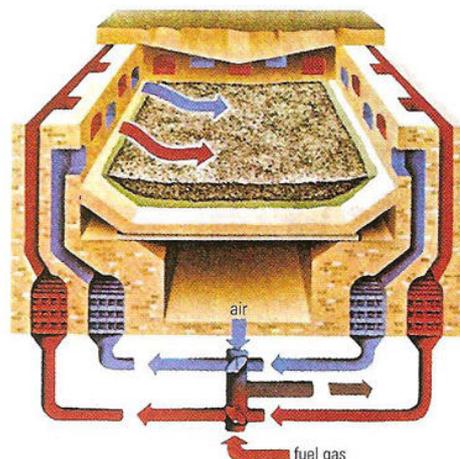
Nella parte sottostante è provvisto di 4 camere ausiliarie costituite da impilaggi di mattoni ceramici, impiegate a coppie alternativamente per recuperare calore dai gas esausti (riscaldandosi fino a 1200°C) ed a preriscaldare (fino a 1000-1100°C) separatamente l'aria di combustione ed il *gas Siemens* (gasogeno, gas di coke, gas d'altoforno, ma ora anche olio combustibile o metano).

Nella parte superiore del forno aria e combustibile si incontrano e, bruciando, riscaldano da sopra la carica metallica, che raggiunge una temperatura di 1800°C.

Il processo dura circa 6-8 ore, il che consente di controllare frequentemente la qualità dell'acciaio, ed ogni mezzora circa avviene l'inversione dei flussi per l'ottimizzazione del recupero termico.



il forno Martin-Siemens



schema di funzionamento del forno

Tra 1878 ed il 1879 **Wilhelm Siemens** sperimentò, senza grandi successi, i **primi forni elettrici**.

Nel 1898 **Ernesto Stassano**, a seguito di prove ed esperimenti iniziati nel 1896, brevettò un *forno elettrico ad arco indiretto* a corrente trifase, con il quale riesce ad ottenere a Darfo produzioni di acciaio di elevata qualità partendo da cariche costituite all'80% di rottame e al 20% di ghisa.

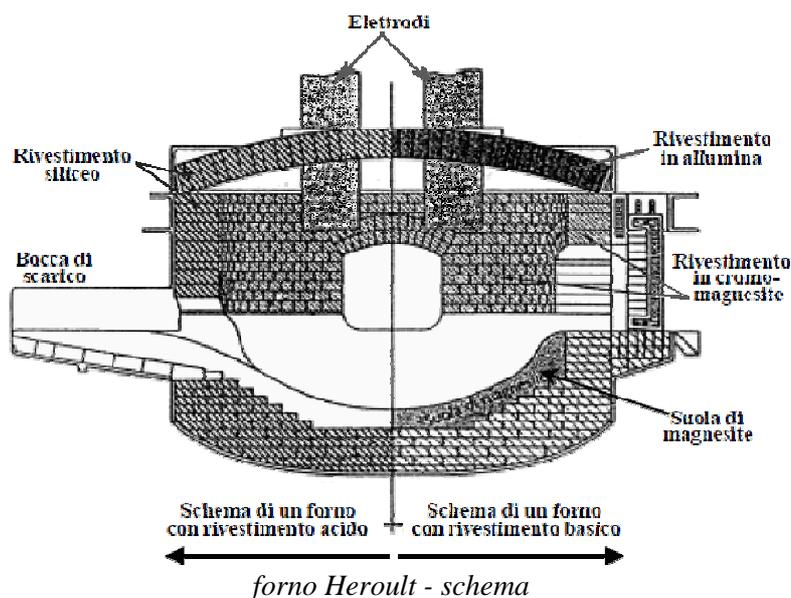


**QUESTO FORNO
CHE PRIMO NEL MONDO
PRODUSSE ELETTRICAMENTE L'ACCIAIO
SE NON DIEDE FORTUNA ALL'INVENTORE
ERNESTO STASSANO
DIA ALMENO LUCE AL SUO NOME
E ONORE ALL'ITALIA
1900**

forno Stassano (1900)

Nel 1899 **Paul Luis Héroult**, prendendo spunto dal processo per la produzione dell'alluminio per via elettrolitica da lui stesso inventato nel 1886, realizzò a *Creuzot*, in Francia, il primo **forno elettrico a suola non conduttrice** per acciaio, che utilizzava corrente trifase ed elettrodi di grafite che penetravano dalla volta del forno e che sfioravano la carica da fondere.

Il processo si dimostrò molto efficiente per la rifusione e la produzione di acciai speciali a partire da rottami di ferro.



Nel 1905 anche il giovane ingegnere ed industriale svizzero **Paul Girod** sviluppò un **forno elettrico a suola conduttrice** che ebbe grande successo ed, in combinazione con lo sviluppo del sistema idroelettrico, diede avvio all'elettrometallurgia permettendogli di fondare nel 1908 lo stabilimento *Forges et Aciéries Paul Girod* ad Ugine, nella Savoia (Francia).

Nel 1924 subentra nella gestione della *Acciaieria di Cogne*, in Val d'Aosta (Italia).

Negli anni 1947 e 1948 presso la *von Roll AG* l'ingegnere svizzero **Robert Durrer** sperimentò e mise a punto un processo di conversione che utilizzava ossigeno al posto dell'aria.

Il processo venne condiviso con le ditte austriache **VÖST** di Linz e **ÖAMG** di Donawitz, che nel 1952 e rispettivamente nel 1953 installarono i primi convertitori industriali da 30 tonnellate. Essi presero il nome di **Convertitori L.D.** dalle iniziali delle due città.

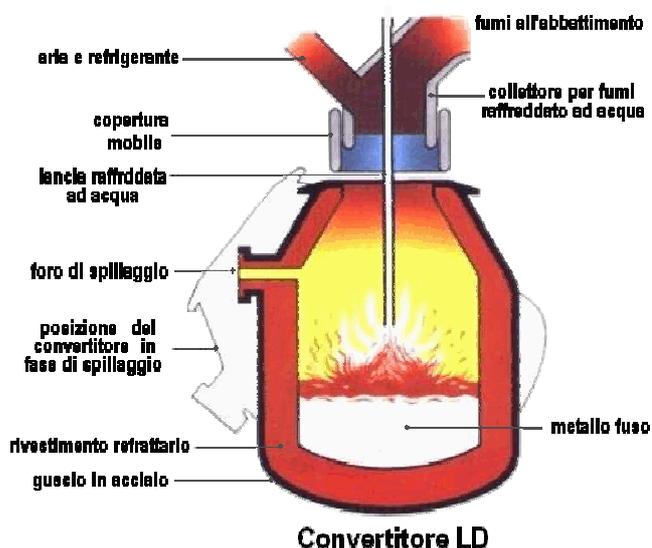
Nei primi anni '40, oltre a Durrer, proposero versioni della forgiatura primaria ad ossigeno anche il tedesco C.V. Schwarz, il belga John Miles e lo svizzero Heinrich Heilbrugge.

Un processo analogo era stato brevettato già nel 1858 dallo stesso Henry Bessemer, ma non ebbe fortuna per l'indisponibilità e l'elevato costo dell'ossigeno puro.

Il **processo LD**, o **processo Durrer**, è uno sviluppo del **processo Bessemer**, che impiega per la decarburazione della ghisa ossigeno puro, soffiato sulla superficie del metallo fuso da una lancia raffreddata ad acqua.

È un **processo basico all'ossigeno** chiamato anche **BOS** (dall'inglese *Basic Oxygen Steelmaking*) - e **BOF** (da *Basic Oxygen Furnace*) è chiamato il forno - ed attualmente è il processo maggiormente impiegato per l'affinazione della ghisa.

La reazione è molto esotermica, cosicché alla carica iniziale (ghisa ~90%, rottame e/o minerale ~10%) vengono aggiunti progressivamente altri rottami e/o minerale per tenere sotto controllo la temperatura, nonché calce ed addensanti di scorie per favorire la schiumatura e la separazione delle impurità.



Alcune varianti introdotte negli anni '60 prevedono l'insufflazione di ossigeno dal basso; per esempio il **processo OBM** (*Oxygen Boden Maxhütte*) o **QBOP** (*Quick Basic Oxygen Process*) viene effettuato mediante un convertitore basico nel quale dal fondo, attraverso un certo numero di ugelli (da 10 a 18) viene soffiato ossigeno dalla parte centrale, e un gas combustibile tipo metano oppure propano dalla corona esterna. L'ossigeno ha la funzione di ossidare il carbonio in eccesso presente nella ghisa, mentre il combustibile, piroscondendosi, raffredda l'ugello evitando la rapida corrosione del fondo del convertitore, che così può arrivare a 350/400 colate.

Dopo la prima guerra mondiale ebbe inizio la produzione d'acciai speciali mediante affinazione al **forno elettrico ad arco** o **ad induzione**, che, raggiungendo temperature assai elevate, dopo la produzione primaria permetteva un'affinazione perfetta.

Dopo la seconda guerra mondiale, con l'aumento del rottame di ferro e l'opportunità/necessità di recuperarlo trasformandolo nuovamente in acciaio, si sono infine sviluppate le cosiddette mini-fabbriche dotate di **forni elettrici ad arco** (**EAF - Electric Arc Furnace**), che consentivano la fusione di rottame e ghisa con elevate efficienze di processo ed una elevata specializzazione nella produzione. Da dimensioni medie di 25-30 tonnellate per colata e tempi per ciclo di circa 3-3,5 ore degli anni '60, negli anni '90, riducendo il numero di forni, se ne è progressivamente aumentata la dimensione media a 70 – 100 (ora anche 300) tonnellate, con tempi per ciclo inferiori ad 1 ora.

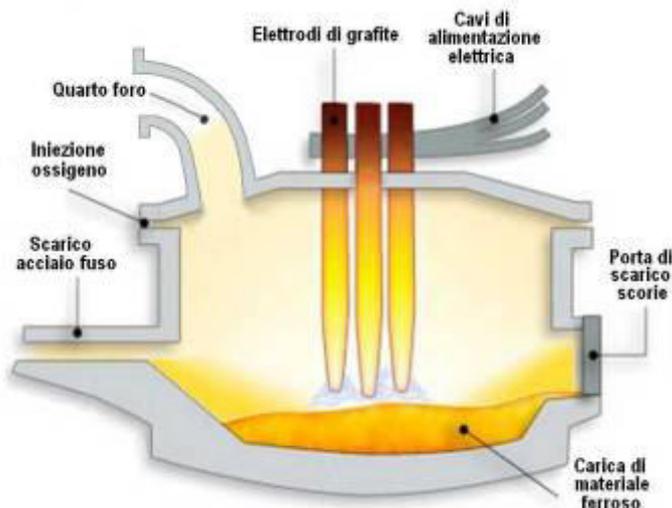
A tali progressi ha concorso in modo decisivo lo sviluppo, favorito anche dall'elettronica, dei cosiddetti trattamenti **fuori forno** effettuati in **forni siviera** (**LD - Ladle furnace**).

Il **forno elettrico ad arco** è costituito da un tino di acciaio rivestito di refrattario con una suola non conduttrice.

La volta, rimovibile per consentire l'introduzione dei rottami, è provvista di tre fori per l'inserimento degli elettrodi di grafite, ed un *quarto foro* per l'estrazione dei gas polverosi che si sviluppano nella fusione.

Oltre al riscaldamento elettrico, viene fornito anche calore chimico, sviluppato iniettando gas metano, ossigeno ed alluminio (o silicio).

In esso normalmente si provvede alla trasformazione del rottame solido in acciaio grezzo liquido, effettuando eventualmente qualche pre-trattamento.



L'ulteriore raffinazione è riservata ai successivi processi secondari di produzione dell'acciaio realizzati **fuori forno**. Il **forno siviera** è una sorta di contenitore di acciaio rivestito di apposito refrattario, dotato di elettrodi per il raggiungimento delle temperature necessarie, dentro il quale vengono effettuate le elaborazioni richieste e dosate le ferroleghie previste.

Altri trattamenti **fuori forno** sono:

- degassaggio con ricircolo (**RH** – *Ruhrstahl Heraeus*);
- degassaggio a ricircolazione con lancia ad ossigeno (**RH-OB** – *RH-Oxygen Blowing*);
- decarburazione sottovuoto con ossigeno (**VOD** *Vacuum Oxygen Decarburization*);
- degassaggio in siviera (**VD Tank Degassing**).

3 I PROCESSI SIDERURGICI

La produzione dell'acciaio attualmente avviene:

- a partire da minerale, mediante **ciclo integrale**;
- a partire da rottame, mediante **forno elettrico**.

3.1 IL CICLO INTEGRALE

Il ciclo integrale prevede le seguenti fasi:

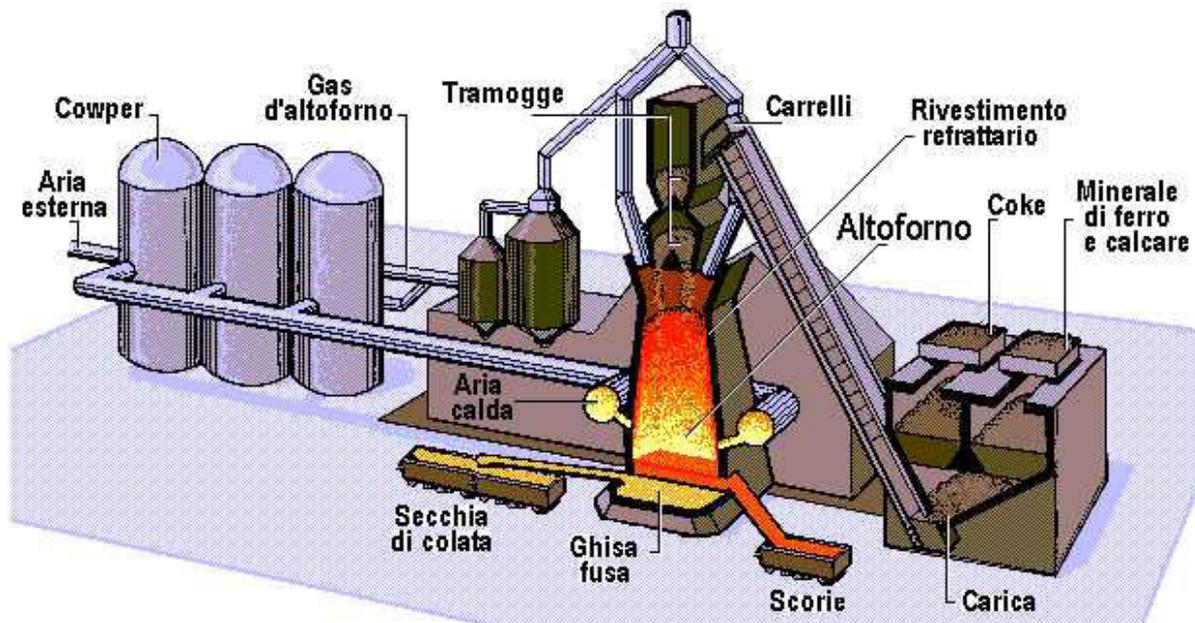
- *trattamenti del minerale* (principalmente ematite e magnetite):
 - *pretrattamenti*: frantumazione e vagliatura;
 - *arricchimento*: magnetico o per flottazione;
 - *agglomerazione*: mediante sinteraggio o pellettizzazione;
- *estrazione pirometallurgica in altoforno*: produzione di ghisa madre;
- *affinazione termica in convertitore*: decarburazione della ghisa e trasformazione in acciaio;
- *lavorazioni plastiche*: colata, laminazione, ecc..

