

LA FABBRICAZIONE DELL'ACCIAIO AL FORNO ELETTRICO

La scoperta dell'arco che scocca fra due elettrodi di carbonio risale al 1800 per opera di H.Davy ed il primo tentativo di fondere il ferro mediante l'impiego di calore, che l'arco irradia ad altissima temperatura fu operato da Siemens nel 1878. Ma nei vent'anni che seguirono l'elettro-siderurgia ebbe ben pochi sviluppi, dato che i tempi non erano ancora maturi e che l'energia disponibile era limitata ed il suo costo molto alto. Agli inizi del secolo, Héroult in Francia, Stassano in Italia, Kjellin in Svezia, idearono e costruirono tre diversi tipi di forni elettrici per produrre acciaio su scala industriale. Mentre il forno di Héroult rappresenta il primo esemplare di forno ad arco diretto, nel quale anche la carica è attraversata dalla corrente dell'arco, quello di Stassano fu il prototipo dei forni ad arco indiretto o radiante ed il Kjellin di quelli ad induzione.

La metallurgia della fabbricazione dell'acciaio al forno elettrico ha avuto sviluppi più lenti rispetto al forno stesso. Le doti di flessibilità metallurgica di questo forno furono comprese ed utilizzate a pieno solo in un secondo tempo; in origine il forno elettrico fu considerato solo sotto il suo aspetto di forno fusorio. Le possibilità metallurgiche del forno elettrico dipendono da due fatti fondamentali: 1. possibilità di controllare in una certa misura il potenziale ossigeno nel sistema metallurgico, potendosi realizzare anche condizioni di scoria moderatamente riducenti nei confronti del bagno metallico; 2. flessibilità di carattere termico, che consente all'operatore di dosare nel modo più opportuno la somministrazione del calore, in relazione alle esigenze metallurgiche del processo.

Le doti di flessibilità metallurgica fanno del forno elettrico uno strumento praticamente insostituibile nel campo della produzione degli acciai legati, speciali e di alta qualità. La produzione di acciai alto legati, contenenti notevoli percentuali di elementi di lega ossidabili, viene praticamente svolta solo in questo tipo di forno per la possibilità di controllo di tipo chimico-fisico sul livello di ossidazione delle scorie che esso offre. Tale controllo rende inoltre possibile ottenere una buona desolfurazione dell'acciaio ed il contenimento delle inclusioni non metalliche, sia con riguardo agli ossidi che ai solfuri.

Il forno elettrico possiede inoltre notevole flessibilità di carattere impiantistico, potendosi costruire unità di una vasta gamma di capacità (da 0,5-1 t sino a 200 t ed oltre, per i forni del tipo ad arco). I costi di esercizio per la produzione della tonnellata d'acciaio non crescono molto nel passare dalle unità più piccole alle più grandi.

Un aspetto importante, che in molte circostanze ha frenato e limitato lo sviluppo del forno elettrico, è il costo dell'energia, che incide sensibilmente sul costo totale di fabbricazione dell'acciaio. Per quanto riguarda le materie prime che esso impiega, essendo essenzialmente un forno fusorio adatto a trattare una carica solida, è svincolato dall'impiego di carica liquida e quindi idoneo ad essere adottato fuori dell'ambito dello stabilimento siderurgico a ciclo integrale. Lavorando principalmente rottami di ferro è avvantaggiato in quelle aree a forte concentrazione industriale, ove non sia presente la siderurgia integrale e ove vi sia contemporaneamente produzione di rottami ed un vicino ampio mercato utilizzatore dell'acciaio.

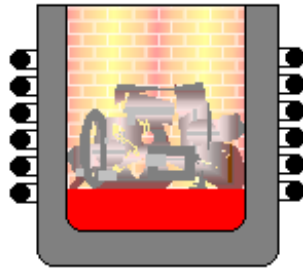
Altri fattori che hanno fornito impulso allo sviluppo di questo tipo di forno sono i seguenti: 1. possibilità di realizzare impianti di capacità produttiva relativamente modesta e con immobilizzi contenuti (anche in senso relativo, ossia rapportati alla capacità produttiva); 2. possibilità di costruzione di forni ad arco di grandi dimensioni (superiore alle 100 t), alimentati da potenti trasformatori, con grande capacità fusoria, tempi di colata ridotti e grande capacità produttiva.

Forni elettrici fusori

L'energia elettrica può essere utilizzata in vari modi per produrre calore a temperatura elevata. Escludendo quelle tecniche di trasformazione della energia elettrica in termica, che non possono essere convenientemente adottate alle alte temperature necessarie alla produzione di acciai

o, si hanno le seguenti possibilità.

1. Forni a resistenza elettrica, in cui la corrente passa attraverso il materiale da fondere. E' questo il caso dei forni a induzione, nei quali l'energia elettrica è trasformata in calore direttamente all'interno della carica, per resistenza.



forno elettrico ad induzione

2. Forni ad arco indiretto, nei quali il bagno metallico è riscaldato per irraggiamento da parte di un arco, che si sviluppa fra gli elettrodi al disopra di esso. Il bagno non è percorso da corrente.

3. Forni ad arco diretto, nei quali la corrente dell'arco passa attraverso il bagno metallico. In questi forni gli archi scoccano fra elettrodi e bagno ed il circuito elettrico secondario si chiude nel bagno stesso. Per l'alta conducibilità elettrica della carica, la trasformazione dell'energia elettrica in termica avviene per la massima parte nell'arco ed il calore è trasmesso per irraggiamento al bagno; il contributo fornito dalla resistenza del bagno è trascurabile.

4. Forni ad arco resistenza, uguali ai precedenti; nei quali però, per le caratteristiche di bassa conducibilità elettrica della carica trattata, una aliquota importante di energia viene



trasformata in calore per resistenza. Questi forni sono utilizzati nei processi di riduzione, a elettrodi immersi nella carica.

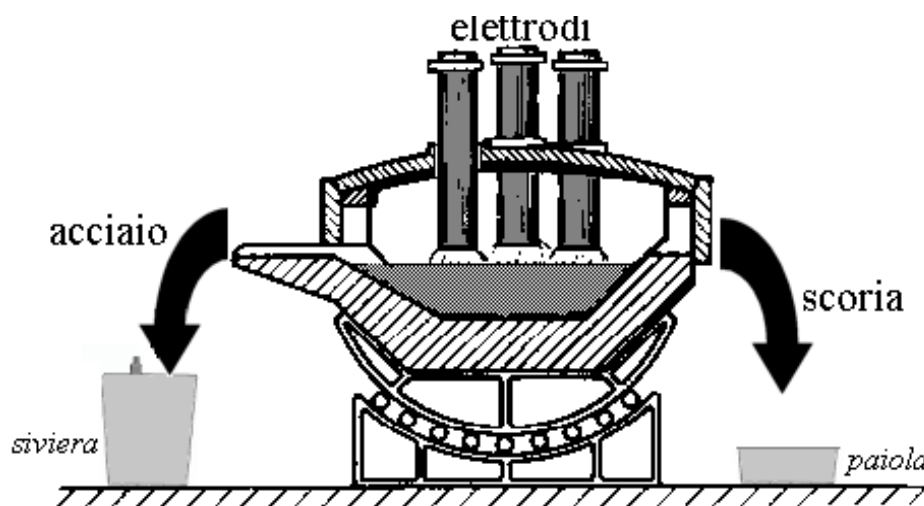
Forni a induzione- I forni a induzione sono costituiti da un avvolgimento primario, che viene alimentato dalla rete, e da un circuito secondario, in cui avviene la trasformazione dell'energia elettrica in calore, per effetto di resistenza alle correnti indotte. Il circuito secondario è in sostanza costituito da una sola spira in corto circuito, formata dalla stessa carica metallica da fondere o dal metallo fuso. L'energia è trasmessa dal primario al secondario per induzione elettromagnetica. A seconda di come è realizzato il concatenamento del flusso magnetico inducente con la carica metallica, si hanno i due casi dei forni a bassa ed alta frequenza. I forni a bassa frequenza (frequenza di rete) debbono essere muniti di nucleo di ferro lamellare che realizzi l'accoppiamento magnetico primario-secondario. I forni a frequenza media ed alta non hanno nucleo. La carica metallica viene attraversata dal flusso magnetico alternato, generato dalla corrente che percorre l'avvolgimento primario; questo è costituito da una bobina avvolta direttamente attorno al crogiolo. La bassa permeabilità magnetica di tale circuito, che si chiude attraverso l'aria all'esterno del crogiolo, viene compensata con l'impiego dell'alta frequenza. La forza elettromotrice indotta nella carica metallica è proporzionale alla frequenza ed al flusso magnetico concatenato.

I forni a induzione sono largamente impiegati nella produzione delle leghe non ferrose e delle ghise speciali (in alternativa al cubilotto). Quelli ad alta frequenza sono usati anche per la fabbricazione di acciai speciali ad alto tenore di lega. La capacità dei forni ad alta frequenza per acciaio è in genere limitata a massimi di 3 t; l'intervallo delle capacità più comuni va dai 100 kg ai 1000 kg. Il consumo di energia per la fusione si aggira sui 650 kWh a tonnellata di acciaio a fronte di un bisogno teorico di 371 kWh per fondere e portare a 1600 °C 1 tonnellata di ferro (vedi tabella sui dati termodinamici del ferro nelle pagine finali). Esistono forni a rivestimento refrattario sia acido che basico.

La tecnica metallurgica generalmente adottata è quella della rifusione, che risulta particolarmente semplice. La carica deve essere selezionata e dosata con cura per ottenere la composizione desiderata per l'acciaio, con un minimo di aggiunte ulteriori (salvo piccole aggiunte finali di disossidanti).

Non si effettua mai nessun processo di affinazione nei forni a rivestimento acido, ma anche in quelli basici un'affinazione è svolta solo in casi particolari. Per questo motivo non si lavora con copertura di scoria sul metallo.

Le correnti indotte, che generano il calore, provocano anche intensi movimenti rotatori in seno al metallo liquido, che agevolano ed accelerano la fusione e che successivamente favoriscono l'omogeneità chimica e di temperatura dell'acciaio.



Nei forni a induzione è così possibile mantenere la temperatura finale dell'acciaio entro limiti di controllo molto stretti, dell'ordine di $\pm 3^{\circ}\text{C}$, come è richiesto dai sistemi di colata continua.

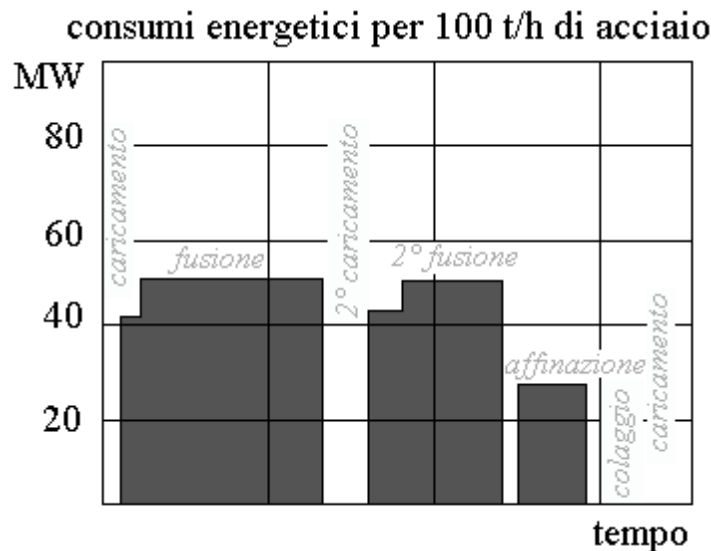
È facile attrezzare i forni a induzione per lavorare sottovuoto o in speciali atmosfere protettive, includendo tutto l'insieme del forno e della lingottiera in autoclave, nella quale può essere praticato il vuoto oppure mantenuta l'atmosfera protettiva. Si conduce così in assenza d'aria la fusione e la successiva colata dell'acciaio, che viene versato direttamente nella lingottiera predisposta sotto al forno. I forni ad induzione sotto vuoto o in atmosfera protettiva sono largamente impiegati nella fabbricazione di acciai ad altissimo tenore di lega e di leghe speciali e sono indispensabili se queste contengono in elevata percentuale elementi quali il titanio.

Forni elettrici ad arco (EAF, Electric Arc Furnace) - I forni ad arco indiretto (o radiante) trovano impiego limitato alle piccole capacità ed alla fabbricazione di prodotti speciali, nel campo delle ghise e dei metalli e leghe non ferrose, per lo più in piccole fonderie con limitati programmi di produzione. Sono generalmente forni monofasi, con crogiolo cilindrico ad asse orizzontale, con la possibilità di realizzare un movimento oscillante attorno a tale asse. Essendo monofasi sono muniti di una coppia di elettrodi, di carbonio o di grafite, disposti longitudinalmente lungo l'asse del crogiolo.

Forni elettrici per acciaieria di larghissimo impiego sono invece quelli ad arco diretto (tipo Héroult). A questo tipo di forno ci si riferisce nella seguente trattazione con il termine "forni elettrici ad arco" o "forni ad arco" .

I forni elettrici ad arco sono costituiti da un crogiolo cilindrico ad asse verticale, composto di un fasciame in lamiera internamente rivestito in refrattario. Il crogiolo è ricoperto da una volta, che nella versione dei forni moderni è mobile, consentendo così di scoprire completamente il crogiolo e di caricare rapidamente il forno dall'alto mediante carroponte e ceste di carica. Vi sono una o due porte, disposte lateralmente nello involucro del crogiolo, che consentono l'accesso al suo interno per tutte le operazioni inerenti alla condotta del forno e della colata. Il crogiolo è oscillante attorno ad un asse orizzontale; esso quindi appoggia su culle e guide a settore circolare ed il movimento è realizzato mediante servomeccanismi di tipo elettromeccanico o idraulico. Il basculamento del crogiolo serve, oltre che per spillare la colata e versarla in siviera (attraverso un foro ed un canale di colata), anche per agevolare le operazioni di scorifica, che sono effettuate attraverso le porte.

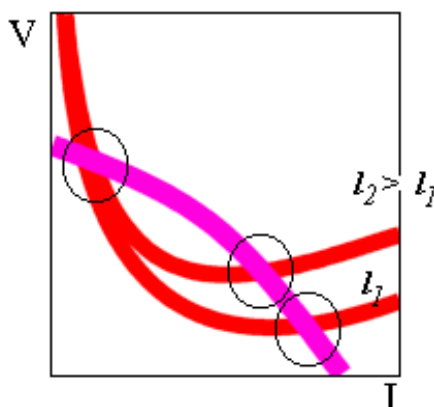
I forni ad arco sono normalmente di tipo trifase; sono quindi muniti di tre elettrodi di



grafite, che penetrano entro il crogiolo attraverso tre aperture di passaggio circolari previste nella volta disposte secondo i tre vertici di un triangolo equilatero. Gli elettrodi sono serrati da morse conduttrici e sostenuti da equipaggiamenti mobili che scorrono su guide verticali (le cosiddette colonne porta elettrodi). Le morse portacorrente sono collegate elettricamente alle sbarre del secondario del trasformatore, mediante conduttori. Data la mobilità di tutto l'assieme elettrodo-morsa-colonna porta elettrodo il tratto terminale dei conduttori sino al trasformatore è realizzato con cavi flessibili in rame; il tratto successivo, sino alla morsa può essere realizzato mediante sbarre o tubi in rame con raffreddamento ad acqua, sostenuti dai porta elettrodi:

L'arco scocca fra l'estremità di ciascuno dei tre elettrodi e la carica metallica; questa è percorsa dalla corrente ed il circuito secondario si chiude attraverso la carica. L'arco elettrico è un plasma ad alta densità generato per ionizzazione parziale dell'aria e di vapori metallici provenienti dalla carica; il calore è trasmesso alla carica principalmente per irraggiamento. Caratteristica dell'arco elettrico è quella di convertire in calore una grande quantità di energia confinata entro un limitato volume, nel quale quindi si raggiungono temperature elevate (dell'ordine di 10 000°C). L'energia elettrica impegnata nel sostenimento dell'arco produce la ionizzazione del mezzo, ed un aumento della temperatura e della conducibilità del mezzo stesso. Se l'arco si allunga occorre aumentare la tensione applicata per sostenerlo ed evitarne lo spegnimento; se si accorcia aumenta la densità di carica, la temperatura e la conducibilità così da avere un maggior passaggio di corrente ed una maggiore erogazione di calore. Nell'alimentazione in corrente alternata si ha accensione e spegnimento per ogni ciclo, possibili per l'elevata temperatura mantenuta dall'elettrodo.

Il sistema di regolazione agisce sulla posizione delle colonne portaelettrodo, mediante servomeccanismi di tipo elettromeccanico idraulico. La tensione d'arco, a parità di corrente, è funzione della distanza elettrodo-carica metallica e cresce con essa. Quindi per una data condizione di funzionamento (espressa in termini di potenza, voltampere), si realizza una condizione di arco stabile regolando la distanza elettrodo-carica, in relazione alla curva caratteristica di tensione al secondario del trasformatore. Vi sono oggi diversi sistemi di regolazione molti dei quali di grande efficacia per prontezza e sensibilità e stabilità. I diversi sistemi ad impedenza costante si basano sulle variazioni di tensione e di corrente, connesse con le irregolarità di assorbimento di energia da parte dell'arco. Tali variazioni si trasformano in impulsi nel sistema di regolazione, che determinano un sollevamento dell'elettrodo nel caso di aumento nell'assorbimento di energia e viceversa un suo abbassamento nel caso di diminuzione. In tal modo la regolazione mantiene praticamente costante la lunghezza d'arco, che risulta funzione principalmente della tensione di lavoro.



Il forno è alimentato da un trasformatore, il cui secondario deve poter fornire l'energia a varie tensioni; pertanto è sempre munito di variatore di tensione. Variando la tensione (e quindi anche la lunghezza dell'arco) e per ogni tensione variando la corrente, si regola la potenza e l'erogazione di calore a seconda delle esigenze della fusione e dell'affinazione. Tali possibilità di regolazione, se ben utilizzate, consentono all'operatore di effettuare aggiustaggi anche di grande finezza nella condotta della colata. Il trasformatore deve essere installato il più vicino possibile al forno, per contenere al massimo le perdite elettriche fra le barre del suo secondario e l'elettrodo. La tensione di alimentazione dei forni ad arco è dell'ordine di centinaia di Volt, con tendenza nei forni di elevata potenza fusoria a superare i 1000 V. Un importante parametro di proporzionamento del forno è la scelta della potenza del trasformatore in relazione alle dimensioni ed alla capacità del forno: potenza specifica del trasformatore (espressa, ad esempio, in kVA/t di carica) è il principale parametro caratterizzante la potenza fusoria del forno.

Refrattari - La grandissima maggioranza dei forni elettrici ad arco è a rivestimento basico, benché per qualche particolare applicazione siano utilizzati forni a rivestimento acido, limitatamente ad unità di piccola capacità.

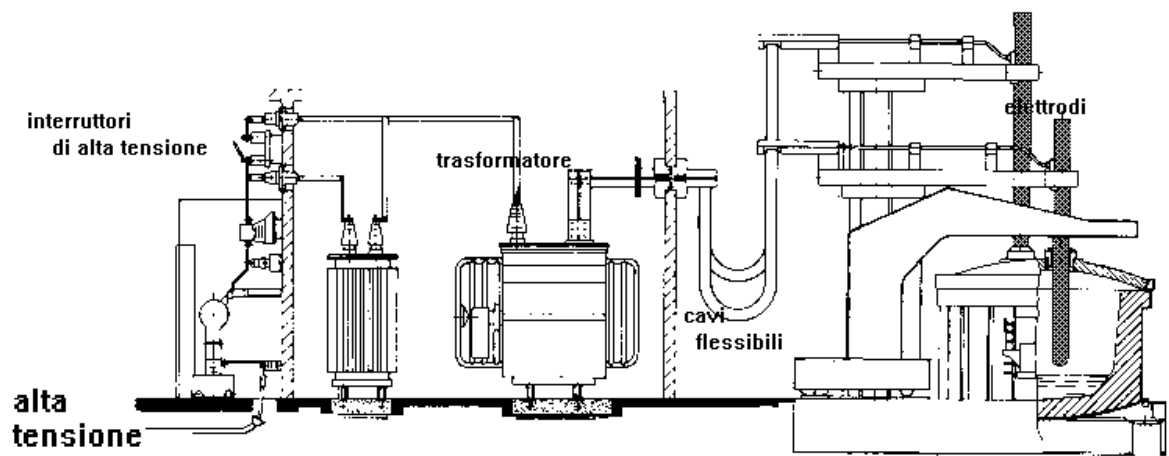
La suola del forno è generalmente costituita di due parti: rivestimento di sicurezza, sul quale viene costruita la suola vera e propria. Il rivestimento di sicurezza è in mattoni di magnesite colata, disposti nella parte più bassa e su più corsi (generalmente due). La suola vera e propria è costituita da una pigiata. Le acciaierie europee (in particolare quelle italiane) impiegano la pigiata in dolomite cotta, in granulometria fine, che sinterizza a contatto con l'acciaio liquido nel corso delle prime colate.

L'altro refrattario largamente usato per la suola dei forni basici è la magnesite. La magnesite impiegata a tale scopo è periclasio ad alto tenore di magnesia, con limitati tenori di impurezze, che agiscono da fondenti. La suola in pigiata di magnesite è particolarmente diffusa negli Stati Uniti, impiegandosi catrame anidro come legante. Per il rivestimento delle pareti, compresa la zona esposta all'attacco delle scorie, le soluzioni più comunemente adottate sono

due: blocchi di dolomite prefabbricati e mattoni a base di magnesia. La prima soluzione è più largamente diffusa in Europa. Si costruisce il rivestimento con pochi blocchi prefabbricati, di grandi dimensioni, in dolomite legata con catrame e formata ad elevata pressione, con armature interne di ferro. L'altro sistema costruttivo per le pareti del crogiolo è quello in mattoni di magnesio-cromite chimicamente legati, eventualmente scatolati con lamierino di ferro in corrispondenza ai giunti. Va estendendosi l'impiego dei nuovi tipi di mattoni ad alta densità, in magnesite naturale a basso tenore in ossido di ferro, cotta ad elevata temperatura; dei tipi in magnesio-cromite direttamente legati; dei tipi in magnesite impregnati con catrame (particolarmente nella zona esposta all'attacco scoria).

Occorre aver presente che la volta del forno è severamente sollecitata in quanto esposta all'irradiazione diretta da parte dell'arco specialmente verso la fine della fusione; inoltre il materiale che la costituisce deve avere buone caratteristiche di resistenza agli sbalzi termici cui essa è sottoposta durante le operazioni di carica del forno, nell'intervallo fra colate successive e nel caso di un funzionamento intermittente del forno. Oggi nella costruzione della volta si fa sempre più ricorso a refrattari alluminosi (70-90% Al_2O_3); i mattoni sono disposti in anelli concentrici. Nella zona centrale degli alveoli, attraverso i quali penetrano gli elettrodi e che è la più sollecitata, si ricorre a pigiate di materiali ad elevata percentuale di allumina.

Nei moderni forni di elevata potenza fusoria le sollecitazioni e le azioni distruttive esercitate sui refrattari vanno grandemente crescendo. A tale situazione si è fatto fronte non solo con l'impiego di refrattari in grado di meglio resistere a tali più gravose condizioni di impiego, ma anche estendendo sempre più l'impiego di corpi raffreddanti a circolazione d'acqua (pannelli di raffreddamento nelle zone più sollecitate della volta e delle pareti del forno). Le maggiori perdite termiche che tale tecnica comporta, vengono compensate dall'accorciamento della durata di colata, ottenuta con l'aumento della potenza fusoria.



Caratteristiche costruttive e di utenza elettrica - Nel proporzionamento del trasformatore alla capacità di carica del forno, che ne determina le caratteristiche di potenza fusoria, si è assistito in

questi anni ad un notevole incremento di tale potenza. Essa può essere espressa come potenza elettrica totale specifica, ossia riferita alla tonnellata di carica (kVA/t). In relazione a questa tendenza si hanno per i forni di maggior dimensione (100-150 t) trasformatori da 40-60 MVA, con tendenza a spingersi oltre i 100 MVA per forni ancor più grandi (150-200).

Il forno elettrico, anche quando è di dimensioni relativamente modeste, è sempre un grosso utente di energia elettrica e ciò pone alcuni problemi per il suo inserimento nelle reti di alimentazione. La utilizzazione dell'energia avviene con un fattore di potenza abbastanza elevato. Ma a fronte di tale caratteristica di utenza abbastanza favorevole c'è l'inconveniente della discontinuità del prelievo (frequenti disinserzioni) e delle forti punte di assorbimento istantaneo, che si verificano particolarmente all'inizio della fusione per i frequenti cortocircuiti dovuti all'instabilità dell'arco ed al franamento del rottame. Ciò può determinare disturbi nelle reti quali fluttuazioni di tensione (*flicker*). L'impiego delle forti potenze nel periodo di fusione tende a peggiorare la utilizzazione dell'impianto in relazione al costo del trasformatore, mentre l'elevato impegno di potenza determina un maggior costo per l'energia. Le esigenze metallurgiche della affinazione richiedono un periodo di tempo variabile a seconda delle qualità dell'acciaio prodotto, con esercizio del trasformatore a carico ridotto per il limitato fabbisogno termico in tale fase.

Vi è quindi un notevole interesse economico all'accelerazione dei processi metallurgici dell'affinazione, particolarmente quando il forno è utilizzato per la produzione di acciai al carbonio di qualità comune (affinazione veloce). Sotto questo aspetto il forno elettrico di tipo moderno ad elevata potenza fusoria rende molto interessante l'adozione di tecniche di affinazione e messa a punto dell'acciaio liquido fuori del forno: trattamenti sotto vuoto, trattamento per gorgogliamento con gas inerte, ecc. Queste possono consentire un'accelerazione notevole dell'affinazione in forno, senza pregiudizio per la qualità dell'acciaio prodotto, consentendo una migliore utilizzazione della potenza elettrica.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati forni elettrici ad arco che lavorano in corrente continua, costituiti da un solo elettrodo di grafite che scende dalla volta mentre il circuito si chiude attraverso il bagno metallico sul secondo elettrodo che è costituito dalla suola conduttrice. I vantaggi della corrente continua con un solo elettrodo consistono in:

- maggiore stabilità dell'arco, con conseguente minore consumo dell'elettrodo. L'arco scocca con un'angolazione fino a 30° sul bagno fuso e tende a ruotare continuamente lungo l'asse verticale per effetto del campo magnetico.
- migliore rendimento nel trasferimento di potenza al bagno, connesso alla miglior localizzazione della "zona calda" centrale rispetto alle tre zone caratteristiche del sistema trifase,
- riduzione dei disturbi in rete.

La presenza di un solo elettrodo permette di semplificare il disegno della volta del forno, del sistema di brandeggio e dell'impianto elettrico (con l'eccezione del sistema di raddrizzamento della corrente da alternata a continua). Si può controllare la posizione dell'arco ricorrendo a più elettrodi immersi nella suola alimentati in modo diseguale, in modo da regolare l'omogeneità della temperatura nel forno ed evitare zone fredde.

Gli elettrodi - Gli elettrodi portano la corrente all'interno del forno ed alla loro estremità inferiore sono sede dell'arco: essi sono soggetti a notevoli sollecitazioni termiche e meccaniche e ad azioni ossidative a temperature elevata. Debbono pertanto soddisfare ai seguenti principali requisiti:

1. non fusibilità, resistenza alla sublimazione ed all'ossidazione ad alta temperatura;
2. buona conducibilità elettrica e termica;
3. discrete caratteristiche di resistenza meccanica a caldo;
4. basso coefficiente di dilatazione termica e resistenza agli sbalzi di temperatura, anche in condizioni di shock termico.

A tali requisiti rispondono bene solo gli elettrodi di grafite. Questi vengono prodotti a partire da vari tipi di materiali carboniosi, con alto tenore di carbonio fisso, basso tenore di

materie volatili, basso contenuto di ceneri: antraciti di alta qualità, coke metallurgico, coke di petrolio. S'impiega pece di catrame quale legante. Dopo una calcinazione delle materie prime a temperatura elevata e preparazione granulometrica, si preparano gli impasti, si formano gli elettrodi e si procede alla loro cottura. Nel caso degli elettrodi di grafite viene effettuata una cottura di grafitizzazione, prolungata ed a temperatura molto elevata (attorno ai 2750°C), con riscaldamento elettrico per resistenza. L'attuale consumo di elettrodi di grafite è dell'ordine dei 2.2 kg per tonnellata di acciaio prodotto.

L'acciaieria elettrica

Le disposizioni d'impianto di un'acciaieria elettrica con forni ad arco sono svariate, data la molteplicità delle utilizzazioni di questo tipo di forno, che condizionano le soluzioni da adottare. Il forno ad arco è il più largamente utilizzato per la produzione di getti e di fucinati; viene impiegato per lingotti in acciaio di qualità, speciali e legati, ed anche per produzioni di massa di acciai al carbonio. Esso consente con facilità ed aggravio di costi limitato, di raggiungere le temperature di colata più alte richieste dalla colata continua nei confronti della colata tradizionale dei lingotti; inoltre la gamma delle capacità intermedie dei forni (dalle 30 alle 70 t circa) ed il loro ritmo di colata offre buone possibilità di sincronizzazione dei forni con la macchina di colata continua, soprattutto per le doti di flessibilità proprie del forno elettrico.

Una tipica disposizione impiantistica di acciaieria elettrica destinata alla fabbricazione di lingotti o servita da colata continua, comprende i due capannoni affiancati: la campata dei forni e quella di colata. I forni, preferibilmente tutti della medesima capacità, possono andare da 1-2 sino a 4, con disposizione in linea. Alle spalle dei forni sono ubicati il parco dei rottami ed i depositi delle materie prime. Il rottame è trasferito alla carica dei forni mediante ceste di carica, che vengono preparate nella zona dei rottami e mosse trasversalmente alla campata dei forni su carrelli semoventi. I forni sono serviti da carroponti di carica. Una disposizione in linea dei forni ed un afflusso della carica di questo tipo svincola nel modo migliore ogni forno da interferenze con le operazioni di quelle adiacenti. Il preriscaldamento del rottame da 300 a 800°C permette di ridurre il consumo di energia elettrica e di tagliare i tempi di fusione del rottame.

I forni elettrici, a differenza dei convertitori per i quali è prevista la rotazione completa sui perni orizzontali, possono essere installati con il piano di lavoro del forno a livello di campagna; le siviere di colata e le paiole destinate a ricevere le scorie vengono allora disposte in fossa.

Nel capannone dei forni vengono collocate le cabine elettriche, comprendenti i trasformatori di alimentazione di ciascun forno, le stazioni delle pompe per i servizi di comando idraulico ed oleodinamico e quelle dei compressori d'aria per gli interruttori di potenza e di manovra dei trasformatori, la cabina dei servizi elettrici generali.

La condotta della colata al forno elettrico ad arco

Nel processo di fabbricazione dell'acciaio al forno ad arco si possono distinguere quattro operazioni principali: il caricamento del forno, la fusione del materiale caricato, l'affinazione per il raggiungimento della composizione chimica e della temperatura prescritte per il tipo di acciaio da produrre, il colaggio. Le prime due operazioni, che incidono fortemente sulla produttività del forno, sono da condurre il più velocemente possibile e limitazioni a tale velocità sono poste solo dalle condizioni dell'impianto (sistema di carica adottato, potenza elettrica disponibile) e dal tipo di materiale di carica (ad esempio densità del rottame). La durata dell'affinazione è invece condizionata dal tipo di acciaio da produrre e dai requisiti qualitativi posti in relazione alle materie prime impiegate. Il travaso dell'acciaio elaborato in siviera è l'ultima operazione, condizionata dai tempi tecnici dell'impianto; si può schematicamente assegnare a questa fase quella di preparazione del forno per il trattamento successivo. Per la prima e l'ultima operazione si può considerare un tempo di 15-20 minuti ciascuna.

Con riferimento ai materiali di carica si hanno due tipi di esercizio del forno elettrico con carica solida: processo ghisa-rottame e carbone-rottame. Le differenze fra i due sono abbastanza

trascurabili, poiché il quantitativo di ghisa in carica in genere non supera quello minimo necessario per la carburazione, cioè per raggiungere a fine fusione il tenore di carbonio più conveniente per la successiva condotta dell'affinazione: la ghisa in carica difficilmente supera il 10-15% della carica totale. Il tipo di processo più diffuso è quello carbone-rottame, dato che questa carica risulta in molte circostanze la più economica. Per carburare il metallo si impiega per lo più coke o antracite.

Un materiale di carica interessante per l'impiego nei forni elettrici sono i preridotti di ferro, sotto forma di spugna, pellets o anche di bricchette. Vi è oggi qualche acciaieria elettrica che impiega preridotti su piena scala industriale, anche per la maggiore pulizia della materia prima in termini di elementi non desiderati.

Subito dopo la carica ha inizio la fusione. Il trasformatore del forno durante tale periodo viene utilizzato alla massima potenza per la quale è stato previsto. Nei primi minuti, quando gli elettrodi lavorano ancora in posizione alta in prossimità della volta e l'arco è fortemente instabile (per la bassa temperatura e l'insufficiente ionizzazione) si inizia la fusione con prese di tensione alquanto ridotte, ma via via che gli elettrodi scendono, perforando la carica e l'arco risulta schermato dalla massa della carica, si lavora alla massima tensione secondaria e quindi con arco lungo.



Le operazioni di variazione della tensione durante la condotta della fusione sono molto agevolate nei moderni impianti muniti di trasformatori con variatore di tensione sotto carico, non essendo in tal caso necessario interrompere l'erogazione di energia al forno. Difficilmente tutta la carica di rottame può essere contenuta nel crogiolo, per la sua eccessiva voluminosità: quindi non appena sia fusa la carica della prima cesta, si effettua una seconda carica, e così via fino al completamento. Le operazioni di carica nei forni a volta mobile e carica effettuata con ceste a fondo apribile, richiedono interruzioni di soli pochi minuti, con ridotta dispersione di calore, dopodiché si riprende la fusione.

Quando la fusione è completata ha inizio l'affinazione. Questa richiede, nel caso del processo basico, la formazione di scorie di composizione chimica e viscosità controllate, con aggiunte di calcare, calce e spatofluore; si conduce contemporaneamente l'ossidazione del carbonio, con aggiunte di minerale di ferro o scaglie di laminazione sino a giungere al tenore di carbonio finale desiderato per l'arresto. Generalmente le scorie di fusione vengono eliminate con una scorifica prima di iniziare l'affinazione ossidante. Qualora si faccia uso di ossigeno gassoso, si procede al soffiaggio per una veloce decarburazione. Nel corso dell'affinazione ossidante si ha come obiettivo, oltre l'eliminazione del carbonio ed una certa desolfurazione, la defosforazione.

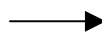
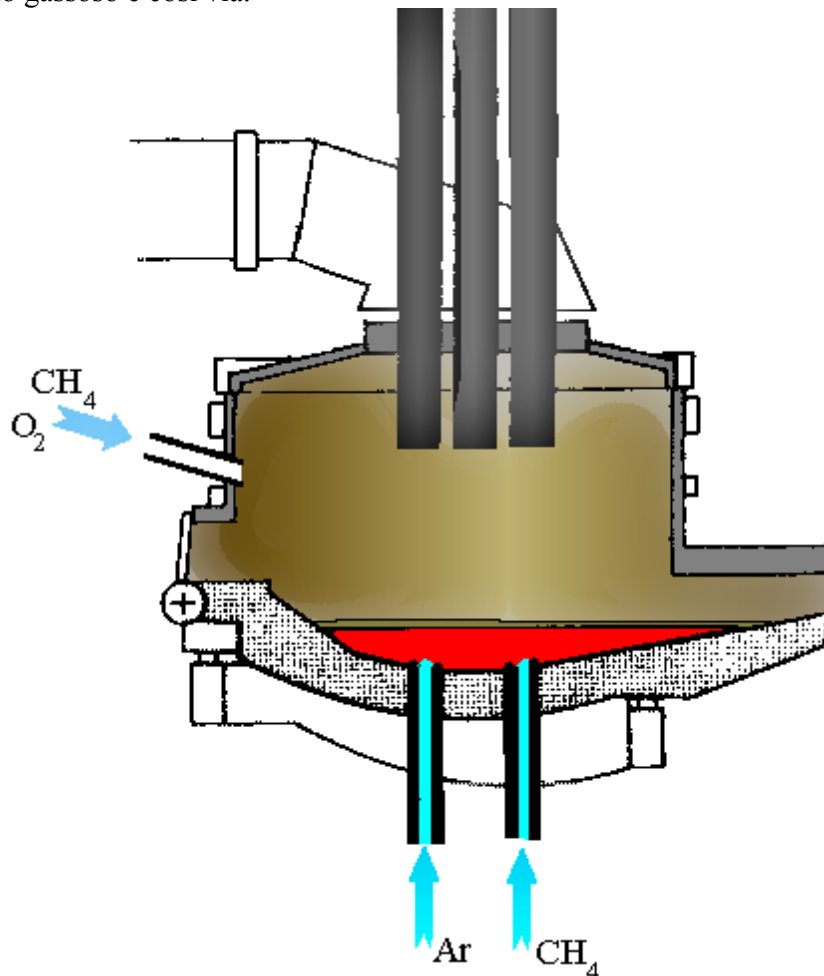
La ripartizione metallo-scoria dello zolfo durante l'affinazione ossidante al forno elettrico, si svolge solo limitatamente, essendo le condizioni ossidanti.

Portato il carbonio al livello desiderato per l'acciaio da fabbricare, si arresta la decarburazione, eliminando con una scorifica le scorie ossidanti, rinnovandole con la aggiunta di calce, iniziando eventualmente la disossidazione in forno (ad esempio con alluminio o lega FeSiMn). Nel caso di acciai semplici al carbonio o basso legati e comunque sempre che non sia prevista una successiva affinazione riducente, si procede subito alla colata in siviera, facendo le aggiunte correttive e disossidanti finali (che generalmente vengono ripartite fra il forno e la siviera).

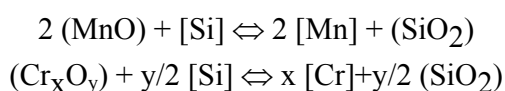
Nel caso della lavorazione "a doppia scoria", tipica del forno elettrico, si fa seguire alla affinazione ossidante una scorifica completa. Si formano nuove scorie con l'aggiunta di calce; queste risultano altamente basiche e vanno fluidificate con spatofluore. Quindi la scoria viene disossidata con aggiunta di riducenti finemente macinati, quali: ferrosilicio, siliciuro di calcio, carburo di silicio, coke e antracite; eventualmente si può fare uso anche di alluminio in gocce. I disossidanti svolgono la riduzione dell'ossido di ferro degli altri ossidi metallici presenti nelle scorie, ne abbassano quindi il potere ossidante, effettuano una disossidazione parziale del metallo per ripartizione metallo-scoria dell'ossigeno. E' possibile nella fase riducente desolfurare efficacemente il metallo per l'alto rapporto di ripartizione dello zolfo che si può raggiungere; è invece impossibile lo svolgimento di qualsiasi defosforazione e spesso si verifica una certa risalita del fosforo nell'acciaio.

Per ottenere i migliori risultati metallurgici dall'affinazione riducente occorrerebbe una permanenza molto lunga (dell'ordine di ore), con aggravii di vario tipo e con l'inconveniente di una sensibile risalita del contenuto di gas dell'acciaio (idrogeno).

Si preferisce oggi accelerare l'affinazione, ricorrendo alla messa a punto finale dell'acciaio in operazioni che avvengono fuori del forno (ad esempio in un impianto di trattamento sottovuoto), utilizzando per la desolfurazione le tecniche di insufflazione di polveri riducenti mediante veicolo gassoso e così via.



Il ricorso all'affinazione con scorie riducenti è indispensabile quando si debbono produrre acciai ad alto tenore in elementi ossidabili, quali il manganese ed il cromo. Le forti aggiunte di lega, che sono in questo caso necessarie, possono essere fatte solo in forno, dato che occorre fornire una notevole quantità di calore per la loro fusione ed evitare disomogeneità analitiche dell'acciaio nella siviera. Le aggiunte degli elementi di lega (ferro-manganese, ferro-cromo, ecc.) possono venire fatte in forno con una resa elevata in elementi ossidabili, quando si siano formate e si mantengono scorie riducenti a tenore in ossido di ferro molto basso. Per questo motivo, per la fabbricazione di acciai ad alto tenore di cromo, quali gli inossidabili, quelli per impieghi alle temperature elevate e tipi analoghi, o dell'acciaio austenitico al manganese, si impiega quasi esclusivamente il forno elettrico. In condizioni di scorie riducenti, e quindi in assenza di azioni ossidanti sul metallo, si stabiliscono equilibri di ossidoriduzione metallo-scoria del tipo dei seguenti, con riferimento al manganese e al cromo ed all'impiego di silicio quale riducente:



Per quanto concerne i disossidanti impiegati per la riduzione delle scorie, le scorie riducenti possono essere riportate a due tipi principali: scorie bianche non carburate e scorie riducenti carurate. Le scorie del primo tipo vengono formate impiegando quali riducenti principalmente silicio ed alluminio; il carbonio, o non viene impiegato affatto, oppure solo in quantità molto limitata. Scorie di questo tipo sono necessarie quando si debbano fabbricare acciai a tenore di carbonio basso (quali, ad esempio, alcuni tipi di acciai inossidabili). Aggiunte di carbonio rilevanti, anche se fatte con materiale finemente macinato in polvere ed aggiunto su scorie già formate, determinano inevitabilmente un passaggio di carbonio nell'acciaio, che in questi casi va in ogni modo evitato. Quando invece non vi sia un vincolo di questo tipo, ad esempio nella fabbricazione di acciai ad elevato tenore di carbonio, è preferibile il ricorso a scorie riducenti carurate, per le quali si fa uso prevalente del carbonio per la riduzione. Occorre in tal caso tener conto della risalita del contenuto di carbonio dell'acciaio per l'effetto ricarburante della lavorazione ed iniziare quindi l'affinazione riducente con una percentuale di carbonio nell'acciaio abbastanza bassa, cosicché alla fine non venga superato il limite massimo di prescrizione.

Vari tipi di condotta dell'affinazione al forno elettrico - Gli schemi generali di lavorazione qui esposti, possono subire numerose varianti, in relazione al tipo di acciaio da fabbricare, alle materie prime impiegate, a considerazioni di carattere qualitativo e metallurgico oppure di carattere economico. Si può tentare una classificazione delle più importanti di tali varianti, in relazione alle diverse principali operazioni dell'affinazione.

A. Con riguardo alla operazione di decarburazione si possono avere tre principali tipi di lavorazione:

A1. Lavorazione con ossidazione completa, nella quale la decarburazione viene spinta al disotto del minimo tenore di carbonio prescritto alla analisi finale (generalmente sino allo 0,10% circa). Dopo scorifica completa, si ricarburata fino al tenore di carbonio richiesto. Questo tipo di lavorazione è per lo più adottato per esigenze di defosforazione.

A2. Lavorazione con decarburazione parziale: partendo da adeguato tenore di carbonio a bagno fuso, si decarburata fino al tenore di carbonio prescritto per l'acciaio che si fabbrica, o meglio fino ad un carbonio inferiore a quello, tenendo debito conto dello effetto ricarburante delle aggiunte finali e della successiva eventuale affinazione riducente.

A3. Lavorazione senza decarburazione. Si pratica nella fabbricazione per rifusione di colate di acciaio legato (inossidabili, acciai al cromo in genere, acciaio austenitico al manganese). Si effettua la riduzione della scoria di fusione e si cola senza procedere a nessuna operazione di scorifica. La carica è sempre composta di rottami di acciaio legato dello stesso

tipo di quello da fabbricare. Questa lavorazione può comportare lo inconveniente di un contenuto di gas nell'acciaio piuttosto alto.

B. Con riguardo ai tipi e numero delle scorie impiegate, si hanno i principali casi seguenti:

B1. Lavorazione ad una sola scoria ossidante. E' la lavorazione più economica e veloce, la più largamente applicata alla fabbricazione degli acciai al carbonio e basso legati.

B2. Lavorazione a due scorie, la prima ossidante e la seconda riducente. E' la lavorazione caratteristica del forno elettrico, che abbiamo in precedenza descritta.