Coke metallurgico

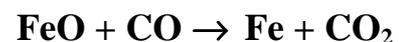
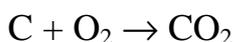


I **trattamenti del minerale** hanno la funzione di separare il materiale sterile, arricchendo la materia prima di ossidi di ferro, nonché di renderla idonea all'introduzione nell'altoforno formando sferule con diametro 10 – 25 mm mediante sinterizzazione o pellettizzandole con umidità e polveri di coke.

L'**estrazione pirometallurgica** viene ottenuta caricando l'altoforno con strati di **minerale**, **calcare** (fondente) e **coke** ed estraendo da basso il metallo (ghisa madre o di prima fusione).



La separazione del metallo avviene per **riduzione indiretta** ad opera del gas riducente a base di CO che si produce nel passaggio dei gas di combustione attraverso il coke della massa in cottura:

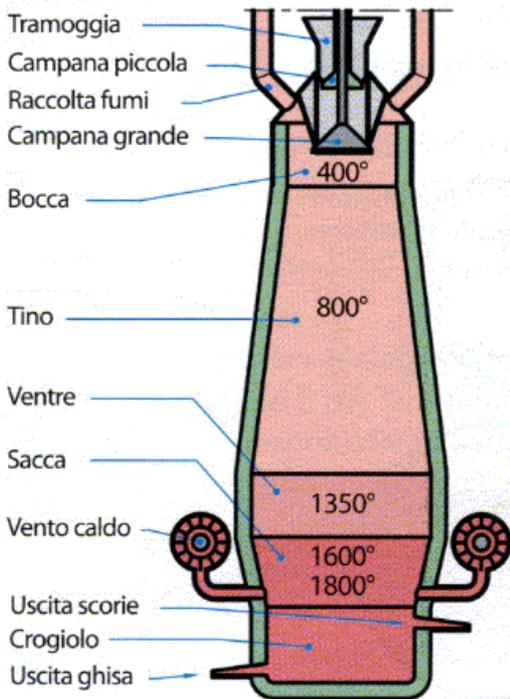


(altre reazioni sugli ossidi di ferro sono: $3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2$ $Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$)

e per **riduzione diretta** ad opera del carbonio:



Quest'ultimo composto che si forma è il **Carburo di Ferro** (*cementite*): in pratica si tratta della **ghisa in saturazione di Carbonio** (tenore 6,67%). Essa fonde a circa 1200-1300°C.



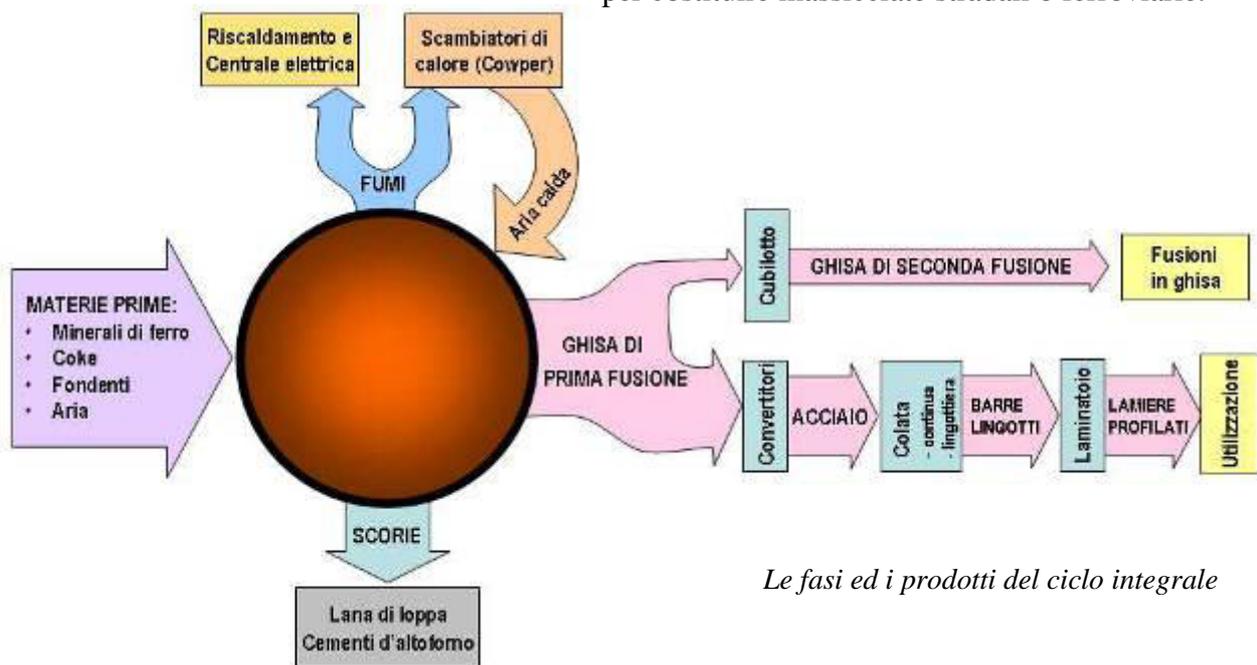
Nomenclatura dell'altoforno

Le scorie ed il metallo fuso si raccolgono nel crogiolo sul fondo dell'altoforno in due strati, spillati separatamente. Lo spillaggio avviene solitamente ogni 2-3 ore, ma il tempo di fusione, dalla carica del minerale all'estrazione della ghisa, è di circa 6 ore.

Il processo di produzione della ghisa è continuo e viene interrotto, dopo anni d'utilizzo, soltanto quando il forno deve essere riparato o ricostruito.

I **gas di combustione**, ancora ricchi di CO (*gas d'altoforno*), vengono utilizzati per preriscaldare l'aria di combustione (*vento caldo*) negli scambiatori rigenerativi (*Cowpers*); successivamente sono utilizzati come combustibile in caldaie o turbine a gas per produrre energia elettrica impiegata per i vari macchinari (soffianti, montacarichi, carroponte, ecc.).

Le **scorie** o *loppe* (costituite da silice, calce, ossidi di ferro, ...) sono separate nella parte alta del crogiolo in quantità di circa 0,3 tonnellate per tonnellata di ghisa madre. Possono essere impiegate quale additivo del cemento Portland, per produrre isolanti termici o per costituire massicciate stradali o ferroviarie.



Le fasi ed i prodotti del ciclo integrale

La ghisa fusa (*ghisa madre* o *ghisa di prima fusione*), estratta alla temperatura di 1330-1380°C, può essere colata in lingottiere o conchiglie raffreddate ad acqua per formare *lingotti* i o *pani* che saranno rifusi in altri stabilimenti, ovvero caricata in *siviere* o in *carrosiluro* per il trasporto alle successive lavorazioni di affinazione.

Essa presenta la composizione media riportata in tabella. Alcuni componenti come Zolfo e Fosforo sono elementi nocivi perché impartiscono fragilità.

Elementi	%
Carbonio	3 ÷ 4
Silicio	1 ÷ 3
Manganese	1 ÷ 2
Fosforo	0,3 ÷ 2
Zolfo	0,1 ÷ 0,2
Ferro	resto

Composizione tipo della ghisa madre

La ghisa prodotta viene colata in lingotti per le lavorazioni al cubilotto (**ghisa di seconda fusione**), ovvero trasferita allo stato liquido all'**affinazione**. Questa è principalmente rivolta alla decarburazione della ghisa con trasformazione in acciaio (tenore di carbonio 0,05 ÷ 1%), ma anche alla correzione della presenza degli altri elementi fino alle quantità desiderate.

I forni di affinazione attualmente impiegati sono i **convertitori LD**, i cosiddetti *convertitori a ossigeno*.

In essi, versata la ghisa con una piccola quantità di rottame di scarto, l'ossidazione avviene tramite l'insufflazione a velocità supersonica di ossigeno usando una lancia verticale di acciaio a fori multipli adeguatamente raffreddata.

La tipologia più ricorrente prevede una capacità di 200÷300 tonnellate di acciaio liquido ed il ciclo dura circa 30÷40 minuti con un periodo di soffiatura d'ossigeno (puro al 99,5%) di 15 minuti mediante una lancia a fori multipli; dal basso viene effettuata una insufflazione di gas inerte (argon) per agitare il metallo fuso e rimuovere meglio le impurità di fosforo.

Dopo campionamento ed aggiunta degli eventuali elementi di lega richiesti, l'acciaio viene travasato in siviera per i successivi processi metallurgici.



Le fasi del ciclo di affinazione al convertitore LD

3.2 IL FORNO ELETTRICO AD ARCO (EAF)

Il **forno elettrico ad arco** (in gergo internazionale *EAF - Electric Arc Furnace*) per la sua enorme versatilità è ampiamente impiegato in siderurgia per trattare la ghisa o per produrre acciaio da rottame ferroso, avendo il vantaggio di consentire il rapido raggiungimento di temperature elevatissime e facilmente regolabili, nonché la fabbricazione di acciai di altissima qualità.

I forni oggi maggiormente impiegati sono del tipo *ad arco diretto a suola non conduttrice*, derivati dal **forno di Héroult**. Sono provvisti di due o tre elettrodi di grafite (con diametro di 50 – 80 cm) che producono archi elettrici tra gli elettrodi stessi ed il bagno metallico e viceversa.

Oltre all'energia elettrica al sistema viene fornita anche energia chimica grazie all'insufflazione di ossigeno, metano, nonché calce e carbone in polvere.

*Il **forno Stassano**, ad arco indiretto (scoccato fra gli stessi elettrodi), entra nel suo lento declino già a partire dal 1915, a causa della scarsa attitudine alle grosse produzioni industriali.*

*Il **forno ad induzione** viene impiegato per la rifusione e per il riscaldamento di materiale in piccole pezzature e per piccole produzioni di acciai speciali di altissima qualità.*

I moderni forni consentono elevate produzioni quantitative, qualità significative, risparmi per ferroleghie, refrattari, elettrodi.

Dimensionalmente le attuali capacità dei forni sono comprese fra 90 e 300 ton con diametri del tino di 5 ÷ 14 m e tempi di colata di circa 1 ora (*tap to tap*).

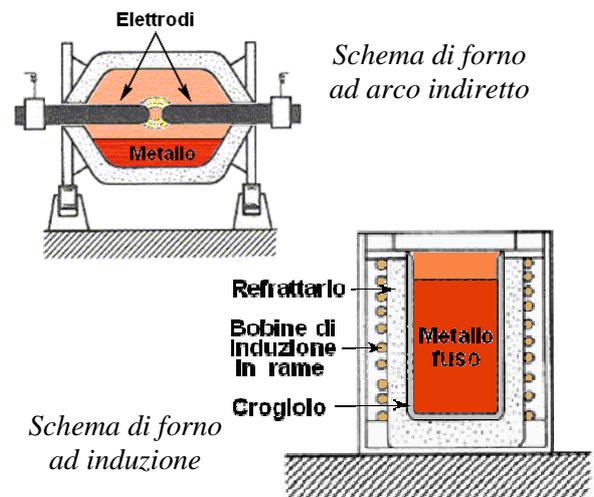
Il forno elettrico è composto da:

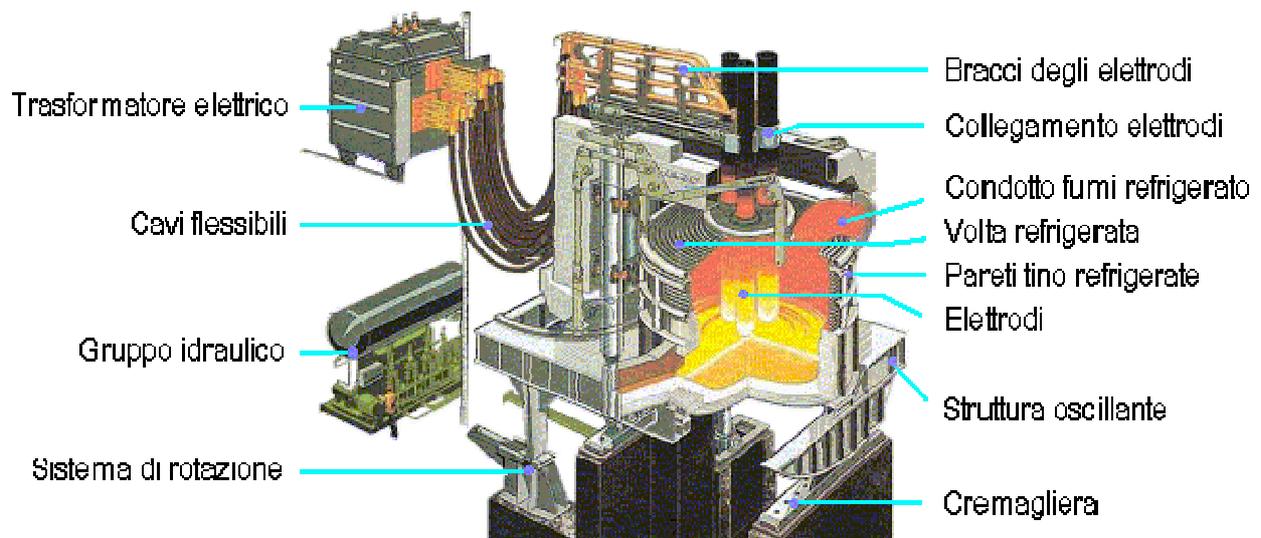
- una **suola** costituita da una struttura metallica concava rivestita interamente da refrattari destinata a contenere l'acciaio fuso e la scoria; essa è opportunamente sagomata in modo da poter assumere diverse inclinazioni durante le varie operazioni eseguite, quali spillaggio e scorifica;
- un **tino**, detto anche *gabbia*, di forma cilindrica, costituito da pannelli raffreddati ad acqua e destinato a contenere i materiali che devono essere fusi;
- la **volta**, che costituisce il coperchio del forno, anch'essa raffreddata ad acqua, e provvista di tre fori per gli elettrodi e di un **quarto foro**, più grande, per l'aspirazione dei gas e dei fumi che si sviluppano durante il processo.

Il rivestimento refrattario del forno è costituito da due strati: quello più interno è permanente e dura tutta la vita del tino, mentre quello più esterno, a contatto con l'acciaio, di tipo basico, viene realizzato con magnesite (MgO) e dolomite ($MgCa(CO_3)_2$) e dura per circa 100 colate.

I fori per i tre elettrodi (nel caso dei forni trifase) sono disposti a triangolo equilatero nella parte centrale della volta. La corrente alternata applicata ad essi, con tensione di 400 ÷ 900 V ed intensità di ~44000 A, fa ionizzare l'aria tra rottame ed elettrodi, producendo un arco a temperatura di 10000~12000°C che trasforma l'energia elettrica in calore (effetto Joule) che si trasmette a tutta la carica, prima per irraggiamento e poi per conduzione attraverso il metallo liquefatto.

Per evitare la presenza di zone più fredde, vicino alle pareti sono poi installati bruciatori a metano ed ossigeno, che consentono inoltre l'accelerazione dei tempi di fusione.





I principali componenti del forno elettrico ad arco

L'introduzione della carica metallica nel forno viene effettuata dall'alto mediante apposite ceste, caricate di rottame per mezzo di elettromagneti. Considerato che il volume del rottame è molto maggiore di quello del metallo fuso, dopo la cesta iniziale, normalmente vengono aggiunte altre due ceste di rottame.

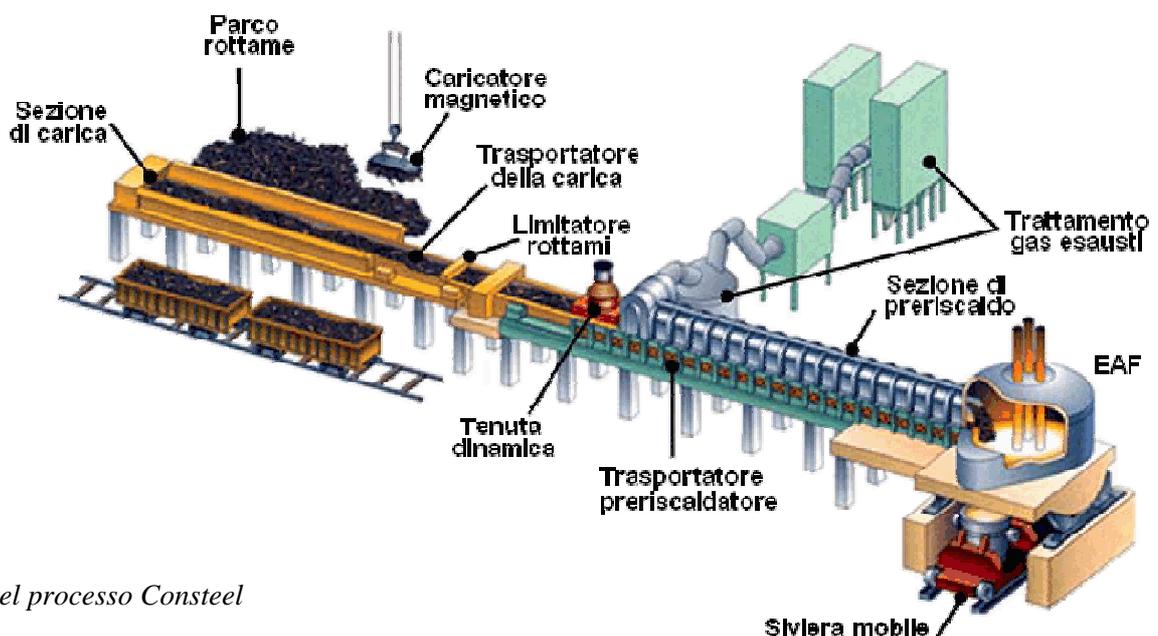
Queste vengono introdotte nel forno dopo aver sollevato e spostato lateralmente la volta e gli elettrodi, onde consentire l'immissione della carica nel crogiuolo.



Elettromagnete per il caricamento delle ceste

Cesta per rottame

Negli impianti più moderni l'alimentazione del rottame avviene in continuo mediante un nastro trasportatore che, recuperando il calore dei fumi aspirati, preriscalda il rottame stesso in entrata al forno (*processo Consteel*).



Schema del processo Consteel

Durante il processo di fusione l'altezza degli elettrodi può essere variata in funzione delle esigenze connesse con la marcia del forno.

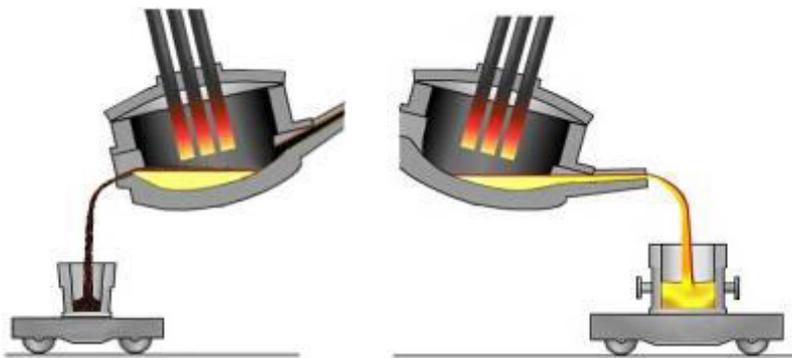
Il forno è dotato di un sistema di captazione e abbattimento fumi. La captazione dei fumi primari è effettuata in depressione attraverso il **quarto foro** della volta; tramite un'apposita conduttura i fumi sono convogliati agli impianti di trattamento e di abbattimento delle polveri.

Oltre alla carica metallica propriamente detta, costituita da rottami di ferro (~90%) e ghisa (~10%), vengono aggiunti anche scorificanti (soprattutto calce e silice), aventi la funzione di promuovere la formazione della scoria, al cui contatto avvengono tutte le reazioni chimiche che hanno luogo nel metallo fuso, ed eventualmente carbone per regolare la quantità di *Carbonio* in lega.

Raggiunto il *melt-down* (quando tutto il rottame risulta fuso) nella parte inferiore del forno si è formata una pozza contenente le due fasi caratteristiche *metallo fuso* (sotto) e *scoria* (sopra):

- il *bagno metallico* è costituito da Fe liquido con disciolte percentuali variabili dei seguenti elementi: C, Si, Mn, Al, Zn, Cr, V, W, Ti, Ni, Co, Cu, Mo, Sn, P, S, O, N, H, ecc.;
- la *scoria* è costituita da CaO (40 ÷ 60%), SiO₂ (5 ÷ 15%), FeO (10 ÷ 30%), MgO (3 ÷ 8%), MnO (2 ÷ 5%), ed inoltre Al₂O₃, P₂O₅, CuS, MnS, ecc., con composizioni molto variabili a seconda della qualità delle materie prime introdotte e delle particolari condizioni operative.

Si procede quindi alla *scorifica*, inclinando il forno dalla parte della porta di scarico delle scorie, e quindi allo *spillaggio*, inclinando il forno dalla parte del becco di colata (*spout*) o procedendo all'apertura (*bussaggio*) del foro inferiore di colata (*tap-hole*).



Scorifica

Spillaggio



Lo *spillaggio* avviene ad una temperatura di circa 1630-1670°C, circa 100-130°C superiore alla temperatura teorica di *liquidus* del fuso (1530-1540°C). Tale scelta operativa discende dalla necessità di superare convenientemente l'intervallo di fusione del metallo per assicurare che l'elaborazione dell'acciaio avvenga sempre in fase perfettamente liquida.

L'organizzazione produttiva prevede che il forno, dopo due o tre successive cariche di rottame, raggiunga rapidamente la fusione del materiale e che l'acciaio grezzo venga poi travasato per la "finitura" in un secondo impianto denominato *forno siviera* o *Ladle Furnace (L.F.)*.

Il *forno siviera* è uno speciale contenitore in acciaio, rivestito internamente di refrattario, nel quale l'acciaio liquido, mantenuto caldo mediante riscaldamento elettrico con anodi di grafite, viene decarburato ed elaborato con accuratissimi dosaggi dei vari elementi di lega per ottenere la qualità metallurgica desiderata.

Pure il rivestimento del *forno siviera* è costituito da uno strato interno permanente e da uno più esterno demolito e ricostruito ogni circa 40 colate; il fondo e la parte a contatto con l'acciaio vengono realizzati in dolomite, mentre per la parte più a contatto con la scoria si utilizzano mattoni a base di magnesite, più resistenti alla corrosione.

Anche in questo caso i gas che si sviluppano vengono estratti attraverso il coperchio ed inseriti nel sistema di aspirazione e trattamento dei fumi.

In particolare i trattamenti *fuori forno* nel *forno siviera* permettono di:

- ridurre il contenuto di gas (azoto ed ossigeno);
- conseguire una desolfurazione spinta;
- diminuire le inclusioni non metalliche, migliorandone la distribuzione;
- effettuare le correzioni analitiche finali nelle condizioni più favorevoli e con elevata resa;
- riprodurre il medesimo tipo di acciaio con ridotta dispersione analitica fra colate diverse.

Il metallo fuso viene rimescolato mediante un flusso di gas inerte (Argo) dal fondo, mentre gli additivi solidi e polverosi vengono alimentati attraverso una tramoggia o una lancia.

Ogni 10-15 minuti circa si effettuano misurazioni della temperatura all'interno della siviera mediante termocoppie, procedendo inoltre a prelievo di campioni di metallo da sottoporre a prova spettrometrica per verificare la corretta "messa in forcilla" degli elementi contenuti nel fuso.

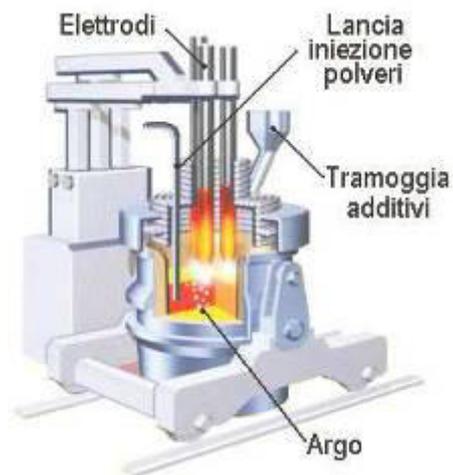
Per la produzione di acciai speciali e per estrarre parte dei gas ossigeno ed idrogeno disciolti è possibile effettuare anche il trattamento sottovuoto, posizionando la siviera sotto una particolare cappa a tenuta che, attraverso pompe ed eiettori, applica un vuoto a pressione inferiore a 1 torr.

Raggiunta la composizione desiderata, la siviera è trasferita con gru o con carrelli alla sezione di colata, che viene eseguita mediante rovesciamento oppure attraverso un foro aperto sul fondo, regolabile con un dispositivo a spina. La colata può essere effettuata **in lingotti** o **continua**.

Nella *colata in lingotti* l'acciaio viene versato in lingottiere disposte su carri di colata. La colata può essere:

- **diretta**: il metallo liquido è versato per gravità direttamente nella lingottiera;
- **in sorgente**: l'acciaio fuso è scaricato in una colonna che rigurgita dal fondo della lingottiera;
- **sotto vuoto**: per la produzione di grossi lingotti, per evitare occlusioni gassose.

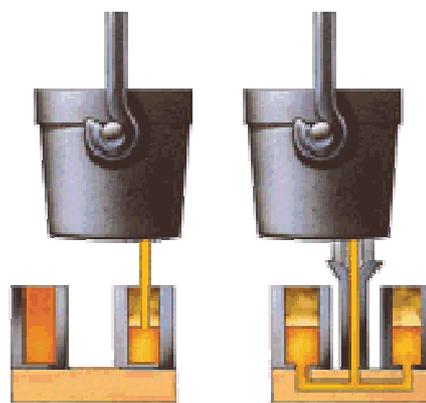
Dopo il colaggio, appena solidificati, i lingotti vengono estratti dalle lingottiere (*strippaggio*) e depositati in appositi ambienti per un raffreddamento completo.



Forno siviera



Forno siviera



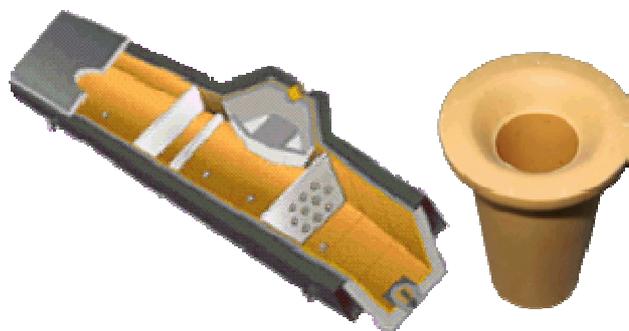
Colata diretta

Colata in sorgente

La **colata continua** è un processo con il quale si producono semilavorati in acciaio a sezione costante attraverso un procedimento analogo all'estrusione ed in cui il metallo liquido viene fatto passare per forza di gravità attraverso forme permanenti in rame (**lingottiere**) raffreddate esternamente con acqua e lubrificate per ridurre l'usura.

Dalla siviera il bagno metallico viene colato, attraverso un tubo in refrattario (**busetta**) che assicura un deflusso regolare all'acciaio, in un recipiente, rivestito anch'esso in refrattario, chiamato **paniera** (o **tundish**).

La **paniera**, di forma allungata, consente uniformare il battente metallostatico e di ripartire l'acciaio fra 4 o più diverse linee di colata operanti in parallelo, a loro volta collegate alla **paniera** mediante tubi ceramizzati (**scaricatori**) che fungono da sistemi di regolazione del getto.

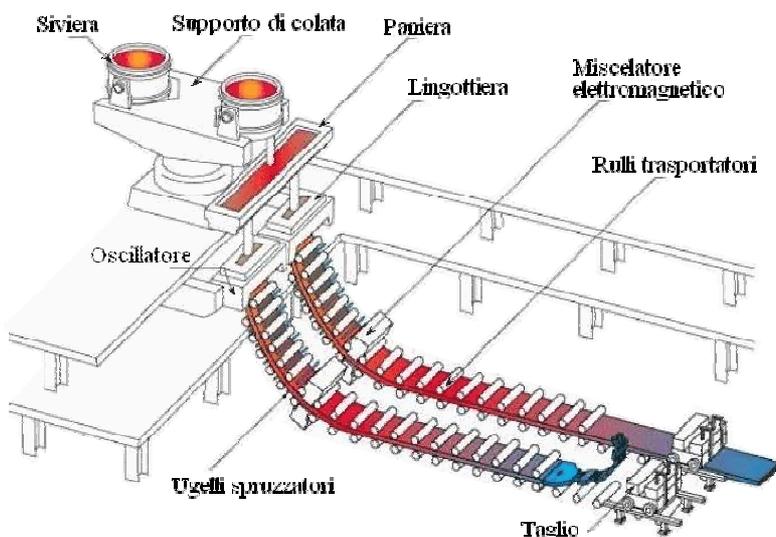


Paniera e particolare di uno scaricatore

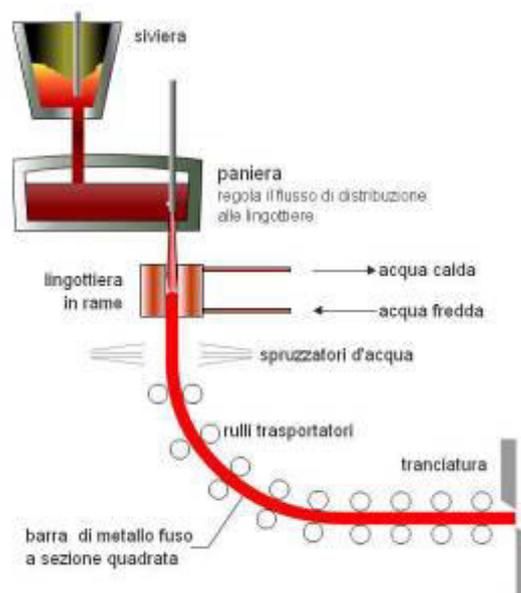
Ciascuna linea di colata prende avvio da una **lingottiera** (o **cristallizzatore**), costituita da uno stampo cavo in rame raffreddato ad acqua, che nel breve periodo di permanenza dell'acciaio fuso permette la formazione di una crosta superficiale solidificata che si autosostiene contenente al suo interno metallo liquido; per favorire il distacco tra rame ed acciaio la lingottiera è tenuta in oscillazione mediante un motore elettrico.