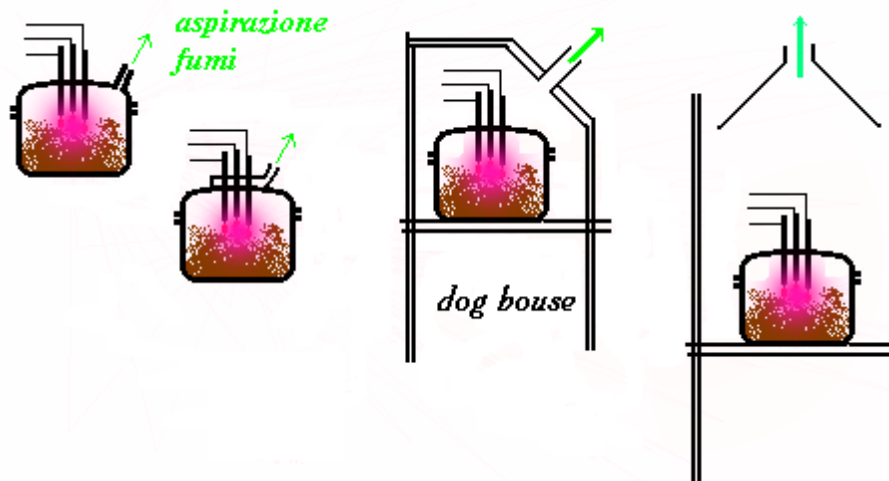
B3. Lavorazione con una sola scoria e due fasi di affinazione, la prima ossidante e la seconda riducente; si differenzia dalla precedente per il fatto che non si effettua nessuna scorifica. Viene adottata nella fabbricazione di acciai a medio ed alto tenore in elementi di lega ossidabili, principalmente al cromo, per rifusione di rottami di acciaio legato. Consente un buon recupero di elementi di lega, senza rinunciare ai vantaggi, anche qualitativi, che la lavorazione ossidante con ribollimento del carbonio offre (ad esempio basso contenuto di gas nell'acciaio). E' applicata in particolare nella fabbricazione di acciai a basso carbonio. Ricorrendo per la decarburazione all'impiego dell'ossigeno gassoso e facendo svolgere il processo a temperatura elevata, si limita il passaggio del cromo in fase scoria per ossidazione; con la successiva riduzione delle scorie si ottiene il suo ritorno nella fase metallo, resa alta e poche perdite.

B4. Lavorazione con una sola scoria riducente. E' propria delle colate di rifusione partendo da rottami ad alto tenore in elementi di lega (v. precedente punto A3).

C. In relazione al tipo di carica impiegato, in particolare alla sua composizione chimica, si possono avere i seguenti schemi di processo di fabbricazione, limitatamente al caso di acciai legati:

C1. Processo di fabbricazione sintetico, in cui la carica è composta di rottami di acciaio al carbonio e la composizione finale viene raggiunta mediante l'aggiunta degli elementi di lega necessari.

C2. Processo semisintetico, in cui la carica è in parte composta di rottami di acciaio legato, dello stesso tipo o di tipo analogo a quello da fabbricare. La composizione finale viene raggiunta mediante correzioni analitiche apportate con l'aggiunta degli elementi di lega.



C3. Processo di rifusione, in cui la carica è composta esclusivamente di rottami dello stesso tipo di quello da fabbricare. Le aggiunte finali di elementi di lega sono limitate alla necessità di piccole correzioni da apportare alla composizione chimica.

Aspetti energetici della condotta del forno ad arco

Il consumo di energia per la fabbricazione dell'acciaio al forno elettrico è un importante componente dei costi. Il fabbisogno termico per la colata, partendo da una carica solida di

rottami di ferro moderatamente carburata, presenta una limitata variabilità. Esso in pratica coincide con la quantità di calore necessaria alla fusione ed al surriscaldamento dell'acciaio, alla formazione e fusione delle scorie. A differenza dei processi di acciaieria che impiegano cariche con alte percentuali di ghisa, con una carica di rottame si ha un modesto apporto termico per reazioni di ossidazione (quali quelle del silicio del fosforo), né vi è apporto per entalpia dei materiali di carica (con riferimento alla temperatura ambiente). In relazione alla carica impiegata, che contiene silicio e fosforo in quantità limitata, il volume delle scorie di fusione è piccolo e poco variabile: dell'ordine del 5% rispetto al metallo.

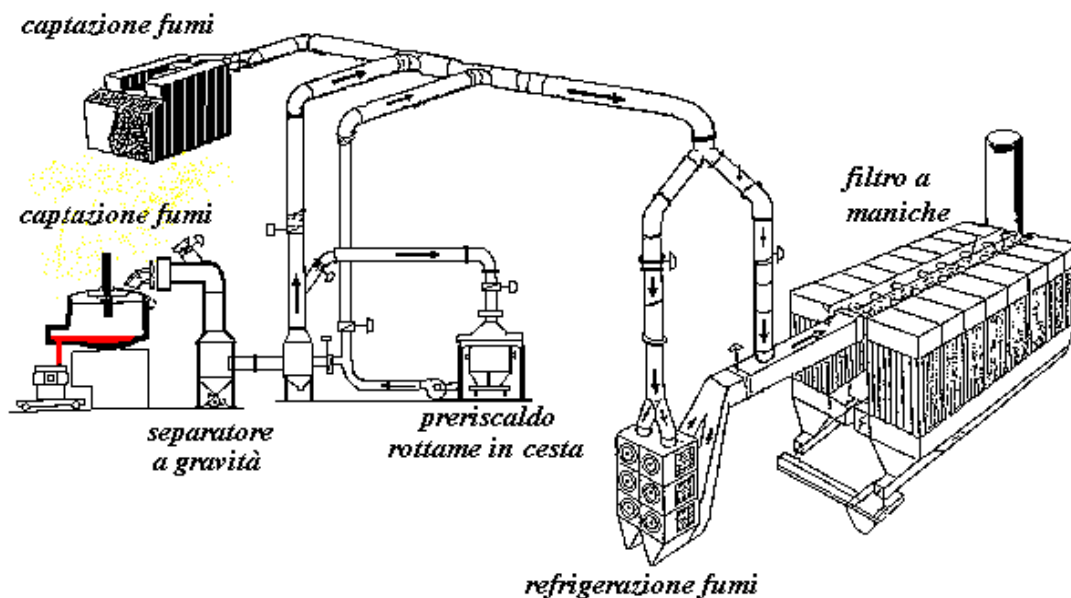
Tutto ciò comporta una modesta variabilità del bilancio e del fabbisogno termico per la tonnellata di acciaio prodotta, che risulta di circa 320 000 kcal/t, pari a 370 kWh/t.

Le perdite al forno elettrico sono di due tipi: elettriche e termiche. Le perdite elettriche sono principalmente una funzione delle modalità di utilizzazione del trasformatore e dell'ampereaggio impiegato in fusione. Questo deve essere mantenuto stabile attorno al valore ottimale.

Le perdite termiche sono una funzione in primo luogo del tempo. Il tempo di fusione dipende dalla potenza del trasformatore e dalla capacità fusoria dell'impianto, anche in relazione a fattori geometrici del forno, al rivestimento refrattario e del suo stato di usura e corpi raffreddanti (ossia a fattori influenzati direttamente la dispersione termica). Inoltre vari fattori pratici ed operativi, di funzionamento e di condotta dell'impianto, possono influire su questo tempo. Ogni tempo morto durante la fusione, disfunzioni del sistema di regolazione elettrica degli elettrodi, ecc., causano inevitabilmente aumenti del tempo di fusione, maggiori perdite termiche ed un maggiore consumo energetico rispetto ai valori ottimali.

I forni elettrici ad arco hanno rendimenti elevati nella trasformazione dell'energia elettrica in calore utile del processo metallurgico, particolarmente nella fusione (dell'ordine dell'80%).

Il consumo di energia durante l'affinazione dipende principalmente dalla sua durata. Di qui il massimo interesse a ridurre questa al minimo, ricorrendo ai trattamenti successivi dell'acciaio liquido nella siviera (post-affinazione, trattamenti fuori forno).

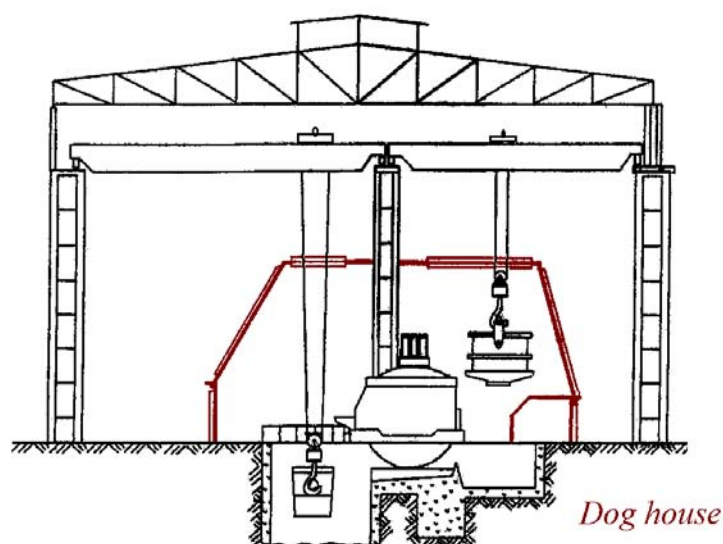
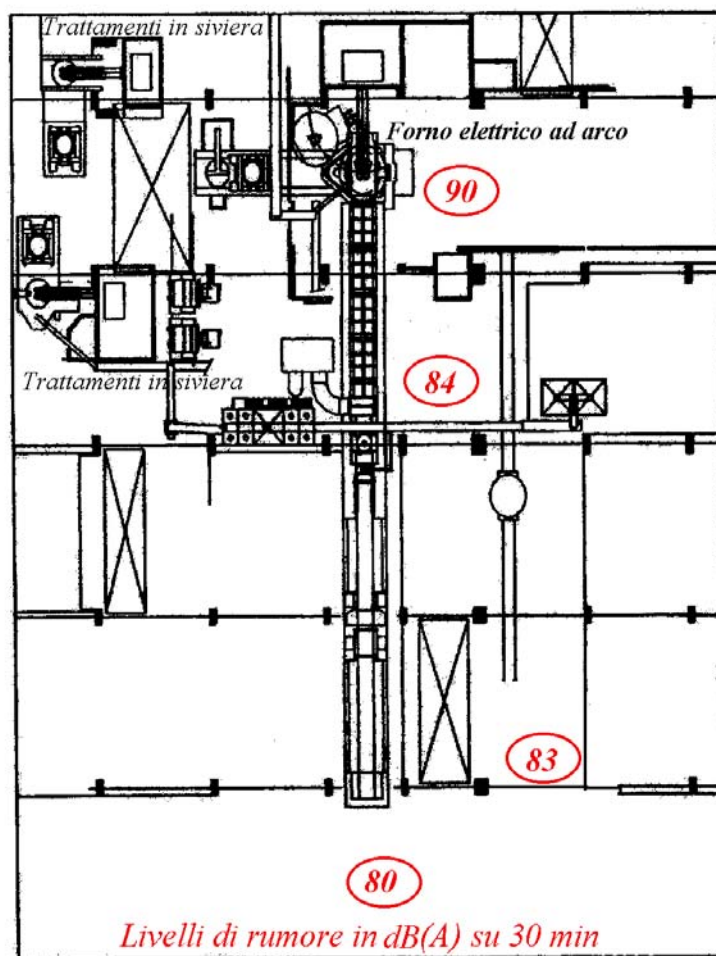


Il consumo totale di energia per la produzione dell'acciaio al forno elettrico è quindi molto variabile, in funzione di parametri d'impianto, della condotta del forno e di fattori metallurgici. Esso si aggira nell'intervallo 450-700 kWh/t. Allo scopo di apportare energia termica supplementare in fase di fusione si possono prevedere dei bruciatori che utilizzano oli leggeri, gas naturale o carbone polverizzato.

I sistemi per assistere l'operatore nella condotta della fusione con calcolatori elettronici, che forniscono informazioni di guida, con particolare riguardo all'utilizzo del trasformatore

(potenza, tensione, corrente) ed alla tempestività delle cariche successive alla prima. L'obiettivo è in genere quello di portare ad un minimo la durata della fusione, contenendo al tempo stesso l'usura del refrattario. Ad esempio il calcolatore aiuta nella scelta dei valori di tensione e corrente d'arco, in relazione alla totalizzazione dell'energia già fornita, e quindi al progresso della fusione. Un programma di questo tipo deve tener conto di parametri quali: caratteristiche del forno, tipo di rottame e sua densità, impiego di particolari parametri.

Per proteggere l'ambiente nell'interno e nei dintorni dell'acciaieria elettrica, occorre intervenire sui fumi e sui rumori prodotti nelle varie fasi della fabbricazione dell'acciaio. La quantità di fumo prodotta varia in funzione delle caratteristiche del rottame usato, così che un prodotto di partenza "sporco" per ruggine, oli e grassi tende a formare fumi in fase di fusione della carica. In fase di affinazione ossidante i fumi saranno più ricchi di particelle di ossido di ferro e di vapori di metalli basso fondenti, come Zn e Pb, generalmente ossidati. L'intercettazione dei fumi può essere effettuata con prelievo diretto dall'interno del forno o isolando il forno stesso in una camera stagna (*dog house*) così da risolvere contemporaneamente il problema dei rumori dovuti soprattutto all'arco elettrico (110-115 dB) nella fase di fusione. I fumi, ammontanti a circa 1-2 % dell'acciaio prodotto, vengono intercettati e trattati per via secca o per via umida allo scopo di abbattere le polveri. La via secca consiste in precipitatori elettrostatici e filtri a sacco; la via umida in *scrubber* Venturi e precipitatori elettrostatici ad umido.



Le polveri provenienti dalla fabbricazione di acciai al carbonio o basso legati, a causa dell'elevato tenore di ossidi di Zn (20-35 %) e Pb (0-8 %), sono considerate rifiuti tossici, ma possono costituire materia prima secondaria per un trattamento di recupero di questi metalli. Le polveri provenienti dai fumi della fabbricazione degli acciai inossidabili, ricche in ossidi di Cr e Ni, vengono necessariamente trattate per l'elevato valore commerciale dei due metalli o, comunque, per l'inertizzazione del cromo esavalente. Le operazioni di recupero da polveri molto

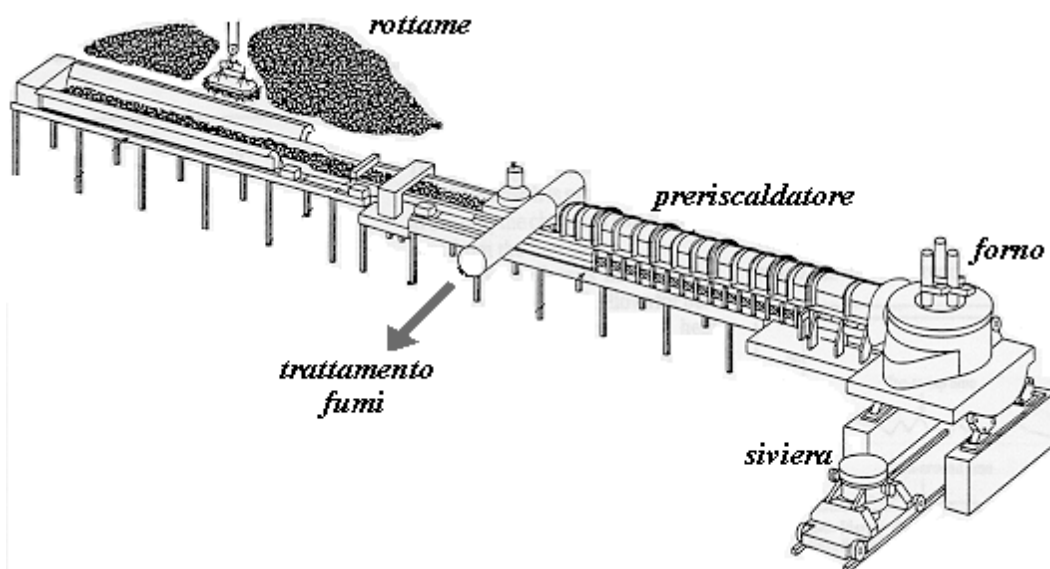
ricche in ferro non sono sempre economicamente convenienti, anche se bisogna mettere in conto il costo che comunque va affrontato per l'inertizzazione e la discarica. I trattamenti previsti su queste materie prime secondarie (fondamentalmente ossidi a base prevalente di ferro da ridurre in parte o in tutto allo stato metallico) utilizzano impianti metallurgici di dimensioni ridotte che possono essere di tipo pirometallurgico o di tipo idrometallurgico. Se la concentrazione nelle polveri dei fumi di specie chimiche di facile vaporizzazione non è sufficiente, spesso si rimettono in circolo le polveri nel forno per produrre polveri più inquinate e più facili da trattare.

I trattamenti pirometallurgici prevedono la fusione delle polveri mediante forni elettrici o a combustibile in ambiente riducente per la presenza di carbone, ottenendo nuovamente dei prodotti comunque ossidati o una ghisa liquida da riutilizzare nella linea produttiva principale. Le polveri delle acciaierie che producono inox sono ricche in Cr e Ni e, quindi, ad elevato valore; la lega che si ottiene dalla riduzione con carbone in un forno al plasma costituiscono una ferrolega ricca in carbonio e, quindi, poco pregiata.

I trattamenti idrometallurgici prevedono ad esempio una lisciviazione delle polveri in soluzione acquosa acida o basica, un arricchimento selettivo della liscivia negli elementi da recuperare (con operazioni chimiche di precipitazione, cementazione, estrazione con solvente ...) ed un trattamento finale di elettrolisi con la produzione di catodi di metallo puro.

Evoluzione dell'acciaieria elettrica

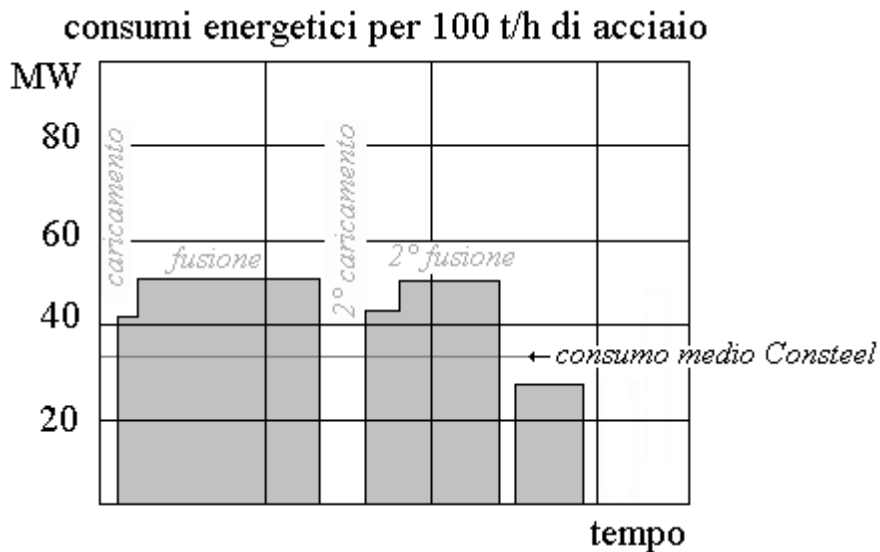
Uno sviluppo interessante dell'acciaieria elettrica è quello che prevede l'alimentazione continua del bagno metallico in elaborazione, con preriscaldamento della carica e controllo delle emissioni inquinanti.



Il processo Consteel® è sviluppato su scala industriale e prevede queste possibilità. Consiste in due sezioni: il convogliatore ed il forno. Il convogliatore, che ha il compito di trasportare con continuità la carica fin dentro il forno, è costituito da un nastro trasportatore in posizione orizzontale sul quale viene depositato il materiale di carica proveniente dal parco rottami. Il nastro percorre un primo tratto all'aperto per facilitare le operazioni di carica, ed un secondo tratto dentro un condotto che costituisce lo scarico dei fumi che fuoriescono dal forno. La carica, procedendo in controcorrente rispetto ai fumi, si preriscalda prima di entrare nel forno; i fumi ormai raffreddati, vengono inviati all'impianto di trattamento prima di essere scaricati in atmosfera. Il forno, infine, è un'evoluzione del classico forno elettrico ad arco perché deve prevedere una porta di ingresso del rottame, sempre aperta, attraverso la quale il rottame cade con continuità nel bagno fuso. Il rottame fonde per immersione nel bagno metallico che viene tenuto ad alta temperatura da un arco elettrico schermato dalla scoria schiumosa. Nell'interno del forno sono previste lance per la somministrazione di ossigeno o di altri reagenti,

come il carbonio. L'acciaio prodotto avrà una composizione chimica costante e dovrà ricorrere ai trattamenti fuori forno per la messa a punto compositiva finale.

Processo Consteel®



Il processo presuppone la presenza di un bagno fuso iniziale ed ha il vantaggio di non aver bisogno di complessi movimenti della volta e di sistemi di spostamento degli elettrodi, che finiscono per lavorare su un bagno piatto e privo di movimenti, sia progressivi che impulsivi, di rottami metallici ancora solidi. I vantaggi del sistema di alimentazione continuo sono:

- Operativi: alimentazione senza traumi e discontinuità; assenza di movimenti della volta; riduzione dei movimenti degli elettrodi; preriscaldamento della carica.
- Ambientali: sistema di trattamento fumi di minori dimensioni; diminuzione dei rumori da 110-115 dB a 85-90 dB per la maggior regolarità dell'arco che non agisce sul rottame da fondere ma su un bagno piatto.
- Elettrici: migliore sfruttamento della potenza elettrica e quindi minore potenza impegnata; assenza di picchi nel prelievo; riduzione dei disturbi sulla linea elettrica.

A fronte di questi vantaggi sta una maggior complicazione ed onerosità nell'impianto nuovo o un costo di trasformazione nell'impianto esistente.

CLASSIFICAZIONE DEI PRODOTTI SIDERURGICI

I prodotti siderurgici in uscita dallo stabilimento sono necessariamente allo stato solido, in forme adatte per le varie esigenze delle lavorazioni successive. La norma UNI 7272 si occupa della definizione e classificazione dei prodotti di acciaio. I prodotti siderurgici propriamente detti, secondo lo stadio di fabbricazione, vanno dal grezzo (acciaio liquido o lingotto), al semilavorato, al prodotto finito o a quello finale.

GREZZO - Il lingotto si ottiene colando acciaio allo stato liquido in una matrice di forma genericamente a tronco di piramide o di cono ad asse verticale. La sezione orizzontale può essere quadrata, rettangolare (larghezza minore del doppio dello spessore), piatta (larghezza maggiore del doppio dello spessore), poligonale, tonda, ovale o profilata in funzione delle successive lavorazioni. Le dimensioni del lingotto variano da pochi chili di una colata sperimentale a più di dieci tonnellate.

Dal grezzo con operazioni di lavorazione per deformazione plastica di laminazione (o fucinatura), si ottengono i semilavorati, che sono destinati a successive lavorazioni per ottenere un prodotto finito siderurgico.

SEMILAVORATO - I semilavorati sono caratterizzati da sezioni rette di vario tipo, ma di dimensioni costanti. Le tolleranze sono in genere ampie e gli spigoli arrotondati. I semilavorati possono essere fabbricati da lingotto, con successive lavorazioni per deformazione plastica a caldo, ovvero direttamente dal metallo liquido, per colata continua. Forme e dimensioni dei semilavorati, indipendentemente dal tipo di acciaio utilizzato, sono riassumibili nella seguente classificazione:

A sezione quadrata

BLUMI (*blooms*) - semilavorati di sezione quadrata, con spigoli arrotondati e spessori da 120 mm e fino a 400 mm.

BILLETTE (*billets*) - semilavorati di sezione quadrata, con spigoli arrotondati e spessori a > 50 mm e fino a 120 mm.

A sezione rettangolare

BLUMI RETTANGOLARI - Sezione maggiore di 14400 mm² e rapporto lunghezza/spessore compreso tra 1 e 2.

BILLETTE RETTANGOLARI - Analoghi ai blumi rettangolari, ma con sezione compresa tra 2500 e 14400 mm².

Appiattiti

BRAMME (*slabs*) - Il rapporto larghezza/spessore è maggiore o uguale a 2 e lo spessore non inferiore a 50 mm. Se il rapporto è maggiore di 4 si parla di bramme appiattite.

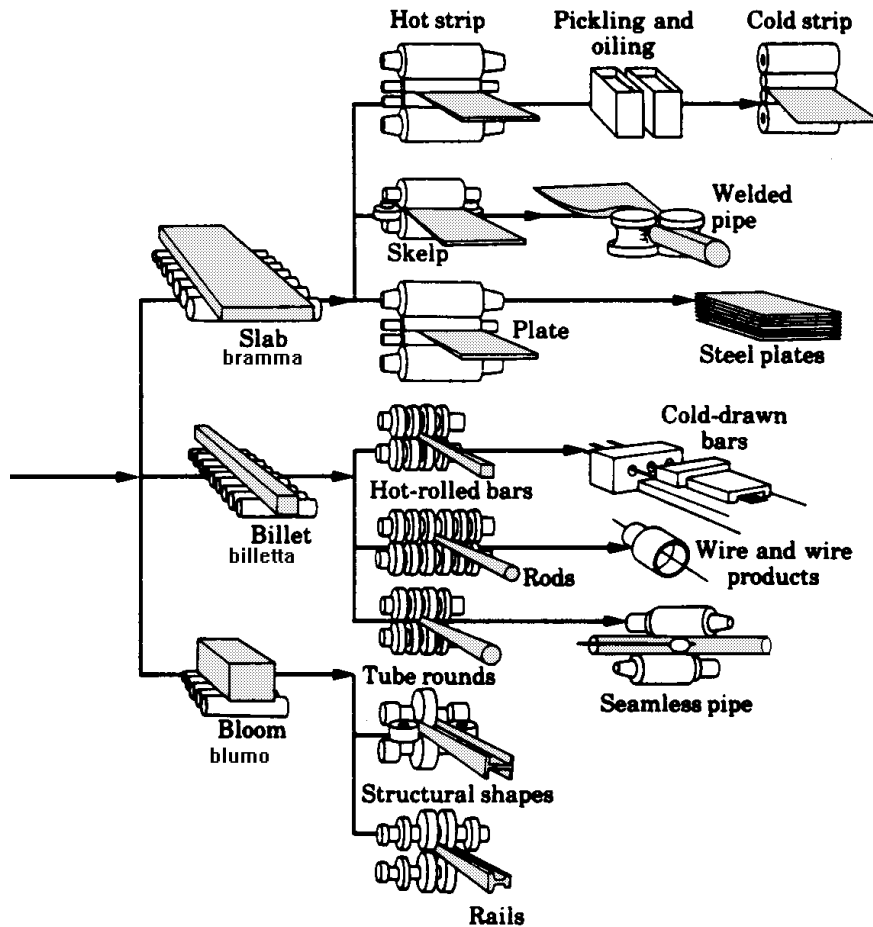
BIDONI - semilavorati in barre piatte con spigoli arrotondati, ovvero smussate sui fianchi, aventi larghezza > 150 mm e spessore compreso tra 6 e 50 mm.

Sbozzati per profilati o per tubi senza saldatura

Hanno sezioni preformate per le successive lavorazioni, sezioni di norma superiori a 2500 mm² nel caso dei profilati. Per i tubi si parte da sezioni tonde, quadrate, rettangolari o poligonali.

PRODOTTI FINITI - In campo siderurgico sono considerati finiti quei prodotti ottenuti per laminazione a caldo o per fucinatura, che hanno necessariamente bisogno di ulteriori lavorazioni, ma non di lavorazioni a caldo nell'ambito dello stabilimento. Sono caratterizzati da sezioni rette costanti, forme e dimensioni con tolleranze ben definite, superfici tecnicamente

lisce. Un caso a parte sono i prodotti finali, che sono dei piatti laminati a caldo con rivestimento permanente.



PRODOTTI FINITI LAMINATI - In base a forme e dimensioni, si distinguono in: lunghi, vergella e piatti. In base alle modalità di fabbricazione in laminati a caldo e laminati a freddo. In base allo stato superficiale a seconda se abbiano avuto o no un trattamento o una copertura protettiva (cromatazione, fosfatazione, deposito di grasso, olio, catrame, carta, vernice...).

Lunghi laminati a caldo

Sono forniti in barre dritte, curve o piegate; mai in rotoli. In base alle sezioni rette possiamo avere, ad esempio, profilati (travi) ad I (IPE = trave ad I ad ali Parallele, rispondenti a norme Europee), H (HE = trave ad H, europea), U, T, angolari ad L, tondi, quadri, esagoni, piatti..., ottenuti tipicamente per laminazione.

Vergella

E' un prodotto finito laminato ed avvolto a caldo in matasse a spire non ordinate. Le sezioni possono essere di vario tipo (tonda, ovale, quadrata...), di dimensione nominale non inferiore a 5 mm, superficie liscia.

Una categoria a parte tra i prodotti lunghi è quella caratterizzata dalla applicazione finale, come barre o matasse per armature per cemento o il materiale generico d'armamento ferroviario (e analogo), come le rotaie.

Prodotti piatti finiti

I prodotti piatti finiti hanno sezione rettangolare con larghezze molto superiori allo spessore. In base alle condizioni di laminazione si distinguono in laminati a caldo e laminati a freddo.

Laminati a caldo - Comprendono prodotti che hanno un'eventuale riduzione finale (meno del 5%) a freddo, detto "*skinpass*". Si distinguono in:

LARGO piatto per larghezza maggiore di 150 mm e spessore maggiore di 4 mm;

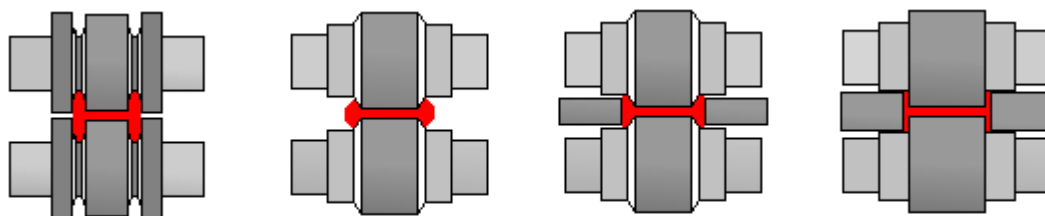
LAMIERA (*sheet*), grossa per spessori superiori a 3 mm e sottile se inferiori; la larghezza varia tipicamente tra 2 e 4 metri e la lunghezza può arrivare fino a 40 metri.

NASTRO (*thin sheet*), avvolto in rotoli (*coils*) a fine laminazione, largo o stretto se la larghezza supera o meno i 600 mm. Gli spessori sono compresi tipicamente tra 1,5 e 8 mm.

Laminati a freddo - Sono considerati tali i prodotti che abbiano avuto una riduzione a freddo di almeno il 25%. In analogia con i laminati a caldo, si distinguono in: lamiere grosse, sottili e nastri.

PRODOTTI FINALI - Appartengono a questa categoria alcuni prodotti piatti, eventualmente ondulati, sottoposti a rivestimento permanente; si producono lamiere e nastri rivestiti su una o due facce di stagno (come la banda stagnata, se in acciaio dolce con spessore inferiore a 0,50 mm), zinco, cromo, piombo, alluminio o con rivestimenti organici o non organici (cromati, fosfati, smalti). Tra i prodotti finali occorre ricordare il lamierino per applicazioni elettromagnetiche, nelle varianti a grano orientato o non, caratterizzato da parametri come la perdita di potenza elettrica (W/kg) nella polarizzazione.

Dividendo grossolanamente il mercato dei laminati tra prodotti lunghi e piatti, i secondi costituiscono circa il 60%, di cui meno di un terzo è rappresentato da prodotti finali.

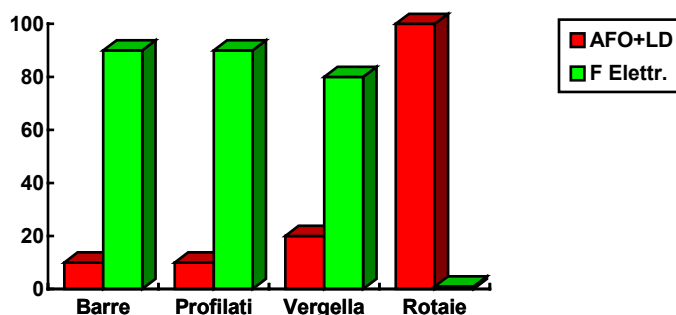


PRODOTTI FINITI FUCINATI - Rientrano in questa categoria alcuni prodotti lunghi, specialmente tondi e quadri, ottenuti mediante fucinatura, con caratteristiche analoghe a quelle dei laminati. Tra i prodotti ottenuti per fucinatura con matrice aperta, che non rientrano tra i prodotti lunghi, ci sono dei prodotti specifici per l'industria ferroviaria, automobilistica, dell'energia, o caratteristici per forma, come dischi, ruote...

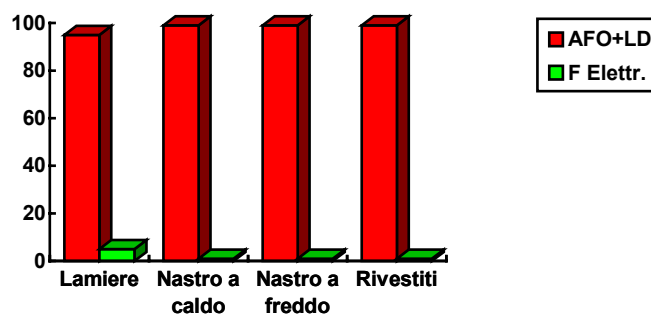
PRODUZIONE SIDERURGICA EUROPEA

Dal punto di vista dei cicli di fabbricazione dei prodotti sopra elencati, in Europa si può considerare una prevalenza della linea forno elettrico + colata continua di billette per i prodotti lunghi ed una quasi esclusività della linea altoforno + convertitore ad ossigeno + colata continua di bramme per i prodotti piani, come indicato dalla figura qui di seguito. I prodotti piani sono caratterizzati da elevate produzioni con poche variazioni dimensionali e compositive; i prodotti lunghi sono più specializzati ed hanno bisogno della maggiore flessibilità produttiva dell'acciaieria elettrica.

Prodotti lunghi



Prodotti piani



I PREZZI DEI PRODOTTI SIDERURGICI

I prezzi dei prodotti siderurgici dipendono non solo dal costo e dalla qualità della materia prima, ma anche dalla forma e finitura del prodotto commerciale, dal suo grado di purezza e dal ciclo tecnologico scelto o imposto per la fabbricazione.

Facendo riferimento al prezzo della ghisa da affinazione, cioè della ghisa destinata alla conversione in acciaio, che nel 2000 è dell'ordine di 300 lire al chilo, i prezzi di mercato di alcuni prodotti siderurgici caratteristici sono illustrati nella tabella che segue. Nei listini si fa differenza tra i prezzi di vendita da grossista e quelli da produttore.

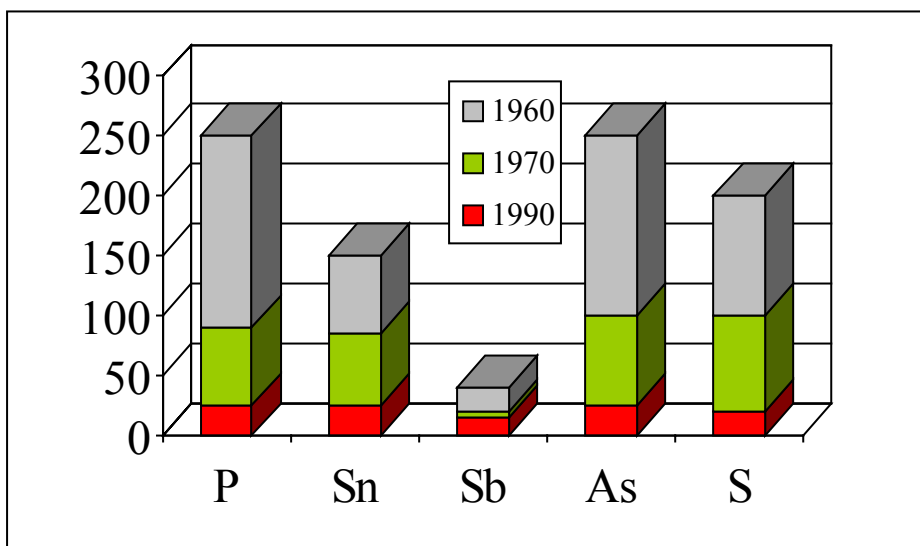
Prezzi di alcuni prodotti metallurgici con riferimento alla ghisa da affinazione

Ghisa da affinazione		1	
Ghisa da fonderia		1,2	
Ferro-silicio al 75%		4	
Ferro-cromo al 50%, carburato		6	
" " , C < 0,05%		13	
<i>Laminati a caldo</i>			
Lamiere		2	
barre da 15 mm, Fe 360 B		1,4	
tondo da cemento armato, Fe B 215		1,6	
travi IPE, Fe 360 B		2	
vergella		2	
<i>Lavorati a freddo</i>			
Lamierino		2,6	
Filo per precompresso		6	
<i>Acciai legati</i>			
Da bonifica, in barre C40			4
" " 39NiCrMo3		5	
inossidabile, " AISI 420		10	
" " AISI 304		13	
" " AISI 310		25	
<i>Non ferrosi</i>			
Lastra Al da 1 mm		14	
barra in lega di Al		16	
" ottone		16	
barra in lega di Ti		200	



PROCESSI SPECIALI DI RIFUSIONE E DI TRATTAMENTO DELL'ACCIAIO LIQUIDO

Gli acciai puliti - L'esigenza di un acciaio "pulito" (*clean steel*) e il grado di pulizia che si può garantire su un prodotto commerciale, possono diventare una prescrizione inderogabile per l'utilizzatore e quindi un criterio selettivo nella scelta di un prodotto o di un fornitore. Il concetto di acciaio pulito o di grado di pulizia di un acciaio sono connessi al tenore di elementi inquinanti e di inclusioni non metalliche che si è in grado di garantire sul prodotto finito. Lo sviluppo delle tecnologie siderurgiche nel corso degli anni (dai convertitori pneumatici a quelli ad ossigeno, dai trattamenti fuori forno alle modalità di colaggio...) ha permesso di ottenere acciai con caratteristiche compositive e stato inclusionale sempre migliori. Gli utilizzatori si sono trovati quindi nella condizione di poter applicare prodotti commerciali sempre più affidabili e a manifestare l'esigenza di prodotti speciali sempre più puliti per le applicazioni di maggior impegno. Questo si traduce necessariamente in un controllo molto spinto dei processi disponibili e nello sviluppo di nuovi processi in grado di superare i limiti delle tecnologie (fusorie, di elaborazione e di solidificazione) già esistenti. Se, ad esempio, alla fine della prima guerra mondiale era possibile ottenere un acciaio con 0,04% di zolfo a fronte di un prodotto commerciale che ne conteneva normalmente lo 0,10%, negli anni '70 si considerava pulito un acciaio con meno di 0,010%, oggi si può trovare lo stesso prodotto con circa 0,001% (10 ppm), che rappresenta un limite solo temporaneo.



Evoluzione storica dei livelli di impurezze (ppm) di un acciaio CrMoV per rotore

La natura chimica, la grandezza, la forma e la distribuzione di inclusioni non metalliche possono essere determinanti nei lamierini sottili, ad esempio nella banda stagnata o nei fili di piccolo diametro, sia nella fase di fabbricazione che in quella di ricopertura superficiale che nella formatura a freddo del prodotto finito. Inclusioni possono affiorare in superficie e compromettere il valore commerciale del prodotto o possono agire da centri di nucleazione di cricche e indurre fratture durante le varie fasi delle lavorazioni. Nel caso di saldature, poi, eventuali difetti sui lembi vengono inglobati nella zona fusa, creando condizioni di debolezza dell'intero giunto. Il controllo sugli ossidi e sui solfuri va condotto durante tutte le fasi di fabbricazione dell'acciaio; sui solfuri si può intervenire, ad esempio, sia con trattamenti in carosiluro sulla ghisa, sia successivamente con trattamenti fuori forno sull'acciaio in grado di controllare sia il contenuto di zolfo (manganese, calcio) sia la forma attraverso la precipitazione di solfuri più alto-fondenti e quindi meno deformabili ad alta temperatura (cerio, zirconio, titanio e tellurio). L'anisotropia meccanica sulle lamiere può essere del tutto tollerabile, quando

comporta minori tenacità e duttilità sul corto, perché in genere non sono presenti sollecitazioni in tale direzione. Le lamiere, invece, di grosso spessore possono presentare sollecitazioni anche sul corto: la minore resistenza può provocare lo strappo lamellare (*lamellar tearing*), che consiste nella rottura per delaminazione lungo superfici sul piano di laminazione, soprattutto in presenza di saldature e di fenomeni di corrosione e di infragilimento da idrogeno che indeboliscono ulteriormente i legami tra strato e strato.

L'utilizzazione di acciai in campi per i quali è richiesta una elevata affidabilità del prodotto (recipienti in pressione, rotor per turbine e per alternatori, reattori per l'industria chimica e nucleare, trivellazioni di pozzi profondi...) rende molto critico il controllo della pulizia dell'acciaio ed in particolare dello stato inclusionale. Forma e distribuzione delle inclusioni non metalliche possono condizionare il comportamento alla frattura, sia a bassa temperatura che in condizioni di scorrimento a caldo, fornendo centri di nucleazione e vie di facile propagazione di cricche in servizio. L'assenza di inclusioni di grosso diametro o di "grappoli" di inclusioni anche di dimensioni ridotte deve essere comunque garantita in un prodotto di buona qualità. L'elemento critico è allora non solo la presenza ma anche la distribuzione nel caso delle piccole inclusioni. Il valore di "piccolo" e "grande" è legato al tipo di acciaio ed alla sua applicazione; ad esempio in prodotti da fucinatura, per i quali sono tollerabili inclusioni di 1-5 μm , è grande una inclusioni da 200 μm , mentre per acciai da cuscinetti i valori si spostano su $< 1 \mu\text{m}$ e 30-40 μm .

Le inclusioni hanno due origini: esogena ed endogena. Le inclusioni non metalliche di natura esogena provengono dal trascinarsi nel metallo fuso di particelle estranee, tipicamente di refrattario. Le inclusioni endogene provengono dalla precipitazione di seconde fasi, tipicamente ossidi e solfuri, quando si superano i limiti di solubilità dei componenti nel metallo fuso o in via di solidificazione. Per controllare e ridurre la presenza di inclusioni si ricorre a processi di rifusione sotto scoria o sotto vuoto dell'acciaio. Se le specifiche sono particolarmente severe si devono controllare i tenori massimi degli elementi formatori di seconde fasi, quali ossigeno e azoto, in modo da avere un impedimento termodinamico: i processi sotto vuoto diventano quindi insostituibili, anche se costosi. Le tecniche di rifusione, che permettono anche di controllare i processi di solidificazione dell'acciaio, vengono scelte in base all'esigenza primaria da soddisfare, ma possono anche essere eseguite in serie se i costi sono compatibili con il valore del prodotto.

Un acciaio pulito è caratterizzato non solo dal contenuto di inclusioni non metalliche, ma anche da un tenore molto basso di elementi non desiderati (inquinanti o *residuals*), come P, S, As, Sb, Bi, Sn, Zn, Cu. Questi elementi, anche se presenti in pochi ppm sono pericolosi in applicazioni sia a bassa che ad alta temperatura perché possono segregare ai bordi di grano durante i trattamenti di rinvenimento o, in esercizio, per lunghe permanenze a temperature tipicamente al di sopra di 400°C. L'arricchimento di impurezze ai bordi di grano abbassa l'energia interfacciale dei grani e favorisce fenomeni di corrosione, di infragilimento e di nucleazione di cavità e cricche. Accanto agli elementi-impurezze sono spesso imposte condizioni restrittive per elementi più comuni, come Mn e Si che agiscono in modo sfavorevole in presenza dei primi. Si sono sviluppate formule empiriche che individuano valori massimi di parametri empirici (*embrittlement factors*) come: $J = (\%Mn + \%Si) (\%P + \%Sn) < 1,3-3,1 \cdot 10^{-4}$ o $K = (\%Mn + \%Si) (10\%P + 5\%Sb + 4\%Sn + \%As) < 1,0-2,6 \cdot 10^{-3}$. Da un punto di vista siderurgico occorre distinguere tra elementi ossidabili e non: questi ultimi, Sn, Sb e As sono controllabili solo attraverso la qualità del rottame.

Una applicazione che ha fortemente spinto lo sviluppo di acciai puliti è quella dei rotor per turbine a vapore per la produzione di energia elettrica. I rotor di turbine degli stadi sia di alta che di media pressione sono destinati a lavorare per lunghi periodi nel campo di temperature tra 300 e 520°C circa. Condizioni di lavoro che provocano una riduzione della tenacità con tendenza alla frattura intergranulare a causa della segregazione di elementi-impurezza ai bordi di grano. I rotor sono fabbricati per fucinatura di lingotti in acciaio basso-legato al Ni Cr Mo, con eventuali presenze di V e bassi tenori di Mn e Si. L'infragilimento, misurabile ad esempio come aumento della temperatura di transizione duttile / fragile, non presenta valori di soglia ma aumenta all'aumentare del contenuto di impurezze, tipicamente di fosforo. Questo significa che

la assenza di infragilimento non è legata ad un valore massimo di inquinanti da non superare, ma che l'infragilimento è tanto più basso quanto più basso è il tenore di inquinanti (e di inclusioni non metalliche). Dal punto di vista dell'acciaiere non c'è altra risposta che la fabbricazione di acciai sempre più puliti, ottenibili con tecnologie sofisticate e costose, a partire da materie prime di elevata purezza. L'elevato grado di purezza deve essere garantito non su un valore medio ma puntualmente su tutto il lingotto, ciò che impone la conoscenza ed il controllo dei processi di solidificazione.