Il lingotto formato scende quindi in una camera a spruzzi accompagnato da rulli trasportatori che incurvano l'acciaio in via di solidificazione per disporlo gradualmente in orizzontale ed agevolare le lavorazioni successive; il raggio di curvatura (7,5 – 15 metri) è molto ampio per evitare la rottura della pelle solidificata.

Nella zona terminale, a solidificazione completata, il prodotto continuo viene tagliato con cannello ossiacetilenico in **blumi**, **billette** o **bramme** di lunghezza attorno a 8 metri. I semilavorati sono quindi inviati alle lavorazioni successive, come il condizionamento, la laminazione e la finitura.



Colata continua in bramme piatte



Colata continua - schema



Colata continua in billette

Tra i semilavorati siderurgici, ottenuti per laminazione di lingotti o per colata continua, si distinguono:

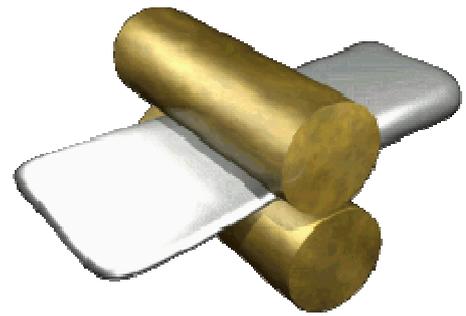
- **Blumo**: di sezione quadrata ($>14.400 \text{ mm}^2$) a spigoli arrotondati con lati maggiori di 120 mm.
- **Billetta**: di sezione quadrata o rettangolare ($<14.400 \text{ mm}^2$) con lati compresi fra 50 e 120 mm; le billette vengono successivamente laminate a caldo per ottenere di barre, fili o profilati.
- **Bramma** (o **slebo**): di sezione rettangolare ($>14.400 \text{ mm}^2$) a spigoli arrotondati con rapporto fra i lati minore di 4; vengono successivamente laminate a caldo per ottenere lamiere.
- **Bramma piatta**: come la bramma, ma con un rapporto tra i lati maggiore di 4.
- **Barra**: di sezione quadra, esagonale, circolare con lato di 10÷150 mm o diametro di 5÷30 mm.
- **Bidone**: di sezione rettangolare con il lato più corto di lunghezza minore di 50 mm e un rapporto tra i lati maggiore di 4.



Billette

3.3 LAMINAZIONE

La **laminazione** è un processo meccanico effettuato sui semilavorati derivanti dalla colata continua, atto a ridurre lo spessore e trasformarli in lamine o altre forme desiderate. Essa consiste nel far passare il materiale tra una serie di coppie di rulli (*gabbie di laminazione*) tenuti ad una distanza progressivamente minore in modo da costringere il materiale stesso, per riduzioni successive, a ridursi di spessore (laminarsi) e ad allungarsi nel verso di laminazione.



La laminazione può essere fatta **a freddo** o **a caldo**.

La **laminazione a freddo**, che comporta maggiori sforzi applicati sul materiale ed attrezzature più complesse, conferisce al materiale stesso una migliore finitura superficiale ed una maggiore resistenza meccanica.

La **laminazione a caldo**, con la quale il materiale subisce un minore incrudimento, per la presenza di fenomeni di ritiro tende ad essere meno precisa e con una finitura superficiale minore. Essa rappresenta il miglior sistema di **formazione primaria** usato per la fabbricazione in serie di manufatti in acciaio. Nella **laminazione a caldo** il materiale nel formato di partenza (*blumo, billetta, bramma*) viene riscaldato alla temperatura di massima plasticità e fatto passare nel **treno di laminazione** costituito dall'insieme delle singole *gabbie di laminazione*, di solito sei o sette.



Laminazione a caldo



Cilindri di laminazione a caldo

In relazione al tipo di acciaio ed alla qualità della struttura desiderata si utilizzano **rapporti di laminazione** molto variabili: bassi (circa 2) per acciai per costruzioni edili, o alti (oltre 12) per acciai da utensili.



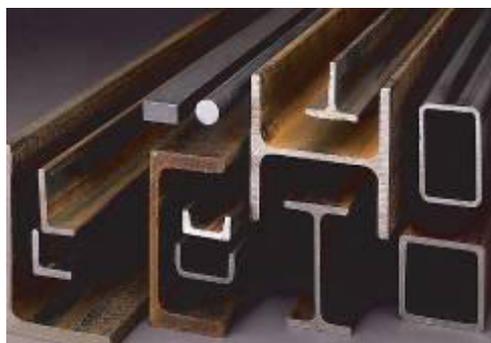
*Laminatoio per prodotti lunghi
(rotaie ad alta resistenza a fatica ed a usura)*

Mentre per la produzione di lamierati (*coils*) si impiegano cilindri perfettamente piani, per la laminazione di profili (tondo *re-bar* per l'edilizia, travi IPE, UPN, HE, ecc.) si utilizzano cilindri di laminazione appositamente scanalati.

La laminazione a caldo riguarda la fabbricazione sia di semilavorati sia di prodotti finiti.

La laminazione a caldo produce i seguenti gruppi di prodotti:

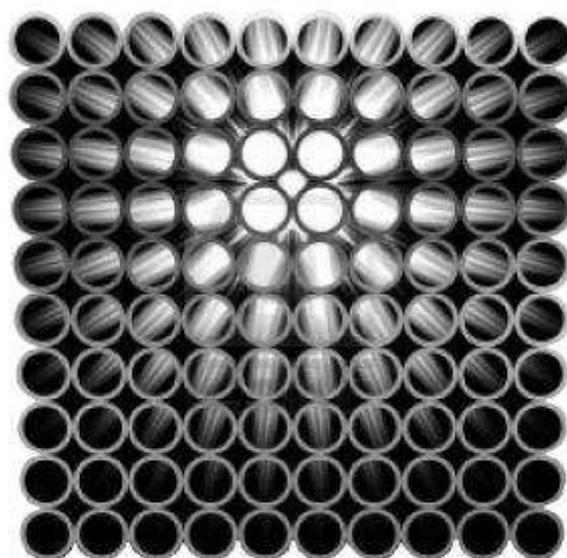
- prodotti lunghi:
 - laminati mercantili (angolari, L, T, ...);
 - travi ad ali parallele (HE, IPE, IPN);
 - laminati a U;
- prodotti piani
 - nastri o coils;
 - lamiere e piatti;
- prodotti cavi:
 - tubi prodotti a caldo
- prodotti derivati:
 - travi saldate (ricavate da lamiere o da nastri a caldo);
 - profilati a freddo (ricavati da nastro a caldo);
 - tubi saldati (cilindrici o di forma ricavati da nastro a caldo);
 - lamiere grecate (ricavate da nastro a caldo).



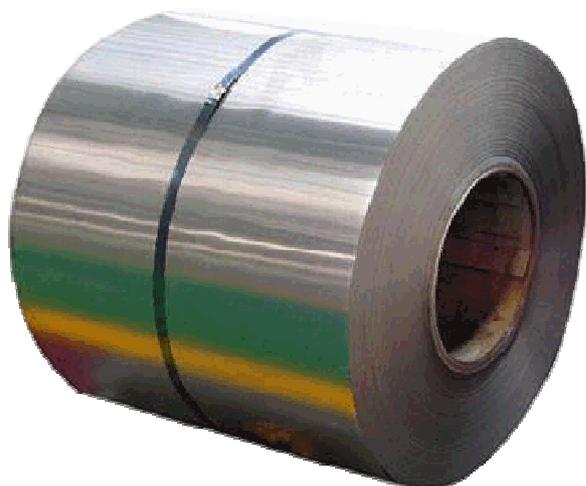
Profilati vari



Tondo re-bar per l'edilizia



Tubi



Laminato piatto (coil)



Profilato (rotaila)

4 CLASSIFICAZIONE E DESIGNAZIONE DEGLI ACCIAI

Le proprietà dei vari tipi di acciaio dipendono principalmente dalla quantità di carbonio presente e dalla sua distribuzione nel ferro, dalle ferroleghie aggiunte e dai trattamenti termici subiti. Generalmente sono facilmente saldabili, presentano buone proprietà meccaniche e sono lavorabili per deformazioni plastiche e con le macchine utensili.

Quindi l'acciaio, che costituisce il più importante prodotto della siderurgia, viene commercializzato in una grande varietà di tipi, ciascuno con caratteristiche diverse, classificabili secondo la composizione chimica, la struttura, il processo di produzione, l'impiego prevalente.

4.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI IN BASE AI COMPONENTI

Una classificazione molto comune, avente come riferimento la normativa *UNI EN 10020*, effettuata sulla base dei componenti distingue **cinque grandi categorie**:

- acciai **al carbonio**,
- acciai **legati**,
- acciai **debolmente legati ad alta resistenza**,
- acciai **inossidabili**,
- acciai **da utensili**.

4.1.1 ACCIAI AL CARBONIO

Detti anche *acciai non legati*, costituiscono oltre il 90% di tutti gli acciai e contengono una quantità variabile, generalmente inferiore all'1,5%, di carbonio e ridotte quantità di altri elementi di lega.

Secondo il tenore o percentuale di carbonio, si dividono in:

- | | |
|---|---|
| • <i>extra dolci</i> : 0,05% < C < 0,15%; | • <i>semiduri</i> : 0,40% < C < 0,60%; |
| • <i>dolci</i> : 0,15% < C < 0,25%; | • <i>duri</i> : 0,60% < C < 0,70%; |
| • <i>semidolci</i> : 0,25% < C < 0,40%; | • <i>durissimi</i> : 0,70% < C < 0,80%; |
| | • <i>extraduri</i> : 0,80% < C < 0,85%. |

Gli acciai extradolci e dolci sono comunemente indicati come ferro.

Gli *acciai al carbonio (non legati)* vengono impiegati per produrre scocche di autoveicoli, parti di macchine, gran parte delle strutture di acciaio degli edifici, scafi delle navi, chiodi, viti, bulloni,

La normativa *UNI EN 10020* definisce le soglie massime degli alliganti che contraddistinguono gli *acciai non legati*:

Al < 0,10%,	Cr < 0,30%,	Mo < 0,08%,	Se < 0,10%,	V < 0,10%,
B < 0,0008%,	Cu < 0,40%,	Nb < 0,06%,	Si < 0,50%,	W < 0,10%,
Bi < 0,10%,	La < 0,05%,	Ni < 0,30%,	Te < 0,10%,	Zr < 0,05
Co < 0,10%,	Mn < 1,65%,	Pb < 0,40%,	Ti < 0,05%,	altri < 0,05%.

4.1.2 ACCIAI LEGATI

Sono caratterizzati dalla presenza di uno o più elementi di lega (quali vanadio, molibdeno, manganese, silicio, rame) in quantità superiore alle soglie che la normativa *UNI EN 10020* stabilisce per i semplici acciai al carbonio.

Gli *acciai legati* a loro volta si suddividono in:

- *acciai bassolegati*: nessun elemento al di sopra del 5%,
- *acciai altolegati*: almeno un elemento di lega al di sopra del 5%.

Gli acciai legati vengono usati nella produzione di molti componenti meccanici soggetti a sollecitazioni meccaniche e che necessitano di particolari proprietà di resistenza: bielle, alberi, perni, sterzi, assali dei veicoli, ecc. .

4.1.3 ACCIAI DEBOLMENTE LEGATI AD ALTA RESISTENZA

Noti anche con la sigla HSLA (acronimo di *high-strength low-alloy*), rappresentano la più recente categoria di acciai le cui proprietà sono dovute alle metodologie di produzione.

Contengono solo piccole quantità di altri elementi (quali, ad esempio, vanadio) e dunque sono in generale più economici dei normali *acciai legati*.

Vengono prodotti con particolari procedure, capaci di conferire loro una resistenza meccanica, anche a basse temperature, e una resistenza alla corrosione superiori a quelle degli acciai al carbonio.

4.1.4 ACCIAI INOSSIDABILI

Si tratta di *acciai legati speciali* che contengono Cromo (tra il 12% e il 30%), Nichel (fino al 35%) e altri elementi leganti, che li rendono brillanti e li proteggono dall'attacco degli agenti atmosferici e di gas e acidi corrosivi.

La brillantezza della loro superficie li rende utilizzabili anche per scopi puramente decorativi.

Presentano una resistenza meccanica non comune, che possono mantenere anche per lunghi periodi a temperature estremamente alte o basse.

L'acciaio inox più comune è quello contrassegnato dalla sigla AISI 304 (*Cr 18%, Ni 10%, C 0,05%*), caratterizzato da amagneticità, come tutti quelli austenitici della serie AISI 300.

Gli acciai inox martensitici e ferritici della serie AISI 400, privi di Nichel, sono invece magnetici.

Gli acciai inossidabili trovano impiego nella realizzazione di tubature e serbatoi di impianti chimici e raffinerie petrolifere, di aerei a reazione e capsule spaziali, di apparecchiature e strumenti chirurgici, di protesi dentarie e chirurgiche.

Molto diffuso l'impiego nella produzione di pentolame, posate e utensili da cucina.

4.1.5 ACCIAI DA UTENSILI

Si tratta di *acciai legati speciali* particolarmente resistenti, impiegati per produrre la maggior parte degli **utensili** per lavorazioni meccaniche (punte elicoidali, frese e lame per asporto di truciolo, cuscinetti, ruote per elementi abrasivi, ...).

Fra l'altro essi contengono *Manganese, Silicio, Cromo, Vanadio, Tungsteno, Molibdeno, Cobalto*.

In particolare per la costruzione di utensili per la lavorazione veloce dei metalli si distinguono:

- *acciai semi-rapidi*, per medie e basse velocità di taglio;
- *rapidi*, quelli che contengono *Tungsteno, Molibdeno*, e altri elementi leganti che ne aumentano la tenacità e la resistenza all'usura in lavorazioni ad alta velocità;
- *acciai extrarapidi* o *super-rapidi*, quelli che contengono anche *Cromo* e *Cobalto*, ancora più resistenti all'usura, ma non agli urti.

4.2 DESIGNAZIONE DEGLI ACCIAI IN BASE ALL'IMPIEGO

Il sistema di designazione degli acciai in base all'impiego (ed alle caratteristiche meccaniche o fisiche) è descritto dalla normativa UNI EN 10027-1 e viene impiegato quando le proprietà iniziali dell'acciaio non vengono sostanzialmente modificate dalle lavorazioni successive.

La designazione prevede l'impiego di una codifica alfanumerica del tipo:

X	NNN	YYY
simbolo	proprietà	altro

esempio

S 235 J0

Il *simbolo* identifica l'impiego:

- **B** - acciai per cemento armato ordinario;
- **D** - acciai prodotti piani per formatura a freddo;
- **E** - acciai per costruzioni meccaniche;
- **G** - acciai da getti di acciaio (simbolo aggiunto davanti);
- **H** - acciai ad alta resistenza per imbutitura a freddo e prodotti piani laminati a freddo;
- **L** - acciai per tubi di condutture;
- **M** - acciai magnetici;
- **P** - acciai per impieghi sotto pressione;
- **R** - acciai per rotaie;
- **S** - acciai per impieghi strutturali (carpenterie metalliche);
- **T** - acciai per banda nera, stagnata e cromata (imballaggi);
- **Y** - acciai per cemento armato precompresso.

Le *proprietà* forniscono il valore della caratteristica principale in funzione dell'impiego:

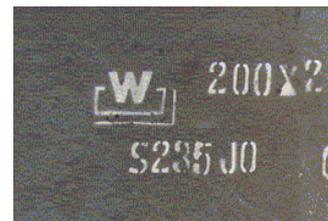
- per S, P, L, E ed H è il *carico unitario di snervamento* minimo in N/mm^2 ;
- per Y ed R è il *carico unitario di rottura* minimo espresso in N/mm^2 ;
- in altri casi è indicata la durezza (per T), lo stato di laminazione (per D), il valore delle proprietà magnetiche (per M),

La terza codifica (*altro*) fornisce altre indicazioni (obbligatorie o facoltative) sulle proprietà dell'acciaio, come ad esempio:

- A, D, E, N, S, P = varie proprietà dell'acciaio magnetico
- J, K, L = valori di resilienza rispettivamente pari a 27 J, 40 J, 60 J (per acciaio S)
- R, 0, 2, 4, ... = combinate con J, K, L: resilienza valutata a $T_{ambiente}$, $0^\circ C$, $-20^\circ C$, -40 , ...
- AR = acciaio grezzo di laminazione (As Rolled)
- N, NL = acciaio con laminazione normalizzata
- M, ML = acciaio con laminazione termomeccanico
- Q = acciaio bonificato
- W = acciaio resistente a corrosione atmosferica (weatering)
- G1, G2, = acciaio effervescente, calmato,
- G3, G4, = stati della fornitura (opzionale)
- H = profilo cavo
- P = presenza di fosforo

Nel caso riportato come esempio (**S235J0**) si tratta di:

- un acciaio da costruzione (S)
- con *carico unitario di snervamento* strutturale pari a $235 N/mm^2$
- e con resilienza minima K_v valutata a $0^\circ C$ pari a 27 J.



Acciaio marchiato
S235J0

4.3 DESIGNAZIONE IN BASE ALLA COMPOSIZIONE CHIMICA

Il sistema di designazione degli acciai in base alla composizione chimica, anch'esso descritto dalla normativa UNI EN 10027-1, è utilizzato quando le proprietà per l'impiego vengono conferite dalla trasformazione nel manufatto finito per l'uso.

La designazione varia a seconda del tipo di acciaio e della percentuale degli elementi di lega:

- **acciai non legati** con tenore di Mn < 1%:

- C seguita da un numero pari a 100 volte il tenore percentuale di carbonio medio prescritto (% di CH100);

esempi:

C35

acciaio dolce con
0,35% di C (35/100)

C10

(da carbocementazione)

acciaio extra-dolce con
0,10% di C (10/100)

- **acciai non legati** con tenore di Mn \geq 1% e **acciai bassolegati** (tenore di ciascun elemento di lega < 5%):

- numero pari a 100 volte il tenore di C medio prescritto (% di CH100) seguito dai simboli chimici degli elementi di lega presenti in ordine decrescente di concentrazione seguiti ulteriormente dai rispettivi valori (separati da trattino) delle loro concentrazioni divisi per i seguenti fattori:

- 4 per il Cr, Co, Mn, Ni, Si, W;
- 10 per Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr;
- 100 per N, P, S, Cs;
- 1000 per il B;

esempio:

13CrMo4-5

Acciaio bassolegato
costituito da:
0,13% di C (13/100),
1% di Cr (4/4)
0,5% di Mo (5/10)

- **acciai altolegati** (inox) con tenore di almeno uno degli elementi di lega \geq 5%:

- X seguito da un numero pari a 100 volte il tenore di C medio prescritto (% di CH100) seguito dai simboli chimici degli elementi di lega presenti in ordine decrescente di concentrazione seguiti ulteriormente dai valori (separati da punto o senza separazione) delle loro concentrazioni;

esempio:

X4CrNiMo17.12.2

(AISI 316)

Acciaio inox con la
seguente composizione:
0,04% di C (4/100),
17% di Cr,
12% di Ni,
2% di Mo

- **acciai rapidi**:

- sono indicati con il simbolo HS seguito dai numeri corrispondenti rispettivamente a %W - %Mo - %V - %Co.

esempio:

HS 18-0-1

Acciaio rapido con la
seguente composizione:
18% di W,
0% di Mo,
1% di V
(0% di Co)

5 LE M.T.D. NEL SETTORE SIDERURGICO – (B.A.T.)



Migliori Tecniche Disponibili ai sensi della **direttiva 2010/75/UE (IED)**

Sono sottoposti alla disciplina IPPC (*categoria IPPC 2.2*):

Impianti di produzione di ghisa o acciaio (fusione primaria o secondaria), compresa la relativa colata continua, di capacità superiore a 2,5 tonnellate all'ora.



Nella descrizione delle migliori tecniche disponibili (MTD–BAT) nel settore siderurgico verrà posta attenzione particolare alla **produzione dell'acciaio al forno elettrico ad arco** (*Electric arc furnace steelmaking and casting*).

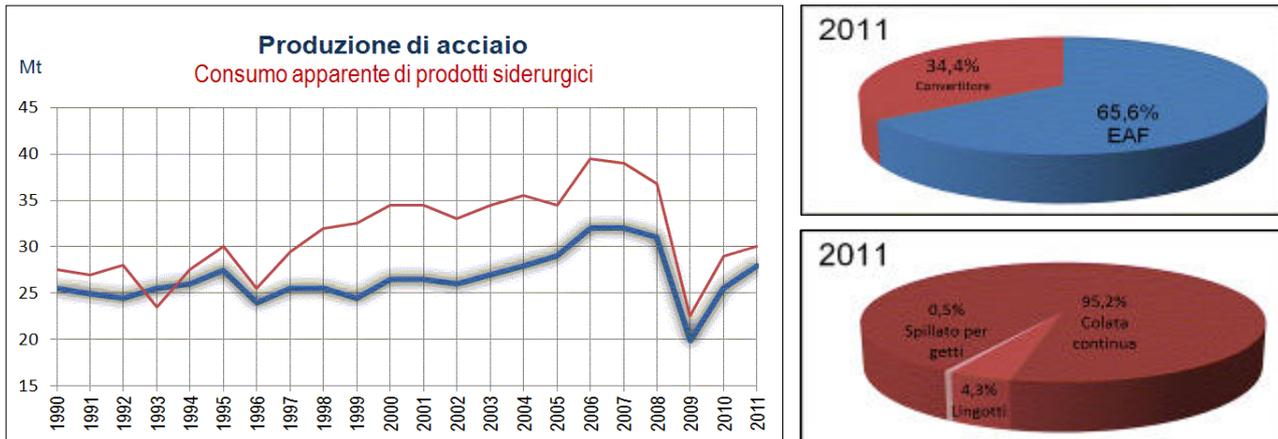
JRC REFERENCE REPORT 2013

Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production

5.1 GENERALITÀ DEL SETTORE SIDERURGICO

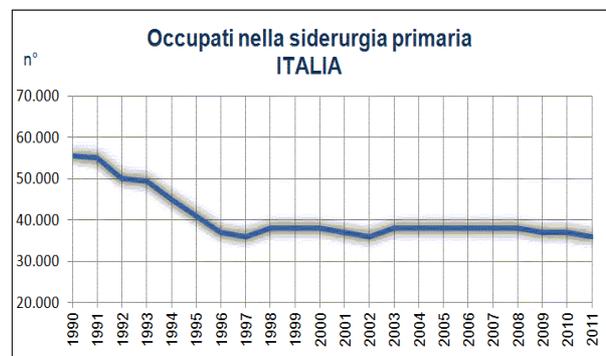
La produzione italiana di acciaio degli ultimi anni si attesta fra 28 e 33 milioni di tonnellate, con un calo significativo negli anni 2009 e 2010 in corrispondenza della nota crisi mondiale che ha coinvolto anche il settore siderurgico. Negli anni di maggior sviluppo la differenza fra importazioni ed esportazioni risulta di circa 3-7 milioni di tonnellate, cosicché il *consumo apparente* di prodotti siderurgici si colloca fra circa 30 e 40 milioni di tonnellate all'anno.

Nel grafico è rappresentato l'andamento della *produzione* e del *consumo apparente* nel periodo 1990 – 2011 (fonte *Federacciai* su dati ISTAT 2012).



La produzione avviene per oltre il 65% mediante forno elettrico ad arco (EAF) e per il restante 35% attraverso conversione (soprattutto LD) di ghisa primaria prodotta da ciclo integrale. La colata continua è la tecnologia prevalente (~95%) rispetto alla colata in lingotti o lo spillaggio per getti.

In Italia la produzione dell'acciaio (28,7 Mt nel 2011) avviene in 42 siti (68 nel 1990, 54 nel 1995) che occupano complessivamente circa 37.000 addetti (29.000 operai e 8.000 impiegati); il dato arriva ad oltre 50.000 addetti includendo anche le seconde lavorazioni.



■	ALTOFORNI	3 siti:
	Piombino, Taranto, Trieste	
■	CONVERTITORI A OSSIGENO	2 siti:
	Piombino, Taranto	
●	FORNI ELETTRICI	40 siti:
	Aosta, Bergamo, Bolzano, Brescia, Catania, Cremona, Cuneo, Modena, Padova, Potenza, Torino, Terni, Trento , Udine, Varese, Verona, Vicenza	

Nazione UE	Migliaia ton (2011)
Austria	7.474
Belgio	8.026
Finlandia	3.989
Francia	15.781
Germania	44.284
Grecia	1.946
Italia	28.735
Lussemburgo	2.521
Paesi Bassi	6.937
Portogallo	1.170
Spagna	15.504
Svezia	4.867
Regno Unito	9.478
Bulgaria	835
Rep. Ceca	5.583
Ungheria	1.746
Lettonia	870
Polonia	8.779
Romania	3.830
Slovacchia	4.236
Slovenia	648
Unione Europea	177.239

Quale ulteriore informazione si riporta una tabella con le produzioni in migliaia di tonnellate nelle nazioni dell'Unione Europea, nonché nelle diverse aree del mondo, riferite all'anno 2011.

Nell'Unione Europea l'Italia si colloca alle spalle della Germania, seguita da Francia e Spagna.

Nel Mondo i maggiori produttori risultano Cina, Giappone ed USA , seguiti da India e Sud Corea.

Area geografica	Migliaia ton (2011)
Unione Europea	177.239
Altri Europa	38.948 di cui Turchia 34.103
ex URSS	112.663 di cui Russia 68.852 Ucraina 35.332
Nord America	118.893 di cui USA 86.398
America Latina	48.349 di cui Brasile 35.205
Africa	15.222
Asia	998.252 di cui Cina 683.883 Giappone 107.601 India 71.260 Sud Corea 68.519 Taiwan 22.873
Oceania	7.248
Mondo	1.516.814

5.2 LA SIDERURGIA AL FORNO ELETTRICO AD ARCO (EAF) VALUTAZIONE DEGLI ASPETTI AMBIENTALI DEL SETTORE

La produzione di acciaio al forno elettrico risulta un'attività ecologica in senso lato, in quanto consente di recuperare materiali da prodotti al termine del loro ciclo di vita altrimenti non riciclabili, recuperando anche buona parte dell'energia inizialmente spesa per ottenere l'acciaio a partire dal minerale.

Tuttavia i consumi energetici rimangono ancora molto elevati (processo molto energivoro).

Oltre al **consumo di energia**, gli impatti ambientali più significativi riguardano:

- le **emissioni in atmosfera**, con particolare riferimento alle emissioni di:
 - o **polveri**
 - o **composti organoclorurati (PCDD/PCDF)**
- la gestione delle **acque**
- i **rifiuti solidi**.

L'industria siderurgica é caratterizzata da processi altamente intensivi nell'uso di materiali e di energia: energia e materie prime, assieme alla manodopera, rappresentano i principali fattori di produzione, da cui dipende l'economicità del settore produttivo; dalla corretta risoluzione delle problematiche ambientali, connesse con le emissioni in atmosfera, gli scarichi idrici e lo smaltimento dei rifiuti, dipende invece la sostenibilità dei processi utilizzati nel settore siderurgico.

La fusione diretta di rottame ferroso nei forni elettrici comporta l'impiego di consistenti quantità di energia elettrica e produce significative emissioni in atmosfera e residui solidi costituiti da rifiuti e scarti, in parte recuperabili.

Si deve peraltro sottolineare come, in questo settore, l'importanza della tematica ambientale - di crescente impatto sull'opinione pubblica - abbia portato ad uno straordinario sviluppo delle tecnologie di riduzione e controllo degli effetti negativi, che molto hanno beneficiato del parallelo progresso dell'elettronica e dell'informatica.

5.2.1 ENERGIA

Negli ultimi 20 anni il forno elettrico è stato oggetto di tutta una serie di miglioramenti (lance ad ossigeno, bruciatori a metano, raffreddamenti della volta e dei pannelli laterali, elettrodi di grafite UHP, materiali refrattari, foro di spillaggio EBT - Eccentric Bottom Tapping) che ne hanno ottimizzato la marcia, incrementando la produttività e riducendo i consumi specifici di energia.

Al fine di recuperare calore sensibile dai fumi captati ed estratti dal forno, dopo aver sperimentato il preriscaldamento delle ceste di rottame (sistema oramai in disuso), attualmente nei nuovi impianti si adottano i sistemi **Finger Shaft Furnace (FS)** ed il **Consteel (CS)**. In entrambi i fumi, prima di andare al sistema di abbattimento vengono fatti passare in controcorrente attraverso il rottame.

Nel sistema **Finger Shaft Furnace** il rottame viene caricato in modo discontinuo in una sorta di tino (shaft), posto superiormente al forno, nel quale transitano i fumi; delle specie di dita raffreddate ad acqua (finger) trattengono e poi, ad intervalli, lasciano cadere il rottame preriscaldato senza dover aprire il forno.

Nel sistema **Consteel** il rottame viene caricato in modo continuo su un nastro trasportatore, la cui parte terminale è attraversata dai fumi caldi e funge da post-combustore per l'inserimento di aria nel tunnel. Il forno si caratterizza per l'assenza di foro sulla volta (4° foro), sostituito dal tunnel, per il sistema di ribaltamento centrato sul centro geometrico del convogliatore e per la sua forma interna atta a mantenere dopo lo spillaggio una consistente dote liquida.

In entrambi i sistemi non è richiesta l'apertura della volta per la carica del rottame, talché il risparmio di energia è ulteriormente aumentato per la riduzione delle perdite termiche e dei tempi di caricamento e *tap to tap*.

Inoltre vengono ridotte anche le criticità legate alle emissioni: il sistema di caricamento continuo limita di molto il fenomeno della dispersione di fumi secondari e delle emissioni sonore.