In tabella sono riportate le analisi compositive di un acciaio 3.5%NiCrMoV per rotore richieste da un produttore nella versione standard ed in quella *superclean*.

Acciaio 3.5%NiCrMoV – Composizione % in peso												
Tipo	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Sn	As	Sb
Standard	0,26	0,05	0,20	0,005	0,004	1,50	0,36	3,55	0,11	0,005	0,006	0,001
Superclean	0,26	0,01	0,03	0,004	0,001	1,71	0,47	3,66	0,12	0,004	0,004	0,001

Lo sviluppo di acciai puliti, o, comunque, il miglioramento e la garanzia della qualità degli acciai commerciali ha permesso negli ultimi anni notevoli incrementi nelle prestazioni in servizio, tali da mantenere competitivi i prodotti siderurgici nei confronti dei nuovi materiali. Un incremento delle resistenze specifiche allo snervamento ed alla rottura ottenibili attraverso un controllo sulla composizione ed una migliore utilizzazione dei trattamenti termici, permettono infatti agli acciai di aumentare il rapporto resistenza/densità agendo sul numeratore e compensando, così, la concorrenza di leghe di alluminio, di titanio e materiali compositi che possono contare su valori più bassi del denominatore. Il minor costo delle materie prime e la possibilità di ricorrere a tecnologie di lavorazione consolidate garantisce altri punti a favore degli acciai.

Condizioni egualmente restrittive su alcuni elementi vengono poste agli acciai per impieghi nucleari, che debbano essere esposti a radiazioni. Per garantire la richiesta di un livello di sicurezza di radioattività entro 500 anni, i componenti esposti a radiazioni non devono contenere certi elementi che possano produrre isotopi radioattivi con tempi di dimezzamenti molto lunghi. La lista degli elementi non desiderati comprende Ni, N, Cu, Mo e, soprattutto, Nb. Questo criterio ha influito nello sviluppo dei materiali della prima parete nei reattori a fusione: gli acciai inossidabili convenzionali, che contengono quantità sia pur piccole di N, Nb e Mo non sono applicabili. Per il niobio, ad esempio, è prescritto un livello massimo di 1 ppm. Sono stati sviluppati acciai inossidabili martensitici al 12% Cr, privi di Ni e Mo e rigorosamente controllati in N e Nb.

Si è visto che i diversi processi di trattamento dell'acciaio si differenziano tra di loro, in ordine ai tipi di acciai che consentono di fabbricare ed al loro livello qualitativo. Ogni processo ha una propria flessibilità metallurgica, che trova il suo limite anche in fattori di tipo economico. Tutti i processi descritti hanno delle limitazioni di fronte ad esigenze qualitative sempre più severe: per particolari applicazioni vengono richiesti acciai con prescrizioni molto restrittive, con riguardo a determinate caratteristiche.

Per soddisfare queste esigenze sono stati ideati, messi a punto ed adottati nella pratica industriale, degli speciali processi. Essi possono venir suddivisi in due gruppi:

1. processi di trattamento dell'acciaio liquido fuori forno (*post-furnace treatments*), senza rifusione del metallo; citiamo fra questi: trattamento sotto vuoto, trattamento con gas inerte in siviera, trattamento con scorie prefuse;

2. processi speciali che comportano una seconda fusione del metallo. Fra questi possono essere indicati: il processo di rifusione sotto vuoto (VAR: *vacuum arc remelting*), il processo di rifusione sotto scoria protettiva (ESR: *electro-slag remelting*).

Nel caso di processi del primo tipo, la messa a punto qualitativa dell'acciaio viene ultimata fuori del forno fusorio e del convertitore, in un recipiente di trattamento separato, in genere nella stessa siviera di colata (*ladle metallurgy*). In tal modo gli impianti primari di produzione restano svincolati da un condizionamento troppo stretto da parte delle esigenze qualitative. Vi è oggi nelle tecniche di acciaieria un indirizzo verso l'adozione di procedimenti di questo tipo, in base

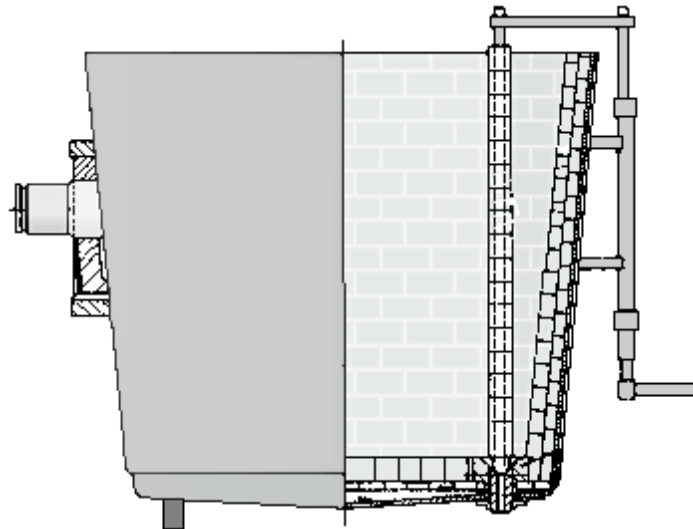
al concetto di svolgere le operazioni metallurgiche necessarie, ivi compresa l'alligazione, con adatti strumenti e nelle condizioni più idonee; anche se per far ciò occorre spezzare il processo in due fasi, svolte in recipienti di reazione separati. Procedendo in questa direzione si giunge ai procedimenti del secondo tipo, che prevedono una rifusione del metallo.

Obiettivi e mezzi impiegati nei processi di trattamento dell'acciaio liquido in siviera

Gli speciali procedimenti di trattamento dell'acciaio liquido sono svolti sul metallo a temperature generalmente intorno o superiori ai 1600°C. Gli scopi principali, che con questi trattamenti ci si prefigge di ottenere, sono i seguenti:

1. miglioramento dell'uniformità di temperatura e di composizione chimica della massa del metallo;
2. abbassamento del suo contenuto di gas (particolarmente dell'idrogeno);
3. completamento della decarburazione a spese dell'ossigeno residuo della precedente affinazione in forno (carbodisossidazione); decarburazione molto spinta, per la fabbricazione di acciai a bassissimo livello di carbonio (inferiori a 0,01%), evitando al tempo stesso una eccessiva ossidazione del metallo;
4. disossidazione dell'acciaio ed abbassamento del suo contenuto di inclusioni non metalliche, che si originano nei processi di disossidazione per precipitazione (inclusioni di ossidi); loro miglior distribuzione, ottenimento di inclusioni di dimensioni più piccole e di tipo meno dannoso alle proprietà dell'acciaio;
5. desolforazione spinta, con contemporanea disossidazione per diffusione;
6. possibilità di correzione analitica finale dell'acciaio più accurata e quindi contenimento della dispersione di analisi fra le diverse colate del medesimo tipo di acciaio;
7. aggiunte finali dei disossidanti e dei correttivi di analisi, effettuate in condizioni favorevoli per assicurare una loro miglior resa; con economia quindi di costosi elementi di lega.
8. Pur non rientrando in uno scopo primario, la presenza di un trattamento in siviera con possibilità di riscaldamento del metallo fuso permette di ottenere un sistema di accumulo di acciaio utilizzabile nella gestione dei flussi tra acciaieria e colata continua.

Gli strumenti a disposizione non permettono di raggiungere con un singolo processo gli



obiettivi qualitativi ed anche economici appena visti. I mezzi utilizzabili sono principalmente di carattere fisico, quali:

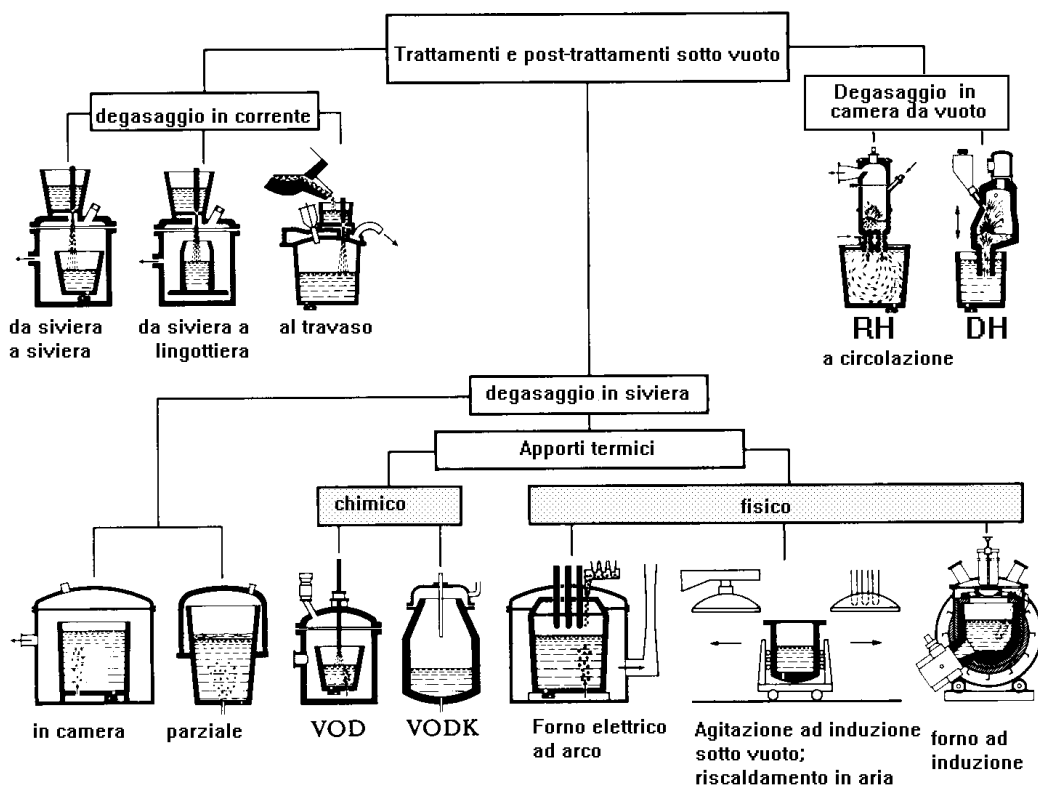
1. Mescolamento attivo della massa di metallo liquido. Si può impiegare a tale scopo lo effetto dell'induzione elettromagnetica (*induction stirring*); oppure far gorgogliare nel metallo un gas inerte, per lo più un gas nobile, ma anche l'azoto (*gas stirring*).
2. Realizzazione di ampie superfici di reazione, quali si possono ottenere con la tecniche di iniezione di materiali in polveri finissime, impiegando un veicolo gassoso inerte; oppure

assicurando un intimo contatto e mescolamento del metallo con una scoria prefusa, di adatta composizione chimica;

3. Far agire sul metallo un'atmosfera a bassa pressione parziale del gas che si desidera eliminare (ad esempio con un gorgogliamento di gas nobile), meglio ancora esponendo il metallo in un ambiente a bassissima pressione totale (trattamento sotto vuoto).

Nell'applicazione delle tecniche di gorgogliamento di gas inerte e sotto vuoto, nascono difficoltà connesse con le cadute di temperatura che il metallo subisce nel corso, e per effetto, del trattamento, se nel recipiente di reazione non si ha una somministrazione di calore che sopperisca, almeno in parte, alle perdite termiche che si verificano. In tali condizioni è necessario che l'acciaio raggiunga alla fine dell'antecedente fase di affinazione, nei forni e nei convertitori, una maggior temperatura, che compensi la successiva caduta di temperatura dovuta al trattamento. Tale maggior surriscaldamento dello acciaio d'altro canto va considerato indesiderabile sotto diversi aspetti; perciò si sono sviluppati alcuni procedimenti che prevedono la possibilità di somministrazione di calore in connessione ad un trattamento sotto vuoto.

I processi di trattamento dell'acciaio liquido fuori dal forno vengono quasi sempre svolti nella stessa siviera che è impiegata per colare l'acciaio. E' evidente il vantaggio, non soltanto economico che questa soluzione comporta. Evita l'impiego di un apposito recipiente di reazione; evita inoltre l'ulteriore caduta di temperatura che il ripetersi di travasi dell'acciaio da uno ad un altro recipiente determina. Per migliorare dal punto di vista chimico-fisico le condizioni di trattamento in siviera, si tende anche a sostituire il rivestimento con refrattari acidi silico-alluminosi con un rivestimento più costoso a caratteristiche basiche.

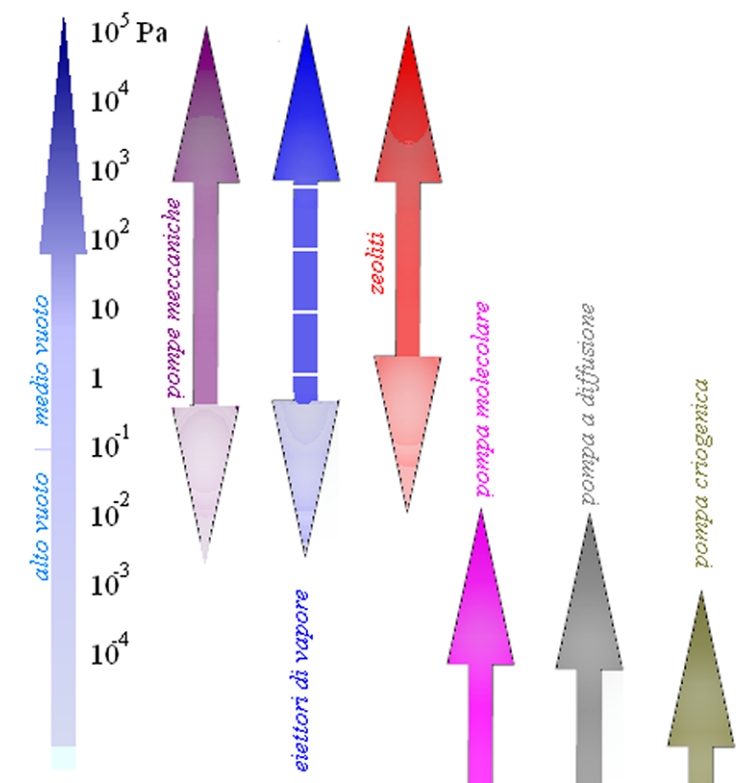


I processi di trattamento sotto vuoto

I processi di degasaggio dell'acciaio per trattamento sotto vuoto hanno cominciato ad affermarsi dopo il 1952, quando si sono avute le prime applicazioni industriali alla deidrogenazione dei grossi lingotti da fucinatura. Il loro sviluppo è stato rapido; si sono successivamente ideate nuove tecniche di trattamento e se ne è estesa l'applicazione a diversi obiettivi metallurgici e qualitativi, più complessi ed ampi.

L'abbassamento dei contenuti di idrogeno e di azoto dell'acciaio può essere realizzato rapidamente, esponendo un getto di metallo in un ambiente nel quale si sia praticato e si mantenga un grado di vuoto spinto. Il degasaggio avviene efficacemente nel breve tempo di caduta del getto del metallo liquido nel vuoto, a causa dell'elevata superficie del metallo esposta, poiché il getto si suddivide finemente in piccole gocce. Altri sistemi di trattamento sottovuoto, affermatosi più recentemente, prevedono di far ricircolare l'acciaio per un certo tempo fra un recipiente contenitore (che è la stessa siviera di colata) ed un recipiente di degasaggio, nel quale si fa il vuoto. In altri casi il trattamento sotto vuoto si effettua in condizioni statiche, ponendo la siviera contenente l'acciaio in una autoclave sotto vuoto ed attivando il degasaggio con gorgogliamento di gas inerte o promuovendo il mescolamento con una bobina di induzione. Questi processi non prevedono alcuna somministrazione di calore all'acciaio nel corso del trattamento, oppure ne prevedono una molto limitata, per sopperire in parte alle perdite termiche. Ma ve ne sono altri, più complessi e più flessibili, che consentono una somministrazione di calore, anche notevole (ad esempio con arco elettrico).

La produzione del vuoto consiste nell'estrarre aria atmosferica per mezzo di pompe dall'interno di un volume definito da un recipiente. Nelle applicazioni metallurgiche il recipiente contiene una quantità definita di metallo allo stato liquido (o anche allo stato solido) e di gas in soluzione; sfruttando le condizioni di equilibrio dei gas tra metallo ed ambiente, si cerca di degasare il metallo realizzando una bassa pressione sia globale che parziale del singolo componente aspirando con continuità i gas che si formano. Le particelle che compongono il gas, secondo la teoria cinetica dei gas, sono in continuo movimento ed esercitano una pressione p sulle pareti del recipiente di volume V proporzionale, ad una data temperatura T , al numero n di particelle. Mediante opportuni sistemi di pompaggio (meccanici, fluidodinamici, chimici ...) si realizzano pressioni inferiori a quella atmosferica p_a che è pari a: $p_a = 10^{-1} \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg} = 760 \text{ Torr}$



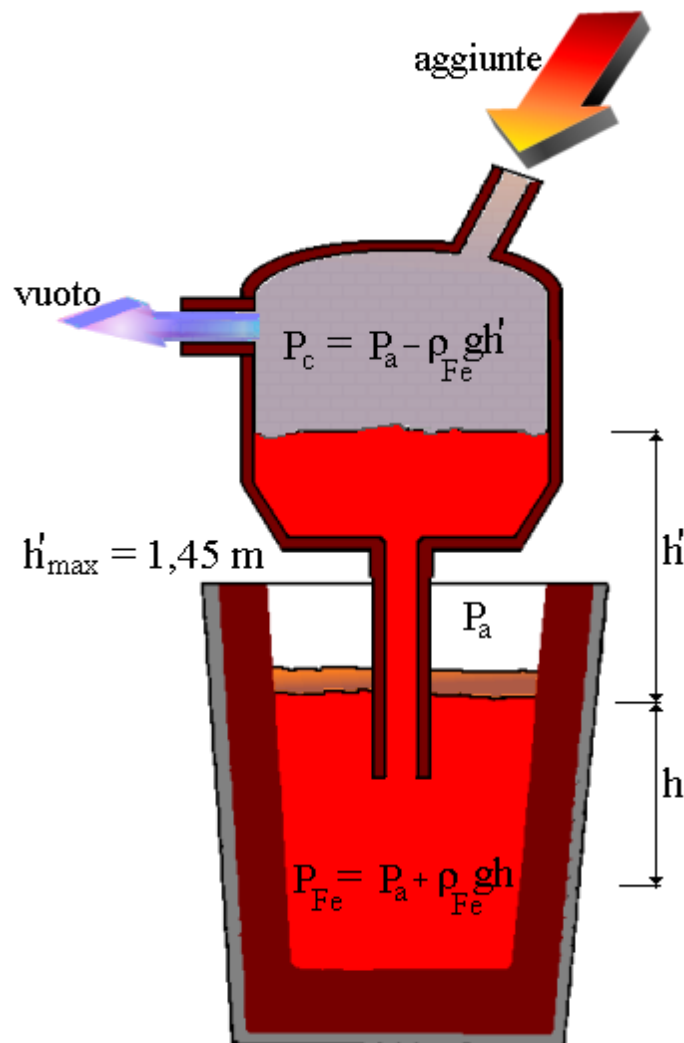
La pressione limite raggiungibile dipende dalla capacità di pompaggio del sistema che deve smaltire i flussi entranti dovuti alle perdite ed alla cessione di gas e vapori da parte del metallo e delle superfici del contenitore.

Non esiste un tipo di pompa in grado di raggiungere vuoti molto spinti a partire dalla pressione atmosferica, ma sistemi di pompaggio costituiti da più pompe che lavorano in

successione in campi tipici di pressione e portata. Le pompe meccaniche rotative, ad esempio, coprono dei campi di lavoro che vanno dalla pressione atmosferica fino a 1-0,1 Pa e possono scendere a pressioni inferiori se messe in serie. Gli eiettori di vapore non hanno organi meccanici in movimento ed operano con getti di vapore ad elevata velocità prodotti mediante tubi convergenti/divergenti su salti di pressione molto più limitati, dell'ordine di 1:10, così da poter raggiungere una pressione minima paragonabile a quella delle pompe meccaniche solo se posti in serie fino a 5-6 stadi.

Processi di degasaggio in siviera - La siviera di colata viene posta in una camera stagna, nella quale si effettua rapidamente il vuoto. Si verifica un movimento di ribollimento nell'acciaio per il rapido sviluppo di gas, che causa un'agitazione ed omogeneizzazione della massa del metallo. Per attivare questo effetto si può provocare, come accennato, una agitazione artificiale, facendo gorgogliare un gas inerte o mediante induzione elettromagnetica.

Degasaggio per azione del vuoto sul getto d'acciaio - Le tecniche di degasaggio hanno avuto le loro prime applicazioni alla colata sotto vuoto di grossi lingotti da fucinatura. In tale caso si pone la lingottiera in una camera, nella quale si pratica il vuoto. La siviera viene disposta per la colata sopra la camera da vuoto, assicurando la perfetta tenuta. L'acciaio fuoriesce dallo scaricatore, disposto nel modo usuale sul fondo della siviera, perfora all'inizio un lamierino d'alluminio, che chiude l'apposito orificio di colata nel coperchio del recipiente sotto vuoto, e cade nella camera sottostante. Il lingotto viene così colato sotto vuoto, mentre il getto d'acciaio subisce una deidrogenazione nel corso della sua caduta nel vuoto.



Questo principio può essere applicato anche in altri modi. Si può degasare il metallo nel corso di un travaso ad una seconda siviera; questo procedimento è indicato anche col termine di

stream degasing. Oppure si degasa durante la colata dal forno nella siviera, questo procedimento viene denominato degasaggio allo spillaggio o, con il termine inglese, *tap degasing*. Tutti questi procedimenti hanno delle limitazioni; anche per la breve durata del trattamento in genere hanno come obiettivo solo l'abbassamento del contenuto di idrogeno dell'acciaio. Il processo *stream degasing* presenta inoltre il grave inconveniente di causare forti cadute di temperatura, dato che si effettua un travaso dell'acciaio: la necessità quindi di colare dal forno ad una temperatura sensibilmente maggiore dell'usuale. Per questi motivi, i procedimenti di trattamento sottovuoto di questo tipo hanno subito un arresto nel loro sviluppo in questi anni. Viene praticato principalmente solo il colaggio sotto vuoto dei grossi lingotti da forgia.

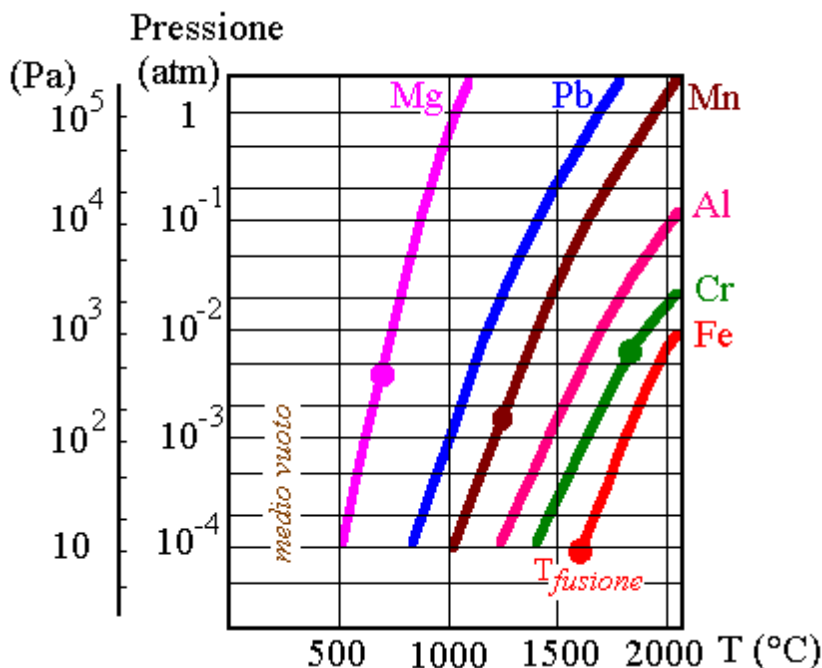
Processi di trattamento sotto vuoto per ricircolazione - Sono procedimenti di trattamento dell'acciaio liquido sotto vuoto di recente introduzione, attualmente in fase di rapida affermazione industriale. Esistono di tale principio due realizzazioni sviluppate alla fine degli anni '50: il cosiddetto sistema DH (Dortmund Hörder) e quello RH (Rheinstahl-Heraeus). L'acciaio contenuto nella siviera di colata viene fatto ricircolare in un recipiente di trattamento sovrastante, nel quale si mantiene il vuoto. La pressione nel recipiente di trattamento, che è trascurabile, fa sì che il metallo liquido salga naturalmente per un'altezza equivalente alla pressione ferrostatica. Il metallo passa dalla siviera al recipiente sotto vuoto attraverso una o due "gambe" tubolari di refrattario, che stanno immerse nell'acciaio.

La pressione ferrostatica - La pressione p_{Fe} nell'interno di una massa di ferro fuso, a riposo, ad una quota h sotto il pelo libero del metallo sul quale agisca la sola pressione atmosferica p_a , è pari a:

$$p_{Fe} = p_a + \rho_{Fe}gh$$

in cui :

- $p_a = 10^5 \text{ Pa}$
- $\rho_{Fe} = 7000 \text{ kg/m}^3$.



Se in un condotto che pesca nel metallo fuso viene realizzata una pressione $p_c < p_a$, il liquido risalirà di una quota h' pari a:

$$h' = (p_a - p_c) / \rho_{Fe}g$$

Nell'ipotesi di poter realizzare il vuoto assoluto, $p_c = 0$, la quota massima di risalita del ferro liquido sarebbe pari a :

$$h' = 10^5 / 7000 \times 9,8 = 1,45 \text{ m}$$

questo significa, d'altronde, che per ogni 1,45 m la pressione ferrostatica aumenta di una atmosfera.

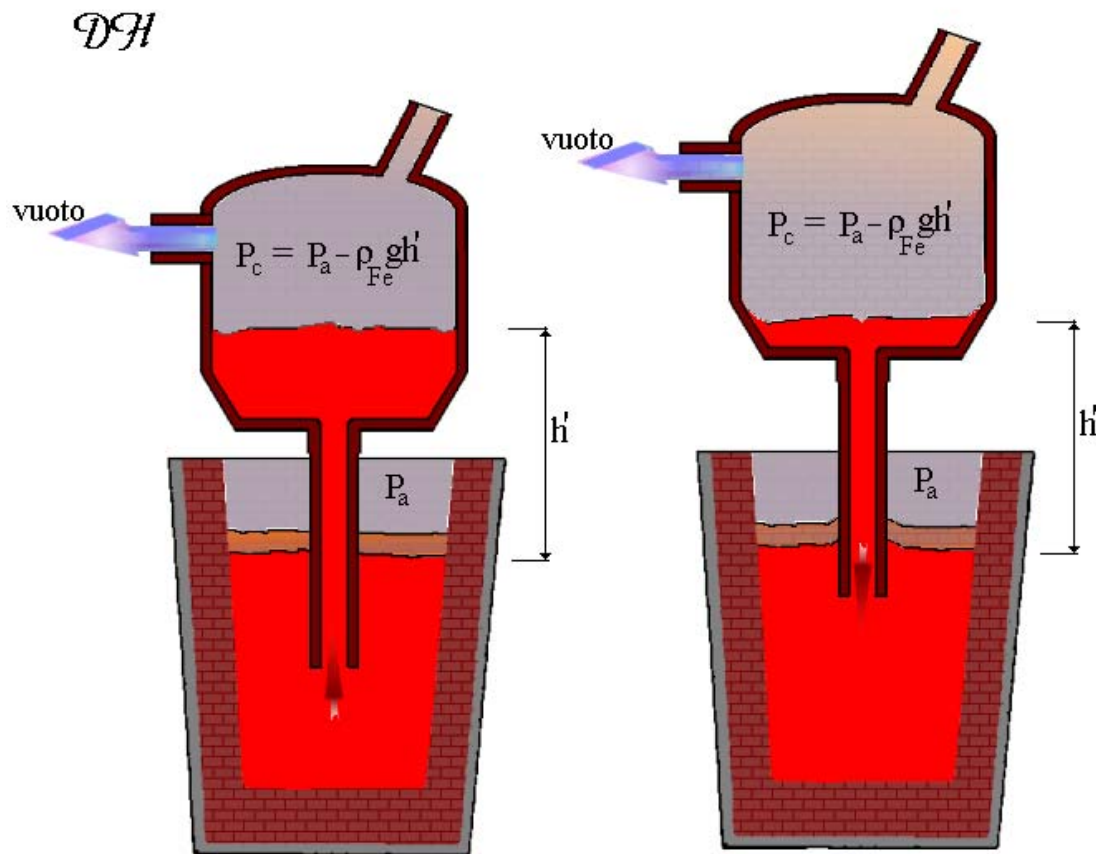
A parte le perdite e la capacità del sistema da vuoto, la pressione p_c non può raggiungere lo zero a causa della tensione di vapore del metallo, o della lega. Per i metalli puri la tensione di vapore p_m aumenta con la temperatura T con una relazione del tipo:

$$\log p_m = -A/T + B$$

In alcuni processi siderurgici le elevate tensioni di vapore possono essere condizionate dalla presenza di metalli basso-fondenti come Zn e Cd. Questo fenomeno può essere d'altronde sfruttato per eliminare tali metalli dalla lega. Gli elementi tradizionali di lega che possono provocare dei problemi nei trattamenti sotto vuoto sono manganese e cromo.

I vapori di Mn che si sviluppano durante il trattamento sotto vuoto tendono a depositarsi sulle pareti fredde dei contenitori e dei sistemi di pompaggio, sotto forma di una film, di polveri sia metalliche che ossidate.

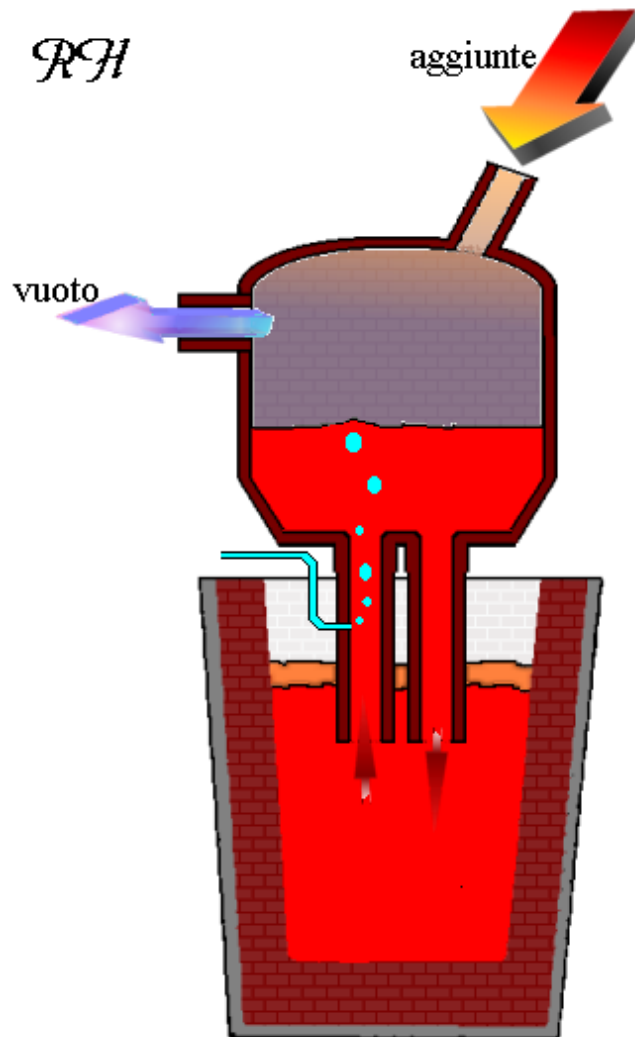
La quota di risalita del ferro fuso in un impianto da vuoto di tipo industriale, realizzato con pompaggio con eiettori di vapore in più stadi in serie, è dell'ordine di 1,3 m.



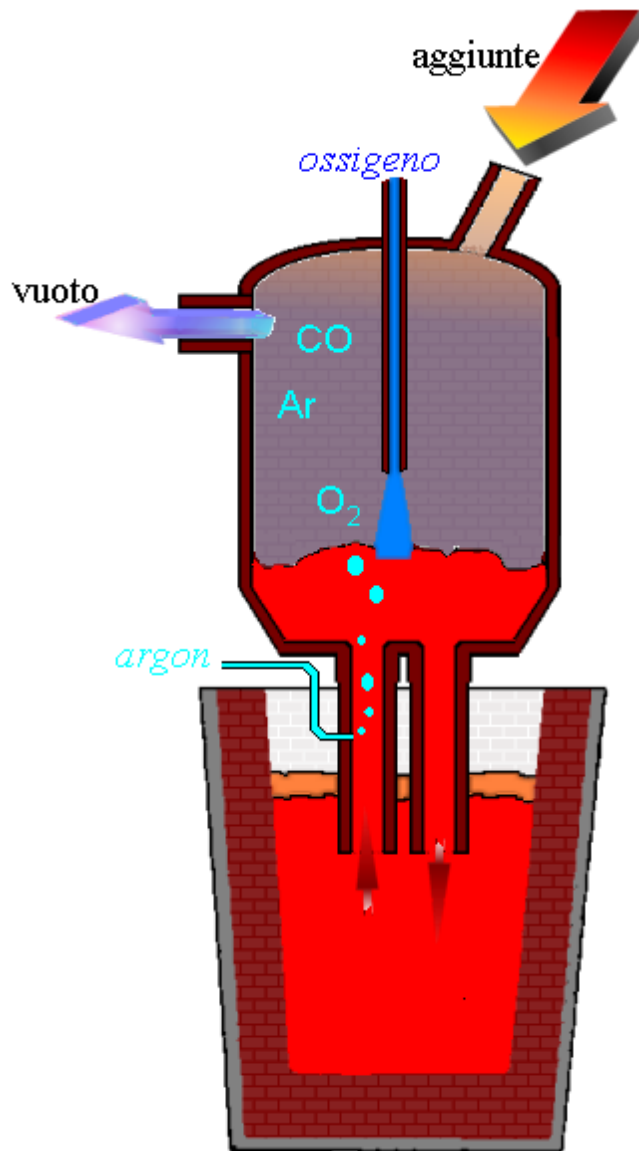
Nel procedimento DH la gamba è una sola e la circolazione del metallo viene ottenuta imprimendo un moto oscillatorio verticale all'autoclave o alla siviera. L'escursione reciproca è di circa 0,6 m. Ad ogni movimento il 10-20% dell'acciaio passa dalla siviera al recipiente di trattamento ed in 30-50 cicli ripetuti (richiedenti un tempo di trattamento di 10-20 min) si completa il processo. In tal modo un peso d'acciaio pari a 3-5 volte il peso totale di quello contenuto nella siviera, è trattato sotto vuoto.

Nel procedimento RH vi sono due tubi immersi per realizzare la circolazione dello acciaio, che sale lungo il primo e discende attraverso il secondo tubo, con continuità. Il movimento è attivato da immissione di argon in pressione nella gamba di mandata; si è anche proposto di ottenere il movimento di salita dell'acciaio per via elettromagnetica mediante un avvolgimento elettrico concatenato con la colonna di acciaio liquido contenuto nella gamba di

mandata. Mentre il recipiente DH è a fondo largo abbastanza piano, per migliorare l'esposizione dell'acciaio all'azione del vuoto, quello RH non ha tale necessità ed è più piccolo.



Nel processo RH la turbolenza è elevata, dato il moto impresso al metallo, ed esplica un'azione favorevole sotto l'aspetto della omogeneizzazione sia chimica che termica. Per il rivestimento delle autoclavi sotto vuoto si impiegano: refrattari basici di magnesia (98% MgO); si impiegano anche refrattari in cromo-magnesia a grani elettrofusi; mattoni di mullite; mattoni elettrofusi ad alta allumina (al 90-95%). Gli impianti a ricircolazione consentono l'aggiunta di elementi di lega, correttivi e disossidanti finali, nelle migliori condizioni per la loro rapida fusione ed una buona omogeneizzazione nella massa di metallo in movimento, con rese elevate e costanti degli elementi ossidabili. Si possono fare aggiunte di grafite per realizzare la carbodisossidazione, a pressione di sviluppo dell'ossido di carbonio molto bassa, quindi eliminazione spinta dell'ossigeno residuo. E' possibile anche realizzare una decarburazione spinta dell'acciaio, senza contemporanea ossidazione (quindi senza risalita del contenuto di ossigeno), giungendosi facilmente a tenore di carbonio dello ordine dello 0,01% (100 ppm) ed ancora più bassi, dell'ordine di poche decine di ppm: ciò è di particolare interesse per la fabbricazione di acciai al silicio da trasformatori, di acciai inossidabili, di acciai extra-dolci da stampaggio, di acciai da costruzione ferritici al titanio, al niobio, al vanadio, al boro. Per effettuare le aggiunte gli impianti sono muniti di una serie di tramogge, disposte a quota sovrastante l'autoclave di trattamento, di dosatori e bilance, alimentatori vibranti e scivoli di scarico; è possibile quindi svolgere programmi di aggiunta dei vari materiali, sottovuoto e nella sequenza desiderata, opportunamente dosati.



Procedimenti di trattamento sotto vuoto con somministrazione di calore

Per consentire la possibilità di maggiori aggiunte di elementi di lega nella siviera, al tempo stesso evitare la necessità di un indesiderato eccessivo surriscaldamento dello acciaio nei forni, correggere nel modo migliore la temperatura finale e conferire maggiore elasticità ai processi di degasaggio, si deve prevedere la possibilità di una somministrazione di calore durante e/o dopo il trattamento. Il riscaldamento può essere realizzato mediante arco elettrico. Il trattamento adottato è del tipo "degasaggio statico in siviera".

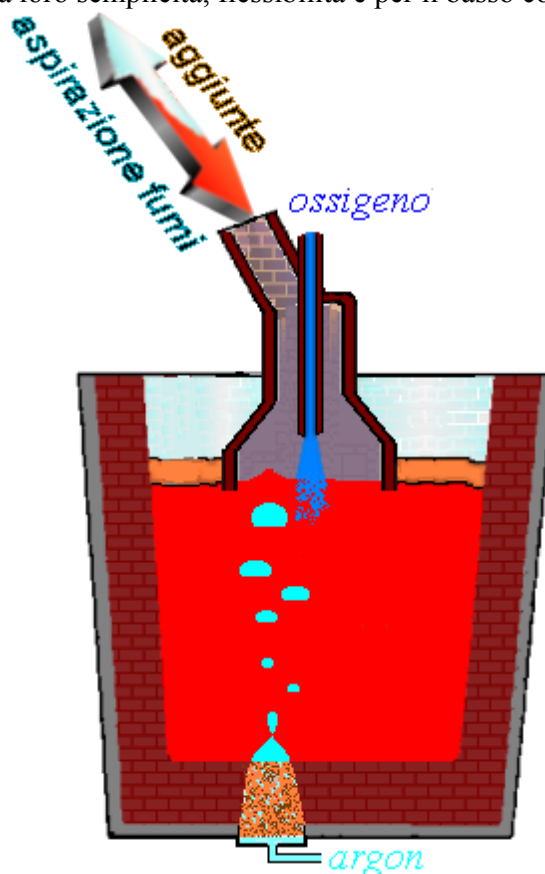
Il procedimento svedese denominato ASEA-SKF impiega una speciale siviera, che può essere chiusa da coperchio a tenuta per effettuare il trattamento sotto vuoto. Questo è attivato da una agitazione magnetica, che determina un movimento ascendente-discendente del metallo liquido. Il trattamento sotto vuoto può essere fatto anche con lo acciaio a bassa temperatura: successivamente si provvede al suo riscaldamento con un arco elettrico, sostituendo al coperchio collegato all'impianto per il vuoto, una volta ed un sistema di elettrodi. La sostituzione avviene mediante movimenti rotatori delle relative attrezzature.

Un altro procedimento di questo tipo è quello VAD: *vacuum arc degasing*, realizzato negli Stati Uniti. In questo caso si impiega una normale siviera, nella quale l'acciaio è trattato sotto vuoto in autoclave, mantenendolo in agitazione con gorgogliamento di gas inerte. L'acciaio viene successivamente riscaldato con arco elettrico.

La somministrazione di calore può essere effettuata per via chimica, ricorrendo a reazioni esotermiche, prima fra tutte quella di ossidazione del carbonio. Nel processo KTB (*Kawasaki oxygen Top Blowing*), ad esempio, si utilizza una camera RH modificata con una lancia che soffia ossigeno in presenza di vuoto per abbattere il tenore di carbonio residuo e fornire contemporaneamente calore. Il sistema da vuoto deve evacuare massicce quantità di argon, ossido di carbonio ed eventuali ossigeno ed anidride carbonica presenti nel reattore. Variando le condizioni di soffiaggio è possibile decarburare a poche decine di ppm e disossidare successivamente.

Trattamento dell'acciaio liquido per gorgogliamento di gas inerte

I procedimenti di trattamento dell'acciaio mediante un gas inerte, generalmente argon, fatto gorgogliare attraverso la massa del metallo liquido, sono sovente utilizzati quali tecniche complementari a quelle di trattamento sotto vuoto. Di recente hanno avuto anche una intensa applicazione autonoma; soprattutto allo scopo di ottenere una buona omogeneità di temperatura e di analisi chimica dell'acciaio nella siviera, necessaria con l'adozione della colata continua, che ha particolari severe esigenze sotto questo aspetto. Si tratta di tecniche di notevole interesse applicativo, soprattutto per la loro semplicità, flessibilità e per il basso costo.



L'idea d'insufflare un gas inerte discende dai benefici che si possono ottenere promuovendo una agitazione meccanica, più o meno intensa, nella massa del metallo liquido; si favorisce l'omogeneizzazione e la diffusione degli elementi di lega aggiunti, si attiva l'eliminazione di inclusioni e di elementi indesiderabili, si ha un effetto favorevole sulla decantazione delle inclusioni di ossidi. La diminuzione del contenuto di ossigeno dell'acciaio risulta funzione della potenza impiegata per l'agitazione e del tempo, ossia del lavoro speso nell'azione di agitazione: la velocità di rimozione è funzione esponenziale dell'energia somministrata. L'agitazione provocata dal gorgogliamento di un gas inerte promuove inoltre gli scambi metallo-scoria, migliorando il contatto fra le due fasi ed attivando i processi di diffusione e scambio: può quindi essere utilizzata combinata ad un trattamento dell'acciaio con scorie

sintetiche di opportuna composizione chimica oppure facendo aggiunte di agenti reattivi sotto forma adeguata (per ottenere, ad esempio, una desolfurazione spinta dell'acciaio). Si può anche realizzare un certo degasaggio del metallo, data la tendenza dei gas presenti in soluzione a diffondere nelle bolle del gas gorgogliante.

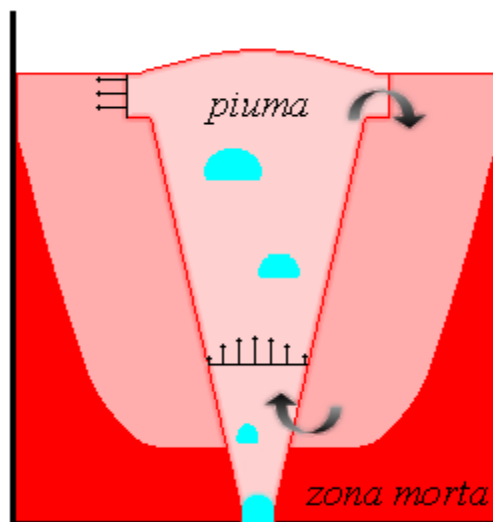
Le modalità adottate per realizzare l'insufflaggio ed il gorgogliamento del gas nello acciaio sono diverse:

1. Insufflaggio di un getto di gas che impatta sulla superficie del metallo. E' un metodo che ha avuto limitate applicazioni.

2. Gorgogliamento del gas attraverso un sistema immerso. La soluzione più semplice consiste nell'introdurre il gas nel metallo a mezzo di una lancia immersa consumabile (tubo di ferro, eventualmente protetto con refrattario o con grafite). Via via che la lancia si consuma, viene fatta avanzare. Per il trattamento dell'acciaio in siviera si utilizza anche un tubo fisso rivestito in refrattario, immerso nell'acciaio; il gas che giunge dall'alto defluisce verso la sua estremità inferiore, dalla quale fuoriesce gorgogliando nel metallo.

3. Insufflazione del gas dal fondo della siviera. I vantaggi di questo procedimento derivano dal fatto che l'efficacia del trattamento con gas inerte dipende dal tempo di soggiorno di ciascuna bolla nel bagno metallico e dalle dimensioni, quanto più piccole, delle bolle medesime. Sembra quindi vantaggioso insufflare l'argon dal fondo, finemente suddiviso in piccole bolle. Ciò può venire realizzato modificando localmente il recipiente contenitore dell'acciaio. Si sono sviluppati adatti refrattari porosi, di caratteristiche soddisfacenti per il loro inserimento nella muratura del fondo della siviera.

Il gas giunge al mattone poroso attraverso tubazione, lo attraversa e viene distribuito alla superficie di contatto con l'acciaio liquido in piccole bolle estese ad una superficie relativamente grande. Questo sistema ha trovato in tempi recenti estesa applicazione in molte acciaierie per l'omogeneizzazione e la correzione finale della colata, anche se si devono affrontare i problemi di usura e danneggiamento sia del setto poroso che del refrattario circostante.



Nella massa liquida si stabilisce un flusso di materia più o meno regolare che può essere schematizzato in una zona centrale "piuma" di risalita del metallo, in una zona circostante di ridiscesa ed in una zona morta che non risente dei fenomeni indotti dal gorgogliamento, come mostrato nella figura.

Trattamento per insufflazione di polveri reattive

Fra i procedimenti di trattamento dell'acciaio liquido nella secchia di colata hanno trovato impiego anche quelli che prevedono l'insufflaggio di polveri reattive mediante veicolo di gas inerte (argon talvolta azoto). Trattamenti di questo tipo erano già stati impiegati nel passato nei forni elettrici ad arco mediante l'introduzione di lance immerse attraverso la porta dei forni,

usando miscele di polveri basiche riducenti a scopo di desolfurazione e disossidazione, a base di calce ed agenti riducenti vari. Procedimenti di insufflaggio con veicolo di gas inerte (azoto) sono stati del resto impiegati anche per la ghisa liquida, prima della carica nei convertitori di acciaieria, per praticare una sua desolfurazione, impiegando quali agenti desolforanti: Na_2CO_3 , CaO , C , CaC_2 , CaCN_2 , ma anche Ca-Si , Al , Ca-Si-Mn come disossidanti in grado di controllare la forma delle inclusioni.

I vantaggi dell'impiego di reagenti in forma di polveri fini con agitazione contemporanea del metallo liquido con gas inerte gorgogliante, sono evidenti sotto l'aspetto cinetico e fluidodinamico consentendo una notevole accelerazione dei processi di scambio di materia e quindi un maggiore accostamento in brevi tempi alle condizioni di equilibrio eterogeneo.

L'interfaccia di un sistema eterogeneo liquido-liquido può essere aumentata realizzando un'efficace agitazione meccanica che al limite, se la tensione interfacciale è bassa, può portare alla formazione di un'emulsione; l'interfaccia solido-liquido è aumentata con il grado di comminazione del solido; l'interfaccia liquido-gas può essere aumentata provocando la formazione di bolle quanto più piccole possibili ovvero disperdendo il liquido su di una grande superficie esposta alla atmosfera reattiva (vedi anche i trattamenti sotto vuoto del getto d'acciaio cadente nel vuoto per la sua deidrogenazione).

L'agitazione risulta benefica in quanto riduce lo spessore dello strato limite, sovrappone a moti convettivi naturali relativamente lenti un moto convettivo forzato più efficace ai fini del trasporto di materia, prolunga il tempo di contatto tra reagenti immiscibili e a diversa densità.

L'aumento dell'estensione dell'interfaccia e l'agitazione sono i parametri più sfruttati sul piano applicativo per migliorare la cinetica di reazioni eterogenee di questo tipo.

Trattamento dell'acciaio con scorie sintetiche liquide

Si ricorre ad un trattamento dell'acciaio con scorie sintetiche liquide, effettuato in siviera all'atto della colata, in casi particolari, per scopi quali i seguenti: realizzare una rapida desolfurazione spinta, disossidare l'acciaio per diffusione, ottenere un elevato grado di purezza sotto l'aspetto del contenuto di inclusioni non metalliche. Si ottiene per tal via una serie di miglioramenti qualitativi del materiale, che riguardano le caratteristiche di resistenza a fatica, la sensibilità all'effetto di intaglio, le proprietà plastiche, la resilienza in senso trasversale rispetto alla longitudinale (ossia un minor grado di anisotropia, in dipendenza della fibrosità del materiale originata dalle lavorazioni plastiche a caldo). Tali miglioramenti sono interessanti nel caso di acciai di alta qualità: acciai da costruzione legati, per cuscinetti di rotolamento e per utensili.

Vengono utilizzate scorie sintetiche prefuse di tipo acido (ad esempio della seguente analisi: $\text{SiO}_2 = 70\%$, $\text{MgO} = 15\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15\%$); oppure scorie di tipo basico (ad esempio: $\text{CaO} = 55\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 40\%$, $\text{SiO}_2 = 2\%$, $\text{MgO} = 3\%$). Con scorie di tipo basico è possibile quindi ottenere un buon effetto desolforante. La scoria sintetica liquida può venir preparata in un forno elettrico ad arco, fondendo allumina e calce in zolle, alla temperatura di $1640-1670^\circ\text{C}$. La caduta dell'acciaio nella siviera, nella quale sia stata predisposta la scoria liquida, assicura un intimo contatto scoria-metallo ed un veloce decorso dei processi desiderati.

L'azoto nell'acciaio liquido

Uno degli obiettivi dei processi di degasaggio è l'abbassamento del tenore di azoto nell'acciaio. Come già detto l'azoto è un gas a molecola biatomica, solubile nel ferro sotto forma atomica, e che segue la legge di Sievert:

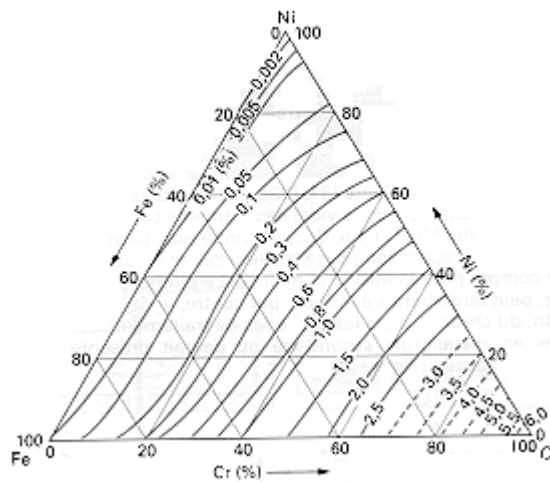
$$[\text{N}] = K \cdot \sqrt{p_{\text{N}_2}}$$

La cinetica di degasaggio è controllata dalla disponibilità sulla superficie del ferro di siti per la ricombinazione della molecola. Tali siti sono però fortemente ridotti dalla presenza di altri

elementi attivi, come zolfo ed ossigeno, che sono in grado di diminuire la cinetica della reazione. Si calcola che un tenore di zolfo pari a 0,01% blocchi circa il 90% dei siti disponibili per una stessa superficie di ferro puro. Per ottenere un'efficace denitrurazione occorre, pertanto, una preventiva desolfurazione ed un controllo sul tenore di ossigeno: gli acciai a basso tenore di C ed alto tenore di S sono i più difficili da trattare.

D'altra parte il contatto dell'acciaio liquido con l'atmosfera a seguito di soste e di travasi, provoca un reingresso di azoto (*Nitrogen pickup*) nel metallo, favorito dagli stessi parametri che ne ostacolano l'allontanamento. Ciò rende problematico l'uso di azoto come gas di gorgogliamento in sostituzione del più costoso argon.

Quando si debba produrre un acciaio ad elevato tenore di azoto, come nel caso di alcuni acciai inossidabili che ne sfruttano le caratteristiche gammagene con evidente risparmio rispetto al costoso nichel, si verifica un problema diametralmente opposto a quello del degasaggio: l'azoto è un elemento di lega e non deve fuoriuscire durante i vari trattamenti.



Nel diagramma sopra riportato si vede l'influenza degli elementi di lega sulla solubilità dell'azoto in acciaio Fe-Cr-Ni a 1600°C alla pressione di 1 atmosfera. E' evidente il forte effetto del cromo che ostacola la rimozione dell'azoto in caso di degasaggio o ne aiuta l'alligazione nel caso opposto, quando si cerca di aggiungere un elemento gammageno a basso costo.

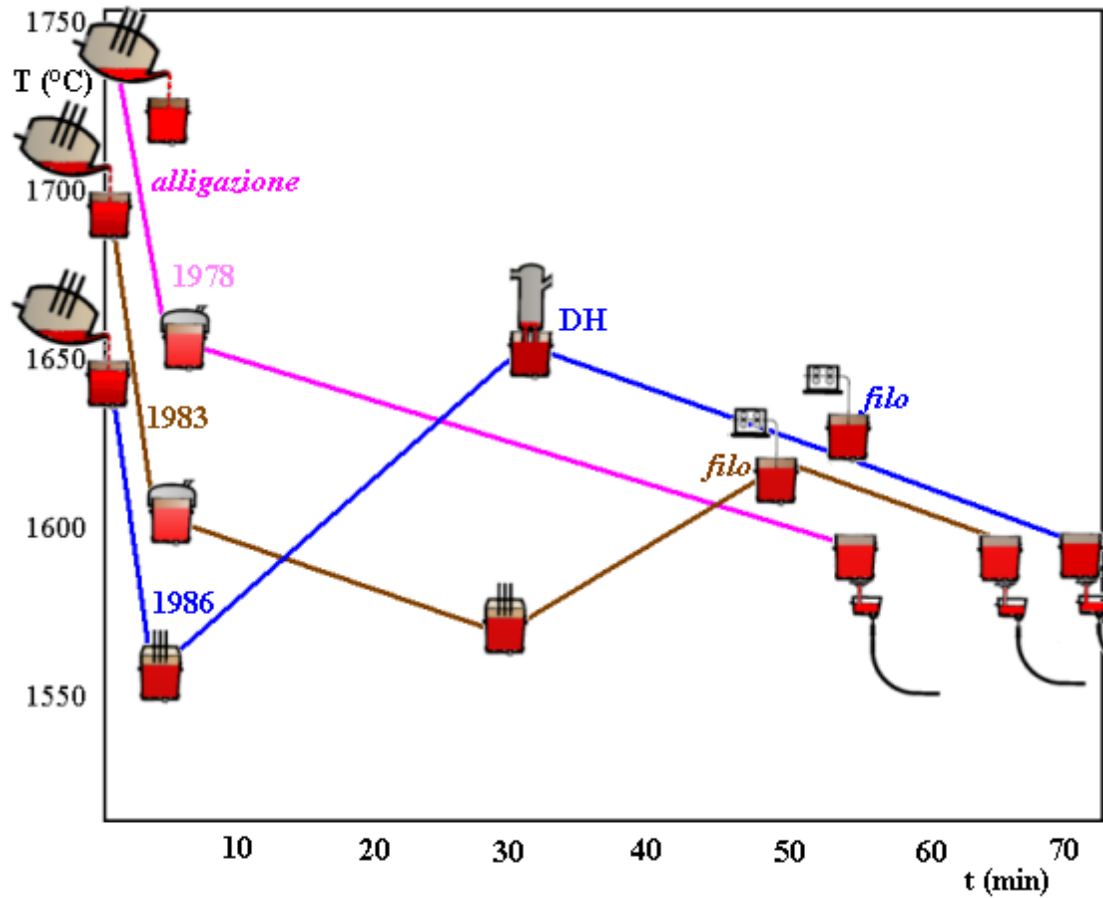
La temperatura dell'acciaio

Dal punto di vista termico, le operazioni cui è sottoposto l'acciaio prima di essere colato per la solidificazione possono avere durate molto variabili in situazioni sia di sottrazione che di somministrazione di calore.

Il raffreddamento naturale del metallo contenuto in una grossa siviera è valutabile grossolanamente in 40 - 50 °C per i travasi tra forno, siviera e paniera per la colata continua, eventualmente aggravato dal trasferimento da e per le camere di degasaggio. Va considerato inoltre un raffreddamento di 0,5 - 1,0 °C s⁻¹ per la permanenza nei vari contenitori. Sottraggono calore le operazioni di gorgogliamento di gas (1,5 °C s⁻¹) e le aggiunte non esotermiche di ferroleghie e rottami (6 - 10 °C s⁻¹t⁻¹); forniscono calore le aggiunte disossidanti, come quella di alluminio, e le operazioni di riscaldamento sia chimico che fisico che servono per chiudere il bilancio termico. Una caduta di temperatura di un centinaio di gradi si può verificare in tempi inferiori ad un'ora e va quindi compensata da un riscaldamento prima della colata; il surriscaldamento iniziale dell'acciaio deve spesso essere evitato per ridurre il danneggiamento del refrattario ed evitare una permanenza troppo lunga in forno.

In figura è schematicamente riportata come esempio l'evoluzione storica della sequenza di operazioni di trattamento in siviera per un acciaio di qualità destinato ad essere colato in continuo ad una temperatura di circa 1600 °C. I trattamenti prevedono un'alligazione, un

degasaggio ed una messa a punto finale. L'evoluzione più evidente è l'abbassamento progressivo della temperatura di colata in siviera, così da diminuire la permanenza nel forno elettrico, rendendolo disponibile per una colata successiva. L'utilizzazione di una siviera riscaldante permette di ottenere i risultati migliori, svincolando il forno elettrico dalla sequenza di operazioni previste (e di quelle imprevedibili) a valle del colaggio.



GLI ACCIAI INOSSIDABILI

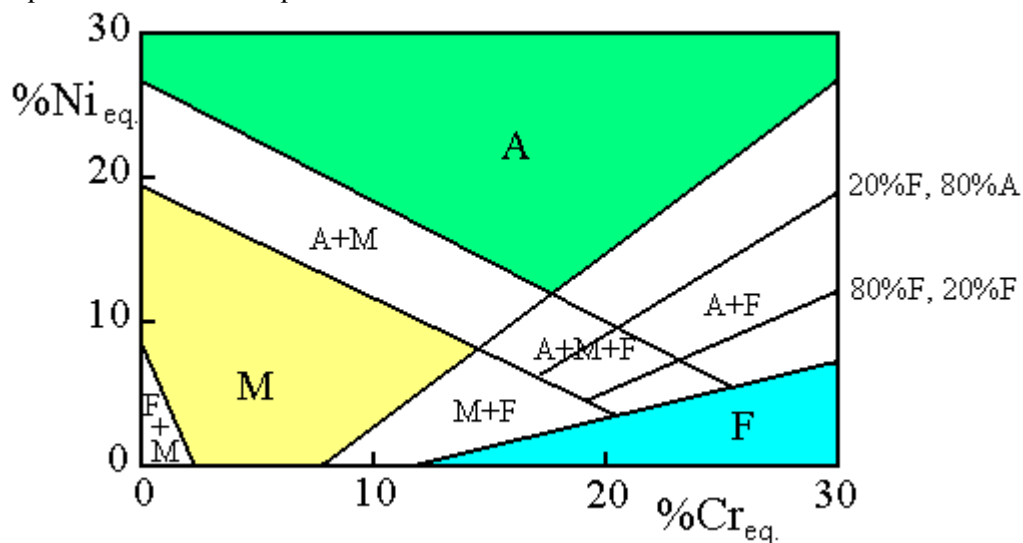
Gli acciai inossidabili furono inventati negli anni immediatamente precedenti alla prima guerra mondiale, sviluppati in laboratorio tra le due guerre e commercializzati in modo diffuso solo dopo la seconda guerra mondiale. La produzione attuale è ripartita approssimativamente in 75% austenitici e 25% ferritici. I paesi esportatori sono il Giappone e l'Unione europea, gli importatori sono gli USA e la Cina.

Paese produttore di acciaio inossidabile	Tonnellate prodotte nel 1998
Giappone	3 447 000
USA	2 009 000
Corea del sud	1 704 000
Germania	1 479 000
Italia	1 096 000
Francia	1 059 000
Spagna	1 012 000
Totale mondiale	17 185 000

Classificazione degli acciai inossidabili - Gli acciai inossidabili sono leghe Fe - Cr - C, o più frequentemente, leghe Fe - Ni - Cr caratterizzate dalla elevata resistenza ai fenomeni corrosivi sia ad alta che a bassa temperatura, ottenuta attraverso l'alligazione con cromo. Il tenore di cromo è di almeno 12-13 %, che è il valore minimo per il quale la resistenza alla corrosione aumenta drasticamente. Sono tradizionalmente suddivisi in base alla struttura metallografica prevalente.

Seguendo le norme AISI, gli acciai inossidabili martensitici e ferritici sono contraddistinti da un numero a tre cifre iniziante per 4; gli inossidabili austenitici sono invece caratterizzati da un numero a tre cifre iniziante per 2 se contenenti manganese (poco usati) e 3 se contengono nichel. Le altre famiglie, più recenti, di acciai inossidabili vengono individuate da sigle che sono spesso quelle commerciali. Ad ogni sigla AISI può corrispondere più o meno rigorosamente una designazione UNI.

Per avere un'idea delle fasi presenti e, quindi, della famiglia a cui appartiene un acciaio inossidabile avendo a disposizione la sola composizione chimica, si può ricorrere al diagramma di Schaeffler che converte il tenore degli elementi che stabilizzano le fasi α e γ nei due parametri cromo equivalente e nichel equivalente.



Acciai inossidabili martensitici - Sono suscettibili di tempra martensitica avendo la trasformazione gamma/alfa. Presentano tradizionalmente tenori di carbonio superiori a 0,12% , di cromo superiori a 13% e piccoli quantitativi di nichel e molibdeno. Vengono usati per parti meccaniche soggette ad usura, per lame, stampi, sfere di cuscinetti, ugelli, iniettori, alberi e parti di pompe....

Acciai inossidabili ferritici - Non presentano trasformazioni allotropiche della ferrite, che è stabile dalla temperatura di solidificazione in giù; hanno tenori di carbonio tra 0,06 e 0,16%; cromo tra 13 e 26 %; non hanno nichel. Sono suscettibili di infragilimento per permanenze in un campo di temperature che va da poco sotto 475°C fino a poco sopra 850 per fenomeni di formazione di fasi fragili (α e α' , χ , σ). La fase σ ad esempio è una fase intermetallica fragile la cui composizione varia in un ampio campo di concentrazioni dei vari elementi secondo una formula del tipo $(Cr, Mo)_x (Fe, Ni, Mn)_y$. La facilità di permanere o di transitare nel campo di temperature critiche a seguito di trattamenti termici o di saldature, rende molto concreto il pericolo di avere un comportamento fragile e, quindi, limita l'impiego di tali acciai.

Gli acciai inossidabili più comuni		
AISI	UNI	classe
410	X 12 Cr 13	martensitici
420	X 30 Cr 13	martensitici
440	---	martensitici [1% C; 17% Cr]
430	X 8 Cr 17	ferritici
446	X 16 Cr 26	ferritici
304	X 5 CrNi 1810	austenitici
304L	X 2 CrNi 1811	austenitici
316	X 5 CrNiMo 1712	austenitici
316L	X 2 CrNiMo 1712	austenitici
321	X 6 CrNiTi 1811	austenitici
310	X 22 CrNi 2520	austenitici

Acciai inossidabili austenitici - Sono leghe ferro-cromo-nichel con tenori particolarmente bassi di carbonio e stabilità della austenite su tutto il campo di temperature. Hanno ottima resistenza alla corrosione in molti campi applicativi, duttilità e tenacità. Non

essendo suscettibili di trasformazioni strutturali da trattamento termico, per ottenere buona resistenza meccanica si deve ricorrere all'incrudimento.

In genere si considera che per aumentare la resistenza alla corrosione bisogna aumentare il contenuto di Cr e di Mo; questi due elementi sono alfa-genitori e, quindi, se si vuole favorire la presenza di fase gamma, occorre compensare con elementi gamma-genitori come Ni, Mn e, più recentemente, azoto.

Acciai inossidabili duplex - Costituiscono una nuova categoria di acciai inossidabili, nei quali è prevista la presenza contemporanea di due fasi, come la ferrite e l'austenite; hanno caratteristiche meccaniche e di resistenza alla corrosione molto interessanti. Hanno tenori di Cr tra 22 e 27%, di Ni tra 4 e 7% e contengono Mo e N.

Acciai inossidabili indurenti per precipitazione - Presentano elevate caratteristiche meccaniche grazie alla precipitazione di seconde fasi nella matrice austenitica o martensitica. Presentano tenori molto variabili di Cr, di Ni ed altri elementi di lega come Mn, P, Al, Cu secondo i brevetti particolari. Non sono chiaramente identificabili nel diagramma di Schaeffler.

Processi speciali per la fabbricazione di acciai inossidabili

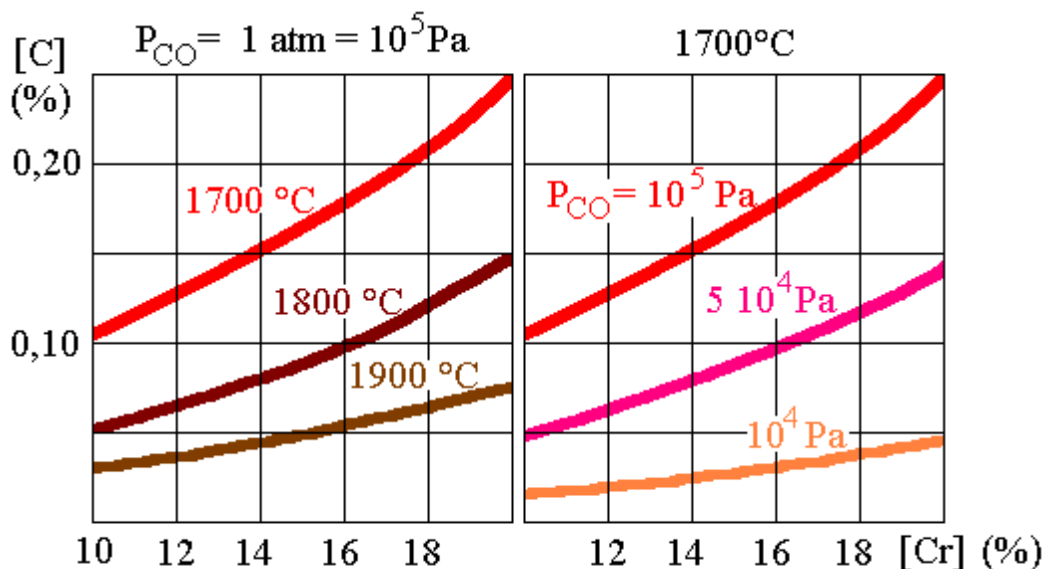
Molti tipi di acciai inossidabili, sia ferritici che austenitici e dei tipi più pregiati, richiedono tenori di carbonio molto bassi; per essi il carbonio è da considerare un'impurezza altamente indesiderabile perché può provocare la corrosione intergranulare. L'ossidazione del carbonio a livelli <0,03% è una operazione di affinazione difficile a condurre in tutti i processi di acciaieria. L'ossidazione del carbonio in presenza di cromo pone ulteriori difficoltà, in quanto

comporta inevitabilmente quella contemporanea del cromo, che per carboni così bassi diviene praticamente insostenibile. Anche l'alligazione in cromo pone difficoltà, dovendosi ricorrere a leghe Fe-Cr con carbonio particolarmente basso, peraltro molto costose perché fabbricate con processi di fabbricazione complessi, dato che nella riduzione del cromo al forno elettrico di riduzione usando il carbonio come riducente si ottiene una lega che si satura in carbonio sino a livelli elevati.

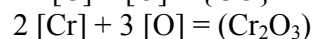
Gli acciai inossidabili sono stati sempre fabbricati al forno elettrico ad arco, risolvendo con vari accorgimenti tecnologici i problemi dell'affinazione e dell'alligazione in cromo, sino agli elevati livelli richiesti, di un bagno di acciaio liquido previamente portato ad un livello di carbonio molto basso.

Negli ultimi anni questa tecnologia ha avuto una radicale evoluzione, con la applicazione di alcuni semplici principi termodinamici; questo è un caso esemplare della applicazione di conoscenze di base a procedimenti industriali, con risultati che hanno comportato la radicale trasformazione delle tecniche e degli impianti di tutto un settore di grande rilevanza, quale è quello della fabbricazione degli acciai inossidabili.

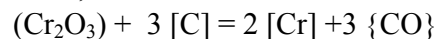
Si è già trattato l'argomento dell'equilibrio Cr-C nel corso di una affinazione ossidante. Al crescere della temperatura l'equilibrio si sposta favorevolmente ad una ossidazione preferenziale del carbonio rispetto al cromo, dato che il rapporto di equilibrio Cr/C si muove verso valori più alti. Inoltre quando un bagno liquido di acciaio inossidabile contenente cromo viene decarburato, il CO che si sviluppa è in equilibrio con una pressione di un'atmosfera o anche superiore.



Le reazioni che descrivono gli equilibri sono:



sottraendo dalla prima la seconda, si ottiene:



per la quale vale la relazione:

$$K = \frac{[Cr]^2 (P_{CO})^3}{[C]^3 (Cr_2O_3)}; \log K = 25,6 - (40563/T)$$

In queste condizioni esiste un preciso limite alla quantità percentuale di cromo che può esistere in equilibrio col carbonio per ogni temperatura. Ogni eccesso di cromo viene inevitabilmente ossidato ed al diminuire del carbonio diminuisce anche il tenore di cromo che può essere presente in soluzione nell'acciaio. Questo costituisce il valore limite termodinamico di decarburazione di un bagno contenente un determinato tenore di cromo.

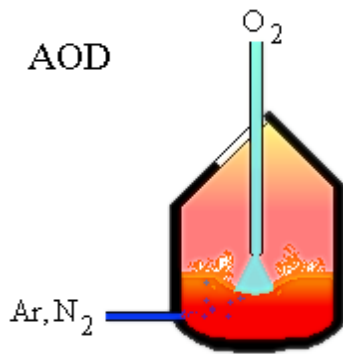
Ma se si abbassa la pressione alla quale il CO si sviluppa è possibile giungere nella ossidazione a più bassi valori del carbonio compatibili con più alti valori di cromo. Ciò è

illustrato nella figura di destra, ove sono riportate curve relative all'equilibrio Cr/C per diversi valori di p_{CO} a temperatura costante.

In definitiva le vie per la risoluzione del problema della fabbricazione di acciai ad alto tenore di cromo e basso tenore di carbonio sono le seguenti:

a) svolgere la decarburazione alla temperatura la più elevata possibile, compatibilmente con la tenuta dei refrattari, con la fattibilità tecnologica e con i vincoli economici (figura di sinistra);

b) svolgere la decarburazione consentendo lo sviluppo del CO ad una bassa pressione (figura di destra).



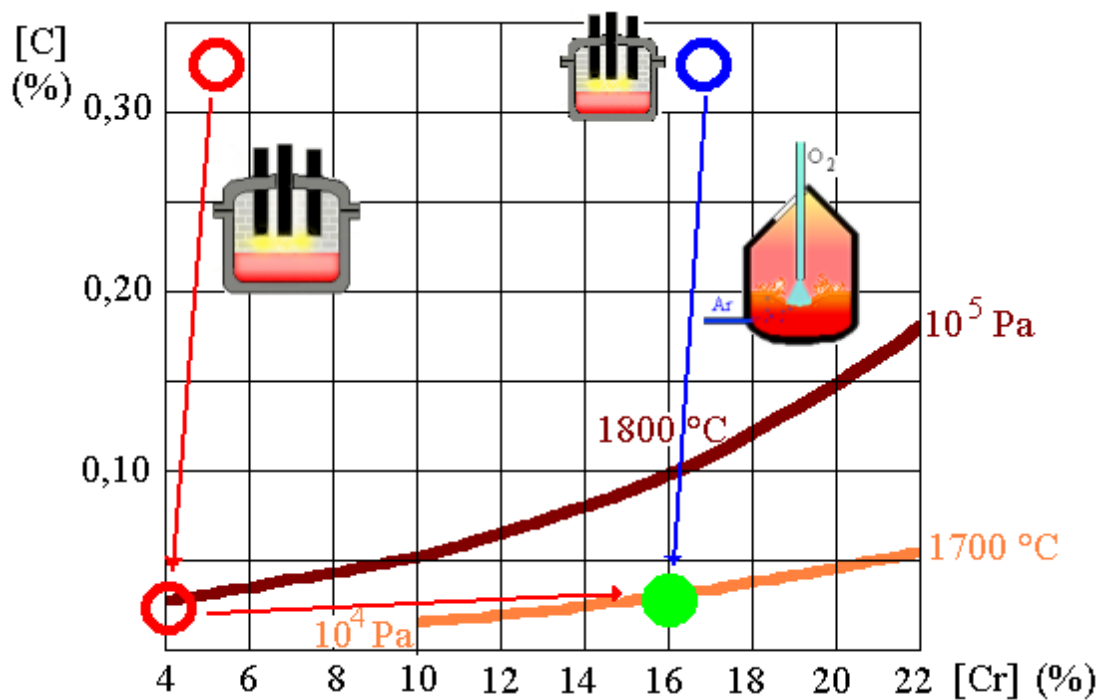
Questa via è stata realizzata con due tecniche. Con il processo VOD *vacuum oxygen decarburization* si conduce l'ossidazione mediante soffiaggio di ossigeno con lancia in un reattore sotto vuoto. Ma vi è anche la possibilità di abbassare la pressione di sviluppo del CO abbassandone la pressione parziale in luogo di quella totale. Ciò è stato realizzato nel processo AOD *argon oxygen decarburization*, in cui la decarburazione viene condotta in un convertitore soffiato dal fondo ed eventualmente dall'alto con una lancia, facendo gorgogliare nel metallo miscela di gas argon e ossigeno con rapporto di miscela variabile.

All'aumentare del grado di diluizione dell'ossigeno con l'argon nel gas ossidante è possibile abbassare la pressione parziale alla quale il CO si sviluppa e quindi spingere ulteriormente la decarburazione salvaguardando il cromo dall'ossidazione.

Il processo AOD ha avuto negli ultimi anni ampi sviluppi applicativi nell'industria dell'acciaio inossidabile. La fabbricazione viene condotta in due fasi:

a) fusione e alligazione dell'acciaio nel forno elettrico ad arco

b) affinazione ossidante del metallo liquido, correzione ed alligazione finale in convertitore soffiato dal fondo con miscela di argon-ossigeno, con possibilità di regolazione del rapporto di miscela impiegato ai fini della condotta dell'affinazione in modo ottimale. Il rapporto Ar/O_2 varia da valori prossimi a $1/4$ nelle prime fasi del soffiaggio fino a valori attorno a $4/1$ nelle ultime fasi, quando il carbonio è ormai ai livelli più bassi.



Processi speciali di rifusione dell'acciaio

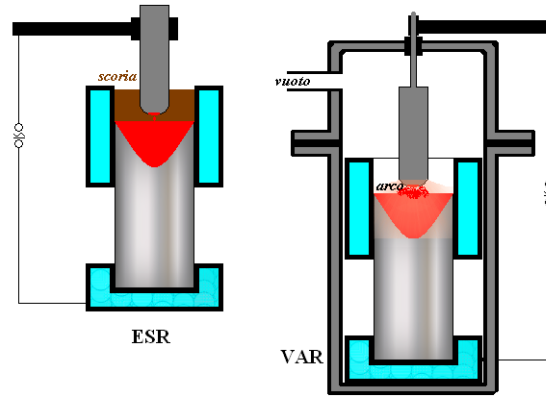
Le applicazioni per le tecnologie più avanzate hanno spinto negli ultimi venti anni a sviluppare leghe a base di ferro di caratteristiche sempre più elevate, particolarmente per il campo delle costruzioni aeronautiche, missilistiche ed aerospaziali (turbine a gas, turbogetti, cuscinetti per motori aeronautici, ingranaggi, strutture di aeromobili e per costruzioni missilistiche). Il campo dei materiali per queste applicazioni è molto ampio: va dagli acciai da costruzione a basso tenore in elementi di lega ad elevata resistenza, agli acciai per cuscinetti di rotolamento, contenenti il 2-4% di elementi di lega, sino agli acciai austenitici di elevata resistenza per gli impieghi alle temperature più elevate, contenenti sino al 40-45% di vari elementi di lega, essendo il rimanente ferro. I requisiti richiesti per applicazioni severe di questo tipo riguardano principalmente un elevato grado di omogeneità di analisi (massimo

contenimento quindi delle segregazioni chimiche), ed un'elevata purezza (sotto gli aspetti del contenuto delle inclusioni non metalliche, delle varie impurezze inquinanti e dei gas inclusi). Sono richiesti sempre severi esami non distruttivi (mediante ultrasuoni) alle caratteristiche di resistenza a fatica, elevata insensibilità agli effetti d'intaglio.

Per la produzione di acciai e leghe ferrose che rispondano a tali esigenze si è fatto dapprima ricorso alla tecnica di fusione sotto vuoto in forno a induzione, colando sempre sotto vuoto un convenzionale lingotto. Le caratteristiche offerte da un processo di questo tipo sono legate all'eliminazione di azioni ossidanti da parte dell'atmosfera sul metallo, di assorbimento di gas (in tali applicazioni interessa talora un contenuto di azoto della lega particolarmente basso ed all'ottenimento di una composizione chimica della lega particolarmente basso), ed all'ottenimento di una composizione chimica controllata entro limiti ristretti. Ma non possono venire evitate reazioni indesiderate con i refrattari del crogiolo né si può realizzare un processo di desolfurazione. Soprattutto restano insoluti i problemi originati dai fenomeni che si svolgono durante la solidificazione del lingotto: segregazione chimica, formazione di addensamenti di inclusioni nelle zone più segregate di ultima solidificazione.

Sono stati sviluppati successivamente, nuovi metodi di rifusione che portano, oltre ai vantaggi propri della fusione e della colata sottovuoto, a produrre un lingotto che presenta in misura minima disomogeneità analitica, segregazioni ed inclusioni non metalliche. Inoltre la fusione del metallo non viene svolta in un recipiente refrattario: si evita così ogni effetto indesiderato sulla purezza della lega che il contatto con il refrattario può comportare. I nuovi procedimenti di fusione sotto vuoto di un elettrodo consumabile (processo VAR: *vacuum arc remelting*), di fusione di un elettrodo consumabile sotto scoria protettiva (processo ESR: *electro-slag remelting*), hanno costituito un passo avanti nella produzione di acciai di altissima qualità e di superleghe a base di ferro. Vi è infine il procedimento di fusione e trattamento sottovuoto, con riscaldamento per bombardamento elettronico, detto EBR: (*electro-beam remelting*). Fasci elettronici, provenienti da emissione termoionica, sono opportunamente focalizzati ed accelerati e forniscono l'energia per la fusione di un elettrodo della lega da produrre; questo viene fatto avanzare in una disposizione catodica anulare sotto vuoto, essendo così assoggettato al bombardamento elettronico. La fusione, svolta sotto vuoto spinto e con elevata superficie di metallo esposta, determina una superaffinazione, con eliminazione pressoché completa di inclusioni non metalliche, di gas e delle impurezze metalliche indesiderate presenti, che vengono allontanate dal metallo liquido per evaporazione. Il costo di questi trattamenti speciali di rifusione è giustificato solo dalla migliore qualità del prodotto finale.

Processo VAR - Consiste nel rifondere sotto vuoto un elettrodo prefabbricato, costituito della lega da produrre, mediante un arco elettrico a corrente continua. Il metallo liquido va a formare direttamente il lingotto, entro una lingottiera a pareti di rame raffreddate ad acqua. La flangia superiore del crogiolo-lingottiera va a costituire chiusura della camera a vuoto. In tal modo il lingotto, che generalmente è di sezione circolare, cresce lentamente verso l'alto, via via che la fusione dell'elettrodo procede. Si realizza una solidificazione del metallo con velocità molto bassa, controllabile ed uniforme, che progredisce a spese di una pozza di liquido di dimensioni contenute, mantenuta nella parte superiore del lingotto dall'elettrodo che l'alimenta con continuità. Tale procedimento determina una struttura del lingotto solidificato molto regolare ed uniforme, praticamente esente da disuniformità analitiche ed inclusioni, dovute a segregazione di solidificazione. Operando a pressioni basse si ottiene anche un controllo efficace sul tenore dei gas nel prodotto finale.



Processo ESR - Anche questo procedimento prevede la rifusione di un elettrodo consumabile, il cui materiale va direttamente a formare il lingotto entro una lingottiera-crogiuolo raffreddata ad acqua (analogo quindi al procedimento VAR già descritto). Nel caso del processo ESR la fusione non è condotta sotto vuoto, bensì l'elettrodo viene fatto fondere immerso in una scoria sintetica elettro-conduttrice; questa costituisce protezione per il sottostante metallo liquido ed esercita una energica azione affinante sulle goccioline di metallo liquido che l'attraversano. Per la fusione si impiega corrente alternata ad alta densità e bassa tensione, che attraversando la scoria conduttrice genera in seno ad essa, per resistenza, il calore necessario alla fusione dell'elettrodo immerso. Questo procedimento, a differenza di quello VAR, prevede un'azione affinante, svolta mediante l'intervento di una fase non metallica; le modalità di solidificazione del lingotto sono abbastanza simili fra i due procedimenti.

Il processo ESR è d'altro canto meno efficace di quello VAR ad ottenere un acciaio a basso contenuto d'idrogeno.



IL COLAGGIO DELL'ACCIAIO

L'acciaio liquido, indipendentemente dal procedimento di fabbricazione seguito, alla fine del processo viene versato tutto in una siviera di capacità commisurata a quella dei forni o dei convertitori. La siviera è un recipiente contenitore in lamiera d'acciaio saldata, internamente rivestito in refrattario. E' trasportata da un carroponte e con essa si effettua la successiva colata dell'acciaio nelle lingottiere, alle macchine di colata continua, o nelle forme, nel caso che l'acciaio sia destinato alla produzione di getti. S'impartisce così all'acciaio all'atto della solidificazione, la forma più opportuna per gli ulteriori impieghi cui è destinato.

Il colaggio dell'acciaio in lingotti (*ingots*) è stato fino a tutti gli anni '60 il sistema principale di solidificazione in siderurgia. Attualmente nei paesi più industrializzati si cola in lingotto la quantità necessaria alla fabbricazione dei soli prodotti fucinati (alberi, rotor). La lingottiera (*ingot mould*) è una forma di ghisa a pareti di forte spessore nella quale si svolge la solidificazione di una quantità limitata di acciaio; a solidificazione terminata il lingotto viene estratto dalla lingottiera (slingottamento o scassetamento, *stripping*) ed avviato alle successive lavorazioni.

Per completezza si deve ricordare che una piccola parte della produzione d'acciaio viene utilizzata in fonderia per la produzione di getti. Getti in acciaio vengono impiegati nell'industria nucleare per componenti di pompe e di generatori di vapore, negli impianti idraulici per turbine, nelle industrie chimica, petrolchimica e siderurgica soprattutto con l'impiego di acciai inossidabili.

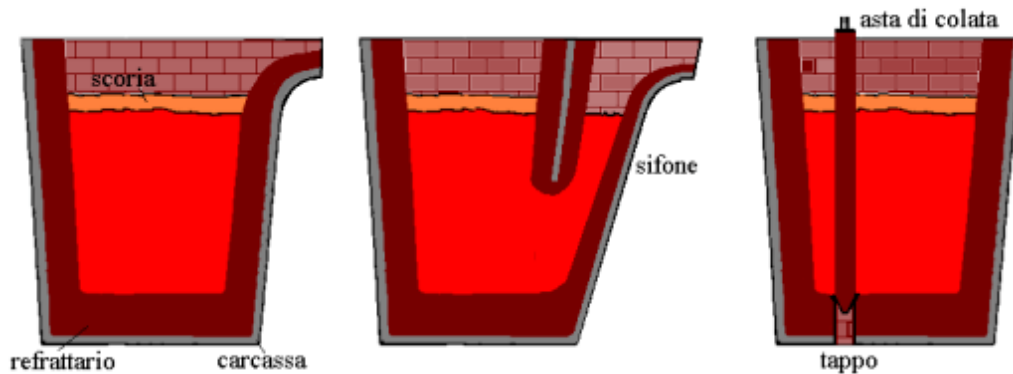
Il sistema del colaggio in colata continua si basa sul principio di colare, con continuità e senza interruzioni fino al completo svuotamento della siviera, tutto l'acciaio liquido, trasformandolo nel corso della solidificazione in semilavorati di sezione appropriata, tali da poter essere destinate direttamente ai treni di laminazione finitori (e quindi senza necessità di alcuna operazione preliminare di sbazzatura mediante laminazione che avrebbe invece il lingotto). L'interposizione di una panierina tra siviera e colata continua permette di mantenere un polmone di acciaio liquido che alimenta il sistema senza soluzione di continuità durante il cambio di siviera.

La colata dell'acciaio in lingottiera o alla colata continua costituisce una complessa tecnologia, della massima importanza per il successo qualitativo della produzione. L'obiettivo fondamentale è l'ottenimento di un prodotto che, dopo solidificazione, sia omogeneo chimicamente e che presenti una determinata struttura fisica e metallografica. A questo riguardo la tecnica di colata deve tener conto di fenomeni fondamentali che si svolgono nel corso della: ritiro di solidificazione, struttura cristallina e dendritismo, segregazione chimica, precipitazione di inclusioni non metalliche, formazione di soffiature per sviluppo di gas in soluzione nel metallo liquido o a seguito di reazioni. Inoltre nel corso del colaggio dell'acciaio liquido, della solidificazione e del successivo raffreddamento del lingotto o della barra di colata continua, può verificarsi la formazione di difetti, che generalmente si manifestano come discontinuità fisiche del materiale metallico, sia superficiali che interne. La tecnica di colata dell'acciaio è relativamente svincolata dai processi per la produzione dell'acciaio liquido; essa è piuttosto condizionata dai tipi di acciai e di prodotti da fabbricare e dalle caratteristiche degli impianti ove vengono svolte le lavorazioni successive del prodotto di acciaieria (per deformazione plastica a caldo).

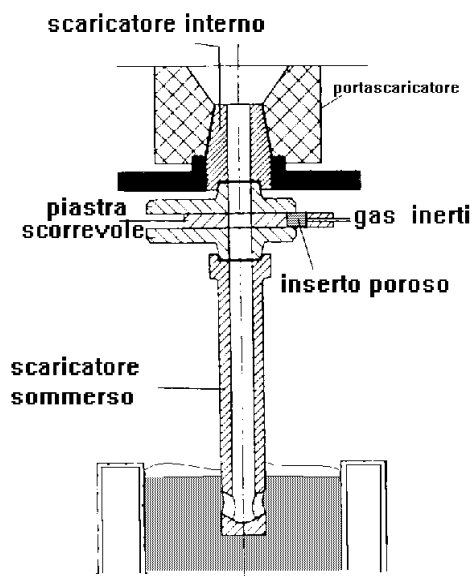
La siviera e la colata in siviera

La siviera è rivestita di mattoni refrattari, per lo più in materiale silico-alluminoso, di elevata densità e bassa porosità. Si impiegano cementi resistenti alla infiltrazione dell'acciaio; è opportuno che i mattoni presentino ristretta tolleranza dimensionale, dimodochè, possa essere contenuto lo spessore dei giunti fra di essi. La muratura è generalmente costituita di un doppio strato (uno strato di usura o di lavoro ed uno strato di protezione). La siviera porta sul fondo uno (talvolta due) fori, di diametro variabile fra 20-25 mm sino a massimi di 100-120 mm, ottenuti

con l'inserimento della muratura di due pezzi refrattari di speciale sagomatura (scaricatore o sedia e portascaricatore). Attraverso il foro dello scaricatore avviene l'efflusso per il colaggio dell'acciaio liquido. Il foro dello scaricatore può venir chiuso o aperto, e l'efflusso regolato, mediante un tappo sagomato (generalmente costituito a uno speciale impasto refrattario contenente grafite). Il tappo è fissato all'estremità di un'asta (spina), costituita da un sostegno interno in tondo di acciaio, esternamente rivestito di refrattari a forma tubolare (tubi spina). In alternativa si può usare il sistema di chiusura del foro di colata, detto a cassetto (*slider*), realizzato mediante lo scorrimento laterale reciproco di tavelle di refrattari speciali del tipo ad altissimo tenore di allumina o grafitici. Il controllo dell'efflusso dell'acciaio dal cassetto può essere agevolmente controllato e regolato, ma costituisce un punto di debolezza del sistema per il pericolo di fenomeni di usura da parte del flusso di metallo fuso o di infiltrazione sempre del metallo fuso attraverso i giochi tra le superfici in stisciamo.



Nel corso della colata e del mantenimento dell'acciaio in siviera si possono fare quei trattamenti fuori forno precedentemente descritti. Se il trattamento si riduce alle sole aggiunte correttive e disossidanti (ferro-silicio, ferro-manganese, alluminio), queste possono essere predisposte sul fondo della siviera prima di iniziare il colaggio o effettuate in parte nel corso della colata, con sequenza prestabilita. Il tempo di riempimento della siviera (dell'ordine dei 10 minuti) deve essere tale da permettere una corretta effettuazione delle aggiunte previste; la turbolenza determinata dalla caduta dell'acciaio assicura la fusione delle aggiunte ed in una certa misura l'omogeneizzazione termica e chimica del bagno. La fusione delle aggiunte avviene a spese del calore sensibile dell'acciaio liquido. Anche a causa di problemi di omogeneità chimica che possono sorgere, vi sono limiti ai quantitativi massimi di leghe che è possibile aggiungere.