5.2.2 EMISSIONI IN ATMOSFERA

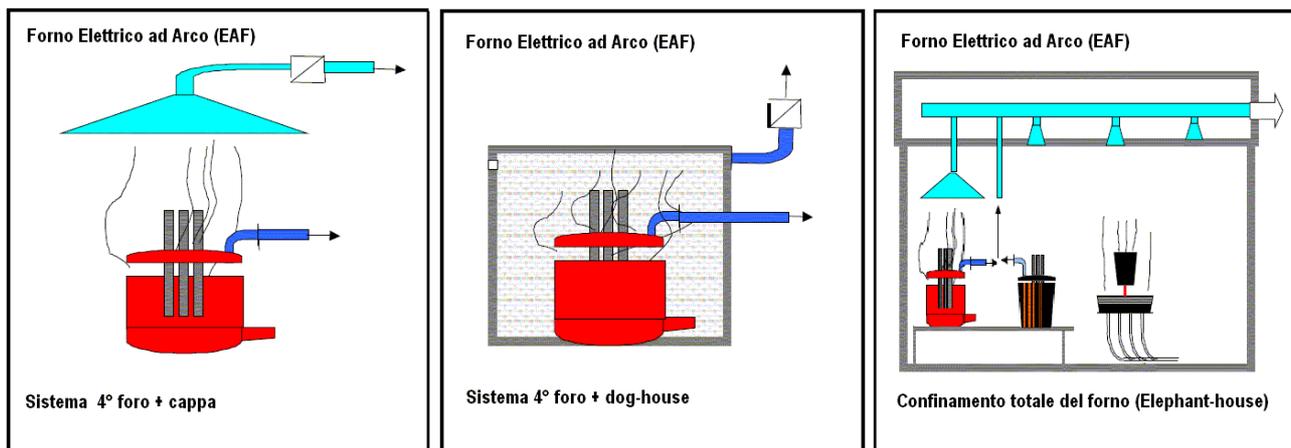
Polveri

Le emissioni di gas e polveri derivano soprattutto della fase di fusione e di affinazione. Si tratta delle **emissioni primarie**, che vengono captate ed asportate a forno chiuso attraverso il quarto foro.

Nei forni tradizionali durante le operazioni di caricamento del rottame si sviluppano invece le cosiddette **emissioni secondarie**, che sfuggono dal forno aperto (quarto foro scollegato) e si liberano impetuosamente nei volumi d'aria soprastanti. Per il contenimento di tali emissioni si rendono necessari sistemi aggiuntivi o alternativi, che nel tempo hanno assunto sempre maggiore importanza ed hanno richiesto sempre maggiore attenzione.

Al riguardo si sono evolute ed affermate diverse tecniche, di cui le più conosciute ed applicate sono:

- quarto foro e cappa (*canopy hood*)
- quarto foro e *dog-house*
- confinamento totale del forno (*elephant house*)



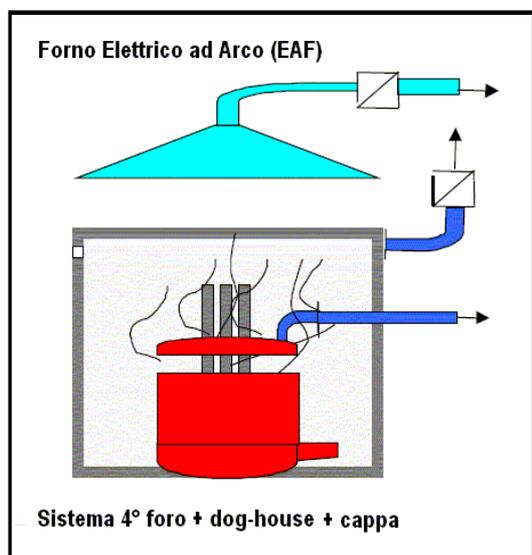
Il quarto foro estrae molto efficacemente le **emissioni primarie** del forno elettrico durante la fusione e l'affinazione; il sistema è applicato anche alle **siviere** ed ai **vessels** della metallurgia secondaria.

I sistemi a cappa sovrastante sono idonei a raccogliere le **emissioni secondarie** durante le cariche, la fusione, la scorifica e lo spillaggio, nonché dalle lavorazioni di metallurgia secondaria, dal preriscaldamento delle siviere (soprattutto nella prima fase quando si liberano prodotti della decomposizione del legante organico presente nel legante refrattario) e dai nastri trasportatori.

La combinazione di quarto foro e cappa consente la captazione delle polveri fino al 98%.

Il confinamento dei forni (**dog-house**) migliora ulteriormente l'efficacia dell'aspirazione in quanto si riducono i volumi potenzialmente interessati dalle emissioni, risultando efficace anche nella riduzione del rumore con abbattimento dei livelli di pressione sonora di 10 – 20 dB(A).

La completa chiusura di tutti gli impianti in un capannone a tenuta (la cosiddetta **Elephant-house**) – i cui costi sono molto elevati - è in generale applicabile a nuovi impianti. La costruzione di questi edifici comporta una spinta riduzione delle emissioni diffuse verso l'esterno, ma può provocare effetti indesiderati negli ambienti di lavoro.



Le applicazioni più utilizzate sono combinazioni delle diverse soluzioni, che complessivamente conseguono efficienze di captazione delle polveri superiori al 98%.

In figura è riportata una soluzione che prevede quarto foro, dog-house e cappa sovrastante, molto utilizzata per la massimizzazione dell'efficienza in impianti esistenti.

Il dimensionamento complessivo del sistema di aspirazione è dell'ordine di 8.000 – 10.000 Nm³/tLS. Il valore è in continuo aumento proprio per ridurre le emissioni fuggitive conseguenti all'incapacità della **dog-house** e della cappa sovrastante la zona forno a

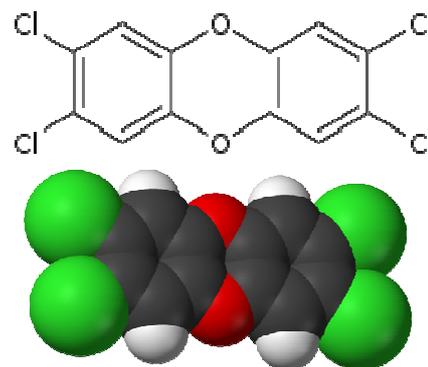
contenere totalmente le emissioni secondarie, soprattutto nelle fasi di carica delle ceste.

Composti organoclorurati

Si tratta di una famiglia di composti organici particolarmente stabili in cui alcuni atomi di idrogeno sono stati sostituiti da atomi di cloro.

Fra essi si annoverano sostanze particolarmente tossiche come le **diossine** ed i **furani** policlorurati ed in particolare le policlorodibenzodiossine (PCDD, 7 composti) ed i policlorodibenzofurani (PCDF, 10 composti), costituiti da due anelli benzenici clorurati.

La tossicità delle diossine e dei furani clorurati viene espressa come tossicità equivalente (I-TEQ) ossia come frazione della tossicità della diossina più pericolosa, la **TCDD (2,3,7,8-tetracloro-dibenzo[b,e]-1,4-diossina** o più semplicemente **tetraclorodibenzodiossina**).



Tetraclorodibenzodiossina (TCDD)
Struttura e visualizzazione 3D

Allo stesso modo vengono valutati i cosiddetti composti diossino-simili (*dioxin-like*), costituiti dai **policlorobifenili** (PCB, 12 composti).

Mentre le diossine ed i furani si formano spontaneamente a partire dagli elementi precursori in particolari condizioni di temperatura, i PCB sono invece sostanze sintetiche, messe al bando dal 1985, ma tuttora presenti nell'ambiente.

Diossine, furani e composti diossino-simili sono inquinanti considerati caratteristici del settore siderurgico, in quanto le peculiarità del processo sono favorevoli al rilascio di tali sostanze che, sebbene vengano distrutte alle alte temperature (> 850-900°C), tendono a riformarsi nelle emissioni primarie durante il raffreddamento dei fumi nell'intervallo critico tra 600 e 280°C, come risultato della reazione tra componenti organici e cloro in essi presenti.

Tale processo, che prende il nome di *de novo synthesis*, viene minimizzato raffreddando il gas molto velocemente (riducendo quindi al minimo il tempo in cui esso rimane alle temperature critiche), soprattutto nell'intervallo di massima produttività tra i 300°C-500°C.

Per conseguire tale effetto possono essere impiegati lo **scambiatore a convezione forzata** (*Forced draught cooler* - FDC) o, molto più efficacemente, la **torre di raffreddamento mediante iniezione di getti d'acqua** (*Quenching Tower* - QT).

Con la torre di quenching un'esatta quantità d'acqua nebulizzata assicura che i fumi primari caldi vengano rapidamente raffreddati a temperature comprese tra 250°-280°C.

Un ulteriore raffreddamento viene ottenuto immediatamente dopo miscelandoli con i fumi secondari più freddi (a 40-60°C) provenienti dalle aspirazioni da cappa e dog-house, raggiungendo in tal modo le temperature adatte alla filtrazione nel filtro a maniche (**bag filter**).

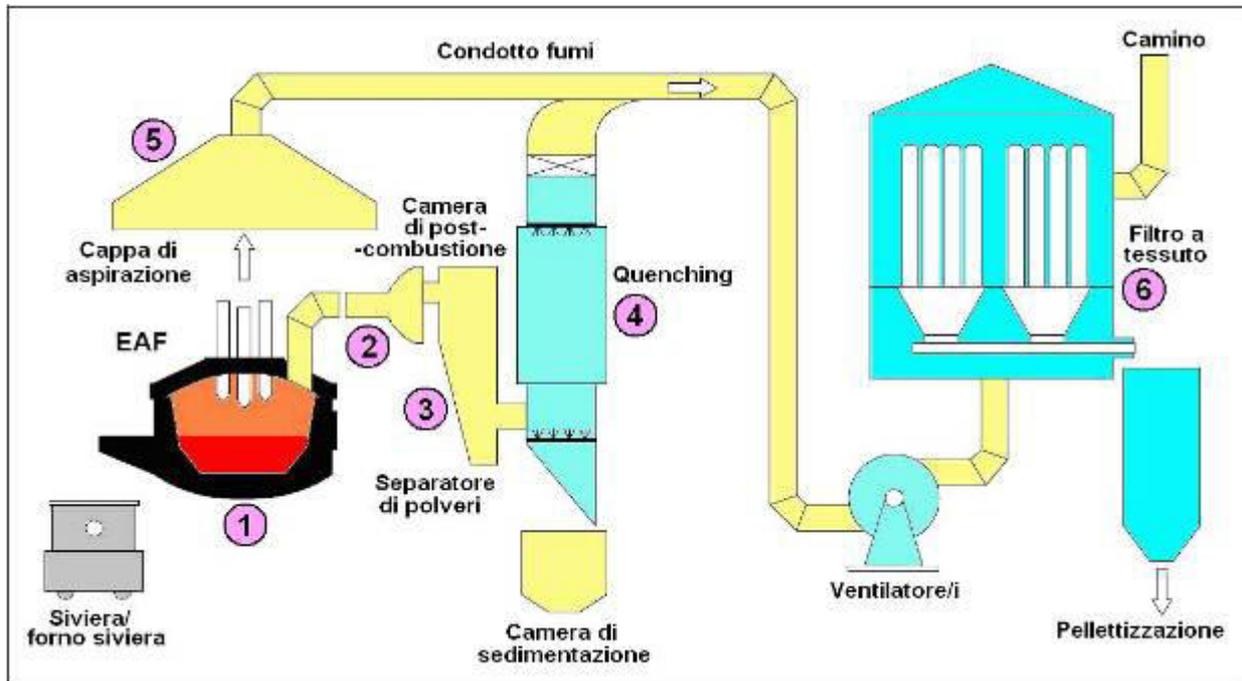
Si è inoltre osservato che quanto minore è la temperatura di filtrazione, tanto maggiore è l'efficienza di abbattimento delle diossine al filtro, presentandosi prevalentemente allo stato particellato o in massima parte adsorbite sulle particelle polverose.

Per migliorare l'abbattimento dei composti organo clorurati vengono impiegati appropriati sistemi di **post-combustione** dei fumi primari in uscita dal forno, ed, ove necessario, **l'iniezione di polvere di lignite, carboni attivi o altri agenti adsorbenti** prima della filtrazione, per favorire la fissazione dei composti stessi sulle polveri adsorbenti, che vengono poi separati dal gas esausto nei filtri a maniche e smaltiti con le polveri abbattute.

Nel caso di iniezione di lignite nei gas effluenti aumentano i rischi di incendio.

Impianto di trattamento dei fumi

L'impianto d'aspirazione e trattamento dei fumi provenienti da un EAF assume tipicamente la seguente configurazione:



Le emissioni primarie a circa 1600°C sono estratte direttamente dal *quarto foro* della volta dell'EAF ® e raccolte dalla curva raffreddata del condotto d'aspirazione.

I fumi, passando in un condotto fisso separato dal forno ©, si miscelano con aria ambiente aspirata attraverso il "gap" esistente fra i due condotti. Nella *Post Combustion Chamber*™, che ha anche la funzione di separare le polveri più grossolane (*cassa polveri*), l'aria falsa favorisce il completamento della combustione del CO.

Attraverso un condotto raffreddato (*WCD Water Cooled Duct*) i fumi, a 500 - 800°C, passano alla *torre di quenching* (QT) Σ, nella quale subiscono un rapido raffreddamento.

I fumi primari (a 200°C-300°C) vengono miscelati con i fumi secondari (a 50 - 70°C) provenienti dalla cappa (posta sopra il forno). I fumi miscelati a temperatura inferiore a 130°C vengono depolverati mediante un *filtro a maniche* |, tipicamente corredato di maniche in poliestere.

5.2.3 GESTIONE DELLE ACQUE

Le acque vengono impiegate:

- per il raffreddamento del forno,
- per il raffreddamento delle apparecchiature della colata continua e del prodotto in uscita.

Per ridurre i consumi di acqua è necessario prevedere **sistemi a circuito chiuso**, provvedendo alla depurazione in opportuni impianti di trattamento per la decantazione dei fanghi e, ove presente anche l'impianto di laminazione, per la separazione degli olii.

L'impianto deve essere supportato con un sistema di controllo e regolazione della qualità dell'acqua in termini di alcalinità, conducibilità e corrosività.

È evidente che il circuito chiuso richiede energia elettrica aggiuntiva per il pompaggio delle acque.

5.2.4 RIFIUTI SOLIDI

I principali rifiuti derivanti dall'esercizio del forno elettrico sono costituiti da:

- polveri di abbattimento
- scorie del forno (scorie nere)
- scorie di siviera (scoria bianca)
- rottami di refrattari.

La loro produzione, con piccole differenze dipendenti dal tipo di acciaio fabbricato e dalla pratica operativa adottata, è quasi un'invariante. Anzi, per quanto riguarda la polvere, lo sforzo è quello di captarne ed abbattele il più possibile.

Le tecniche di riduzione sono dunque quelle che ricercano la massimizzazione del **riciclo interno ed esterno**, riducendo le quantità da destinare allo smaltimento finale in discarica.

Polveri di abbattimento fumi

I rifiuti che presentano i maggiori problemi, per i rilevanti contenuti di metalli pesanti, sono le polveri di abbattimento dei fumi, prodotte in quantità di circa 15 – 20 kg/tonnellata di acciaio.