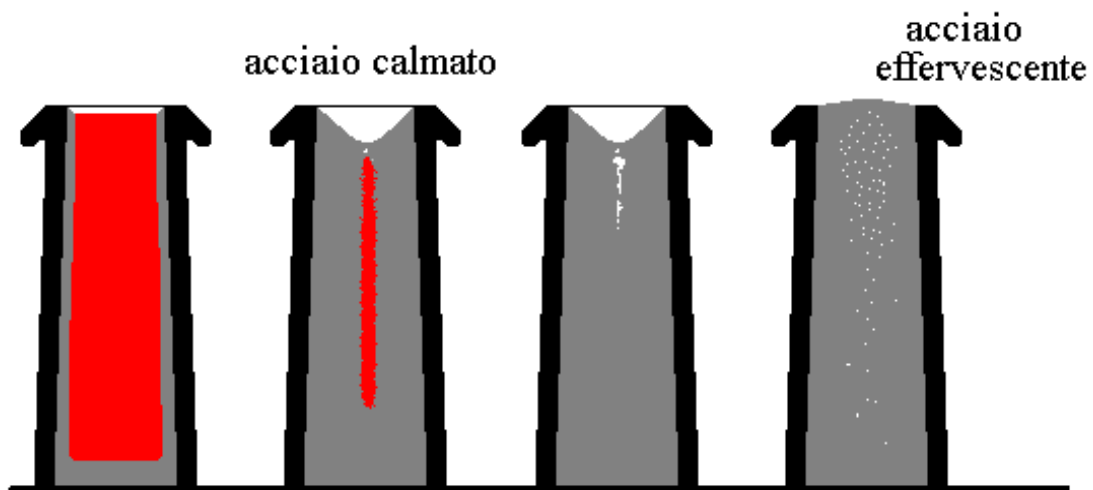


La temperatura finale dell'acciaio liquido in forno od in convertitore al momento dello spillaggio deve essere messa a punto per ogni tipo di acciaio (o famiglia di tipi di acciai) in base alla caduta di temperatura prevista durante la colata in siviera, in relazione alle successive modalità di colata dei lingotti oppure alla colata continua, ad eventuali trattamenti di degasaggio, che determinano ulteriori cadute di temperatura. Il controllo della temperatura dell'acciaio liquido prima dello spillaggio ed in siviera viene oggi fatto in tutte le acciaierie mediante termocoppie ad immersione al platino-platino rodio, e costituisce uno dei più importanti parametri del controllo qualitativo della produzione.

I trattamenti di degasaggio, che costituiscono in molti casi l'ultima operazione prima della colata, impongono una separazione tra metallo liquido ed ambiente da realizzare colando entro condotti di refrattario l'acciaio spillato dal fondo della siviera. La presenza di inclusioni allo stato solido (principalmente Al_2O_3 e CaS) comporta un rischio di incrostazioni e riduzione delle portate. Risulta utile la aggiunta di calcio per formare calcio-alluminati del tipo $CaO-Al_2O_3$, che sono liquidi alla temperature interessate. Ma il calcio, in presenza di zolfo, può reagire per formare il CaS che è uno dei prodotti pericolosi, per cui è essenziale, anche da un punto di vista della produttività dell'impianto, un'efficace desolfurazione ed una decantazione delle inclusioni.

Lingotti e lingottiere

Le dimensioni dei lingotti sono determinate principalmente dal tipo, dalle dimensioni e dalla potenza degli impianti di laminazione o di fucinatura in cui essi vanno lavorati; la loro forma dipende dal tipo di acciaio e dalla sezione trasversale dei prodotti laminati da ottenere. Sono dei parallelepipedi, con una lieve conicità per agevolarne l'estrazione dalla lingottiera. La sezione trasversale è per lo più rettangolare, nel caso che il lingotto sia destinato all'ottenimento di laminati piani (lingotti piatti per bramme e lamiere); i lingotti per la produzione di barre, profilati e tondi hanno quasi sempre sezione trasversale quadra. Vi sono lingotti a sezione poligonale, quali quelli da fucinatura; in alcuni casi a sezione circolare (ad esempio per la fabbricazione di tubi non saldati). Le dimensioni ed il peso dei lingotti variano molto da un impianto all'altro, in funzione dei fattori impiantistici che li condizionano: il loro peso può andare da un centinaio di chilogrammi sino a 30-40 t nel caso di lingotti da laminazione, mentre quelli da fucinatura talvolta superano tali massimi. L'altezza dei lingotti da laminazione varia da meno di 1 m sino a massimi di 2-2,5 m; vi sono alcuni limiti alla massima altezza ammissibile, a causa di fattori metallurgici che determinano le strutture di solidificazione (ad esempio nel caso



degli acciai effervescenti).

Come già detto, in base al grado di disossidazione subito, gli acciai possono suddividersi in calmati, semicalmati ed effervescenti. Nel caso degli acciai calmati si cerca di evitare gli effetti dannosi dovuti al ritiro ed alla segregazione chimica di solidificazione, condizionando il processo di solidificazione del lingotto dimodochè, proceda dal basso verso l'alto, e che la zona

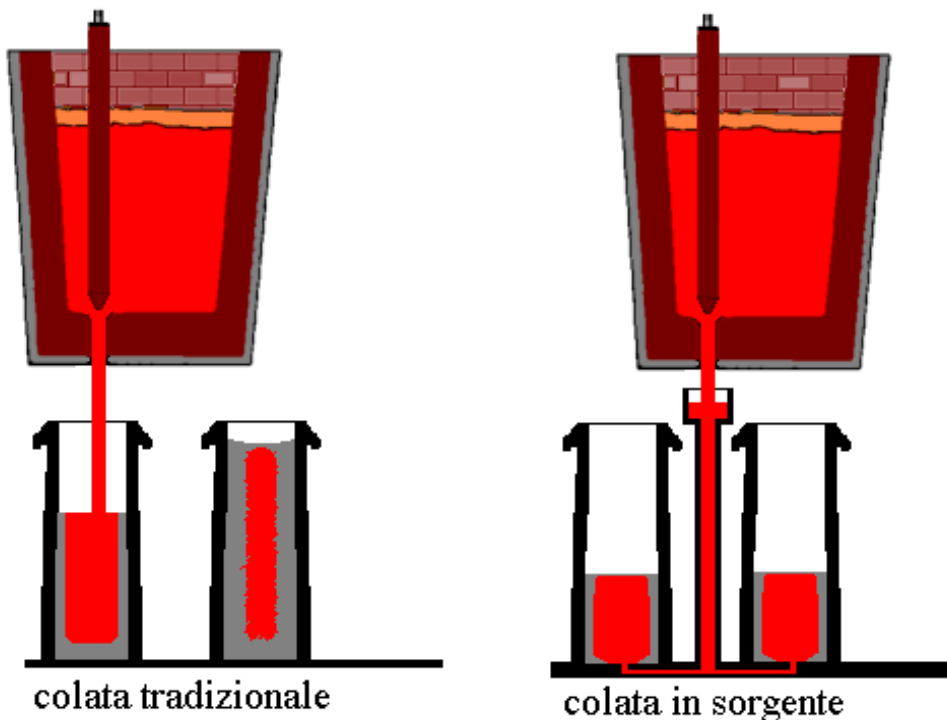
segregata e di ritiro sia concentrata alla sommità del lingotto. Questa costituisce la cosiddetta materozza, che viene asportata nel corso delle operazioni di laminazione e che costituisce quindi una caduta di lavorazione (dell'ordine di 8-15% del peso del lingotto). Per ottenere la solidificazione direzionale e far sì che l'acciaio di parte alta solidifichi per ultimo, andando ad alimentare il corpo del lingotto con metallo liquido, si provvede a coibentare termicamente la materozza tutto attorno e superiormente, o addirittura a somministrarle calore con l'impiego di materiali e polveri di copertura esotermiche (materozze esotermiche). Sempre allo scopo di esaltare la direzionalità della solidificazione si può dare al lingotto una forma rastremata a sezioni trasversali crescenti verso l'alto (lingotti a conicità inversa).

Nel caso degli acciai semicalmati ed effervescenti non si fa uso di materozza; in questo caso è in genere preferita la forma di lingotto rastremata con sezioni trasversali crescenti verso il basso (lingotto a conicità diretta). La forma del lingotto, se a conicità diretta o inversa, condiziona anche gli impianti, le attrezzature e le operazioni di slingottamento. In relazione ai vari tipi e forme di lingotto si hanno i corrispondenti numerosissimi tipi di lingottiere (quadre, piatte, poligonali, a fondo chiuso o aperto, a forma di bottiglia, a conicità diretta o inversa, a pareti lisce oppure corrugate e ondulate).

Le lingottiere sono dei getti in ghisa a pareti di notevole spessore: lo spessore delle pareti deve essere abbastanza grande da determinare la rapida solidificazione dell'acciaio fuso che sale entro la lingottiera a contatto con esse, evitando incollamenti e saldature con la ghisa della lingottiera. Per tale effetto (di conchiglia) si forma attorno al metallo liquido una pelle solidificata di acciaio, che successivamente si contrae sulla massa interna di metallo ancor liquida, staccandosi leggermente dalle pareti della lingottiera. In tal modo si viene a costituire uno strato di aria che si interpone tra lingotto e lingottiera con effetto isolante.

La colata dei lingotti

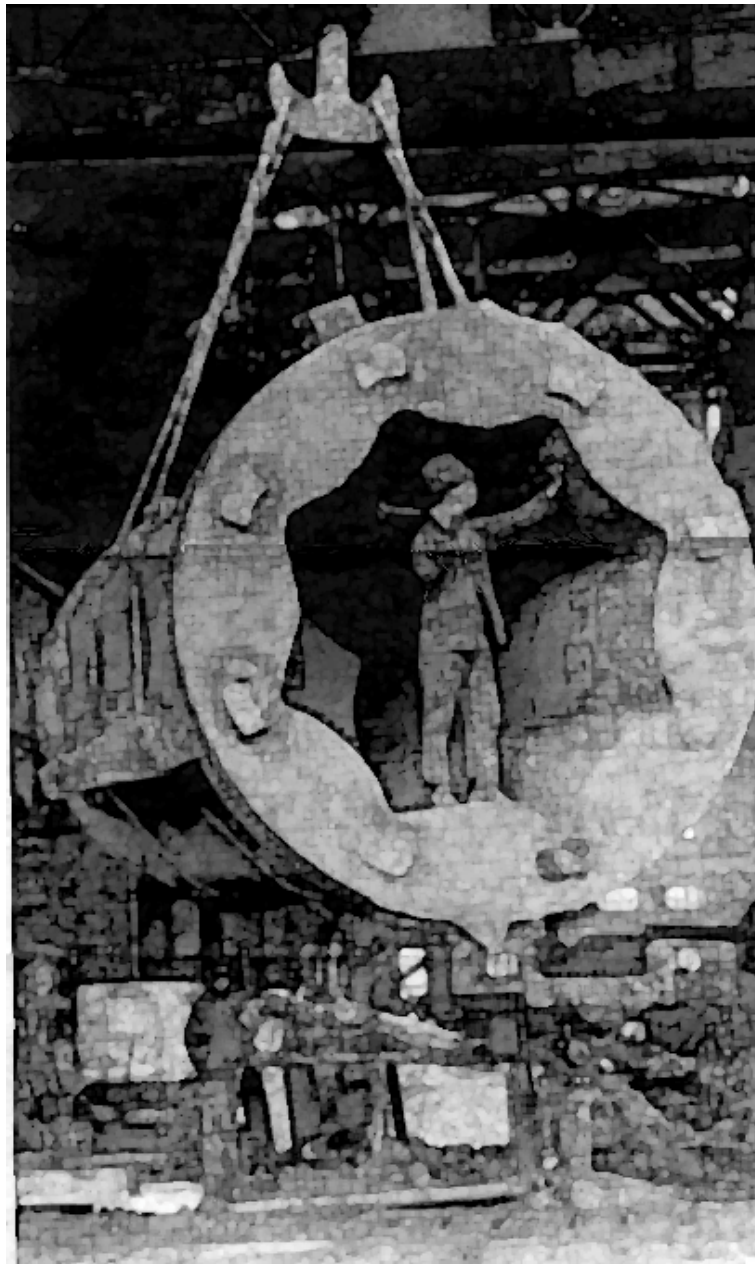
La colata dell'acciaio liquido in lingottiera viene fatta con diverse tecniche, adeguate al tipo di acciaio, alle esigenze qualitative dei prodotti da fabbricare, alle dimensioni dei lingotti e della colata, al numero di lingotti da colare.



Il metodo di colata più semplice ed economico, largamente utilizzato, è quello della colata diretta o in caduta. Il getto dell'acciaio, che esce dal fondo della siviera attraverso il foro dello

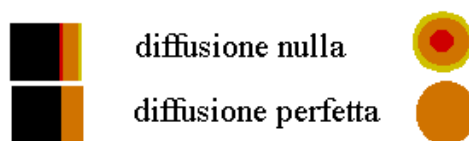
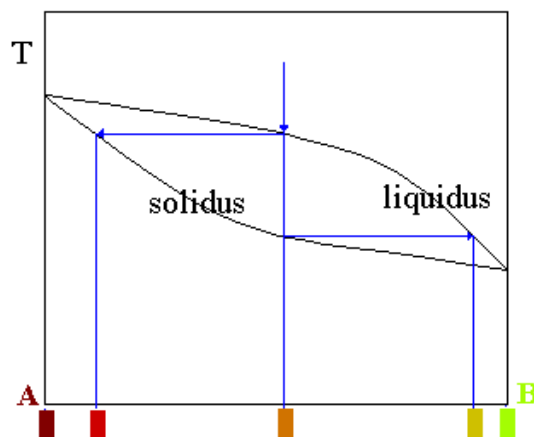
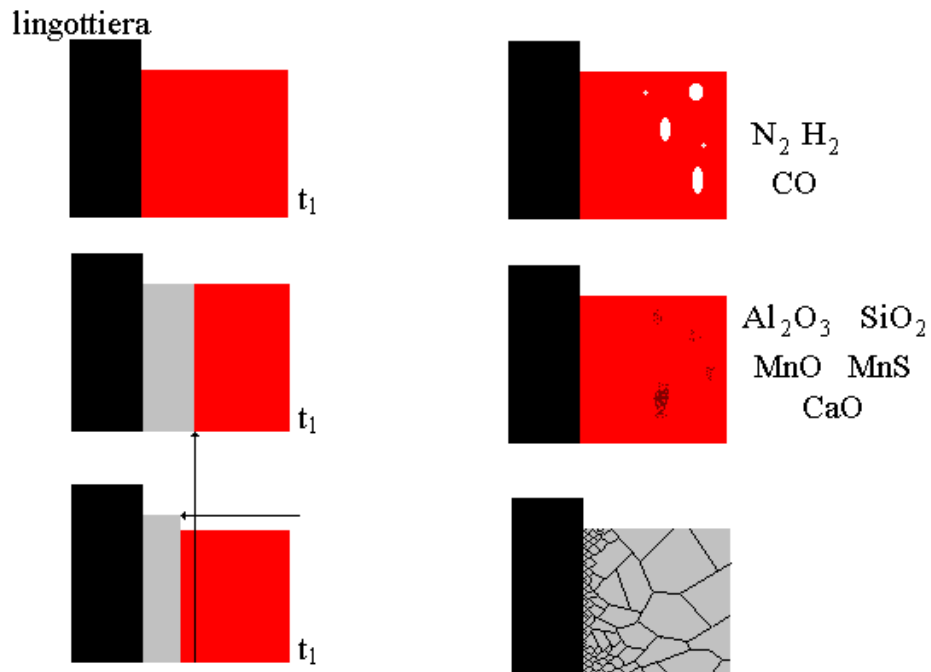
scaricatore, cade liberamente nella lingottiera dall'alto. Con questo sistema i lingotti vengono colati singolarmente in successione. In alternativa si ricorre alla colata in sorgente che alimenta il lingotto dal basso per mezzo di canali di colata rivestiti in refrattario.

Le operazioni di colata dei lingotti come già si è detto, costituiscono una fase critica nel processo industriale di fabbricazione dell'acciaio, e la tecnica di colata adottata, le modalità di preparazione delle attrezzature e di svolgimento del colaggio, hanno una importanza determinante sulla qualità del prodotto siderurgico, con riguardo speciale alla formazione dei difetti superficiali. Uno dei parametri più importanti sotto questi aspetti è la velocità di colata ossia la velocità di salita dell'acciaio nelle lingottiere (dell'ordine di 1,5 m/min). Altri fattori influenzanti sono la temperatura, la fluidità dell'acciaio ed il battente ferrostatico in siviera. Per una lingottiera di data sezione trasversale, la velocità di colata può essere fatta variare scegliendo opportunamente il diametro dello scaricatore. La velocità di colata va ottimizzata in funzione del tipo di acciaio e dei tipi di difetti superficiali riscontrati nei lingotti (principalmente cricche e paglie).



Altro aspetto importante è la preparazione e lo stato delle lingottiere; esse debbono avere una temperatura corretta alla colata (sugli 80°C), essere pulite ed esenti da incrostazioni di

ossidi, di terra e refrattari. Lo stato delle loro superfici interne, più o meno erose dall'uso, contribuisce anch'esso a determinare le condizioni di superficie del lingotto. Nel caso di prodotti particolarmente impegnativi in acciaio di tipo calmato, si usa anche ricoprire le pareti delle lingottiere con lacche a base di idrocarburi, di grafite o di alluminio.



Durante la solidificazione di un lingotto non vengono mai raggiunte condizioni di regime. Le temperature del metallo e le condizioni di scambio termico tra lingotto e lingottiera e tra questa e l'aria variano di momento in momento. Un lingotto a sezione quadrata da 10 tonnellate

ha un'altezza di 2 m ed i lati da 80 cm. Il raffreddamento con solidificazione da 1600°C fino a temperatura ambiente richiede la dissipazione di circa 3200 Mcal, pari a 13400 MJ.

La relazione empirica che lega lo spessore solidificato al tempo è del tipo:

$$s = k \sqrt{t}$$

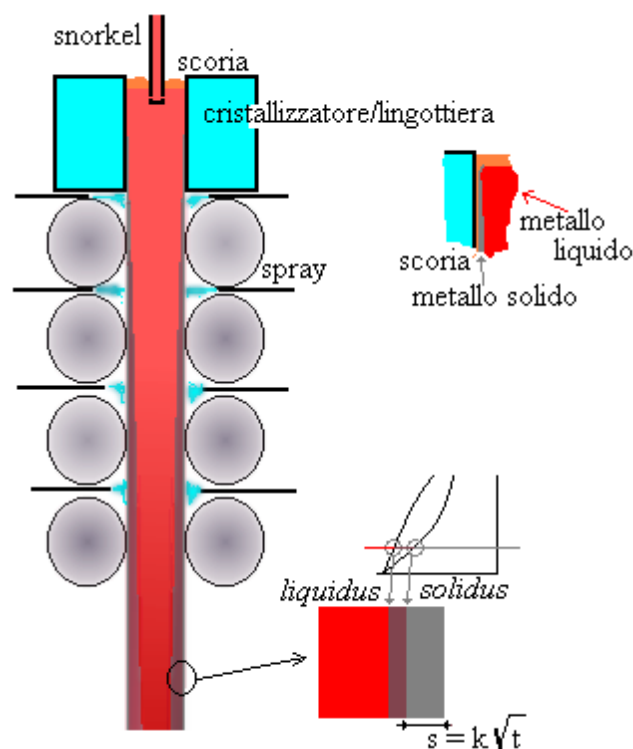
dove k, misurato in mm/min^{1/2} assume valori intorno a 20-22. Il tempo necessario per la solidificazione dell'intero lingotto da 10 tonnellate (s = 400 mm) è dell'ordine di 6 ore, mentre il raffreddamento completo prosegue per tempi ancora più lunghi.

La colata continua dell'acciaio

Le prime applicazioni all'acciaio del principio della colata continua risalgono agli anni 1950-1955, benché, l'idea di colare in continuo i metalli liquidi e le leghe sia molto antica. Una svolta decisiva nell'evoluzione dei concetti per realizzare il principio della colata continua si ebbe con l'idea, brevettata da S. Junghans nel 1933, di impiegare una lingottiera dotata di un movimento oscillatorio verticale non armonico in grado di evitare l'incollamento (*sticking*) della pelle solidificata alle pareti della lingottiera. Nel primo decennio di vita, sino al 1962 circa, il procedimento ha subito una lenta evoluzione dalle dimensioni degli impianti pilota sino ad una piena dimensione industriale, limitatamente ad impianti di modeste dimensioni e potenzialità. Dopo il 1963 l'esperienza accumulata ha consentito una svolta verso macchine di maggiori dimensioni e potenzialità, per grandi siviere e per la produzione di bramme di elevate sezione trasversale.

Oggi la colata continua ha completamente sostituito, sul piano sia tecnico che economico, il colaggio tradizionale dei lingotti di piccole dimensioni destinati alla laminazione diretta nei laminatoi finitori, sia nel campo dei lingotti di grandi dimensioni destinati ai treni sbozzatori per la laminazione ai semiprodotto intermedi siderurgici (billette e blumi per la fabbricazione dei prodotti lunghi, profilati e travi; bramme per la fabbricazione delle lamiere e dei lamierini sottili in rotoli). I vantaggi della colata continua sul colaggio dei lingotti si possono così sintetizzare :

1. Maggior resa in ferro, tipicamente da 85-87% a 95-98%;
2. Semplificazione impiantistica e minori oneri finanziari di investimenti;
3. Maggiori produttività ed uniformità qualitativa dell'acciaio.



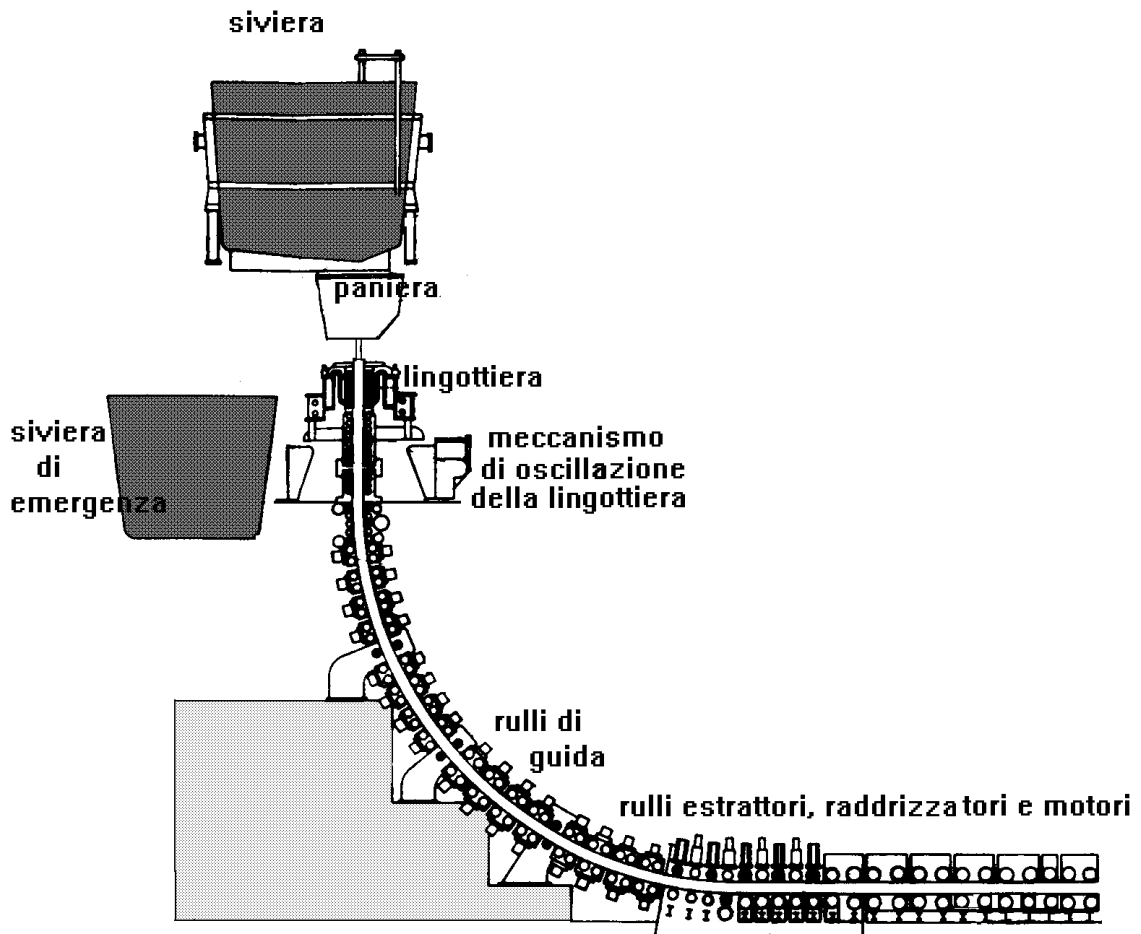
Uno dei principali vantaggi offerti dal procedimento della colata continua è quello di consentire di ottenere barre di sezione limitata e di forma appropriata per la diretta utilizzazione da parte dei treni di laminazione finitori, senza dover procedere alle operazioni preliminari di sbozzatura per laminazione, cui dovevano essere sottoposti i lingotti, particolarmente quelli di dimensioni maggiori. Con la tecnica della colata continua si ottengono direttamente all'atto della colata e solidificazione dell'acciaio, semiprodotto a sezione quadra o semiquadra (le billette e i blumi), destinati alla produzione di laminati, quali: profilati, barre, tondi. Le billette ed i blumi possono avere, ad esempio, sezioni di 100x100 mm, 150x150 mm, 180x220 mm, e così via.

Oppure si possono colare semiprodotto piatti (bramme), destinati alla produzione di lamiere: ad esempio, di sezione 1000x150 mm, 2200x250 mm, ecc.

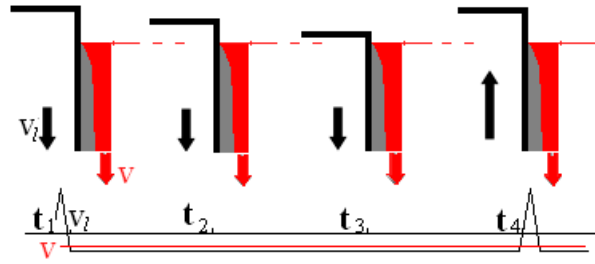
Macchine di colata continua

Un impianto di colata continua è costituito dalle seguenti parti principali:

1. Un recipiente equalizzatore e ripartitore intermedio (paniera, *tundish*), rivestito in refrattario, destinato a ricevere il getto di acciaio, che cade dalla sovrastante siviera. Ha il compito principale di mantenere un battente ferrostatico costante e quindi un deflusso regolare e controllabile dell'acciaio liquido alla sottostante lingottiera attraverso gli scaricatori sommersi (*submerged nozzle*) che proteggono la superficie del flusso di acciaio liquido e ne controllano la turbolenza. Nel caso di macchine a più linee disposte in parallelo ha anche il compito di ripartire l'acciaio fra le diverse linee. Per un miglior controllo sull'efficienza degli scaricatori, che sono disturbati dalla presenza di inclusioni non metalliche allo stato solido, si possono inserire dei filtri che trattengono meccanicamente le inclusioni di maggiori dimensioni.



2. Una lingottiera in rame, raffreddata con circolazione forzata di acqua (detta anche cristallizzatore, *mould*). La lingottiera è priva di fondo e dotata di un limitato movimento oscillatorio verticale. Essa deve assicurare la veloce solidificazione dell'acciaio, nel breve tempo che essa impiega ad attraversarlo, dimodochè la barra abbia formato un guscio esterno prima di abbandonarla. Con il suo moto oscillatorio, la lingottiera accompagna la barra nella sua discesa verso il basso; successivamente risale verso l'alto al punto morto superiore, con velocità generalmente maggiore di quella di discesa, scorrendo quindi rispetto alla barra, che prosegue il suo moto uniforme verso il basso (fase di estrazione della barra dalla lingottiera).

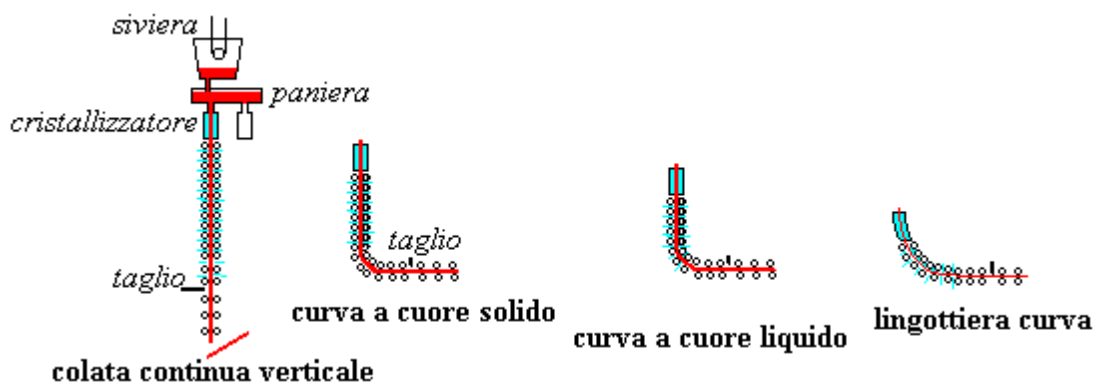


3. Una successiva zona per l'intenso raffreddamento della barra, generalmente realizzato mediante spruzzi di acqua in pressione. La barra nella sua discesa attraverso questa zona deve essere opportunamente sostenuta e guidata, per lo più da un sistema di rulli di appoggio.

4. Un assieme di cilindri motorizzati, destinati ad afferrare e trascinare la barra, determinandone il movimento e l'avanzamento lungo la linea.

5. Dispositivi per il taglio a lunghezza delle barre e per la evacuazione dei pezzi. Eventuali piani di raffreddamento, ove le barre soggiornano per un raffreddamento finale. Nel caso delle macchine a linee curve sono previste anche macchine raddrizzatrici a rulli, all'uscita di ogni linea e prima del taglio.

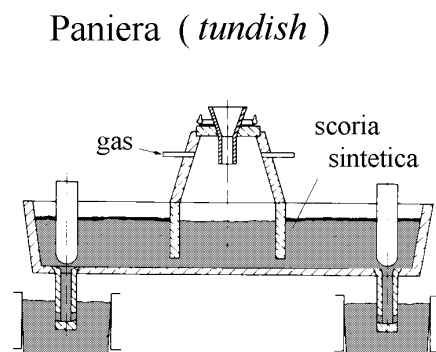
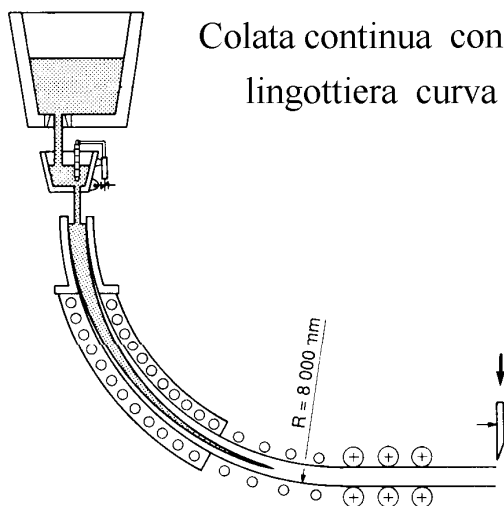
Per iniziare le operazioni di colata si fa uso di una "falsa barra" o "barra oziosa". Questa è articolata e si distende lungo la linea sino ai cilindri estrattori. La sua estremità superiore, introdotta all'interno della lingottiera dal basso, ne costituisce una chiusura mobile sul fondo, contro la quale si viene a saldare il primo acciaio liquido colato. Il moto impresso alla falsa barra lungo la linea determina il trascinamento della barra colata e consente di dare inizio alle operazioni.



Le macchine di colata continua possono essere a 1, a 2 o più linee in parallelo (ve ne sono in pratica fino ad un massimo di 8 linee). La scelta del numero di linee dipende principalmente dalle dimensioni della siviera ossia dalla quantità di acciaio che va colato entro un determinato tempo (il tempo massimo consentito per le operazioni di colata e per lo svuotamento della siviera è di circa 1 ora e 30 min. (per le siviere più grosse di 200-300 t, con punte sino a 2 h); dalla velocità di avanzamento della barra, che è una caratteristica della macchina e che dipende anch'essa dalla sezione che si cola.

La macchina di colata continua è quindi concepita per un flusso delle operazioni ed un movimento della barra continuo dall'alto verso il basso. Le prime macchine erano tutte a sviluppo continuo e verticale; ciò determina alcuni problemi, principalmente in relazione ad elevati costi di impianto, per il notevole sviluppo in altezza di macchine di grandi dimensioni. Successivamente sono state concepite e costruite macchine di altezza molto ridotta, a linee curve. Nelle macchine di tipo curvo, la barra, alla sua uscita dalla lingottiera quando al suo interno l'acciaio è ancora liquido, viene subito curvata dai cilindri di guida in direzione orizzontale (curvatura a cuore liquido); cosicché l'uscita della barra dalla linea avviene orizzontalmente a piano di campagna. In altri tipi di macchine, infine, per lo più per la colata di billette di limitata sezione, la barra viene fatta solidificare completamente lungo il percorso verticale prima di effettuare una piegatura a 90° in orizzontale e quindi le operazioni finali di raddrizzatura, taglio e uscita verso i piani di raffreddamento. L'evoluzione più recente porta a far solidificare l'acciaio in una lingottiera curva, così da limitare le piegature alla sola raddrizzatura.

La macchina di colata continua effettua il colaggio dell'acciaio con continuità e senza interruzioni, sino allo svuotamento completo di una siviera. Il suo funzionamento può essere concepito come destinato ad assolvere un ciclo di operazioni intermittente e ripetitivo, come segue: completata la colata, la macchina viene allestita per quella successiva, ripetendo il suo ciclo di utilizzazione dopo una interruzione di durata variabile. Allo scopo di ottenere uno svolgimento del colaggio sempre più continuo e senza intermittenza, si sta attualmente verificando un crescente sviluppo delle operazioni di colaggio continua senza intermittenze (il cosiddetto continuo-continuo). Si tratta di non interrompere le operazioni di colaggio ed il funzionamento della macchina dopo il completo svuotamento della siviera di acciaio, sostituendola completamente con una seconda siviera piena. Ciò può essere realizzato in vari modi, purché il cambio avvenga abbastanza rapidamente, in modo che l'acciaio contenuta nella paniera di alimentazione delle linee di colata non scenda eccessivamente di livello. Ricorrendo a tale accorgimento è possibile assicurare il funzionamento della macchina senza alcuna interruzione per sequenze di alcune colate, sino a giungere, nel caso di macchine particolarmente studiate e attrezzate, a sequenze di un numero di colate rilevante, condizionate solo dalla resistenza della paniera e degli scaricatori ai fenomeni di usura e di danneggiamento da parte della scoria eventualmente presente.



Processo di solidificazione e velocità di colata

La barra colata in continuo deve sviluppare durante la sua breve permanenza nella lingottiera (che è generalmente inferiore ad un minuto) uno spessore di pelle solida esterna, sufficiente a sopportare le sollecitazioni cui successivamente è esposta. Tali sollecitazioni sono dovute alla pressione ferrostatica, esercitata dal metallo che all'interno è ancora liquido, ed alle azioni meccaniche connesse alla trazione per l'avanzamento della barra (ad esempio per attriti a

seguito di incipienti incollamenti fra le superfici della barra e quelle della lingottiera). Lo spessore della pelle solida necessario all'uscita della lingottiera dipende dalla forma e grandezza della sezione trasversale della barra; per piccole sezioni quadre di billette è sufficiente una pelle abbastanza sottile, mentre per le sezioni di grandi dimensioni (quelli delle bramme o di grossi blumi) è necessaria una pelle notevolmente più spessa e resistente. Principalmente in ragione di tali esigenze la velocità di colata varia a seconda della sezione. La velocità di colata rappresenta la velocità di avanzamento della barra lungo la linea (espressa in metri al minuto). In relazione alla lunghezza ammissibile per la lingottiera (per lo più inferiore al metro) ed alla velocità di colata si ricava il tempo di permanenza della barra in lingottiera.

Durante la colata dell'acciaio, entro la lingottiera si stabiliscono condizioni di regime stazionario, che determinano i processi di trasmissione del calore ed i gradienti di temperatura. La superficie della lingottiera in rame viene mantenuta dalla circolazione dell'acqua di raffreddamento ad una temperatura di poco variabile, generalmente compresa tra 100 e 250 °C. La rapida sottrazione di calore da parte delle pareti della lingottiera trova il suo limite nelle condizioni del contatto fra le superfici della barra e quelle della lingottiera ed anche nella conducibilità termica dell'acciaio. Il metallo fuso è coperto da polveri facilmente fusibili che lo proteggono da fenomeni di ossidazione da parte dell'ambiente, inglobano le inclusioni eventualmente affioranti e, soprattutto, formano uno strato liquido sottile (0,5-2 mm) che si interpone tra pelle e lingottiera. Successivamente al formarsi della prima pelle solida, a causa del ritiro che il metallo subisce, si verifica il distacco della superficie della barra dalle pareti della lingottiera. Il formarsi di un'intercapedine riduce il flusso termico, rallentando il processo di solidificazione.

La relazione fondamentale che lega lo spessore solidificato al tempo è come nel caso dei lingotti:

$$s = k \sqrt{t}$$

La velocità di solidificazione, ossia l'aumento della pelle solidificata nell'unità di tempo, si ottiene derivando rispetto al tempo la precedente espressione; vale quindi la relazione:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{k}{2\sqrt{t}}$$

Mentre lo spessore solidificato cresce proporzionalmente alla radice quadrata del tempo, la velocità di solidificazione decresce inversamente ad essa. Esprimendo le lunghezze in millimetri ed i tempi in minuti, il coefficiente di solidificazione k viene espresso in $\frac{\text{mm}}{\text{min}^{1/2}}$. Il suo valore è influenzato da numerose variabili. Per la solidificazione nella lingottiera in rame raffreddata ad acqua (nelle condizioni della colata continua), si può assumere: $k = 26-29$. I valori più alti sono per billette e blumi che hanno una importante componente di asportazione del calore da parte delle pareti laterali. Il valore di k , nel caso della colata dell'acciaio in una lingottiera di ghisa a pareti spesse, ossia nel caso della colata tradizionale del lingotto, assume un valore di circa 20; la velocità di solidificazione iniziale del lingotto è approssimativamente del 40% inferiore a quella che si realizza nella colata continua, con la lingottiera in rame a raffreddamento forzato con acqua.

La quantità di calore da sottrarre all'acciaio nel corso del processo di solidificazione è la seguente:

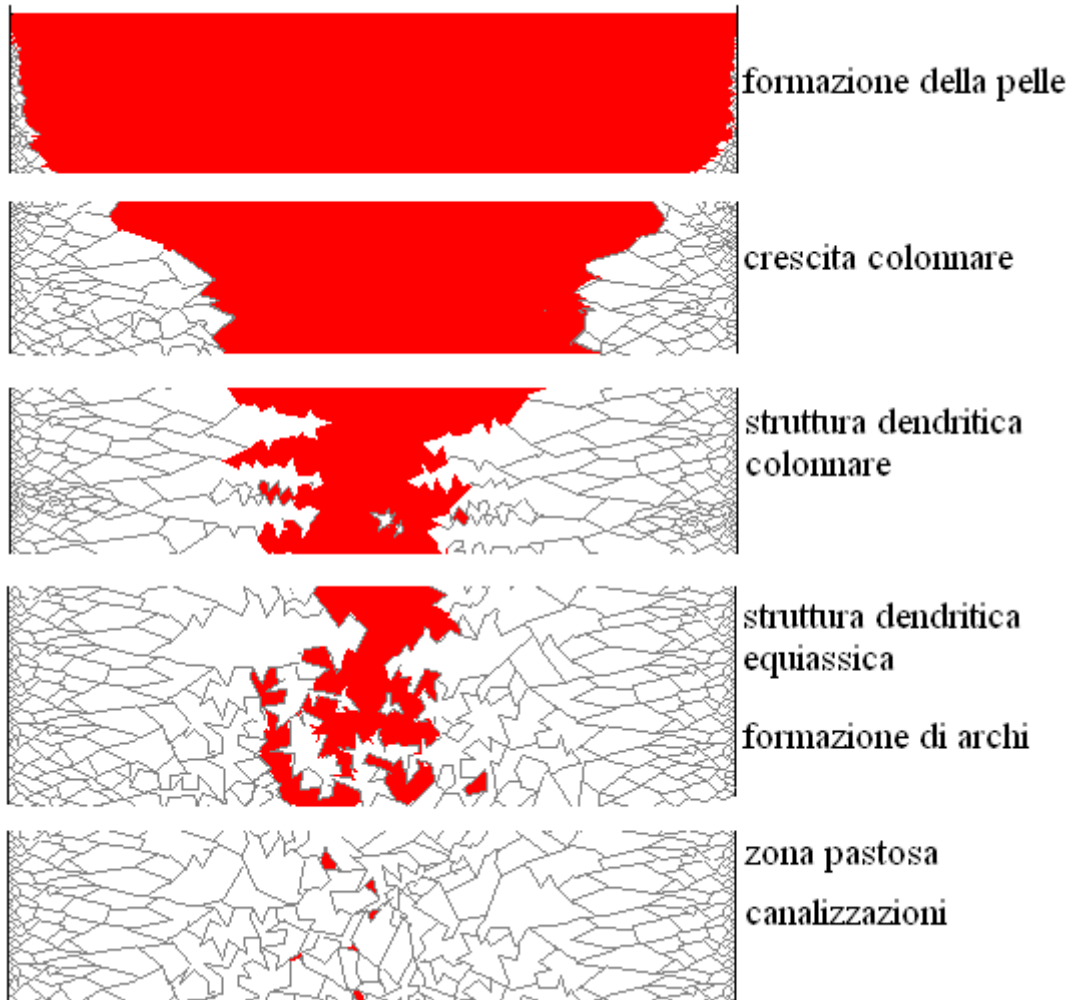
$$P [L + C_S (T_i - T_S)]$$

dove è:

P il peso del metallo (che per unità di lunghezza della barra è funzione della sezione di colata),
 L il calore latente di fusione dell'acciaio,
 C_s il calore specifico dell'acciaio liquido,
 T_i la temperatura iniziale dell'acciaio liquido (dipendente dal surriscaldamento del metallo al di sopra del punto di fusione),
 T_s la temperatura di solidificazione (che dipende dalla sola composizione chimica dell'acciaio).

Da queste considerazioni si ricavano i fattori che condizionano e limitano la velocità di colata. Il tempo di permanenza in lingottiera deve essere tale da assicurare la formazione di uno spessore di pelle sufficiente da garantire l'autosostentamento della barra nel successivo tratto del raffreddamento secondario a spruzzi d'acqua.

La zona di raffreddamento secondario riceve la barra con uno spessore di pelle solidificata dell'ordine di 10-30 mm ed ancora liquida al centro. La solidificazione viene completata nel tempo che la barra impiega a percorrerla; in effetti è questa la zona in cui avviene la solidificazione della maggior parte della sezione. Per garantire che la barra mantenga la sua forma ed evitare possibili rotture della sottile e debole pelle formata in lingottiera è necessario che essa sia sostenuta, contenuta e guidata mediante rulli di appoggio. ciò è particolarmente importante nel caso di sezioni piane e larghe (bramme), per le quali è notevole l'effetto della pressione ferrostatica interna, che si manifesta con tendenza al rigonfiamento della sezione nella sua zona centrale.



Nella zona del raffreddamento secondario la sottrazione del calore avviene per irraggiamento, per contatto con i rulli di sostegno e mediante spruzzi d'acqua nebulizzata. Il raffreddamento deve essere il più regolare ed uniforme possibile lungo tutto il perimetro della barra, nè si debbono determinare brusche variazioni nell'intensità del raffreddamento nel senso longitudinale della linea. E' importante il controllo del volume e della distribuzione dell'acqua, per una buona uniformità dei gradienti termici.

Le strutture finali di solidificazione variano lungo la sezione perpendicolare del semilavorato in corrispondenza ai diversi tempi ed alle diverse modalità con cui si è realizzata la sottrazione di calore. La prima pelle che si forma nel cristallizzatore è costituita da grani fini, ricchi dell'elemento alto-fondente che, nel caso di un acciaio al carbonio, è il ferro. Man mano che la solidificazione procede si formano delle strutture colonnari che testimoniano le direzioni di asportazione del calore. In una fase successiva si formano strutture dendritiche equiorientate che caratterizzano la parte centrale del semilavorato, zona che solidifica per ultima. Al posto della cavità di ritiro si può produrre una canalizzazione assiale con piccole cavità nate come difetti di riempimento nonostante l'elevata pressione ferrostatica del metallo liquido sovrastante.

Nelle condizioni di regime stazionario in cui avviene la solidificazione dell'acciaio, l'interfaccia solido-liquido lungo una sezione longitudinale della barra assume la caratteristica forma a V. La lunghezza metallurgica, che è caratteristica di una determinata macchina, viene definita come la distanza fra il livello del metallo liquido nella lingottiera e la prima coppia dei rulli estrattori. Un criterio di progettazione generalmente seguito è quello per cui anche la massima sezione per la quale la macchina è stata progettata, abbia modo di solidificare entro questa lunghezza. Questo criterio è basato sul concetto di evitare di esercitare sulla barra le

azioni di compressione dei rulli, quando essa sia ancor liquida al suo interno. In realtà, una precisa conoscenza della localizzazione delle ultime zone che solidificano permette di operare una piccola compressione (*soft reduction*) mediante rulli opportuni, per contrastare la formazione di canalizzazioni nella zona pastosa. La solidificazione deve comunque completarsi nel tempo che una sezione impiega a percorrere lo spazio dal menisco di acciaio liquido in lingottiera fino al taglio della barra.

Nel caso generale quindi la distanza fra la lingottiera ed i rulli estrattori (lunghezza metallurgica) è determinata dalla massima lunghezza cui può giungere il cuore liquido. La dimensione della sezione determina il tempo di solidificazione e la velocità di colata: pertanto la lunghezza della linea fra la lingottiera ed i rulli estrattori varia principalmente in funzione della massima sezione colata (può andare, da meno di 10 m a oltre i 20 m, a seconda delle sezioni).

Il fronte di solidificazione, è influenzato dalla velocità di colata e dalla sezione che si cola. Ciò pone anche un limite al raggio di curvatura del tratto curvo, in rapporto allo spessore della sezione nella direzione di curvatura. La quantità di acciaio che può essere colata in continuo per unità di tempo risulta proporzionale al perimetro della sezione colata. La velocità di colata ammissibile è direttamente proporzionale alla velocità della trasmissione del calore ed inversamente alla quantità di calore da asportare. La prima grandezza dipende a sua volta dalla superficie disperdente (e quindi dal perimetro); la seconda dal volume di acciaio (e quindi dalla sezione trasversale della barra) con riferimento ad un suo tratto di lunghezza unitaria.

$$V = f \frac{(\ell + b)}{2\ell b}$$

La portata di peso dell'acciaio di una linea è proporzionale al prodotto dell'area della sezione per la velocità di colata. Per la precedente relazione la portata risulta quindi proporzionale al perimetro. Nel caso di una sezione quadrata si ha: $V = \frac{f}{\ell}$. Ossia la velocità di colata è inversamente proporzionale al lato della sezione. f è una costante di funzionamento della macchina, che ha una limitata variabilità e che dipende principalmente dal tipo di acciaio colato e dalla sua analisi. In generale vale la relazione

$$Q = C P$$

dove Q è la portata oraria dell'acciaio colato in peso, P il perimetro della sezione e C è un coefficiente di proporzionalità. C per gli acciai al carbonio assume un valore di 0,25-0,30 t/h cm (con riferimento al cm di perimetro).

La portata di acciaio liquido (t/h per linea) caratterizza la capacità produttiva della macchina di colata continua, che risulta molto strettamente condizionata dalla sezione, sia dalla sua forma che dalle sue dimensioni. L'esigenza di aumentare la produttività dell'impianto e di ridurre i costi di gestione porta a continue modifiche. Una bramma da 200 mm di spessore viene colata con una velocità di estrazione di circa 1,50 m/min; una da 250 mm con 1,20 m/min. Con le velocità di formazione dello strato solido prima riportate ($k = 26-29 \text{ mm/min}^{1/2}$), si ottengono valori intorno a 20 mm per una lingottiera alta 0,7 m. Il flusso termico mediamente necessario per ottenere questo risultato è compreso tra 1000 e 2000 kW/m², aumentando coll'aumentare della velocità di colata.

Una recente evoluzione consiste nel rendere mobile una parete della lingottiera per poter fabbricare semilavorati di dimensioni diverse, secondo le esigenze della produzione. La faccia "lunga" della lingottiera si può spostare lentamente anche durante il colaggio così da ottenere bramme di diversi spessori a parità di composizione chimica, senza interrompere il processo. La qualità del prodotto è attualmente l'aspetto su cui convergono le attenzioni dei gestori degli impianti di colata continua; lo strumento per intervenire è l'automazione di tutte le fasi, attraverso sistemi di controllo on line, modelli di processo e strumenti di regolazione. Una volta definite le caratteristiche geometriche e qualitative richieste, il sistema viene regolato sui parametri macroscopici. Durante la colata vengono misurati e tenuti sotto controllo in continuo

anche parametri come il livello del liquido sia in paniera che in lingottiera per regolare il flusso in entrata, le temperature del liquido e delle pareti della lingottiera per gestire il flusso di calore durante la formazione della prima pelle solida, le forze di attrito tra pelle e piastre di rame per ottimizzare la qualità superficiale del prodotto finito.



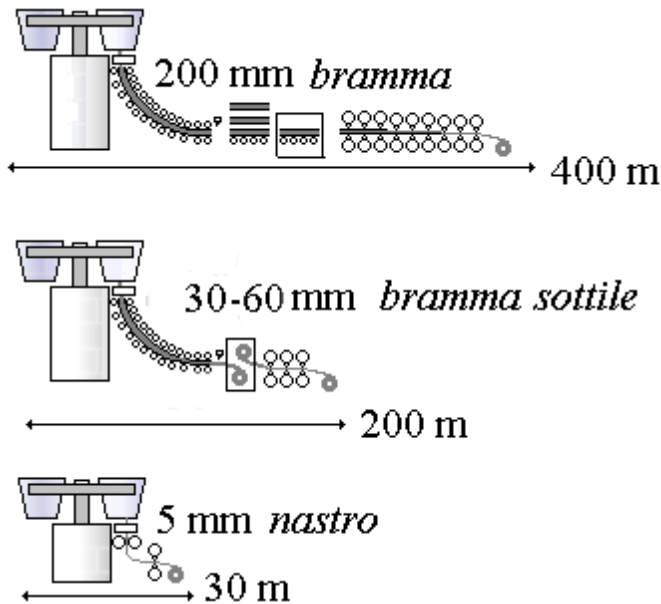
L'innovazione tecnologica più interessante punta ad ottenere bramme a spessore sempre più sottile così da ridurre l'onere delle successive laminazioni. Con la tecnica della "bramma sottile" (*thin slab casting*) si colano bramme dello spessore di 40-50 mm che vengono riscaldate in continuo all'uscita della colata e laminate a nastro dello spessore di pochi mm. Il ridotto spessore della bramma impone un'elevata velocità di colaggio, dell'ordine di 5 m/min, con notevoli problemi nel controllo di tutti i parametri di lavoro già visti, dalla temperatura in lingottiera e nella bramma, alla misura del livello e della turbolenza del metallo liquido, alla misura degli attriti bramma/lingottiera, in modo da potere prevedere con continuità il profilo di solidificazione e ridurre al minimo i difetti. La lingottiera, per poter contenere lo scaricatore, non è più a pareti piane ma a forma svasata. Lo sviluppo dei sistemi di colata continua con produzione dal fuso di semilavorati di spessore sempre minore, tende alla realizzazione di impianti di laminazione alimentati senza soluzione di continuità e con riduzioni sempre minori allo stato solido. Attualmente, partendo

da una bramma di 50 mm di spessore, si procede in modo discontinuo alla omogeneizzazione della temperatura, alla laminazione fino a 2-12 mm, ad un energico raffreddamento ed avvolgimento finale in bobine (*coil*).

La bramma è tagliata in base alle dimensioni del prodotto finale, prima di entrare nel forno di omogeneizzazione. La velocità di colata è ottimizzata sul processo di solidificazione; la lunghezza del forno dipende da tale velocità e dalla durata prevista del trattamento. All'uscita dal forno la bramma viene spinta a più alta velocità nel treno di laminazione; la lunghezza del tratto di raffreddamento dipende dalla velocità di uscita del laminato per raggiungere temperature di avvolgimento inferiori a 600°C. Se il laminato è avvolto in bobine, infatti, le condizioni di raffreddamento a fine lavorazione possono essere molto diverse tra gli strati esterni e quelli interni, tra strisce laterali e fascia centrale. Una temperatura di avvolgimento troppo elevata provoca raffreddamenti molto lenti degli strati più lontani dal contatto con l'aria, con pericoli di ingrossamento grano, ossidazione prolungata, fragilità di rinvenimento e, quindi, decadimento delle caratteristiche sia meccaniche che morfologiche. Tale decadimento è disomogeneo e induce caratteristiche differenti da punto a punto di uno stesso prodotto.

Nel sistema **ISP** (*Inline Strip Production*) il sistema *thin slab casting* è associato ad una riduzione a cuore liquido. La bramma esce dal cristallizzatore ad una velocità di circa 3 m/min con uno spessore di 60 mm, viene ridotta a 40 mm prima della completa solidificazione (*soft reduction*) e ulteriormente laminata fino allo spessore di 15 mm per l'avvolgimento in bobine che vengono mantenute ad una temperatura di circa 1200°C per la successiva laminazione a nastro che viene effettuata su un treno finitore situato immediatamente a valle. L'avvolgimento in bobine in un contenitore che funge da forno (*Cremona furnace*) costituisce l'elemento di discontinuità tra solidificazione/prima laminazione e laminazione finale a nastro. Durante tutto il

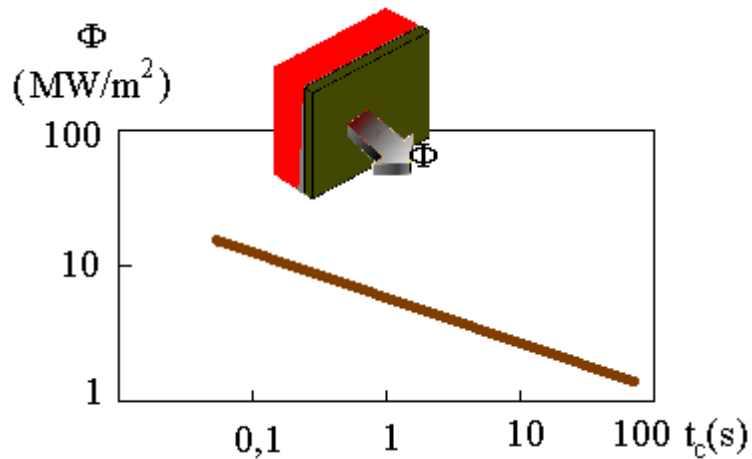
processo si cerca di contenere il raffreddamento del prodotto in lavorazione per ridurre le spese dei successivi riscaldi. Dal punto di vista impiantistico si deve considerare anche l'effetto positivo della riduzione della lunghezza complessiva dei treni di laminazione.



La laminazione in linea con la colata continua, senza discontinuità del manufatto crea problemi notevoli per la gestione del laminatoio a valle perché le velocità di colata e di estrazione della bramma sottile sono decisamente inferiori a quelle di alimentazione di un treno di laminazione. D'altra parte, un processo continuo/continuo senza possibilità di accumulo, può provocare dei danni al sistema di colata in caso di un non improbabile arresto improvviso dei laminatoi.

In fase di sviluppo di impianto pilota è invece la colata a nastro, (*strip casting*), per la fabbricazione diretta di nastri da 2-5 mm di

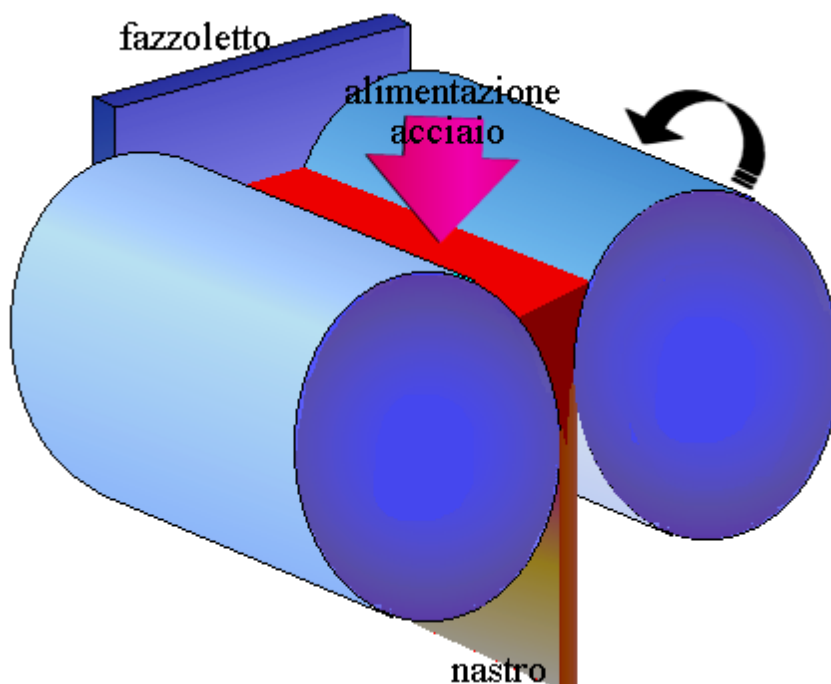
spessore, con l'auspicabile eliminazione di tutta la parte di laminazione a caldo e le conseguenti economie di impianto. Il processo di *strip casting*, per le elevate velocità imposte alla formazione della pelle ed al successivo raffreddamento, deve essere gestito da computer sulla base di modelli fisico-chimici molto sofisticati, essendo molto sensibile a fenomeni quali la turbolenza e l'ondata del bagno, le disomogeneità termiche e la pulizia dell'acciaio. Il tempo t_c di contatto tra metallo e cristallizzatore si riduce a frazioni di secondo e la quantità di calore Φ che deve essere sottratta al bagno per solidificare non più solo la pelle, ma l'intero spessore, aumenta molto rapidamente.



Nel processo semi-industriale di twin-roll strip casting si fabbrica direttamente, con una velocità fino a 100 m/min un nastro largo oltre 1 m e di spessore 2-5 mm.. L'acciaio liquido alimenta, tramite uno scaricatore sommerso, la lingottiera, costituita da una coppia di cristallizzatori cilindrici controrotanti rivestiti in rame e da una coppia di fazzoletti di contenimento laterale. Il flusso di calore che deve essere estratto nello strip casting è dell'ordine di 10 MW/m² per tempi di contatto di pochi decimi di secondo: nella zona di contatto con il fuso (dell'ordine di 30°) i rulli possono asportare calore al metallo e si raffreddano poi da 400 °C a 100 °C (nel caso di superfici in rame) con una energica circolazione di acqua prima di rientrare in contatto con il bagno. Le due pelli solide che si formano sui rulli ruotanti vengono convogliate al centro (*kissing point*) e forzate a costituire il nastro. I problemi che si sono dovuti

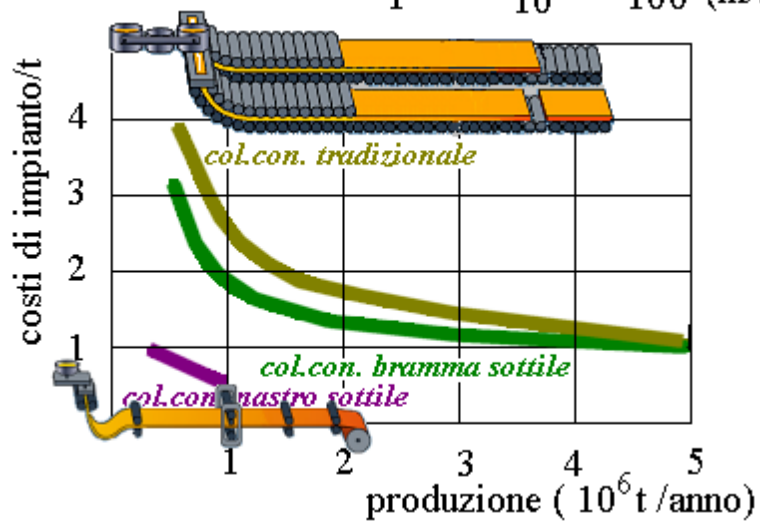
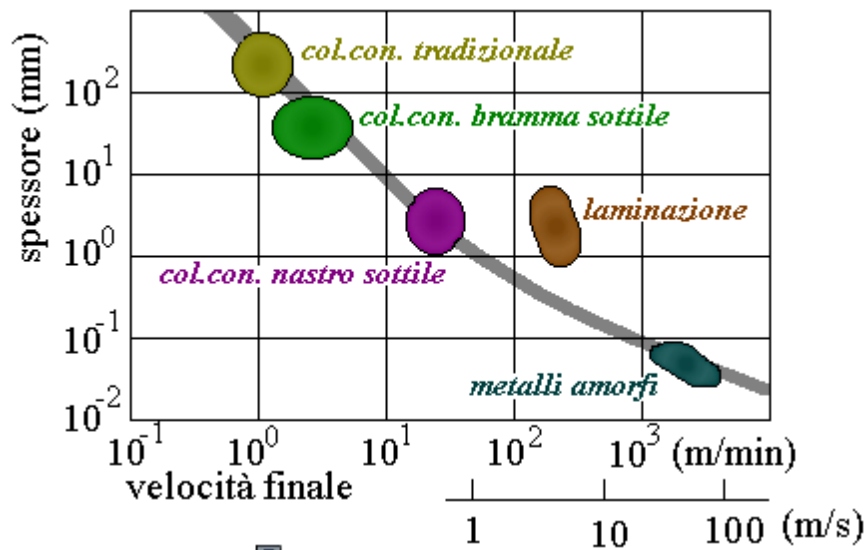
affrontare per lo sviluppo del prodotto finito sono stati di anisotropia cristallografica, di insufficiente finitura superficiale e di variabilità nelle tolleranze dimensionali. La struttura metallografica del prodotto solidificato rivela una zona colonnare esterna e dei cristalli equiassici nella parte interna, associati a porosità facilmente eliminabili con una eventuale successiva laminazione.

La maggior parte degli impianti sperimentali si orienta verso la colata di nastro di acciaio inossidabile per la limitata capacità annua di produzione, dell'ordine di alcune centinaia di migliaia di tonnellate, compatibile con quella caratteristica dell'inox, per uno spessore attorno a 3 mm prima della rilaminazione a freddo. Il processo deve essere completamente automatizzato; le aspettative sulla redditività sono elevate sia per il basso investimento iniziale sia per i bassi costi di produzione rispetto ad un impianto tradizionale. Il processo EUROSTRIP®, partito da esperienze AST con CSM coinvolge alcuni produttori europei in un impianto da 100 000 t/y di inossidabile di spessore 1,5-4,5 mm e larghezza fino a 1450 mm.



Al diminuire dello spessore colato diminuiscono le lavorazioni di laminazione da prevedere a valle: questo comporta una riduzione dei costi, calcolabili fin dalla progettazione dell'impianto. A fronte di una riduzione nei costi di impianto bisogna considerare i maggiori costi di controllo in linea del processo e di condizionamento delle superfici, che si avvicinano sempre più a quelle del prodotto finale.

La linea di colata continua alimenta il laminatoio a valle con una portata che è condizionata dalle velocità di raffreddamento per la solidificazione. Le portate caratteristiche del laminatoio sono invece condizionate dai problemi di raffreddamento del prodotto in lavorazione per meccanismi di conduzione, convezione ed irraggiamento che impongono flussi di materia di un ordine di grandezza superiori a quelli in uscita dalla colata continua: un raffreddamento eccessivo del metallo richiederebbe infatti un aumento delle forze e delle potenze da impegnare nelle lavorazioni.



DIFETTI DI COLATA

I difetti dei lingotti - I principali difetti dei lingotti si manifestano come soluzioni di continuità della struttura metallica. Tali soluzioni di continuità possono essere di dimensioni microscopiche (ad esempio microcricche connesse con la presenza di inclusioni non metalliche), ma spesso sono vistosamente macroscopiche. I difetti possono essere sia superficiali e subsuperficiali che interni. L'individuazione delle cause che li determinano e la loro eliminazione si presenta spesso come un problema di difficile soluzione. Nonostante i molti accorgimenti che si possono adottare per l'eliminazione dei difetti superficiali dei lingotti (in funzione della qualità dei semiprodotto e dei prodotti in acciaio), è quasi sempre necessario, nel caso di prodotti per i quali occorra assicurare perfette condizioni di superficie, un accurato condizionamento superficiale dei lingotti e degli sbozzati, provvedendo all'asportazione delle zone difettose con fiamma a ossigeno, per scalpellatura, molatura, fresatura.

I difetti superficiali dei lingotti rientrano nei seguenti gruppi principali:

1. Cricche verticali e orizzontali - Possono essere dovute a cause quali: ritiro contrastato, pelle di prima solidificazione che si sia rotta a causa della pressione ferrostatica, rotture interdendritiche dovute a metallo impuro (ad esempio per tenore di zolfo troppo alto e forte segregazione), velocità di colata e temperature dell'acciaio troppo alte. Le cricche di questo tipo sono dette a caldo e vanno distinte da quelle a freddo, che si manifestano successivamente nel corso di un raffreddamento del lingotto troppo veloce e disuniforme, per effetto di gradienti termici eccessivi e sollecitazioni di tipo termomeccanico. Taluni tipi di acciaio sono particolarmente suscettibili alle cricche da tensioni termiche (acciai duri, acciai legati autotemperanti ad alta resistenza, acc.): in questi casi è necessario ricorrere ad accorgimenti particolari per assicurare un raffreddamento sufficientemente lento dei lingotti e dei semiprodotto (raffreddamento controllato).

2. Ripresa di colata e sommersioni - Se la velocità di salita dell'acciaio in lingottiera viene arrestata o troppo rallentata, oppure se è sostanzialmente insufficiente, avviene la sommersione di parti della superficie superiore dell'acciaio già in corso di solidificazione da parte del liquido che sale, senza possibilità di saldatura. Si formano quindi zone più o meno estese di discontinuità, sia in superficie che all'interno del lingotto, che nei casi più gravi possono interessare tutta o buona parte della sezione trasversale del lingotto. Occorre anche aver presente che la superficie superiore del lingotto nel corso del colaggio si arricchisce notevolmente in fasi non metalliche ed ossidi, che decantano e vanno a formare una pelle più o meno spessa. Questo fenomeno è particolarmente vistoso nel caso degli acciai calmati all'alluminio e di quelli legati al cromo. Una velocità di colata troppo bassa fa sì che si abbia una serie di sommersioni di tali pellicole di ossidi galleggianti, specialmente lungo il perimetro del lingotto; l'inclusione di grossolane particelle di fasi non metalliche in zone corticali e subcorticali del lingotto comporta la formazione di tipici difetti superficiali. I difetti di questo tipo sono propri del colaggio in sorgente, meno frequenti e gravi nel colaggio diretto. Per contrastarli si può ricorrere alla laccatura delle lingottiere o usare particolari polveri di copertura protettive durante il colaggio.

3. Paglie, gocce fredde, doppia pelle - Sono dovute a spruzzi e schizzi di acciaio che colpiscono nel corso del colaggio le pareti della lingottiera, ove solidificano immediatamente, non avendo poi la possibilità di saldarsi intimamente al corpo del lingotto. Analoghe conseguenze sono dovute ad oscillazioni del pelo di metallo liquido nel corso del colaggio. Generalmente un aumento della velocità di colata riduce i difetti di questo tipo, verificandosi più facilmente la loro rifusione e la saldatura al corpo del lingotto.

4. Inclusioni nella superficie del lingotto di refrattari o scorie di varia provenienza.

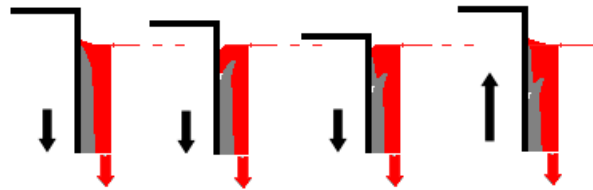
5. Soffiature - Formazione in superficie, o immediatamente al di sotto di essa, di soffiature (cavità dovute a sviluppo di gas) a causa di sviluppo di CO per scarsa disossidazione, umidità nei refrattari di siviera, lingottiere sporche e presenza di incrostazioni di ossidi, assorbimento di idrogeno da parte dell'acciaio. La presenza di soffiature in pelle, o immediatamente al di sotto della superficie, comporta la formazione di caratteristiche e diffuse zone difettose nei semiprodotto sbozzati, che si presentano più gravi nei casi con le superfici ricoperte con una fitta

rete di strappi. Nel caso di soffiature più rade e isolate, dopo la forte riduzione per lavorazione plastica a caldo, sui laminati si osservano difetti fortemente allungati, che si presentano come cricche e rigature longitudinali in superficie.

Difetti dei semiprodotto di colata continua - Vi sono numerosi studi sui difetti che possono presentare i semiprodotto di colata continua. Tali difetti si possono classificare in esterni e superficiali, interni, di forma. Alcuni di essi sono specifici di determinati tipi di sezione (ad esempio certe deformazioni romboidali per le billette ed i blumi o le ovalizzazioni dei tondi). Molti però sono comuni a diverse forme di sezione. Essi per lo più dipendono da condizioni metallurgiche, quali il tipo e la temperatura dell'acciaio, la velocità e le condizioni di colata, la forma e le dimensioni della lingottiera, la sua lubrificazione e il suo movimento oscillatorio, le condizioni di raffreddamento primario e secondario, le modalità di guida e d'estrazione della barra.

La qualità di superficie dei prodotti di colata è generalmente buona. L'altezza di caduta libera dei prodotti dell'acciaio è ridotta rispetto a quella usuale nel caso della colata diretta dei lingotti. Dalla favorevole situazione nel caso della colata continua si risente con una ridotta difettosità per paglie, spruzzi, gocce fredde.

Per condizioni di colaggio ben stabilite l'omogeneità di composizione chimica anche nel senso longitudinale è elevatissima.



La lingottiera esercita una notevole influenza sulle formazioni di difettosità dei prodotti di colata continua, come la sua forma e le sue dimensioni, con le sue condizioni di usura e con le sue distorsioni, per le modalità del movimento oscillatorio, della lubrificazione, del raffreddamento. Durante la prima formazione della pelle si possono avere dei distacchi con introflessioni, piegature e incompleti riempimenti da parte di acciaio liquido, con formazione del difetto superficiale noto col nome di **bande di oscillazione**. Il movimento della lingottiera, che prevede una velocità di discesa maggiore di quella della bramma ed una rapida inversione del moto per la risalita, amplifica i fenomeni di instabilità della prima pelle, con la creazione di un menisco che è spinto verso l'alto e successivamente viene forzato verso il basso con una velocità superiore a quella di discesa della pelle appena formata. Le bande di oscillazione, anche se possono essere cancellate nelle lavorazioni meccaniche successive, sono delle zone di localizzazione di altri ulteriori difetti.

Con il proseguire del raffreddamento e della solidificazione si verifica ben presto un distacco della superficie solidificata dalla parete della lingottiera. Ciò talvolta comporta, in uno stadio iniziale, un'inflessione verso l'interno ancor liquido di una faccia della barra, per un gioco di gradienti di temperatura. All'istante in cui il distacco si verifica le condizioni di sottrazione di calore ed il coefficiente della velocità di solidificazione si alterano sensibilmente. È importante che si sia sviluppato per tempo un guscio solidificato autoportante e soprattutto di spessore uniforme lungo tutta la periferia. La rapida sottrazione di calore all'acciaio liquido in lingottiera trova il suo limite nella conducibilità termica dell'acciaio stesso.

Le condizioni divengono via via più critiche al passare dalle sezioni quadre alle bramme ed all'aumentare della larghezza della bramma. Questa richiede dunque di essere adeguatamente sopportata e contenuta all'uscita dalla lingottiera. Nel caso delle billette possono essere ammesse maggiori velocità d'estrazione.

La formazione delle cricche è influenzata da una molteplicità di fattori, il peso di ciascuno dei quali può essere valutato solo caso per caso. Citiamo i principali: effetto del raggio di raccordo agli spigoli della lingottiera, disuniformità nel raffreddamento e nella velocità di colata,

temperatura dell'acciaio e velocità di colata troppo alte, influenza del tipo di acciaio, della forma e delle dimensioni della sezione.

Occorre sviluppare nella parte alta della lingottiera un profilo di solidificazione il più regolare ed uniforme possibile. Zone sottili e calde sono punti deboli, ove generalmente si innescano nella pelle solidificata cricche e rotture gravi. Intrappolamenti di scoria in superficie possono creare punti e zone calde. Una buona costanza della velocità di colata e del raffreddamento primario è fattore determinante al fine di sviluppare uno spessore di pelle uniforme e costante, con riguardo particolare al pericolo di formazione di cricche sugli spigoli.

Le deformazioni a losanga delle sezioni quadre vanno associate alla formazione di cricche interne. Dipendono principalmente da dissimmetrie nel raffreddamento primario fra le quattro facce e generalmente si aggravano all'aumentare della temperatura e della velocità di colata. Questi due fattori (velocità e temperatura di colata) esercitano sempre la massima influenza sulla formazione di cricche longitudinali, sia sulle facce che sugli spigoli ed in prossimità di essi. Gli incollamenti fra barra e lingottiera rendono più difficile il funzionamento dell'impianto e possono essere causa di strappi e di cricche trasversali.

Una zona critica per la formazione di difetti, quali le cricche superficiali ed interne e le deformazioni della barra, è quella del raffreddamento secondario. Tale zona, di lunghezza variabile tra i 3 ed i 12 m ed oltre, riceve la barra con uno spessore di pelle solidificata di 10-30 mm ed ancor liquida al centro. Al proseguire del raffreddamento ed all'aumentare dello spessore della zona solidificata è necessario ridurre l'intensità del raffreddamento, dato che la pelle solida è più spessa e meno deformabile e può criccare per eccessive sollecitazioni di carattere termico. L'abbattimento del tenore di zolfo ai livelli più bassi economicamente compatibili è una delle migliori armi contro la cricatura del semilavorato.

Importante è il controllo del volume e della distribuzione dell'acqua per una buona uniformità del gradiente termico e della sottrazione di calore, sì che questa sia la più uniforme possibile su tutte le superfici. Il flusso di acqua deve essere proporzionato e regolato dalla velocità di colata, per seguire eventuali transitori dovuti a cambi di siviera o a fuori servizi incidentali.

Il grado di pulizia di un acciaio, come già detto, dipende dalla composizione chimica ottenuta alla fine dei vari trattamenti, ma anche dallo stato inclusionale, fortemente condizionato dalle operazioni di colaggio e solidificazione. Durante le operazioni di travaso e di colaggio del metallo fuso si deve fare particolare attenzione al trascinarsi di scorie dovuto alla formazione di vortici ed allo svuotamento delle ultime quantità di liquido; i vortici facilitano l'erosione dei refrattari e la produzione di inclusioni esogene, il cattivo controllo sullo svuotamento facilita il trascinarsi della scoria. Si utilizzano per questo sensori elettromagnetici ed accelerometri, sensibili gli uni al diverso comportamento elettromagnetico di metallo e scoria, gli altri alle vibrazioni indotte dai vortici fin dal primo formarsi e dalle condizioni di flusso di liquidi a diverse densità e viscosità. Una delle attuali frontiere nella ricerca siderurgica è rappresentata dalla previsione della pulizia inclusionale dell'acciaio quando è ancora allo stato liquido, così da ottimizzare le condizioni di fine trattamento ed evitare la rottamazione di una colata di qualità insoddisfacente. Si usano per questo gli ultrasuoni, con misure sia di riflessione che di attenuazione del segnale: le prime evidenziano le grandi inclusioni, le seconde sono sensibili al livello medio dello stato inclusionale allo stato liquido e, se la solidificazione avviene senza perturbazioni, a quello del solido finale.

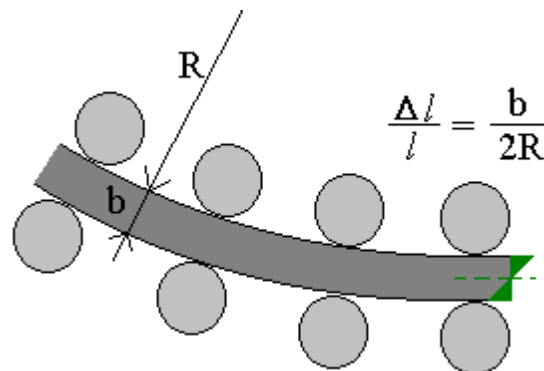
Strutture di solidificazione

La velocità di solidificazione, maggiore nel caso della colata continua rispetto al lingotto, e la sezione di dimensione generalmente ridotta determinano le caratteristiche delle strutture di solidificazione dei semiprodotti di colata continua. Aggiungansi a ciò le modalità di sottrazione del calore attraverso le pareti, come avviene del resto anche nel caso del lingotto. Le strutture sono spiccatamente colonnari, con trascristallizzazione molto spinta nel caso di veloce raffreddamento secondario. La porosità centrale di ritiro non causa in genere problemi, a meno

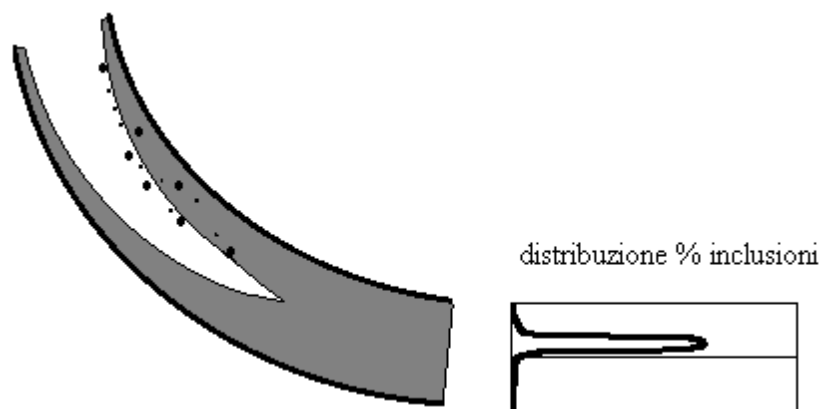
che non sia veramente eccessiva e non contenga grosse inclusioni. Essa si salda bene nelle lavorazioni plastiche a caldo successive, con riduzioni relativamente modeste (3:1-6:1, a seconda del tipo dell'acciaio). Per ostacolare la formazione di un canale centrale di ritiro sul quale possono localizzarsi le segregazioni di elementi basso-fondenti e la presenza di grano grossi, si ricorre con successo allo stirring elettromagnetico ed alla soft reduction.

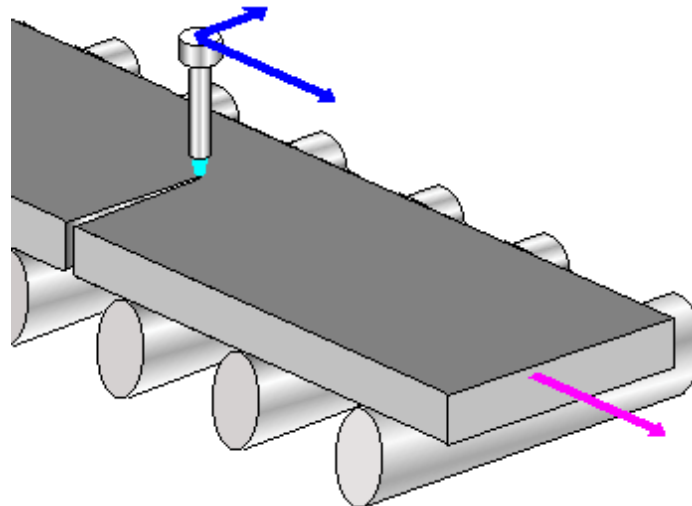
Però un eccesso di porosità centrale può causare inconvenienti, specialmente se la successiva riduzione, che può ricompattare il metallo, è limitata.

La segregazione, come già detto, è per i prodotti di colata continua molto limitata rispetto a quella dei semiprodotti ottenuti per sbazzatura dei lingotti. Ciò vale sia per la segregazione nella sezione trasversale che per quella in direzione longitudinale. La curvatura a cuore liquido e, ancora di più la lingottiera curva, pongono dei problemi di simmetria nel prodotto che esce dalla colata continua. L'intradosso (lato superiore) ha una estensione inferiore a quella dell'estradosso (lato inferiore), sono diverse le geometrie per lo scambio termico e, all'atto del raddrizzamento, sono diverse le deformazioni da imporre. Una bramma di raggio di curvatura R e di spessore b ha una differenza di lunghezza tra intradosso ed estradosso che viene progressivamente compensata portando ad un allungamento dell'intradosso ed un accorciamento dell'estradosso. Considerando indeformato l'asse neutro della bramma, si ha che $\epsilon = \Delta l / l = b / 2R$. Il raddrizzamento può essere eseguito anche in presenza di un residuo di fase liquida al cuore del semilavorato. La bramma deve uscire dalla linea di colata continua con una geometria piana, a questo provvedono i rulli raddrizzatori e la trazione operata dai rulli motori che controllano la velocità di uscita.

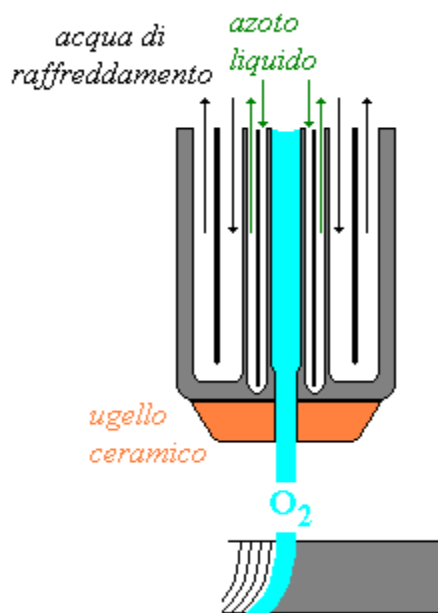


Un'altra conseguenza importante sulla qualità del prodotto è legata alla distribuzione disomogenea delle inclusioni che si accumulano preferenzialmente sul lato superiore. Le inclusioni non metalliche hanno una massa volumica inferiore a quella dell'acciaio liquido e tendono a decantare verso l'alto rimanendo intrappolate all'interfaccia liquido/solido che si sta formando, come illustrato schematicamente nella figura. All'inverso, eventuali cristalli già solidificati, avendo densità maggiore del liquido, tendono ad ammassarsi sul lato inferiore.





La bramma in uscita dalla linea di laminazione e/o di solidificazione in colata continua deve essere tagliata trasversalmente e talvolta anche longitudinalmente (slittamento) con varie tecniche, come il taglio meccanico o quello alla fiamma o con la lancia ad ossigeno illustrata in figura, che sfrutta l'elevata temperatura a cui si trova ancora il semilavorato. Con la lancia ad ossigeno si produce una reazione esotermica di combustione del ferro con formazione di ossidi liquidi che vengono trascinati via dal flusso di ossigeno. La temperatura di fusione degli ossidi di ferro è inferiore a quella del metallo, scendendo al di sotto di 1400 °C per una composizione prossima a FeO, così che è possibile tagliare la lamiera con precisione se il getto è ben indirizzato, facendo fuoriuscire l'ossido allo stato liquido.



LAVORAZIONI PER DEFORMAZIONE PLASTICA

Per descrivere i problemi metallurgici relativi alla formatura degli acciai per deformazione plastica che avvengono nell'ambito dello stabilimento siderurgico occorre richiamare alcuni concetti ed alcune definizioni di meccanica dei materiali. Per semplicità di trattazione, l'acciaio verrà considerato come un corpo omogeneo ed isotropo, avente, cioè, caratteristiche uguali da punto a punto ed indipendenti dalla direzione considerata. Questa semplificazione è ben lungi dalla realtà, come emerge soprattutto in un corso di siderurgia nel quale si evidenziano disomogeneità compositiva per elementi di lega e per elementi non desiderati, formazione di seconde fasi come le inclusioni non metalliche e difetti di solidificazione come cavità di ritiro, segregazioni, soffiature, dendritismo..., ma è una semplificazione che permette di impostare dei criteri di studio di facile approccio.

Si ricorda incidentalmente che l'altra grande tecnologia di formatura dei materiali metallici è quella di fonderia, che permette di ottenere il prodotto quasi finito per solidificazione del metallo entro opportune forme. In questo settore trovano applicazione, tra i prodotti siderurgici, sia le ghise, che hanno peraltro trascurabili caratteristiche plastiche e non possono essere formate per deformazione plastica, che alcuni acciai.

E' ben noto che applicando ad un provino prismatico di sezione trasversale A_0 e di lunghezza l_0 una forza F , si ottiene una tensione $\sigma = F/A_0$ cui corrisponde, per piccoli valori di F e per "basse" temperature, una deformazione $\varepsilon = (l-l_0) / l_0$; è altrettanto noto come i due parametri σ ed ε siano collegati tra loro dalla legge di Hooke tramite il modulo di Young $E = \sigma / \varepsilon$. Negli acciai al carbonio, a temperatura ambiente, $E = 210$ GPa; all'aumentare della temperatura il modulo di Young diminuisce progressivamente; il materiale, cioè, diventa sempre meno rigido.

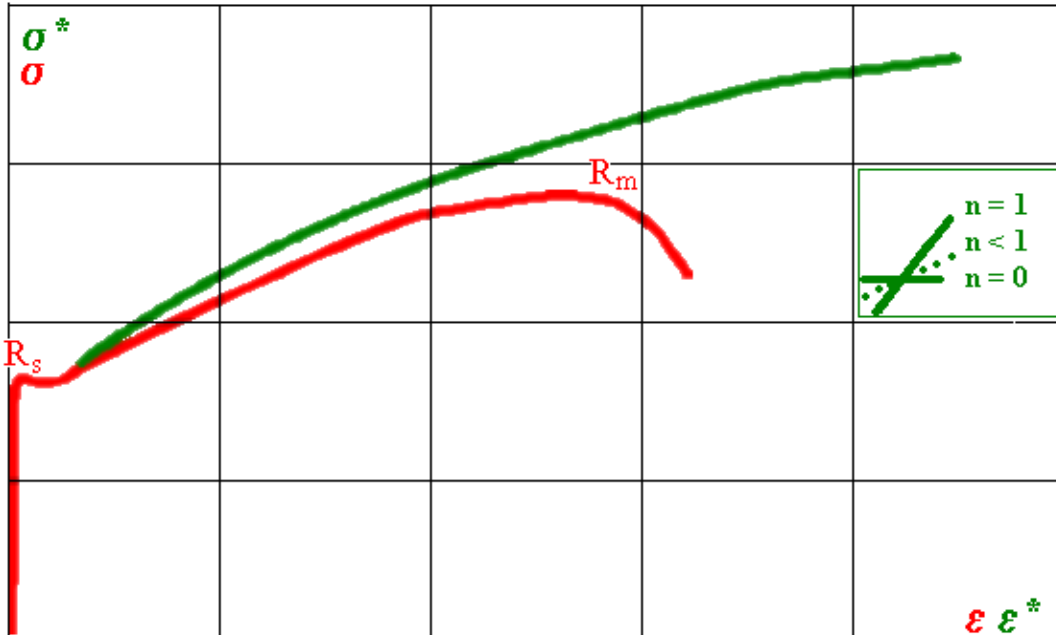
Nelle applicazioni convenzionali di ingegneria l'acciaio è sollecitato nel campo lineare elastico e le deformazioni sono tipicamente reversibili: all'atto della eliminazione del carico applicato, la deformazione scompare del tutto. In una prova di trazione condotta aumentando il carico applicato in modo quasi-statico, il generico acciaio subisce una deformazione dapprima elastica (reversibile) e poi plastica (irreversibile) fino a raggiungere un valore massimo di sollecitazione R_m e poi rompersi. Riportando in un diagramma le deformazioni $\varepsilon = (l-l_0) / l_0$ in funzione degli sforzi $\sigma = F/A_0$ ed effettuando la prova a deformazione crescente fino alla rottura, si ottiene il grafico caratteristico nel quale è possibile definire sia il carico unitario di snervamento σ_y (o σ_s o R_s) che il carico unitario massimo σ_r (o R_m).

Per i materiali che non presentano uno snervamento ben definito ma una transizione continua dal comportamento elastico lineare, a quello plastico, come per gli acciai inossidabili, è utile definire un carico convenzionale di snervamento, come il carico unitario limite di deformazione permanente, che è il carico unitario in corrispondenza del quale rimane una deformazione permanente di $x\%$ a provino scarico, o come il carico unitario di scostamento dalla proporzionalità σ_p (o R_p), che è il carico unitario per il quale si ha una deformazione sotto carico che si scosta di $y\%$ da quella lineare elastica. In genere per x ed y si assume il valore 0,2.

Se, come già detto, il materiale deve lavorare in campo elastico, i dati ottenibili dalla prova di trazione, integrati eventualmente dal modulo di Poisson μ , dall'allungamento percentuale a rottura $A_{\%}$ e dalla riduzione percentuale di sezione a rottura Z , sono generalmente sufficienti a descriverne il comportamento in servizio.

I parametri finora definiti ed i relativi diagrammi fanno riferimento alle condizioni iniziali del provino o della generica struttura; nello studio delle deformazioni plastiche, nelle quali lo stato iniziale viene modificato di continuo, è invece necessario riferirsi alle condizioni istantanee. Nel caso delle lavorazioni per deformazione plastica assume, inoltre, particolare importanza il comportamento a compressione, per il quale vale lo stesso modulo di elasticità ed analoghe condizioni di deformazione elastica, prima, e plastica, poi. Si definiscono una tensione

razionale $\sigma^* = F/A$ come rapporto tra la forza e la sezione trasversale effettiva a cui tale forza è applicata, ed una deformazione razionale ε^* definibile in termini infinitesimi come rapporto tra incremento e lunghezza istantanea: $d\varepsilon^* = dl / l$. Tensioni e deformazioni razionali sono anche indicati come tensioni e deformazioni vere.