Per esse le alternative di recupero consistono in:

- riciclaggio delle polveri al forno;
- processi piro- ed idro-metallurgici per il recupero dello zinco e la rimozione dei metalli pesanti;
- processi innovativi per il recupero del ferro, dei metalli pesanti e della scoria risultante.

Il **riciclaggio delle polveri** le arricchisce di zinco ed è tanto più conveniente quanto più si recuperano anche gli elementi di lega, come nel caso delle polveri derivanti dalla produzione di acciai alto-legati o inossidabili.

Fra i **processi pirometallurgici** il più noto e sperimentato è il *processo Waelz*, messo a punto negli anni '70. Attraverso l'impiego di forni rotativi ad alta temperatura dalle polveri di abbattimento dei fumi vengono estratti con la corrente gassosa lo Zinco ed il Piombo in forma di ossido (denominato *ossido Waelz*), da cui, grazie ad ulteriori lavorazioni, viene poi ricavato lo zinco metallico.

Altra tecnologia per l'estrazione dello zinco è il **processo idrometallurgico** elettrolitico *Ezinex*, degli anni '90, con il quale si recupera zinco di elevata purezza.

Per il recupero degli elementi di lega esiste il **processo al plasma Plasminox**, con il quale il recupero dalle polveri riguarda l'acciaio inox e metalli come Cromo, Nichel e Molibdeno.

Ancora sperimentali e non passati alla fase realizzativa sono i **processi innovativi a caldo**, collegati in linea col sistema di captazione ed abbattimento delle polveri, che consentono di recuperare una fase metallica di ghisa, ricaricabile al forno elettrico, una polvere molto ricca di ossido di zinco, da inviare ai processi di produzione dello zinco metallico, e scoria inerte.

L'alternativa di smaltimento delle polveri è il loro conferimento in discariche specializzate, previa inertizzazione con cemento e/o altri componenti per evitare il possibile rilascio dei metalli pesanti.

Scorie del forno

Le scorie del forno elettrico solidificate decadenti dalla produzione di acciaio al carbonio possono essere considerate una roccia artificiale, simile a quella naturale, composta da ossidi di ferro (FeO), calce (CaO), biossido di silicio (SiO₂), e altri ossidi (MgO, Al₂O₃, MnO). Sono caratterizzate da elevata resistenza meccanica, buona resistenza agli agenti atmosferici ed ottima resistenza all'abrasione, che le rendono idonee per varie applicazioni, dall'edilizia alla costruzione di opere idrauliche, di sottofondi stradali, di terrapieni, ovvero per il recupero ambientale di cave e miniere.

Il principale limite risiede nell'espansività in caso di rilevante presenza di frazioni di ossido di calcio e di ossido di magnesio non legati; per questo si rende necessario un periodo di stagionatura di alcuni mesi per favorire e promuovere un processo naturale di idratazione e carbonatazione, ossia una stabilizzazione di tali ossidi così da evitare qualsiasi problema di rigonfiamento e disgregazione. Per il loro impiego, previa eventuale stagionatura per poterle utilizzare in applicazioni sensibili ai fenomeni di rigonfiamento, vengono sottoposte a frantumazione e vagliatura per ridurne le dimensioni a frazioni granulometriche di interesse commerciale (0-4, 4-8, 8-12 mm); con separatori magnetici possono essere inoltre recuperate le componenti ferrose.

Il processo metallurgico e le modalità di raffreddamento controllato danno luogo ad una composizione chimica indenne da costituenti strutturali in grado di rilasciare elementi non compatibili con l'ambiente in misura superiore rispetto a quella consentita nei test di cessione previsti dalle normative, concretizzando lo spirito dell'obiettivo "Zero Waste".

5.3 SINTESI DEI DATI DI INPUT/OUTPUT DEL FORNO ELETTRICO

Nella seguente tabella sono riportati i fattori di input ed i fattori di emissione dei forni elettrici ad arco EAF esaminati in ambito europeo nel Report 2013 relativo alle Best Available Techniques (BAT) riguardanti il settore siderurgico (*Iron and Steel Production*).

Dati di input/output per i forni elettrici ad arco in Europa UE (Tabella 8.1 BRef 2013)

INPUT			OUTPUT		
Materie prime			Prodotti Liquid Steel (LS)		
Input metallici:			Acciaio liquido	kg	1000
rottame	kg/tLS	1039 - 1232	Emissioni atmosferiche		
ghisa	kg/tLS	0 - 153	gas esausti	MNm ³ /h Nm ³ /tLS	1 - 2 8000-10000
acciaio liquido	kg/tLS	-	polveri	g/tLS (mg/m ³)	4-300 (0,35-52)
ferro preridotto (DRI)	kg/tLS	0 - 215	Hg	mg/tLS	2 - 200
Elettrodo grafite	kg/tLS	2 - 6	Pb	mg/tLS	75 - 2850
Rivest. refrattari	kg/tLS	4 - 60	Cr	mg/tLS	12 - 2800
Elementi di lega:			Ni	mg/tLS	3 - 2000
- per acciaio al C	kg/tLS	11 - 40	Zn	mg/tLS	200 - 24000
- alto legati e inox	kg/tLS	23 - 363	Cd	mg/tLS	1 - 148
Gas			Cu	mg/tLS	11 - 510
ossigeno	m ³ /tLS	5 - 65	HF	mg/tLS	0,04 - 15000
argo	m ³ /tLS	0,3 - 1,45	HCl	mg/tLS	800 - 32250
azoto	m ³ /tLS	0,8 - 12	SO ₂	g/tLS	5 - 210
vapore (metallurg.sec)	m ³ /tLS	(33 - 360)	NOx	g/tLS	13 - 460
Energia			CO	g/tLS	50 - 4500
elettricità	kWh/tLS MJ/tLS	404 - 748 1454 - 2693	CO ₂	kg/tLS	72 - 180
combustibile	MJ/tLS	50 - 1500	TOC	gC/tLS	35 - 260
Acqua			Benzene	mg/tLS	30 - 4400
	m ³ /tLS	1 - 42,8	Clorobenzene	mg/tLS	0,2 - 12
			IPA	mg/tLS	9 - 970
			PCB	mg/tLS	0,01 - 5
			PCDD/F	µg I-TEQ/tLS	0,04 - 6
			Produzione residui (rifiuti e sottoprodotti)		
			scorie da forno	kg/tLS	60 - 270
			scorie da siviera	kg/tLS	10 - 80
			polveri	kg/tLS	10 - 30
			refrattari	kg/tLS	1,6 - 22,8
			Rumore	dB(A)	90 - 133

6 MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI PER IL CONTENIMENTO DEGLI INQUINANTI

6.1 Concetto generale di migliori tecniche disponibili

Anche nel caso dell'industria siderurgica, nell'illustrazione del concetto di BAT (*Best Available Techniques*) il BRef Report si rifà direttamente alla definizione riportata nella **direttiva 2010/75/UE** del 24 novembre 2010, (Direttiva IED - *Industrial Emission Directive*) - evoluzione dalla **direttiva 96/61/CE**, poi riscritta nella **direttiva 2008/01/CE** -, ovvero:

le **Migliori Tecniche Disponibili** (BAT) sono “la più efficiente e avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire la base dei valori limite di emissione e delle altre condizioni di autorizzazione intesi ad evitare oppure, ove ciò si riveli impraticabile, a ridurre le emissioni e l'impatto sull'ambiente nel suo complesso”:

- per «**Tecniche**» si intende sia le tecniche impiegate sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'installazione;
- «**Disponibili**» qualifica le tecniche sviluppate su una scala che ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente attuabili nell'ambito del pertinente comparto industriale, prendendo in considerazione i costi e i vantaggi, indipendentemente dal fatto che siano o meno applicate o prodotte nello Stato membro di cui si tratta, purché il gestore possa avervi accesso a condizioni ragionevoli;
- «**Migliori**» qualifica le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.

6.1.1 Il **BAT Reference Document for Iron and Steel Production**

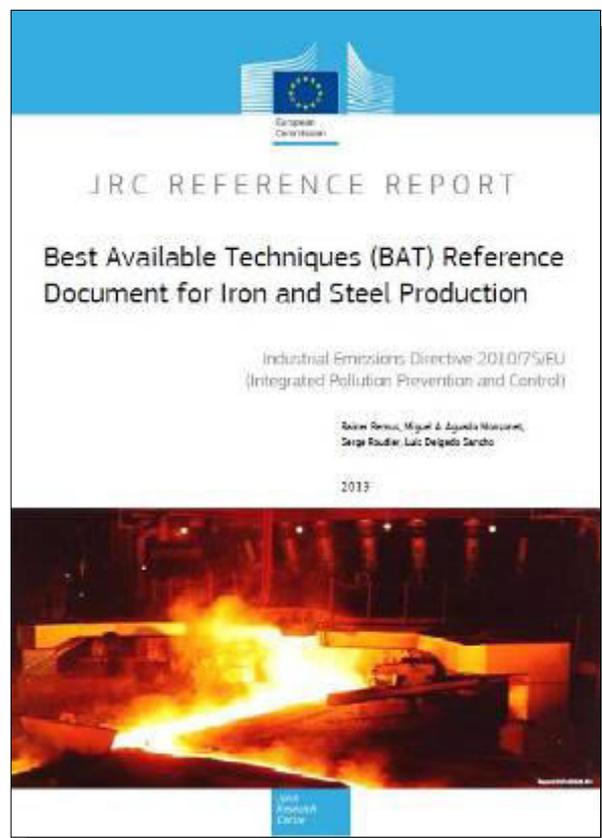
Prendendo come riferimento il Report *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production* del 2013, in questa sede verranno prese in esame le conclusioni sulle BAT relative al processo di:

- **produzione di acciaio con forni elettrici ad arco e la colata.**

Le BAT in questione sono state adottate con la Decisione 28 febbraio 2012, n. 2012/135/UE, pubblicata sulla nella G.U.U.E. 8 marzo 2012, n. L 70:

DECISIONE DI ESECUZIONE DELLA COMMISSIONE che stabilisce le conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BAT) per la produzione di ferro e acciaio ai sensi della direttiva 2010/75/UE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa alle emissioni industriali.

Le tecniche elencate e descritte nelle presenti conclusioni sulle BAT non sono né prescrittive né esaustive. Si possono utilizzare altre tecniche purché assicurino almeno un livello equivalente di protezione ambientale.



6.2 MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI (M.T.D.) DI PORTATA GENERALE PER IL SETTORE SIDERURGICO

Si tratta delle BAT aventi una portata generale e sono riferibili all'intero settore siderurgico.

Sono numerate da 1 a 18 e fra esse quelle pertinenti anche alla produzione di acciaio al forno elettrico sono le seguenti.

6.2.1 SISTEMI DI GESTIONE AMBIENTALE (BAT 1)

1. Attuazione e rispetto di un **Sistema di Gestione Ambientale (SGA)**.

Un Sistema di Gestione Ambientale comprende la struttura organizzativa, le responsabilità, le prassi, le procedure, i processi e le risorse per sviluppare, implementare, mantenere, revisionare e controllare la politica ambientale, secondo un modello dinamico iterativo di continuo miglioramento:

plan – do – check – act
progetta-fai-verifica-agisci.

In particolare risulta assai importante:

- riesaminare periodicamente il sistema di gestione ambientale per accertare che continui ad essere idoneo, adeguato ed efficace;
- seguire gli sviluppi delle tecnologie più pulite;
- applicare periodicamente una serie di analisi comparative settoriali.



6.2.2 GESTIONE ENERGETICA (BAT 2 + 5)

5. Riduzione al minimo del consumo di energia elettrica mediante l'utilizzo di **sistemi di gestione energetica**, nonché di apparecchiature elettriche con un'elevata efficienza energetica.

6.2.3 GESTIONE DEI MATERIALI (BAT 6 + 7)

7. Per ottenere bassi livelli di emissione per gli inquinanti, risulta necessaria una accurata **selezione di qualità adeguate di rottame e di altre materie prime**. In particolare per il rottame le BAT prevedono un'ispezione adeguata dei contaminanti visibili in relazione ai **metalli pesanti**, ed in particolare al mercurio, nonché ai **precursori di PCCD/F e di PCB**.

6.2.4 GESTIONE DEI RESIDUI DI PROCESSO (sottoprodotti e rifiuti) (BAT 8 + 10)

8. Utilizzo di tecniche integrate ed operative per ridurre al minimo i rifiuti attraverso l'**uso ed il riciclaggio interno**.
9. Massimizzazione dell'**uso o del riciclaggio esterno** per i residui solidi che non possono essere utilizzati o riciclati internamente, in linea con le normative in materia di rifiuti.
10. Ricorso alle migliori **prassi operative e gestionali** di tutti i residui solidi ed alla copertura dei punti di trasferimento per evitare le emissioni in aria e in acqua.

6.2.5 EMISSIONI DIFFUSE (BAT 11)

11. **Evitare o ridurre le emissioni diffuse di polveri prodotte dallo stoccaggio, dalla movimentazione e dal trasporto di materiali.** Fra le varie tecniche da impiegare si ritrovano le seguenti, applicabili anche alle acciaierie di seconda fusione:

- definizione, nell'ambito del SGA, di un piano di azione associato per le polveri diffuse;
- impiego di spazzatrici con emissioni ridotte per eseguire la pulizia ordinaria di strade con pavimentazione dura;
- stoccaggio del rottame in aree coperte e con pavimentazione dura, per ridurre anche il rischio di contaminazione dei terreni;
- realizzazione di depositi con muri di contenimento, per ridurre la superficie esposta;
- impiego di apparecchiature per la pulizia delle ruote per evitare di trascinare fango e polveri sulle strade pubbliche;
- applicazione di pavimentazione dura sulle strade utilizzate per il trasporto (cemento o asfalto) per ridurre al minimo la formazione di nuvole di polveri durante il trasporto di materiali e pulizia delle strade;
- inumidimento di strade polverose con spruzzi d'acqua, per esempio durante le operazioni di movimentazione di scorie;
- garantire che i veicoli di trasporto non siano eccessivamente pieni in modo da evitare fuoriuscite di materiale;
- garantire che i veicoli di trasporto siano dotati di teli per coprire il materiale trasportato.

6.2.6 GESTIONE DELLE ACQUE E DELLE ACQUE DI SCARICO (BAT 12)

12. Prevenire, raccogliere e separare i tipi di acque di scarico, facendo il **massimo uso del riciclo interno** e utilizzando un **trattamento adeguato** per ogni flusso finale.

6.2.7 MONITORAGGIO (BAT 13 + 16)

13. Monitoraggio con i moderni sistemi computerizzati nelle sale di controllo di tutti parametri di processo utili al continuo adeguamento ed ottimizzazione online del processo stesso, al fine di garantire le migliori azioni di intervento, aumentando in questo modo l'efficienza energetica, ottenendo la massima resa e migliorando le pratiche di manutenzione.

14. Misurazione in continuo delle emissioni di inquinanti al camino per i seguenti parametri:

- emissioni di **polveri** dai forni elettrici ad arco di grandi dimensioni.