Il diagramma razionale di trazione non è ricavabile immediatamente dalla registrazione di una prova di trazione, ma occorre intervenire con opportune elaborazioni. Per quanto riguarda la valutazione della sezione vera, durante la deformazione plastica, e finché non interviene la strizione, non si ha variazione del volume del provino e, pertanto, si può scrivere che $A_0 l_0 = A l$. Per valutare la deformazione razionale ε^* , dall'integrazione si ottiene $\varepsilon^* = \ln(1 + \varepsilon)$. La tensione razionale diviene allora $\sigma^* = \sigma(1 + \varepsilon)$. Finché la tensione rimane in campo elastico i valori convenzionali e quelli razionali sono praticamente confondibili; solo in campo plastico le differenze diventano evidenti, con valori di σ^* di poco superiori a quelli di σ finché non interviene la strizione che, a causa della riduzione locale della sezione, porta ad una netta divergenza tra i due valori. Sia le curve convenzionali che quelle razionali variano molto al variare dello stato metallurgico del materiale (trattamenti termici, termo-meccanici...), della temperatura di prova e della velocità di deformazione. Una tipica relazione tra tensione e deformazione razionali è espressa da:

$$\sigma^* = k [\varepsilon^*]^n$$

nella quale n assume valori compresi tra 0,1 e 0,5. Per $n = 0$ si ha un corpo perfettamente plastico, privo di incrudimento.

- Per piccoli valori di ε : $\ln(1+\varepsilon) \cong \varepsilon$
 $\varepsilon^* \cong \varepsilon$
 $\sigma^* \cong \sigma$
 - Quando intervengono la deformazione plastica e la strizione:
 $\sigma^* > \sigma$
 $\varepsilon^* < \varepsilon$
- ma la curva tradizionale non tiene conto della strizione e delle forti deformazioni localizzate che portano a valori di $\varepsilon^* \gg \varepsilon$

CRITERI DI PLASTICIZZAZIONE

Con riferimento agli assi principali, per i quali:

$$\tau_{12} = \tau_{21} = \tau_{23} = \tau_{32} = \tau_{13} = \tau_{31} = 0$$

CRITERIO DI TRESCA

Raggiungimento di un valore critico $\tau = \tau^*$

$$\sigma_1 - \sigma_2 \geq 2 \tau^*, \text{ oppure}$$

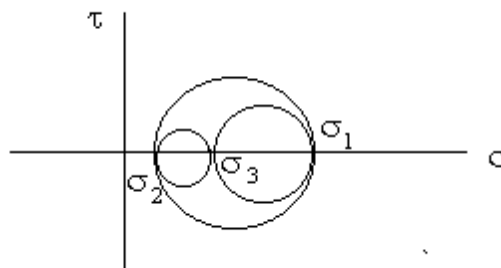
$$\sigma_2 - \sigma_3 \geq 2 \tau^*, \text{ oppure}$$

$$\sigma_3 - \sigma_1 \geq 2 \tau^*$$

Nella prova di trazione monoassiale

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_1 = \sigma_y = 2 \tau^*$$



CRITERIO DI VON MISES

Raggiungimento di un valore critico del lavoro di deformazione

$$\sigma_{vm} = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{1/2}$$

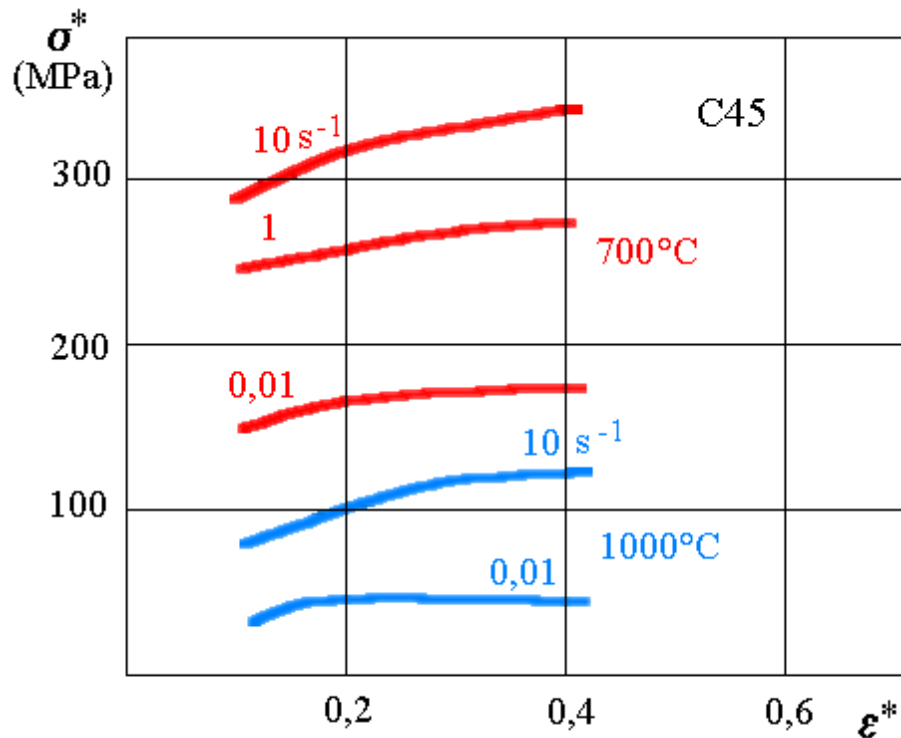
Nella prova di trazione monoassiale:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = 0$$

$$\sigma_{vm} = \left\{ \frac{1}{2} [2 \sigma_1^2] \right\}^{1/2} = \sigma_y$$

In linea di massima un acciaio si deforma plasticamente tanto più facilmente quanto più alta è la temperatura e quanto più lenta è la velocità di deformazione (o, in prima approssimazione, la velocità di applicazione del carico).

Le deformazioni plastiche sono di gran lunga maggiori di quelle elastiche e, nelle condizioni di temperatura in cui normalmente si sviluppano i processi di lavorazione, queste ultime possono essere trascurabili. Occorre definire le condizioni tensionali che individuano l'instaurarsi dello stato plastico. Nel caso della prova di trazione con carico monoassiale questo è individuato dalle condizioni di snervamento; più complessa è la situazione nel caso di stati tensionali pluriassiali. Si deve ricorrere ai sistemi di riferimento principali definibili punto per punto in un corpo comunque sollecitato. I tre assi di un sistema principale individuano le tre direzioni lungo le quali le tensioni, dette principali, sono solo normali e sono nulle le tensioni tangenziali. In base al criterio di Tresca la deformazione plastica si manifesta solo se le tensioni principali non sono tutte uguali tra loro e quando la differenza tra la maggiore e la minore raggiunge un valore critico σ_T , indipendentemente se siano di trazione o di compressione. Gli stati tensionali "idrostatici", sia in trazione che in compressione, non producono deformazione plastica, per la quale c'è invece bisogno di tensioni tangenziali.



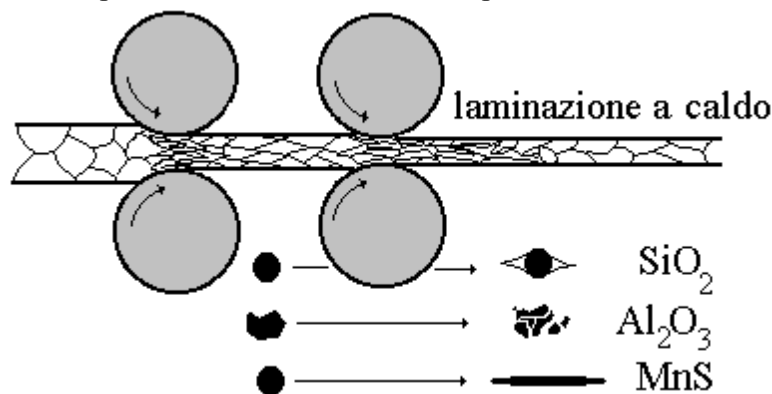
Una volta raggiunta la sollecitazione d'inizio della deformazione plastica, il materiale presenta vari comportamenti, che vanno dall'incrudimento (aumento della deformazione solo con l'aumento del carico applicato) con rottura più o meno rapida, allo scorrimento a carico costante o, addirittura, a carico decrescente. Lo schema di comportamento più semplice per la trattazione matematica è quello di materiale elastico-perfettamente plastico, per il quale ad un primo comportamento elastico lineare segue una deformazione plastica illimitata a carico costante (senza incrudimento).

E' opportuno ricordare che la deformazione elastica, anche se trascurata per semplicità di trattazione, è reversibile e viene recuperata alla fine di ogni ciclo di trattamento plastico. Tale recupero può generare un profilo diverso da quello desiderato (distorsioni, imbarcamenti...) ovvero può rimanere confinato nell'interno del pezzo generando tensioni residue, che agiscono poi, con il loro segno algebrico, assieme alle sollecitazioni esterne applicate al pezzo in servizio. Le tensioni residue possono essere particolarmente pericolose per la sicurezza di funzionamento di un componente perché spesso vengono ignorate, mentre dovrebbero essere sommate

algebricamente alle tensioni esterne. La loro eliminazione avviene con trattamenti termici di distensione che consistono in permanenze più o meno lunghe a temperature da 100 a 500°C.

Il comportamento di un materiale, in particolare quello meccanico, varia con la temperatura perché intervengono fenomeni, come trasformazioni allotropiche, formazione o dissoluzione di seconde fasi, variazioni di grandezza dei grani cristallini, variazioni delle proprietà meccaniche (E , R_s , incrudimento...), interazioni metallo / ambiente..., che si sviluppano a varie temperature con cinetiche proprie, così da modificare sia in modo progressivo, sia in modo discontinuo, le caratteristiche di ogni singolo componente del materiale prima durante e dopo i trattamenti. Le caratteristiche di un materiale possono quindi variare da punto a punto in funzione di gradienti di composizione, di tensioni, di deformazioni, di temperature e, soprattutto, in funzione del tempo, che diviene così l'altro parametro indispensabile per descrivere la situazione complessiva. Una prima idea sull'effetto della temperatura si può ricavare attraverso la temperatura omologa θ , definita come rapporto tra la temperatura che interessa e la temperatura di fusione del materiale, espresse entrambe in gradi Kelvin. Per valori di $\theta < 0,3$ si possono trascurare ad esempio gli effetti dello scorrimento viscoso, cioè del progredire della deformazione ($d\epsilon / dt > 0$) in condizioni di sollecitazione costante.

Una trattazione completa di quanto avviene nei processi di lavorazione per deformazione plastica è molto impegnativa per la molteplicità dei parametri che intervengono; in questa sede ci limiteremo ad esaminare gli aspetti didatticamente più interessanti per la comprensione delle scelte e delle modalità operative durante le lavorazioni primarie in uno stabilimento siderurgico.



Una considerazione ulteriore va fatta per i difetti presenti nel solido, ed in particolare per le inclusioni non metalliche. Le inclusioni, che hanno proprie caratteristiche chimiche e fisiche, sono sottoposte alle tensioni ed alle deformazioni locali che si sviluppano durante il processo di lavorazione, reagendo in modo diverso dalla matrice metallica. Escludendo l'eventuale fusione durante la permanenza ad alta temperatura, che comporta un danneggiamento irreversibile del materiale, le inclusioni non metalliche possono essere più o meno deformabili della matrice; il loro effetto può variare, al variare della temperatura, in funzione del contenuto, della distribuzione, delle dimensioni, della natura chimica e della orientazione. Solfuri e silicati di manganese, ad esempio, sono in genere ben deformabili a caldo e seguono i processi locali di deformazione, si adattano alle forme che il materiale va via via assumendo e conservano memoria incancellabile della storia del pezzo; gli ossidi sono in genere meno deformabili e durante le lavorazioni possono fratturarsi costituendo dei punti deboli per l'innesco e la propagazione di fratture nel prodotto finito.

Anche se non ci occuperemo dello stampaggio e del profondo stampaggio di laminati piani, tecnologie di grande interesse nell'industria automobilistica, l'elevato tonnellaggio di prodotti siderurgici destinati a subire tale lavorazione suggerisce l'opportunità di richiamare alcuni concetti sulla formabilità a freddo. La definizione di formabilità a freddo è associata alla capacità di un laminato piano di assumere concavità e convessità senza difetti sotto l'azione di una forza. Tale capacità dipende dalla geometria del sistema, dagli utensili (punzone, matrice e

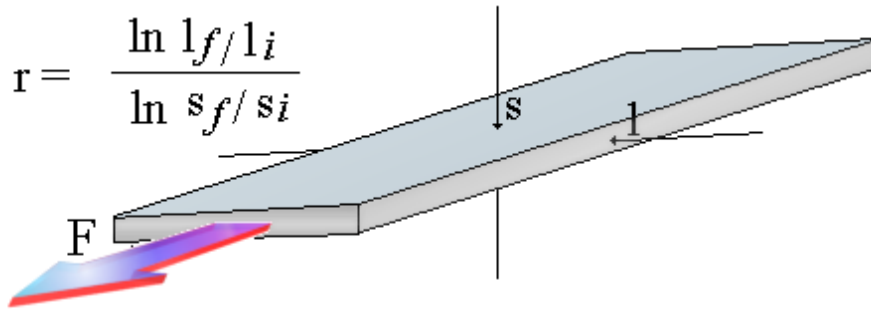
prelamiera) e dalla macchina impiegati; ma anche da parametri più locali, come le modalità di applicazione dei carichi, le velocità, le temperature, le condizioni tribologiche (lubrificazione, finitura superficiale) e, soprattutto, le caratteristiche del materiale, sia strutturali che di superficie. Soffermandoci su quest'ultimo punto, occorre ricordare che la deformabilità a freddo deve tener conto dei parametri già definiti come R_s , R_m e $A\%$. Un basso valore di R_s permette una facile deformazione, purché $A\%$ sia elevato; in realtà queste caratteristiche sono state definite in condizioni di sollecitazione monoassiale e non sono sufficienti a definire il comportamento nelle condizioni di sollecitazioni miste tipiche dello stampaggio. E' utile allora definire due nuovi parametri:

- il coefficiente di anisotropia, r
- l'esponente di incrudimento, n .

Il primo misura la deformabilità di una lamiera attraverso il rapporto tra le deformazioni logaritmiche nella larghezza $\Phi_l = \ln(l_f / l_i)$ e nello spessore $\Phi_s = \ln(s_f / s_i)$ su un provino tirato monoassialmente:

$$r = \Phi_l / \Phi_s = \ln(l_f / l_i) / \ln(s_f / s_i)$$

Ogni valore diverso da 1 testimonia un comportamento anisotropo tra il piano e lo spessore; in genere è presente anche una anisotropia sul piano, che si evidenzia variando la direzione del provino rispetto alla direzione di laminazione, e che suggerisce l'uso di un coefficiente r medio. Valori di r elevati sono in genere favorevoli per lo stampaggio profondo; valori tipici per gli acciai sono compresi tra 1 e 2, per le leghe di titanio si arriva fino a 6.

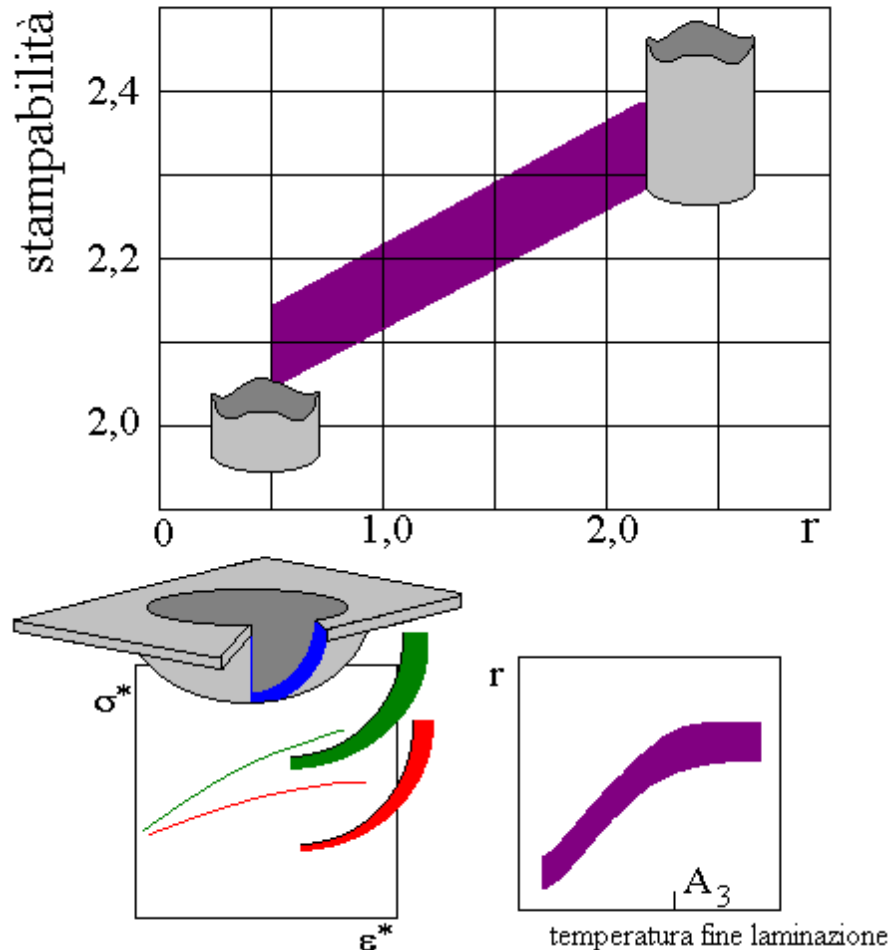


$$r = \frac{\ln l_f / l_i}{\ln s_f / s_i}$$

Il parametro n valuta il comportamento all'incrudimento, simulando la curva $\sigma^* - \epsilon^*$ con la formula:

$$\sigma^* = k [\epsilon^*]^n$$

In un diagramma doppio logaritmico n rappresenta il coefficiente angolare del tratto linearizzato. L'esponente n dipende dalla velocità di deformazione, dalla temperatura di prova e, se del caso, da ogni trasformazione di fase indotta dalla deformazione stessa, come negli acciai in cui l'austenite metastabile subisce una trasformazione austenite \rightarrow martensite.



In genere si cercano alti valori di entrambe i parametri r ed n , unitamente ad un basso valore di R_s .

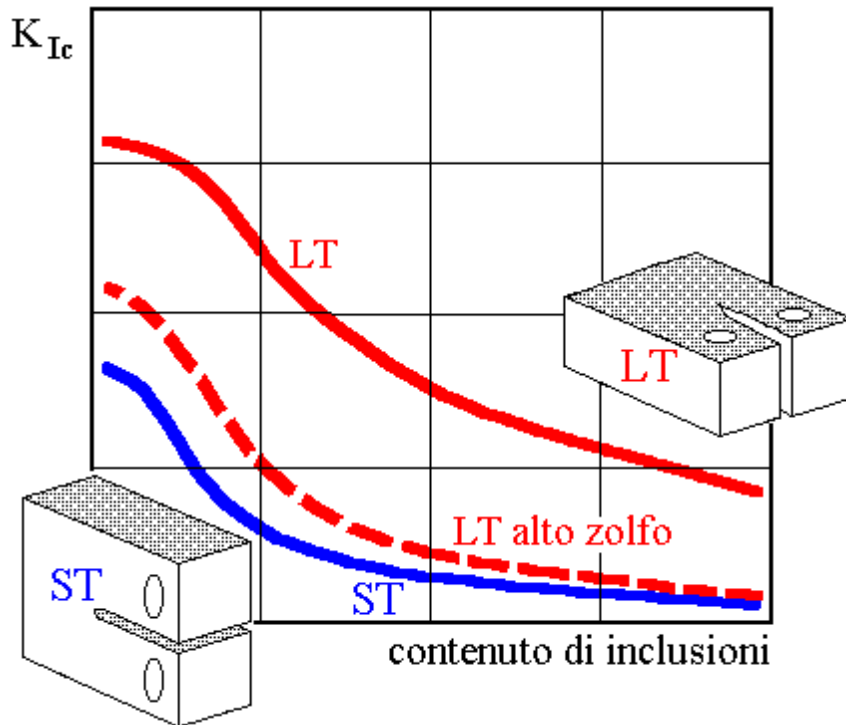
Per ottenere una buona stampabilità si ricorre ad acciai a bassissimo tenore di carbonio ed azoto, costituiti prevalentemente di ferrite e con grano cristallino di non piccole dimensioni. All'aumentare delle dimensioni del grano cristallino, infatti, secondo la legge di Hall-Petch diminuisce R_s e, secondo la relazione di Morrison, aumenta n :

$$R_s = R_{s*} + \beta^* d^{-1/2}$$

$$n = 5 / (10 + d^{-1/2})$$

Il grano ferritico non può però essere troppo grande perché c'è il rischio, in presenza di snervamento a caduta di carico, di deformazioni superficiali (bucce d'arancio, *orange peel*) non accettabili. Alti valori di r possono poi essere raggiunti mediante un'opportuna scelta dei parametri di laminazione e di ricottura. Gli acciai da profondo stampaggio saranno perciò a bassissimo tenore di interstiziali come C e N (*interstitial free IF* o *extra low carbon ELC*, con tenori di carbonio inferiori a 0,010% fino a meno di 0,003% e di azoto al di sotto di 0,002%), degasati sotto vuoto per ridurre il tenore di ossigeno residuo. L'ottimizzazione dei parametri per lo stampaggio può, d'altra parte, portare alla fabbricazione di un prodotto con caratteristiche meccaniche troppo basse: si ricorre allora, in contrasto con quanto appena visto, ad acciai con

carichi di snervamento più elevati, ottenuti con incrudimento, grana fine, alligazione, trattamenti termici, fino ad arrivare agli acciai ad alta resistenza per stampaggio indurenti per precipitazione di carburi di Nb e Ti o agli acciai dual-phase contenenti ferrite e martensite.



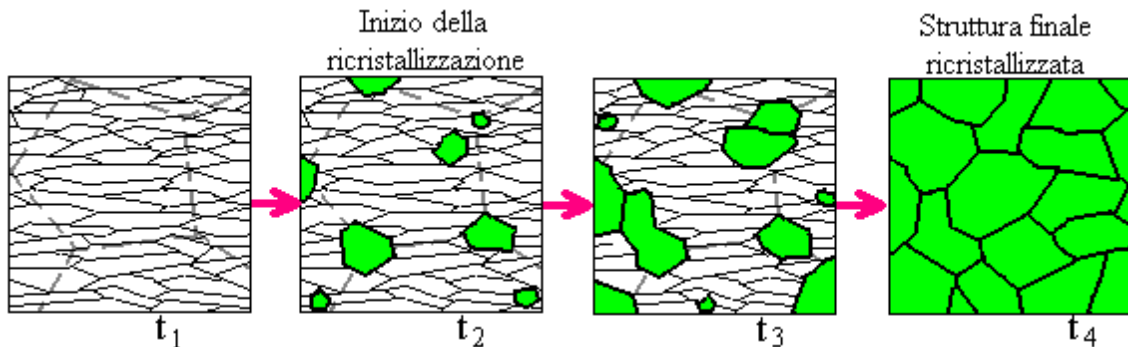
Accanto alle caratteristiche meccaniche convenzionali (R_s , R_m , $A_{\%}$, Z), è opportuno conoscere, per valutare il comportamento in servizio, la tenacità, desumibile da prove di meccanica della frattura (K_{Ic}) o da prove di resilienza (KU , KV , TT = temperatura di transizione duttile/fragile). Anche queste caratteristiche "fratturistiche" dipendono fortemente dalle orientazioni tra superfici su cui avviene la frattura e direzioni di lavorazione. Le caratteristiche sul "corto", che comportano una superficie di frattura parallela ai piani di laminazione, sono tipicamente inferiori a quelle sul "lungo" o sul "traverso".

La maggior parte dei prodotti siderurgici in commercio ha subito un trattamento di laminazione durante il ciclo tecnologico di lavorazione di cui rimane memoria, sia per la parte a caldo che per quella a freddo. Della laminazione a caldo rimane traccia nella deformazione delle inclusioni non metalliche, allungate nella direzione di laminazione, che nessun trattamento termico riuscirà a cancellare; delle lavorazioni a freddo rimane traccia nella orientazione preferenziale dei grani, profondamente deformati nella direzione del "lungo" e del "traverso" in una microstruttura detta *pan-cake*. Entrambe questi effetti portano ad una anisotropia del materiale che può essere non tollerabile, con comportamenti meccanici e tecnologici sul "corto" inferiori a quelli sul "lungo" sia in termini di duttilità che di tenacità.

La ricristallizzazione

Le deformazioni a "bassa" temperatura su un materiale metallico producono un reticolo di dislocazioni con una densità che varia da 10^{12} m/m^3 fino ad un massimo di 10^{16} m/m^3 . Le distorsioni reticolari ad esse connesse provocano un immagazzinamento di energia che si rende disponibile per un riassetto (*recovery*) della struttura. A "bassa" temperatura il processo si svolge con una cinetica molto lenta; aumentando la temperatura non si hanno fenomeni evidenti finché si raggiunge un livello caratteristico, chiamato **temperatura di ricristallizzazione**, in corrispondenza della quale d'improvviso si libera l'energia disponibile con formazione e sviluppo di grani cristallini. La ricristallizzazione avviene con un processo di nucleazione e

crescita guidate dall'energia immagazzinata all'atto della deformazione, secondo direzioni privilegiate. La temperatura di ricristallizzazione non è univocamente definita ma è funzione dell'energia immagazzinata ed è quindi tanto più alta quanto minore è la deformazione preesistente.



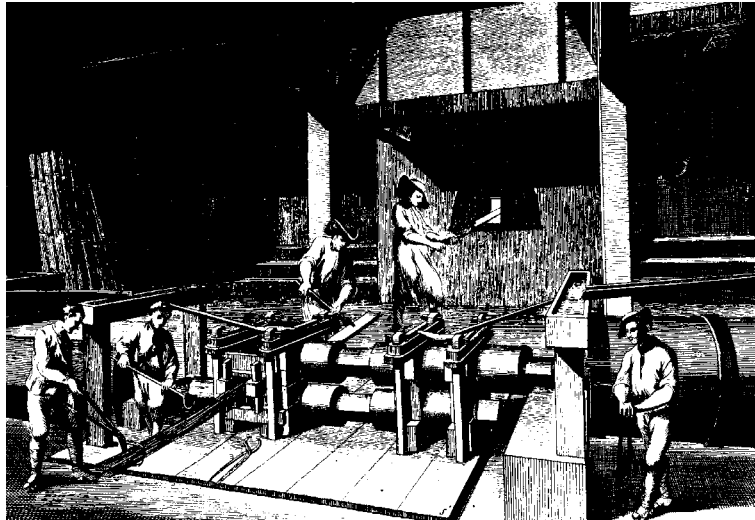
Il valore della temperatura di ricristallizzazione viene utilizzato per classificare convenzionalmente le lavorazioni per deformazione plastica tra quelle che avvengono ad "alta" e quelle che avvengono a "bassa" temperatura: chiameremo le prime " lavorazioni a caldo " e le seconde " lavorazioni a freddo ". Se la deformazione plastica avviene al di sotto della temperatura di ricristallizzazione, il prodotto finale è caratterizzato da una struttura fortemente distorta nella quale non è riconoscibile l'ordine a lungo raggio caratteristico dei singoli grani. La ricristallizzazione si sviluppa in tempi tanto più brevi quanto maggiore è la temperatura a cui il materiale è mantenuto; un successivo soggiorno ad "alta" temperatura provoca solo il fenomeno dell'ingrossamento dei grani, per il quale alcuni grani si sviluppano a spese di altri. Se la lavorazione avviene al di sopra della temperatura di ricristallizzazione il materiale possiede già le condizioni per un riordino con formazione di nuovi grani cristallini. L'importanza della dimensione del grano cristallino è stata evidenziata dalla relazione di Hall-Petch: nel caso più comune si cerca di ottenere un grano fine cui corrispondono elevate caratteristiche tensili senza diminuzione di tenacità.

Nella deformazione plastica a caldo, la ricristallizzazione procede contestualmente: si parla in tal caso di **ricristallizzazione dinamica**. La deformazione da lavorazione plastica provvede all'incrudimento ma alimenta anche la ricristallizzazione con un processo continuo controllato dalla velocità di deformazione e dalla temperatura di lavoro; l'incrudimento rende più difficile ed onerosa la deformazione plastica, mentre il riassetto e la ricristallizzazione la rendono più facile. A fine deformazione plastica il materiale può essere raffreddato energicamente, ad esempio con una lama d'acqua, se interessa favorire od ostacolare particolari trasformazioni strutturali, che vanno dall'affinamento del grano fino ad una vera e propria tempra. Più spesso il laminato viene lasciato raffreddare naturalmente; nel caso di avvolgimento in bobine si produce un raffreddamento molto disomogeneo tra spire centrali e periferiche e tra cuore e bordi, con una maggior permanenza ad alta temperatura del cuore delle spire centrali. Le tipiche velocità di raffreddamento della bobina sono dell'ordine di 20 °C/h; controllando accuratamente la temperatura di inizio avvolgimento, si possono controllare trasformazioni allotropiche e precipitazioni di seconde fasi.

Nel caso degli acciai la temperatura di ricristallizzazione è dell'ordine dei 500°C; quindi una lavorazione a caldo è decisamente condotta al di sopra della temperatura ambiente, mentre una lavorazione a freddo non significa necessariamente che il materiale non sia riscaldato. Le laminazioni convenzionali sono eseguite a caldo così da avere meno sfavorevoli condizioni di sollecitazione meccanica sui cilindri e minore potenza impegnata. Nella laminazione controllata, invece, la temperatura finale del laminato può entrare nel campo "freddo" così da poter affinare la struttura austenitica e guidare la trasformazione austenite \Rightarrow ferrite verso la formazione di grani di piccole dimensioni. La trasformazione $\gamma \Rightarrow \alpha$ avviene in modo diverso se parte da grani austenitici ricristallizzati o non: se le ultime passate sono effettuate a temperatura

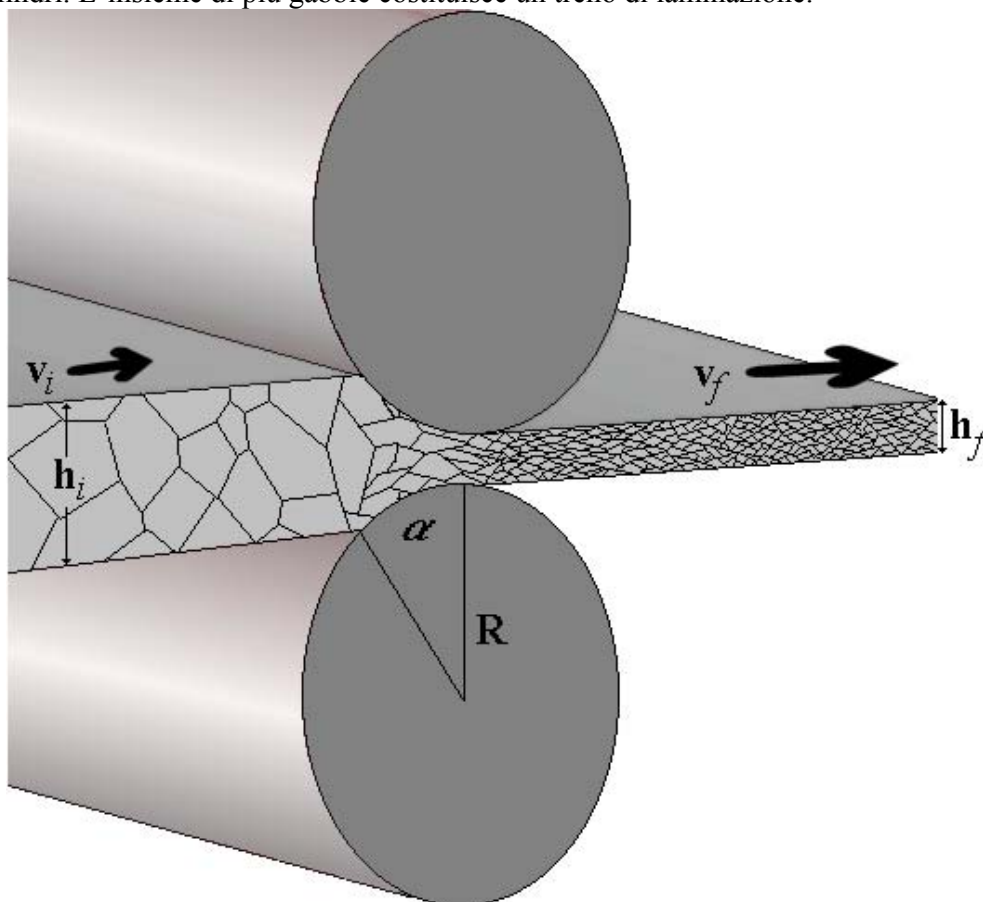
sufficientemente bassa da non permettere la formazione di grani austenitici, si ottiene una struttura finale a grani ferritici fini ed uniformi.

Gli eventuali trattamenti di ricottura di ricristallizzazione, che servono a rigenerare la struttura cristallina, vengono effettuati in forni in ambiente controllato; sul nastro laminato a freddo possono essere effettuati in continuo svolgendo il nastro e facendolo passare lungo un percorso tortuoso in un forno mantenuto a temperatura. Questa tecnica dei trattamenti termici in linea è particolarmente interessante per gli acciai inossidabili suscettibili di sensibilizzazione, per i quali un lento raffreddamento nel campo di temperature intorno a 700°C può provocare una perdita di resistenza alla corrosione. In tal caso a valle del forno di ricottura è prevista una zona di rapido raffreddamento per impedire la precipitazione dei carburi di cromo.



LA LAMINAZIONE

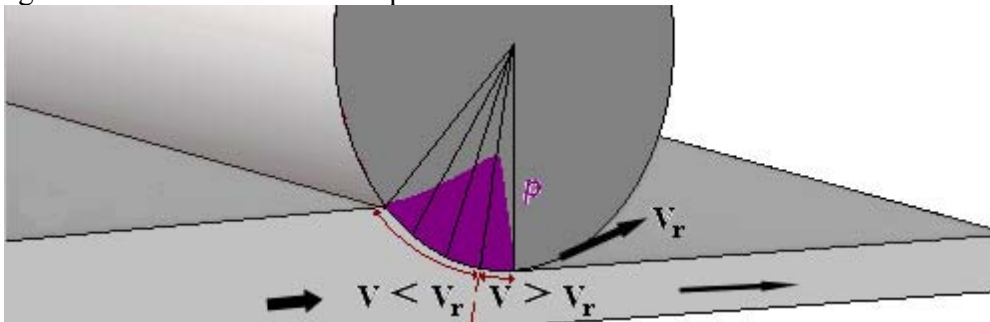
La laminazione (*rolling*) è un processo di lavorazione per deformazione plastica nel quale si riduce la sezione trasversale di un pezzo forzandolo a passare tra due cilindri lisci od opportunamente sagomati (*rolls*). Durante questa azione di "schiacciamento", nel caso più semplice di una lamiera, lo spessore del lavorato diminuisce mentre aumenta la lunghezza e, molto limitatamente, la larghezza in modo da conservare il volume. Il pezzo da laminare viene forzato per lo più dai cilindri stessi che ruotano in verso opposto, sono collegati ad un motore, generalmente elettrico, e per attrito provvedono all'alimentazione del laminatoio (*rolling mill*). Ogni coppia di cilindri è montata in una gabbia, che ne permette il moto rotatorio, gli aggiustamenti sulle luci e garantisce lo scarico delle sollecitazioni che dal pezzo sono esercitate sui cilindri. L'insieme di più gabbie costituisce un treno di laminazione.



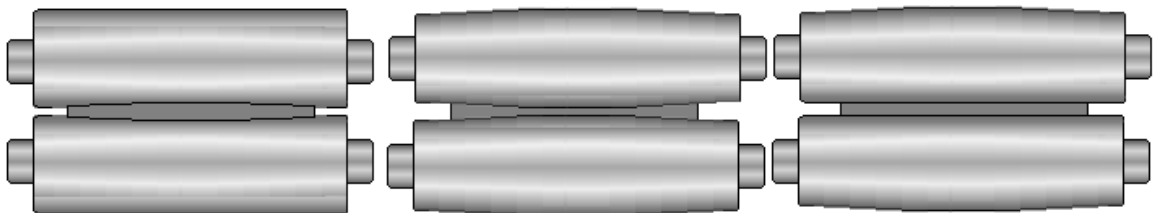
Per laminazione si producono semilavorati e prodotti finiti sia piatti che lunghi, come lamiere, nastri, barre, profilati, vergella, prodotti sia a caldo che a freddo. Con un'accorta gestione del processo di laminazione si può controllare la microstruttura e quindi le caratteristiche di impiego di un acciaio, senza dover ricorrere a trattamenti termici e/o meccanici a valle della laminazione.

Nel caso di una laminazione piana possiamo definire alcuni parametri geometrici, come la riduzione $h = h_i - h_f$, il rapporto di riduzione (o riduzione percentuale) $H = (h_i - h_f) / h_i$, le lunghezze iniziali e finali l_i e l_f , il diametro dei cilindri $2R$, e parametri cinematici e dinamici, come la velocità media di una sezione v e la forza di laminazione F_l che si scambiano laminato e cilindro. Il diametro dei cilindri deve essere proporzionale alla riduzione H in modo tale da non aumentare troppo l'angolo di contatto α (*angle of contact/bite*). Se v_i è la velocità di alimentazione e v_f quella di uscita dai cilindri, in assenza di "allargamento" (o trascurando l'allargamento che è valutabile in prima approssimazione a meno di 1/3 dello schiacciamento), per la continuità potremo scrivere la relazione $l_i h_i = l_f h_f$, ovvero la $v_i h_i = v_f h_f$, che comporta

un aumento della velocità longitudinale media durante il trattamento. Ad ogni riduzione percentuale H corrisponde un analogo allungamento percentuale L ed un incremento percentuale di velocità V . Durante il passaggio tra i cilindri la riduzione di sezione provoca un aumento della velocità longitudinale; tale velocità, o meglio la componente tangenziale al profilo di contatto metallo/cilindro deve essere paragonata con la velocità periferica dei cilindri stessi, che è costante. Lo scorrimento da deformazione plastica avviene preferenzialmente all'interno del materiale stesso ma nella simulazione più semplice si ipotizza una conservazione delle sezioni trasversali, che permette di considerare la costanza del prodotto vh . Si verifica uno scorrimento tra cilindro e laminato che è retrogrado per il materiale all'imbocco dei cilindri ed uno scorrimento in avanti del materiale all'uscita del cilindro; esiste quindi una sola sezione neutra per la quale lo scorrimento è nullo e alla quale corrisponde il massimo delle sollecitazioni che laminato e cilindri si scambiano. Lo scorrimento retrogrado viene ostacolato dalla forza di attrito che nasce dalle forti pressioni di contatto materiale/cilindro e che è necessaria, come già detto, perché garantisce l'alimentazione del processo.



La pressione di contatto materiale/cilindro, integrata su tutta l'area di contatto fornisce la forza di laminazione F_l . Questa dipende dalla resistenza del materiale, dal suo incrudimento e dalle modalità di scorrimento, dalla velocità ed intensità della deformazione, dall'attrito. A causa della presenza delle forze di attrito, la risultante delle forze non passa per l'asse dei cilindri ma genera un momento che deve essere vinto da un'opportuna coppia motrice. A parità di ogni altro elemento, si ha in genere un aumento di coppia motrice, e quindi di potenza spesa, all'aumentare delle dimensioni dei cilindri di laminazione. I cilindri di piccolo diametro sono quindi da preferire a quelli di grande diametro; ma in questo caso i rapporti di riduzione sarebbero più bassi (e quindi servirebbero più passate o più gabbie per ottenere la stessa riduzione) e non si potrebbe più trascurare la deformazione del cilindro stesso che diventerebbe troppo flessibile ed incapace di garantire una omogeneità del profilo del laminato nel traverso. Il cilindro di laminazione, in prima approssimazione, è una trave vincolata ai due estremi e sollecitata in modo quasi uniforme nella zona centrale di contatto con il pezzo: la deformata genera un profilo "a botte" della sezione del laminato. Per ottenere un laminato dalla geometria corretta si adottano pertanto soluzioni costruttive con cilindri profilati a botte in modo da compensare la deformazione sotto carico o con cilindri di sostegno, che hanno lo scopo di controllare la deformazione del cilindro di lavoro, in gabbie multicilindriche. La deformazione deve essere controllata pure sui bordi del laminato, che devono essere ortogonali alla superficie principale, evitando concavità e convessità.



I cilindri di laminazione lavorano in condizioni particolarmente severe perché sono sottoposti a continui cicli termici che li portano da temperature prossime a quelle del pezzo durante il contatto ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) a rapidi raffreddamenti all'aria quando il contatto è cessato. Queste condizioni di "fatica termica" innescano cricche superficiali che si propagano sotto gli

elevati sforzi meccanici. I cilindri devono sopportare elevate sollecitazioni sia di compressione che di taglio, mantenendo una finitura superficiale idonea a prevenire difetti sul laminato. Si ricorre pertanto a getti in ghisa od in acciaio legato ad alto contenuto di carbonio (fin oltre il 2%). Nel caso dei cilindri per lavorazioni a freddo, sottoposti a sollecitazioni particolarmente severe e con prescrizioni di finitura superficiale elevata e costante nel tempo, si ricorre ad acciai fucinati medio od alto-legati. Le durezza superficiali più elevate sono ottenute con trattamenti termici di bonifica su acciai alto-legati al Cr, al V, al Mo.

Il profilo esterno del cilindro viene spesso rinnovato durante la sua vita con asportazione dello strato che si deteriora durante l'esercizio e diminuzione progressiva del diametro iniziale del cilindro. La presenza di lubrificanti, sia a base acquosa che oleosa, permette di ridurre i fenomeni di usura.

Un impianto di laminazione consta tipicamente di una stazione di riscaldamento e di uno o più treni di laminazione. Il riscaldamento, necessario comunque per le lavorazioni a caldo, può avvenire in modo discontinuo in forni a pozzo o a camera, in modo semi-continuo, o in modo continuo. Un forno di riscaldamento discontinuo o statico consiste in un ambiente coibentato nel quale i lingotti (10-20) o le bramme vengono scaldati in una diecina di ore da bruciatori a gas che utilizzano gas d'altoforno, di cokeria o naturale, fino alla temperatura desiderata. I forni a spinta funzionano invece in modo discontinuo: il singolo pezzo viene immesso ad una estremità del forno e spinge tutti gli altri contenuti nel forno e che hanno già subito il riscaldamento ed una adeguata permanenza a temperatura, provocando l'uscita del primo all'estremità opposta. I forni continui sono invece necessari per le grosse produzioni di lamierino; il nastro, avvolto in rotoli, viene svolto, fatto passare in un forno che si estende in lunghezza con un percorso tormentato per una durata di 2-3 minuti, e poi riavvolto con una velocità dell'ordine di 400-600 m/min o inviato direttamente alla lavorazione. Per riscaldare fino a 1200°C una tonnellata di acciaio a partire da temperatura ambiente servono circa 800 MJ; con un rendimento termico complessivo $\eta = 0,66$ si devono prevedere circa 1200 MJ/t.