15. Per le fonti altre di emissioni (compresi gli scarichi delle acque) e per tutti gli inquinanti caratteristici (comprese PCDD/F nelle emissioni) occorre effettuare misurazioni in maniera periodica e discontinua.

Il monitoraggio deve essere effettuato secondo le norme EN e ISO pertinenti.

16. È necessario determinare l'ordine di grandezza delle emissioni diffuse utilizzando, in ordine di preferenza, metodi di misurazione diretti o semidiretti, metodi di misurazione indiretti, calcolo con fattori di emissione.

6.2.8 **DISMISSIONE (BAT 17)**

17. Prevenire l'inquinamento nella fase di dismissione, rendendola più facile, meno inquinante e più economica già in fase di progettazione, mediante tecniche quali:
- evitare le strutture sotterranee;
 - integrare elementi che facilitino lo smantellamento;
 - scegliere finiture superficiali che siano facili da decontaminare;
 - usare per le apparecchiature una configurazione che riduca al minimo le sostanze chimiche intrappolate e faciliti lo scarico o la pulizia;
 - progettare unità flessibili e autonome che consentano una chiusura progressiva;
 - usare materiali biodegradabili e riciclabili in tutti i casi possibili.

6.2.9 **RUMORE (BAT 18)**

18. Ridurre le emissioni acustiche provenienti dalle diverse fonti usando una o più delle tecniche di seguito specificate a seconda delle condizioni locali:
- attuazione di una strategia di riduzione della rumorosità;
 - protezione acustica delle aree delle operazioni/unità rumorose;
 - isolamento dalle vibrazioni delle operazioni/unità;
 - rivestimento interno ed esterno costituito da materiale isolante;
 - edifici insonorizzati in cui svolgere le operazioni rumorose che comportano l'uso di apparecchiature di trasformazione dei materiali;
 - costruire barriere antirumore, per esempio costruzione di edifici o di barriere naturali, come alberi e arbusti tra l'area protetta e l'attività rumorosa;
 - silenziatori sui camini di scarico;
 - canalizzazioni coibentate e ventilatori in uscita situati in edifici insonorizzati;
 - chiusura di porte e finestre delle aree coperte.

6.3 **MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI SPECIFICHE NEL PROCESSO DI PRODUZIONE DI ACCIAIO CON FORNI ELETTRICI AD ARCO**

Si tratta delle conclusioni sulle BAT numerate da 87 a 95 riportate nella sezione 1.7, riferita specificamente alla produzione di acciaio con forni elettrici ad arco ed alla colata continua.

Salvo diversa indicazione, esse possono essere applicate a tutti gli impianti EAF.

6.3.1 **MISURE PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI IN ARIA (BAT 87 + 90)**

87. Per **prevenire le emissioni di mercurio** è necessario evitare per quanto possibile le materie prime e le materie ausiliarie contenenti mercurio.

Il livello di emissione associato alle BAT (AEL-BAT) per il **mercurio** è **< 0,05 mg/Nm³**.

88. Al fine del **contenimento delle emissioni di polveri primarie e secondarie** in tutte le fasi (preriscaldamento dei rottami, caricamento, fusione, spillaggio, trattamento in forni a siviera e metallurgia secondaria) occorre garantire un'estrazione efficiente delle emissioni di polveri provenienti da tutte le fonti mediante l'utilizzo di una delle tecniche di seguito indicate e prevedere la successiva depolverazione mediante un filtro a manica:

- combinazione di captazione diretta dei fumi (4° foro) e sistemi di cappe;
- sistemi di captazione diretta dei fumi (4° foro) e sistemi di dog-house;
- captazione diretta dei gas (4° foro) e sistema di aspirazione totale applicato all'edificio.

L'efficienza media complessiva di aspirazione delle polveri associata alle BAT è > 98%.

Il valore AEL-BAT per le **polveri** è < **5 mg/Nm³**, determinato come valore medio giornaliero.

89. Al fine di **prevenire e ridurre le emissioni di policlorodibenzo-diossine (PCDD) policlorodibenzo-furani (PCDF) e di policloro-bifenili (PCB)** è necessario evitare per quanto possibile materie prime contenenti PCDD/F e PCB o i loro precursori (cfr. BAT 6 e 7) e utilizzare una delle seguenti tecniche o una loro combinazione, unitamente a un adeguato sistema di rimozione delle polveri:

- appropriata postcombustione,
- appropriato raffreddamento rapido (rapid quenching),
- iniezione di agenti adsorbenti adeguati nel collettore prima della depolverazione.

Il valore AEL-BAT per **PCDD/F** è < **0,1 ng I-TEQ/Nm³**, determinato come media di 6-8 ore. In alcuni casi, il AEL-BAT può essere raggiunto soltanto con misure primarie.

90. Per **ridurre le emissioni di polveri** durante le operazioni di trattamento in situ delle scorie è necessario adottare una delle seguenti tecniche o di una loro combinazione:

- captazione efficiente dal frantumatore delle scorie e dai dispositivi di vagliatura con successivo abbattimento delle polveri, se pertinente;
- trasporto di scorie non trattate mediante cariatrici meccaniche;
- captazione o umidificazione dei punti di trasferimento del nastro trasportatore per il materiale frantumato;
- umidificazione dei cumuli di deposito di scorie;
- uso di acqua nebulizzata quando si carica materiale frantumato.

Nel caso di captazione il AEL-BAT per le polveri è < **10 – 20 mg/Nm³** (media semioraria).

6.3.2 RIDUZIONE DEI CONSUMI DI ACQUA E DEGLI SCARICHI (BAT 91 + 92)

91. Per **ridurre al minimo il consumo di acqua del processo** è necessario utilizzare sistemi per il raffreddamento dei dispositivi del forno, possibilmente ad **acqua a circuito chiuso**.

92. Per **ridurre al minimo lo scarico di acque reflue** dall'impianto di colata continua è necessario impiegare una combinazione seguenti tecniche:

- flocculazione, sedimentazione e/o filtrazione per la rimozione di solidi sospesi;
- disoleatori per la rimozione di olio e grassi;
- ricircolazione, per quanto possibile, dell'acqua di raffreddamento e dell'acqua derivante dalla generazione del vuoto.

I valori AEL-BAT per le acque di scarico dalla colata continua sono (campione casuale qualificato o campione medio giornaliero):

- solidi sospesi	< 20 mg/l	- nickel	< 0,5 mg/l
- ferro	< 5 mg/l	- cromo totale	< 0,5 mg/l
- zinco	< 2 mg/l	- idrocarburi totali	< 5 mg/l

6.3.3 MISURE PER LA RIDUZIONE DEI RESIDUI DI PRODUZIONE (BAT 93)

93. Per **prevenire la produzione di rifiuti** è necessario impiegare una delle seguenti tecniche o una loro combinazione:

- adeguata raccolta e stoccaggio dei residui per facilitare un trattamento specifico;
- recupero e riciclaggio in sito di materiali refrattari provenienti dai vari processi e riutilizzo interno, per esempio per la sostituzione di dolomite, magnesite e calce;
- recupero esterno di metalli non ferrosi come lo zinco presenti nelle polveri raccolte dai filtri, previo, se necessario, arricchimento delle polveri stesse mediante ricircolazione nel forno elettrico ad arco;
- recupero delle scaglie derivanti dalla colata continua con successivo riciclaggio, per esempio nell'impianto di sinterizzazione/nell'altoforno o nell'industria del cemento;
- recupero per uso esterno dei materiali refrattari e delle scorie derivanti dal processo EAF come materie prime secondarie, ove consentito dalle condizioni del mercato.

Complessivamente occorre dunque **gestire in maniera controllata i residui** decadenti dai processi che non possono essere evitati o riciclati. Possono non rientrare nell'ambito dell'autorizzazione il riutilizzo o il riciclaggio esterno in quanto, entrando nella discrezione di terzi, non sempre il gestore è in grado di garantirne il controllo.

6.3.4 MISURE PER IL CONTENIMENTO DEI CONSUMI ENERGETICI (BAT 94)

94. Per **ridurre il consumo di energia**, se la tipologia di produzione lo giustifica, è opportuno effettuare la colata continua a nastri semifinita (**nastri di spessore inferiore a 15 mm**). Con questa tecnica il processo di colata è abbinato alla laminazione diretta a caldo, con raffreddamento ed avvolgimento dei nastri (di varia lunghezza e normalmente con spessore inferiore a 2 mm) senza ricorso al forno di riscaldamento intermedio. Oltre che dai tipi di acciaio prodotti, nel caso di impianti esistenti l'applicabilità dipende dallo spazio disponibile, atteso che una macchina per colata a nastri richiede circa 100 m in lunghezza.

6.3.5 MISURE PER IL CONTENIMENTO DEL RUMORE (BAT 95)

95. Per **ridurre le emissioni acustiche** derivanti dalle installazioni e dai processi che producono livelli elevati di rumore è necessario impiegare una combinazione delle seguenti tecniche costruttive e operative, a seconda delle condizioni locali:

- costruzione dell'edificio che ospita il forno elettrico ad arco in modo da assorbire il rumore derivante da urti meccanici dovuti al funzionamento del forno;
- costruzione e installazione di apparecchiature di sollevamento destinate a trasportare le ceste di caricamento in modo da prevenire urti meccanici;
- uso specifico di isolamento acustico delle pareti interne e dei tetti per prevenire la propagazione aerea del rumore della struttura del forno elettrico ad arco;
- separazione del forno dalla parete esterna per ridurre i rumori strutturali dell'edificio del forno elettrico ad arco;
- collocazione dei processi che producono livelli elevati di rumorosità (per esempio, le unità di decarburazione e i forni elettrici ad arco) all'interno dell'edificio principale.

6.4 TECNICHE EMERGENTI

6.4.1 IL FORNO CONTIARC

Il forno Contiarc è un forno ad arco a corrente continua intrinsecamente ecologico in quanto progettato per ridurre l'impatto ambientale e contenere i consumi di energia.

È costituito da un tino anulare la cui parte interna circonda e protegge l'elettrodo centrale e nel quale il rottame viene alimentato con continuità con la stessa velocità con cui viene fuso ed estratto dalla parte inferiore. Durante la discesa nel tino il rottame è preriscaldato in controcorrente dai gas ascendenti, svolgendo inoltre un effetto filtrante che riduce significativamente la polvere che deve essere trattenuta dal sistema di depolverazione di coda.

Il forno Contiarc ha periodi di power-on prossimi al 100% e consumi di energia di circa 260 kWh/t.

6.4.2 IL FILTRO INTERMETALLICO

Si tratta di un filtro a maniche costituito da materiale intermetallico che resiste ad alta temperatura e combina all'azione di filtrazione anche un effetto catalitico, che consente una drastica diminuzione delle polveri e delle emissioni inquinanti associate.

I test condotti presso le acciaierie *LME Laminés Marchands Européens* di Trith-Saint-Léger, nella Francia Settentrionale (vicino a Calais), sono state raggiunte efficienze di riduzione della polvere del 99,9%, di PCDD/F di oltre il 95% e nei confronti dei metalli pesanti del 95 ÷ 100% (ad eccezione dei metalli pesanti presenti in fase di gas come il mercurio).

Inoltre è possibile risparmiare energia, dovendo raffreddare i gas soltanto fino 350-550 °C, anziché a 150-200 °C come con le tecniche tradizionali.

6.4.3 IL RECUPERO DI PNEUMATICI FUORI USO

Come già viene fatto in cemeniteria, gli pneumatici fuori uso possono essere recuperati anche nella siderurgia elettrica in sostituzione del carbone (antracite). Questa tecnica dunque, oltre al recupero di vecchi pneumatici, riduce il consumo di carbone.

L'ottimizzazione del processo di recupero necessita di individuare le giuste quantità e la più corretta posizione all'interno della carica, né troppo in alto, né troppo vicina al bagno di acciaio liquido. Inoltre anche l'ossigeno delle lance deve essere gestito in modo tale da favorire la post-combustione già all'interno del forno.



6.5 CRITERI DI INDIVIDUAZIONE E UTILIZZAZIONE DELLE M.T.D.

L'elenco delle Migliori Tecniche Disponibili riportate nel precedente paragrafo, così come nel BRef, non può essere considerato esaustivo. Infatti la loro reale applicabilità dovrà essere valutata nei singoli casi, accertando altresì la possibilità di disporre di tecniche alternative parimenti efficaci.

Per l'individuazione delle MTD applicate ed applicabili in un singolo impianto si deve necessariamente effettuare una valutazione complessiva dell'insediamento produttivo.

La valutazione, effettuata dall'azienda, deve essere finalizzata alla definizione dei processi condotti nel sito produttivo e delle conseguenti prestazioni ambientali.

Al tal fine dovranno essere individuate ed analizzate le differenti fasi produttive, i macchinari installati e le materie prime impiegate, in funzione della determinazione delle emissioni prodotte e delle tecniche applicabili nell'ambito di un approccio integrato.

Le M.T.D. identificate nei documenti tecnici del settore siderurgico (BRef) potranno essere opportunamente vagliate e confrontate con altre tecniche alternative, eventualmente già applicate nello stabilimento, in ogni caso valutandone l'applicabilità tecnica ed economica nella realtà specifica e verificando la coerenza con i principi generali che stanno alla base del concetto di Migliori Tecniche Disponibili (allegato III della direttiva 2010/75/UE), ripresi nella seguente scheda.

Criteria per la determinazione delle migliori tecniche disponibili

(ALLEGATO III della DIRETTIVA 2010/75/UE)

1. Impiego di tecniche a scarsa produzione di rifiuti;
2. Impiego di sostanze meno pericolose;
3. Sviluppo di tecniche per il ricupero e il riciclo delle sostanze emesse e usate nel processo, e, ove opportuno, dei rifiuti;
4. Processi, sistemi o metodi operativi comparabili, sperimentati con successo su scala industriale;
5. Progressi in campo tecnico e evoluzione delle conoscenze in campo scientifico;
6. Natura, effetti e volume delle emissioni in questione;
7. Date di messa in funzione delle installazioni nuove o esistenti;
8. Tempo necessario per utilizzare una migliore tecnica disponibile;
9. Consumo e natura delle materie prime, ivi compresa l'acqua, usate nel processo e efficienza energetica;
10. Necessità di prevenire o di ridurre al minimo l'impatto globale sull'ambiente delle emissioni e dei rischi;
11. Necessità di prevenire gli incidenti e di ridurre le conseguenze per l'ambiente;
12. Informazioni pubblicate da organizzazioni internazionali pubbliche.

Nel caso di impianti già in esercizio l'applicabilità della MTD è poi condizionata alla compatibilità tecnica con le strutture esistenti, alla disponibilità di spazio ed alla qualità richiesta dal prodotto.

La verifica della compatibilità tecnica ed economica è una fase particolarmente critica, in quanto riassume tutte le specificità dell'impianto produttivo a cui ci si riferisce e pertanto informazioni necessarie devono essere trovate all'interno dell'impianto stesso.

L'acciaio può essere arte



L'acciaio è arte



*Ron Arad
Roddy Giacosa*



Dusan Dzamonja scultura in corten
Park skulptura Dušana Džamonje
Valkanela Vrsar

*Lorenzo Quinn
La dolce vita, London, Park Lane*



L'acciaio è architettura

*Tour Eiffel
Paris*



*Atomium
Bruxelles*