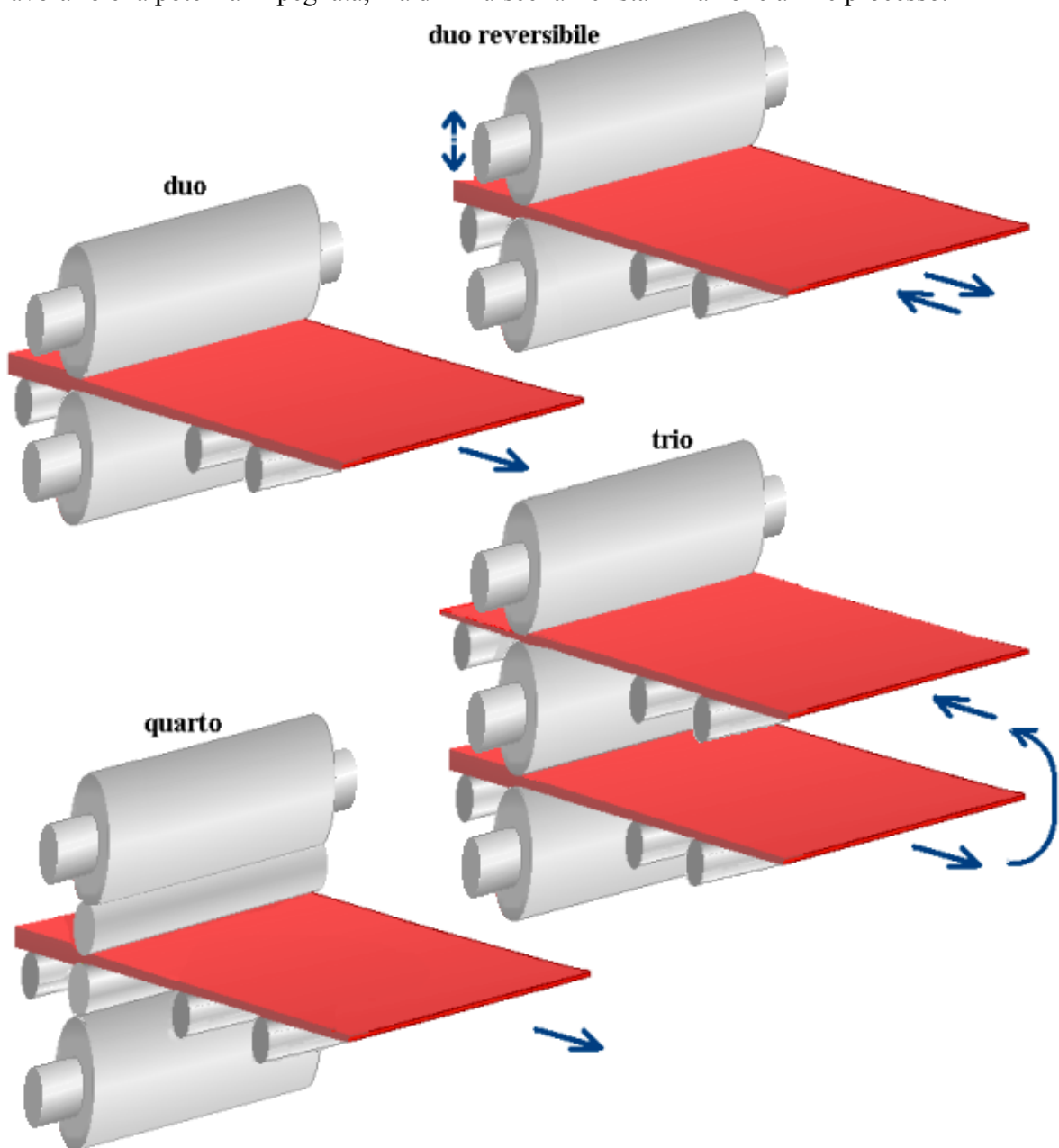
La scelta dei parametri di riscaldamento è molto critica, sia per motivi economici, sia perché la permanenza dell'acciaio ad alta temperatura provoca fenomeni di interazione con l'ambiente come la formazione di scaglia di ossidi a base di ferro (calamina) o di altri elementi affini all'ossigeno (Si, Mn, Al) e la decarburazione di uno strato superficiale di alcuni decimi di mm. Il ferro, il carbonio e gli elementi di lega reagiscono con l'ossigeno con formazione di un prodotto ossidato, generalmente solido, o di un prodotto gassoso (CO, CO₂) che si disperde nell'ambiente. L'evoluzione di queste reazioni dipende dal successivo contatto tra metallo ed agente ossidante: se lo strato d'ossido che si forma è compatto ed aderente alla superficie, all'aumentare dello spessore diminuisce la velocità di ossidazione; la reazione di decarburazione ha invece bisogno della diffusione del carbonio verso la superficie dove reagisce con l'ossigeno. Queste reazioni hanno cinetiche che aumentano con la temperatura e, in genere, con la radice quadrata del tempo. Calcolando una perdita totale per ossidazione di circa 10 chili di ferro per tonnellata di acciaio nell'intero ciclo di laminazione, il 60% si verifica nel forno ed il restante nel treno. La scaglia d'ossido deve essere rimossa dalla superficie meccanicamente, fisicamente o chimicamente perché danneggia sia il prodotto finale che le apparecchiature con cui viene in contatto. Se il trattamento termico deve essere eseguito sul prodotto finito o nelle ultime fasi di lavorazione, si ricorre a costosi ambienti inerti o riducenti.

La permanenza dell'acciaio ad alta temperatura provoca inoltre una crescita del grano austenitico che, come già visto, può influenzare negativamente il comportamento del prodotto finito anche a temperatura ambiente, la solubilizzazione o la precipitazione di seconde fasi. Il raggiungimento di temperature eccessive in ambiente ossidante può provocare un'ossidazione locale con penetrazione profonda dell'ossido attraverso i bordi di grano (bruciatura, *burning*) ed un degrado irreversibile con sgretolamento spugnoso. Nel caso di acciai ad alto tenore di zolfo si possono formare gocce per fusione di un eutettico Fe-S che modifica totalmente la risposta dell'acciaio in sede di lavorazione, con conseguente messa a rottame del pezzo.

Se il prodotto di partenza è il lingotto, la fabbricazione di blumi e bramme viene condotta in laminatoi primari, noti con i nomi rispettivamente di *blooming* e *slabbing*, costruiti secondo lo schema del duo reversibile (*two-high reversing mill*). Il lingotto preriscaldato scorre su una via a rulli e viene fatto passare più volte sotto gli stessi cilindri invertendo il moto e regolando la luce di lavoro; la calibratura sulla larghezza viene fatta ruotando la bramma di 90° e lavorando di costa, oppure utilizzando coppie di cilindri verticali che ricalcano il semilavorato senza modificarne la posizione orizzontale.

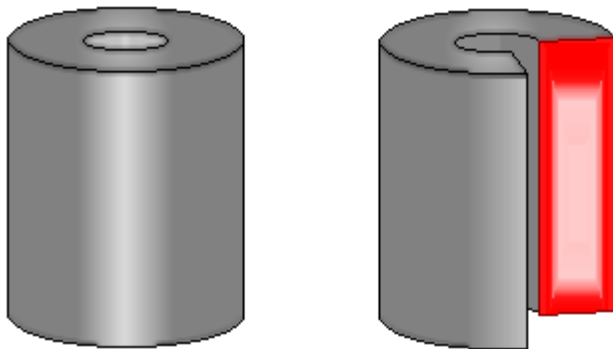
Nella produzione di billette si usano invece laminatoi trio con cilindri opportunamente calibrati. Il movimento del pezzo è continuamente invertito dopo ogni passata da tavole a rulli che provvedono anche allo spostamento verticale ed all'eventuale ribaltamento, senza inversione del senso di rotazione dei cilindri.

Le laminazioni ora descritte avvengono a caldo (*hot rolling*), a temperature che per gli acciai al carbonio iniziano intorno a 1200°C e terminano intorno a 900°C, con riduzioni dell'ordine di 20-40% per passata. Man mano che il pezzo si raffredda aumentano le forze necessarie a lavorarlo e la potenza impegnata, ma diminuisce la ricristallizzazione a fine processo.



In figura sono riportati gli schemi più semplici di laminatoi per prodotti piani, dal duo eventualmente reversibile con inversione del moto e regolazione della luce tra i cilindri ad ogni passata, al trio, al quarto.

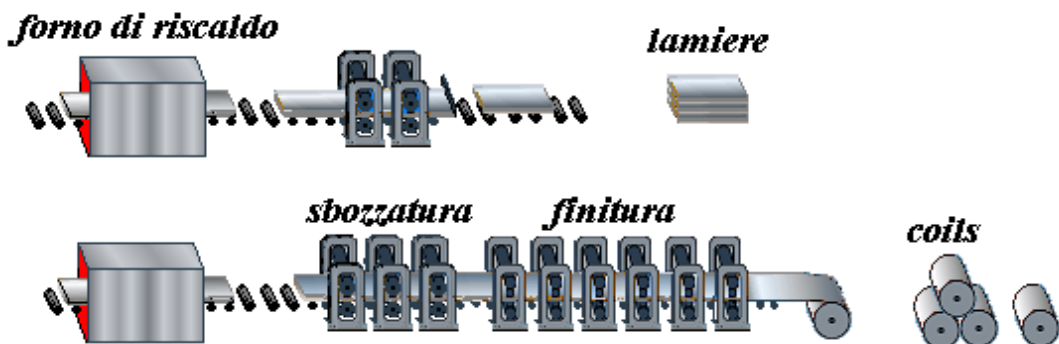
Durante la laminazione a caldo la bramma si raffredda progressivamente per meccanismi di irraggiamento, di convezione ad opera dell'atmosfera e degli eventuali lubrificanti e di conduzione al contatto con i cilindri. Il raffreddamento procede quindi per sottrazione di calore dalla superficie del laminato e si instaura un gradiente termico tra cuore e superficie che viene contrastato dalla conduzione nell'interno del metallo. Per una bramma spessa che esce dal forno di riscaldamento a 1200 °C si può pensare ad una velocità di raffreddamento di 1-2 °C/s e ad una differenza di temperatura tra pelle e cuore che facilmente supera 100°C. Man mano che si riduce lo spessore aumenta la superficie di raffreddamento, così che a 900 °C per uno spessore di 4 mm la velocità di raffreddamento vale circa 10 °C/s ed arriva a 20 °C/s per uno spessore di 2 mm. E' opportuno ricordare che al diminuire dello spessore aumentano le velocità di passaggio del laminato e quindi si riducono i tempi di raffreddamento. A fine laminazione il nastro viene avvolto in bobina dove si instaurano nuovi meccanismi di raffreddamento; per ostacolare una



ricristallizzazione eccessiva occorre ridurre la temperatura di avvolgimento procedendo ad un raffreddamento forzato con getti d'acqua a valle dell'ultima gabbia. Il raffreddamento del coil può essere assimilato a quello di un cilindro compatto con una cavità centrale coassiale: l'asportazione di calore avviene principalmente per convezione ad opera dell'atmosfera

circostante. Il più efficace raffreddamento delle spire esterne e dei bordi superiori, induce una disomogeneità sia longitudinale che trasversale sul prodotto finito.

Le lavorazioni a caldo possono proseguire con ulteriori fasi dopo la produzione di semilavorati, come la fabbricazione di lamiere, lamierini, vergella e profilati di varie sezioni. I treni di laminazione sono costituiti da più gabbie e sono alimentati in modo continuo o semi-continuo. Le operazioni di sbazzatura vengono condotte con gabbie distanziate in modo che non si abbia mai presa simultanea, mentre nelle operazioni di finitura si lavora in continuo, con un sistema di controllo e di regolazione che garantiscono la regolarità del flusso: la velocità di uscita da un treno finitore di un lamierino da 2 mm di spessore è dell'ordine di 10 m/s. Durante la laminazione si deve provvedere ad un controllo automatico sulle dimensioni del laminato (spessore e larghezza), sul profilo e sulla planarità (*flatness*).



Il sistema di controllo deve essere in grado di agire in tempo reale sull'impianto (velocità di alimentazione, distribuzione delle riduzioni nelle singole passate) utilizzando modelli che tengono conto della deformabilità del materiale attraverso la composizione chimica e la temperatura effettiva, e della deformabilità dei cilindri attraverso lo stato tensionale, la temperatura e la variazione del profilo nel tempo. Il mancato coordinamento tra le alimentazioni

delle gabbie provoca una instabilità nell'intero treno di laminazione e l'insorgere di difetti macroscopici sul prodotto finito.

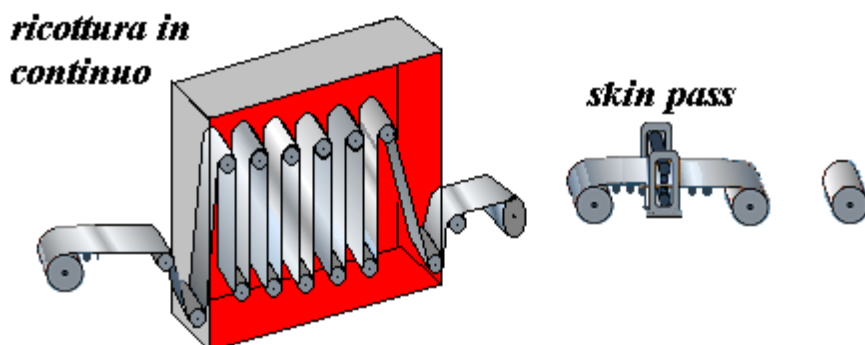
Nella fabbricazione di profilati, come le travi a doppio T, le fasi di lavorazione diventano più complesse per la necessità di sviluppare la deformazione in varie direzioni e non più solo su un piano.

La laminazione a freddo (*cold rolling*) si situa a valle dell'impianto a caldo; un laminato può essere classificato "a freddo" se ha subito una riduzione di almeno il 25%. Un impianto di laminazione a freddo prevede, necessariamente, una fase di decapaggio per la rimozione degli ossidi formati durante le lavorazioni precedenti e che rimarrebbero inclusi nel prodotto finito alterandone sia le tolleranze dimensionali sia l'aspetto superficiale. Tale decapaggio può essere effettuato in ambienti di vario tipo; nel caso più diffuso consiste nella immersione in un bagno di acido solforico o cloridrico seguita da un accurato risciacquo in acqua. Sebbene i rapporti di riduzione siano più bassi di quelli ottenibili con le lavorazioni a caldo, le forze di laminazione sono elevate; si ricorre a cilindri di piccolo diametro in gabbie quarto o pluricilindriche con treni tipicamente continui. Si può prevedere una riduzione delle sollecitazioni sui cilindri sottoponendo il laminato a trazione durante la lavorazione; è inoltre da prevedere la possibilità di ricotture intermedie per ricostituire una struttura non incrudita nonché una passata finale a piccola riduzione per il miglioramento delle caratteristiche meccaniche, delle tolleranze dimensionali e dell'aspetto superficiale.



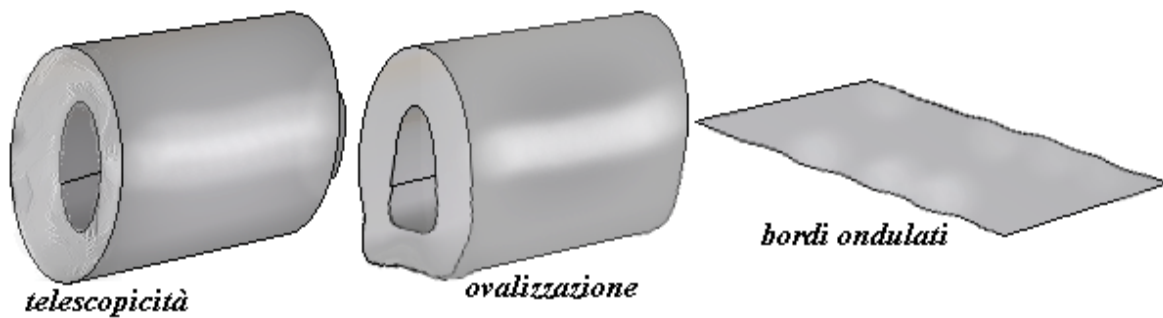
Un tipico laminatoio per prodotti piani lavorati a freddo è il cosiddetto Sendzimir, che è un'evoluzione del treno quarto perché i cilindri di lavoro sono molto piccoli, fino ad un diametro di 50 mm, ma sono sostenuti da una cascata di altri cilindri che ne reggono le spinte e ne controllano le deformazioni. L'uso di lubrificanti, contenenti olio di palma sintetico, permette di ridurre l'attrito e l'usura.

Il nastro a freddo può subire un'ultima laminazione di 2-3% (*skin pass*) allo scopo di ottimizzare la finitura superficiale e creare uno strato superficiale incrudito utile per alcune lavorazioni di stampaggio. Il nastro a freddo può essere invece sottoposto a ricottura di ricristallizzazione per ridurre l'incrudimento e migliorarne la formabilità nelle successive lavorazioni: in tal caso la laminazione a freddo può fornire un laminato con tolleranze dimensionali più strette di un analogo prodotto fabbricato con ciclo tutto a caldo. Il nastro laminato a freddo dovrà avere uno spessore uniforme sia in larghezza che su tutta la lunghezza del prodotto finito, nonché un'elevata planarità ed integrità dei bordi.

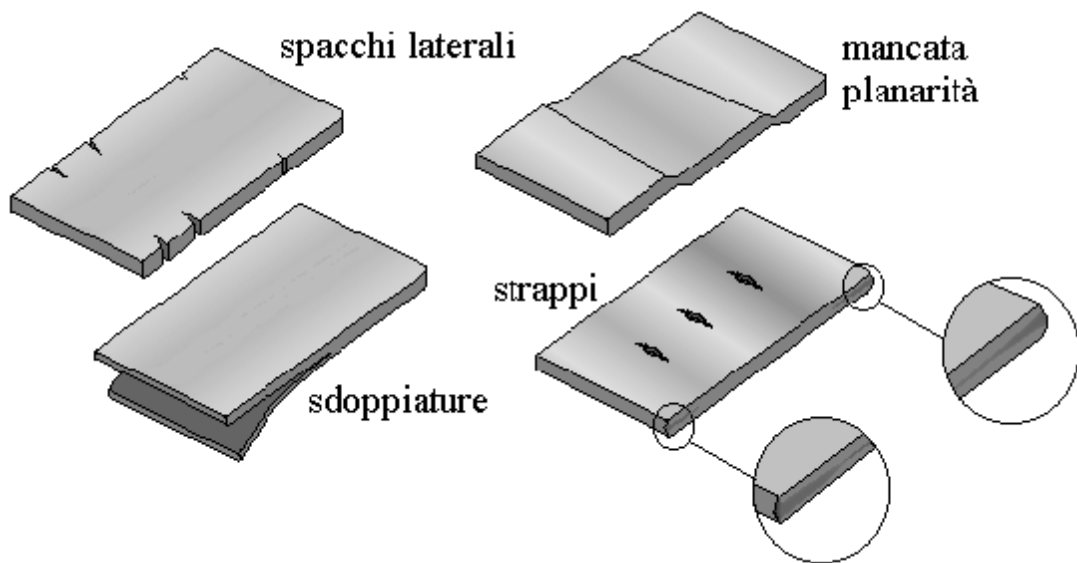


Se il nastro (laminato a caldo o a freddo) è avvolto in coils, si deve evitare il danneggiamento della bobina perché eventuali ammaccature, ovalizzazioni, ondulazioni e

fenomeni di telescopicità rendono difficoltose le operazioni successive di lavorazione ed inutilizzabile il prodotto finito.



Prima, durante e dopo la laminazione occorre provvedere ad un controllo sul prodotto che verrà poi usato sia con funzione strutturale (profilati, rotaie, costruzioni navali ..), sia come elemento di copertura, in funzione di protezione, di contenimento o semplicemente estetica (carrozzerie, mobili metallici, cantieristica civile ...). I difetti tipici di un laminato nascono facilmente su un preesistente stato difettivo metallurgico (porosità, cavità di ritiro, inclusioni non metalliche, ripieghe ...) e/o per cattiva conduzione dell'impianto. Un difetto che nasce nella lavorazione a caldo difficilmente potrà essere compensato nelle successive lavorazioni a freddo. Tra i principali difetti si possono ricordare: inclusioni di scaglie ed ossidi (*scale pits*), soffiature (*blowholes*), spacchi laterali (*edge cracking*), strappi (*scratches*), sdoppiature (*alligatoring*), non planarità (*cross bow, coil set*), ripiegature.



Per armonizzare le varie esigenze delle diverse fasi di lavorazione (a cominciare dalla fabbricazione dell'acciaio) si deve prevedere fin dalla fase di progetto dell'impianto, la gamma di prodotti da realizzare. Anche nel caso di un impianto di laminazione discontinuo occorre

armonizzare le attività dei singoli settori, dall'acciaieria (quantità e composizione dell'acciaio, temperatura finale in siviera) alla colata continua, ai trattamenti termici, alla laminazione. Gli impianti siderurgici e di prima lavorazione degli acciai sono attualmente gestiti da sistemi computerizzati che operano in tempo reale sulla base di misure fisiche (o chimiche) attraverso modelli che devono descrivere accuratamente le singole fasi del processo.

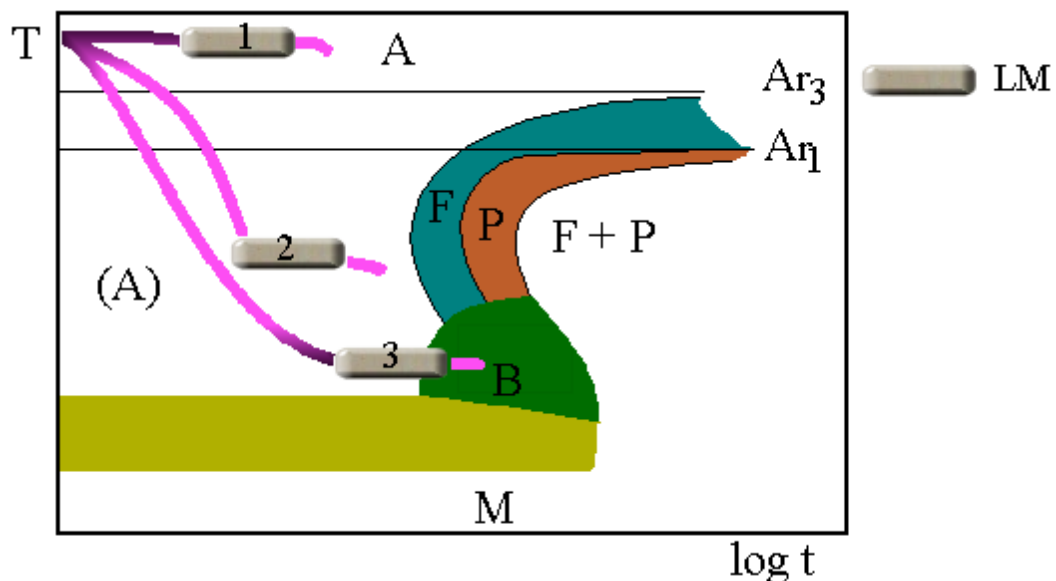
Trattamenti termomeccanici

I trattamenti termomeccanici (TTM) consistono in una combinazione di deformazioni plastiche condotte nel controllo della temperatura, dei tempi e delle velocità di raffreddamento, allo scopo di ottenere microstrutture di particolare interesse applicativo. I trattamenti termomeccanici sugli acciai sono molto usati in combinazione con la laminazione.

Già le lavorazioni a caldo e a freddo, permettono di ottenere a temperatura ambiente dei prodotti di diverse caratteristiche meccaniche pur a parità di composizione; il tipico TTM consiste nel combinare la temperatura a cui si eseguono le lavorazioni meccaniche (LM) con la permanenza in campi di stabilità o instabilità delle fasi che possono essere coinvolte. Si fa riferimento per l'acciaio alla temperatura A_{r3} al di sotto della quale inizia la decomposizione dell'austenite, ed alla temperatura A_{r1} al di sotto della quale l'austenite non è più stabile; è ben noto come queste temperature, definite per velocità di raffreddamento quasi nulle, si spostino al variare di tali velocità descrivendo le curve del diagramma CCT. L'altra temperatura caratteristica è quella di ricristallizzazione (T_r), che dipende fortemente dal tasso di deformazione precedentemente imposta. La ricristallizzazione e l'ingrossamento del grano (*grain coarsening*) devono essere controllati a partire dall'austenite in quanto sono in grado di influire su struttura e proprietà delle fasi che si formano a più bassa temperatura. Le dimensioni finali del grano possono quindi essere controllate nelle varie fasi di lavorazione, anche quelle ad alta temperatura per le quali è più facile e meno onerosa la deformazione.

Con riferimento al diagramma CCT di un acciaio basso-legato riportato in figura, si distinguono tre tipi di TTM:

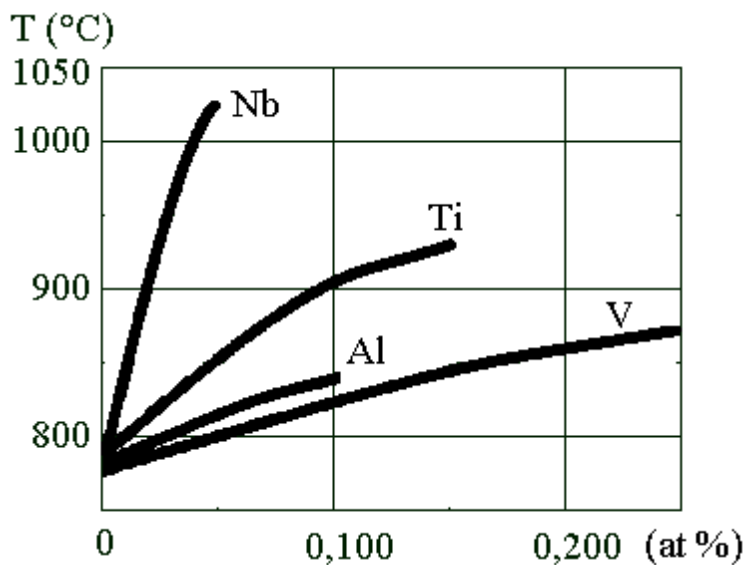
1. Lavorazione meccanica eseguita nel campo dell'**austenite stabile** e successivo raffreddamento; è la procedura più convenzionale di lavorazione a caldo con ricristallizzazione dinamica e rischio di ingrossamento del grano austenitico. La grandezza del grano austenitico può essere controllata agendo sulla temperatura dell'ultima passata, soprattutto quando sono presenti elementi di lega come Nb, Ti e V che possono formare carburi, nitrucci e carbonitrucci efficaci per il controllo della crescita del grano.



2. Lavorazione meccanica eseguita nel campo dell'**austenite metastabile** e successivo raffreddamento; valgono le considerazioni fatte precedentemente con l'aggiunta della possibile scelta della deformazione a freddo.
3. Lavorazione meccanica eseguita nel campo della **trasformazione dell'austenite metastabile** e successivo raffreddamento; le opzioni sono molteplici dal campo A+F al di sopra di A_{r1} , a quello F+P, alle trasformazioni a freddo nel campo bainitico (indicata in figura) e martensitico. Quest'ultimo TTM prende il nome di **ausforming** e può prevedere un successivo trattamento di rinvenimento.

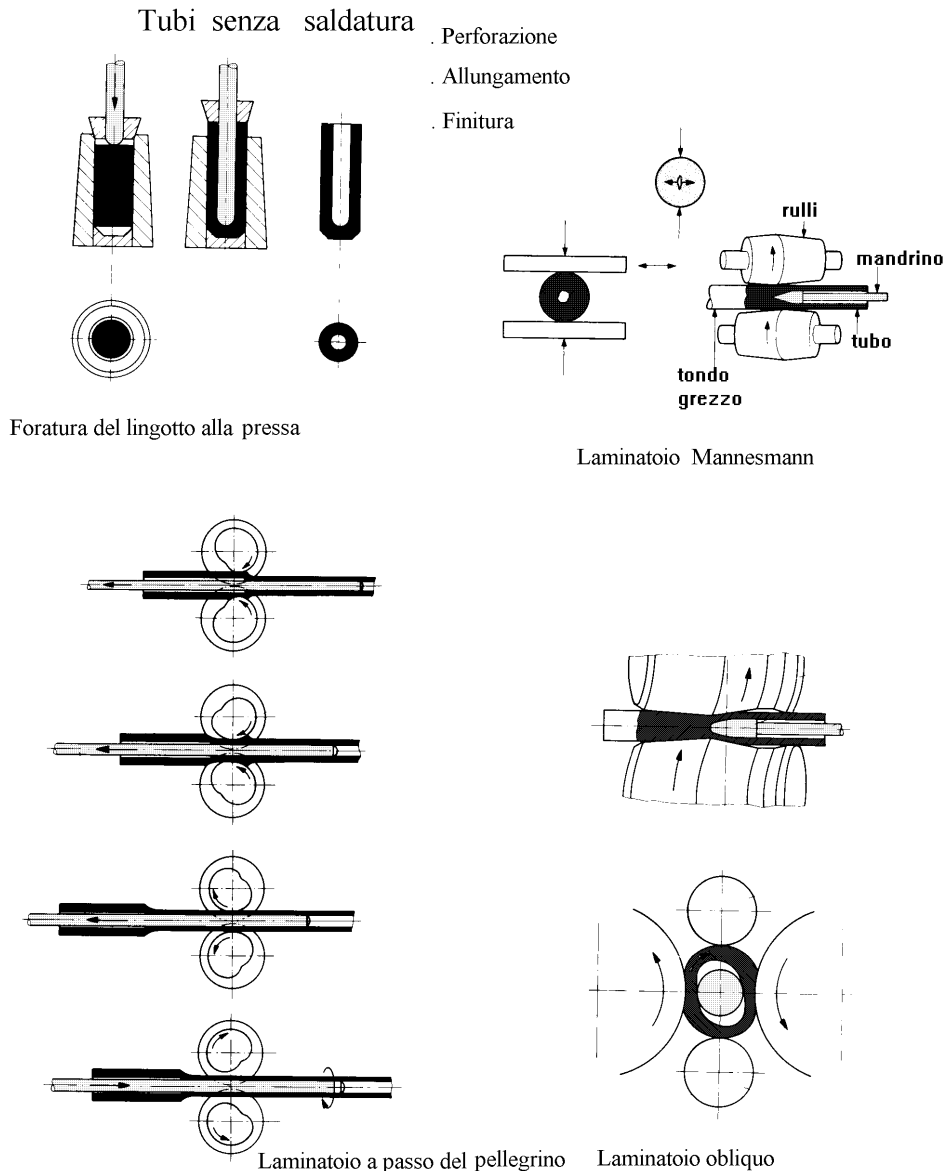
Le deformazioni plastiche sono tanto più onerose quanto minore è la temperatura di lavoro; può essere preferibile o indispensabile ricorrere a TTM ad alta temperatura con successivi raffreddamenti rapidi in linea; è allora fondamentale il controllo sulla grandezza del grano austenitico.

L'efficacia di alcuni elementi nel controllo dell'ingrossamento del grano austenitico è individuata dalla **temperatura di non ricristallizzazione**: Il niobio appare molto efficace formando dei precipitati NbC e Nb(C,N) ben al di sopra di A_{r3} purchè sia alto il prodotto Nb×C e sia elevata la deformazione plastica dell'austenite. Le dimensioni finali del grano ferritico sono controllate sia dalle ridotte dimensioni del grano austenitico di partenza che dalla successiva precipitazione di carbonitruri durante il raffreddamento. La velocità di raffreddamento deve essere ben controllata perché un raffreddamento troppo veloce impedisce la formazione di precipitati ed uno troppo lento provoca la coalescenza di precipitati grossolani poco efficaci nel contenimento della grandezza del grano finale.



La fabbricazione dei tubi

La fabbricazione di tubi è un esempio particolarmente interessante di interazione tra tecnologie meccaniche e metallurgiche. In siderurgia i tubi vengono tradizionalmente fabbricati per getto (tipicamente in ghisa), per deformazione plastica (senza saldatura, *seamless pipe/tube*)



o per saldatura di lamiera (longitudinale o elicoidale). I prodotti tubolari (non necessariamente a sezione circolare) hanno vastissime applicazioni, dal trasporto di fluidi (gas, liquidi, sospensioni, fanghi) nelle più diverse condizioni di pressione (sia interna che esterna) e di temperatura, a funzioni strutturali come elementi di telai, e pertanto sono molto diverse le dimensioni, le tolleranze e le caratteristiche meccaniche richieste. Una suddivisione tradizionale è quella relativa alla presenza o meno della saldatura longitudinale: in alcuni campi, ad esempio nell'estrazione di prodotti petroliferi è prescritto l'uso di tubi senza saldatura. La produzione mondiale di tubi nel 2001 può essere ripartita in 13 milioni di tonnellate di tubi senza saldatura e 28,5 saldati.

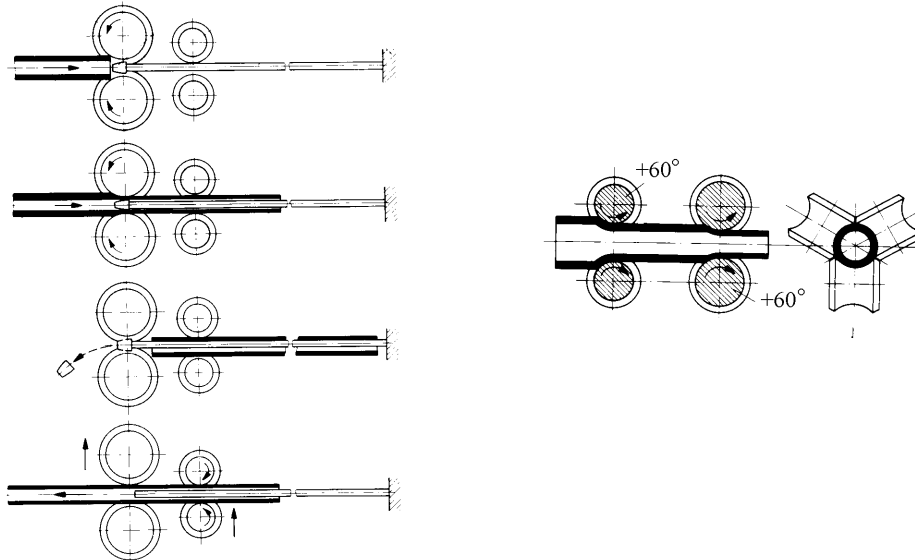
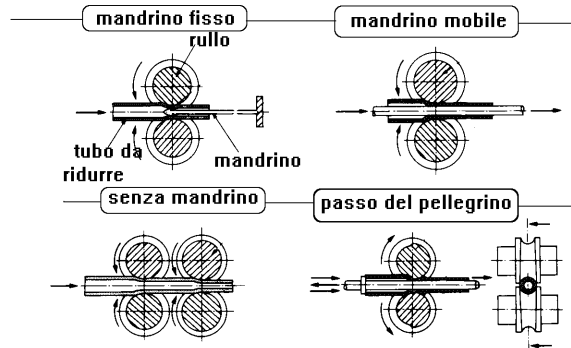
Nel caso di tubi in acciaio di grosso diametro senza saldatura si parte da un lingotto, da un massello o da un semilavorato che deve essere forato e quindi allungato e finito per ottenere le dimensioni e le tolleranze prescritte. La foratura (*piercing*) può essere ottenuta alla pressa mediante un mandrino che penetra nel metallo forzandolo ad aderire e a scorrere sulle pareti

dello stampo, oppure con il processo Mannesmann. In questo caso il tondo grezzo viene forzato ad avanzare con moto elicoidale tra due rulli sghembi che ruotano concordemente: con un opportuno profilo dei cilindri, si ottiene un ricalcamento che induce uno stato di trazione al centro del tondo. Un mandrino (*mandrel*) provvede a far scorrere il materiale allargando la cavità centrale.

Il forato ha in genere dimensioni lontane da quelle del prodotto finito: è tozzo, di grande diametro e di forte spessore. L'allungamento (*elongation*) e la messa a spessore (*wall reduction*) vengono ottenuti tipicamente per laminazione con tecniche di vario tipo, che contemplano o meno l'uso del mandrino. Tra gli impianti che lavorano con il mandrino, è tipico il laminatoio a passo del pellegrino, costituito da cilindri che ruotano discordi, sagomati in modo da laminare il forato solo in una porzione del giro: il tubo è forzato contro il mandrino che asseconda lo spostamento imposto dai cilindri finchè sono in presa; non appena manca il contatto, il mandrino inverte il verso portando una nuova porzione a laminare. Una rotazione lungo l'asse longitudinale ad ogni passo permette un profilo più omogeneo sull'intera superficie.

Tubi senza saldatura

Laminazione di tubi forati



Laminatoio a tappo

I tubi saldati vengono fabbricati a partire da laminati piani di vario spessore, con tecniche diverse a seconda dei diametri. Per piccoli diametri si utilizza un processo di piegatura e saldatura (alla fiamma, a resistenza, ad arco ...) in continuo da nastro; il nastro viene svolto e piegato in continuo per mezzo di rulli opportunamente sagomati che lo piegano progressivamente fino a portare in contatto i lembi da saldare. Per diametri e spessori maggiori la calandratura è discontinua su singole lamiere, prima ad U e poi ad O; la saldatura avviene preferibilmente con un sistema automatico, come l'arco sommerso e con materiale d'apporto. In entrambe i casi la saldatura è longitudinale.

Nei tubi di elevato diametro si può anche avvolgere la lamiera elicoidalmente e provvedere alla saldatura lungo i lembi: in questo caso il cordone di saldatura ha sviluppo elicoidale. In ogni caso i lembi da saldare dovranno essere opportunamente preparati in modo da garantire una regolare deposizione del cordone: le irregolarità geometriche ed i difetti laterali sul laminato si trasformano in difetti sul cordone di saldatura con pregiudizio sulla funzionalità e sulla affidabilità del tubo.

Il trasporto di prodotti petroliferi e di gas naturale su grandi distanze richiede tubazioni di elevato diametro che devono lavorare in condizioni di temperatura variabile tra i -60°C delle zone artiche ai $+50^{\circ}\text{C}$ delle zone desertiche, in ambienti terrestri più o meno corrosivi, ma anche in ambienti sottomarini. Vengono prescritti elevati valori dei carichi specifici a snervamento e a rottura per ridurre lo spessore del tubo, non disgiunti da elevate tenacità per resistere alla propagazione di eventuali cricche. La capacità di produrre acciai sempre più puliti permette una continua evoluzione nelle caratteristiche dei prodotti tubolari come diametro interno, spessore, pressione massima ammissibile. Nel caso di un tubo a parete sottile, di spessore t piccolo rispetto al raggio R , la pressione interna p provoca delle tensioni longitudinali σ_l e trasversali σ_t pari a:

$$\sigma_l = p R / 2 t \qquad \sigma_t = p R / t$$

quindi, a parità di pressione e di raggio della condotta, per ridurre lo spessore occorre aumentare la tensione massima ammissibile del materiale. Da queste formule si vede pure che non tutti i difetti hanno la stessa pericolosità: un'eventuale cricca che giace su un piano longitudinale è sollecitata ad aprirsi da una σ_t pari al doppio della σ_l che agisce su una cricca giacente su un piano trasversale.

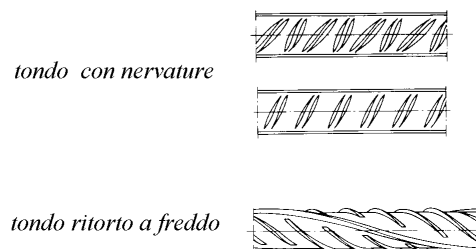
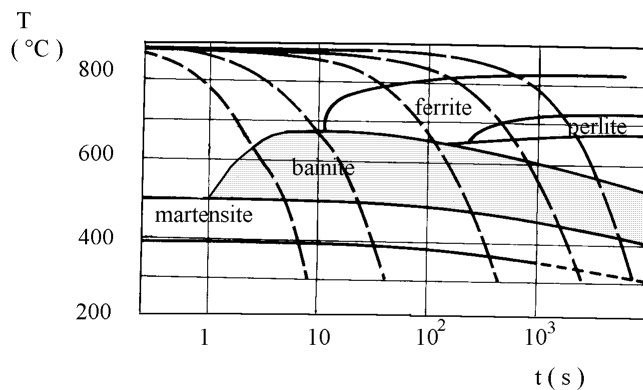
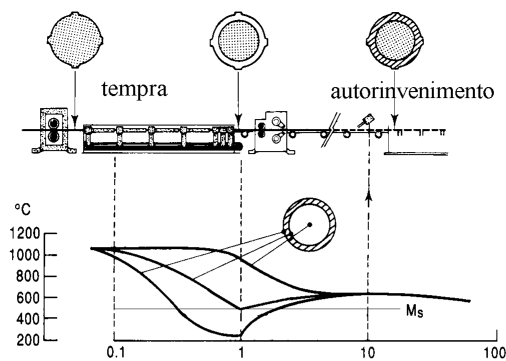
Le condotte vengono costruite saldando "trasversalmente" sul campo i singoli tubi e ripristinando le protezioni (interne ed esterne) contro la corrosione anche in corrispondenza delle saldature: è richiesta pertanto non solo una buona saldabilità, ma anche la garanzia delle caratteristiche meccaniche in corrispondenza dei giunti saldati, notoriamente deboli soprattutto dal punto di vista della tenacità. La continuità meccanica e metallica che si realizza mediante saldatura comporta infatti che la propagazione di un'eventuale cricca non interessa solo la zona di nucleazione ma può mettere fuori servizio una condotta per svariate decine di metri; il danno può essere particolarmente pesante perché alla perdita del fluido trasportato e alla mancata utilizzazione della struttura si deve aggiungere il costo della riparazione, molto gravoso se le condizioni ambientali sono difficili. Si utilizzano pertanto acciai microlegati a basso tenore di carbonio, bassissimo tenore di zolfo, a grano controllato, trattati con opportuni cicli termici durante la laminazione.

Anche i tubi, indipendentemente dal processo produttivo, presentano dei difetti caratteristici, legati a difetti dei semilavorati di partenza o ad una cattiva conduzione degli impianti. La presenza di soffiature, cavità di ritiro, cricche, bande di inclusioni ... viene facilmente esaltata durante le varie fasi di lavorazione per deformazione plastica o di esecuzione delle saldature. Oltre ai difetti interni ed a quelli superficiali, si devono evitare anche eventuali difetti di "geometria" come l'ovalizzazione (*out of roundness*), il fuori squadra (*diamond*) di tubi a sezione non circolare, l'eccentricità (*eccentricity*), la non rettilineità (centinatura, *camber*), le ammaccature (*denting*), la campanatura delle estremità, le rientranze ...

Il tondino da cemento armato

Nel calcestruzzo armato sono presenti due materiali con funzioni strutturali separate e ben precise: il calcestruzzo che ha buona resistenza alle sollecitazioni di compressione e l'acciaio cui è affidato il compito di assorbire tutti gli sforzi di trazione. Il tondino in acciaio ($\Phi = 6-50 \text{ mm}$, lunghezza di 11-14 m, *reinforcing rod*) viene sagomato in modo da costituire l'armatura che è annegata nel calcestruzzo o preventivamente saldato a costituire reti o tralicci elettrosaldati. L'aderenza tra tondino e conglomerato permette di trasmettere gli sforzi tangenziali senza sfilamento: per questo il tondino potrà essere opportunamente sagomato "ad adherenza migliorata", con nervature longitudinali od oblique sulla superficie (*corrugated bar*). L'acciaio,

Tempra superficiale ed autorinvenimento in continuo
su tondi sagomati da cemento armato



secondo la designazione convenzionale, è indicato con sigle del tipo "Fe B 500" nelle quali B sta per Beton ed il numero indica il carico unitario minimo garantito di snervamento, che è la caratteristica più importante che viene richiesta. Si usano tipicamente acciai non legati di base o di qualità, di costo contenuto, con tenore di carbonio basso ($< 0,24 \%$) per garantire una buona saldabilità. Un problema molto sentito è quello della duttilità dell'acciaio, che deve garantire una buona deformabilità dell'intera struttura in condizioni limite (urti, esplosioni, incendi) fino al

caso delle costruzioni in zona sismica. La duttilità può essere calcolata dalla prova di trazione usando il parametro R_m / R_s ed il valore A_m dell'allungamento percentuale in corrispondenza del carico massimo: un acciaio ad alta duttilità ha, per le norme europee, dei valori rispettivamente di 1,20 e 9%.

Nel cemento armato precompresso l'acciaio, che deve provvedere a generare e mantenere uno stato di precompressione sul calcestruzzo, è sollecitato molto più che nel caso precedente e sono pertanto prescritte caratteristiche meccaniche più elevate. Si ricorre a tondini o cavi trattati termicamente o incruditi, in modo da garantire carichi unitari di snervamento dell'ordine di 1500 MN m⁻². Sono inoltre da prevedere una buona resistenza a fatica, alla corrosione ed alla tenso-ricricatura ambientale.

Per quanto riguarda la saldabilità, prescritta talvolta come requisito particolare mediante il simbolo S, le norme UNI fanno riferimento al valore massimo di carbonio equivalente:

$$C_{eq} = C + Mn/6 + [Cr + Mo + V]/5 + [Ni + Cu]/15$$

che nel caso, ad esempio, degli Fe B 500, deve essere inferiore a 0,52. All'aumentare del valore del carbonio equivalente corrisponde una maggiore capacità dell'acciaio di prendere temprata martensitica. Ma la martensite, che si può formare ai bordi del cordone di saldatura a causa del rapido riscaldamento e dell'altrettanto rapido raffreddamento all'atto della saldatura, è decisamente non desiderabile per l'intrinseca fragilità, che può compromettere l'affidabilità di tutta la saldatura. Per gli acciai che hanno carbonio equivalente molto elevato si deve provvedere a preriscaldare ed, eventualmente, a post-riscaldare i lembi ed il cordone di saldatura in modo da ridurre i gradienti termici al raffreddamento e diminuire il rischio della formazione di una zona martensitica.

Il ricorso a tondini ed a vergella in acciaio inossidabile nelle armature per calcestruzzo permette di risolvere alcuni problemi relativi alla migliore resistenza sia a fenomeni corrosivi che al servizio in condizioni di alta temperatura, anche in presenza di fuoco. L'acciaio inossidabile austenitico garantisce inoltre una elevata duttilità, bassa permeabilità magnetica ed assenza di temperatura di transizione. Per avere caratteristiche resistenziali maggiori si deve ricorrere ad una struttura duplex austeno-ferritica.

Laminati rivestiti

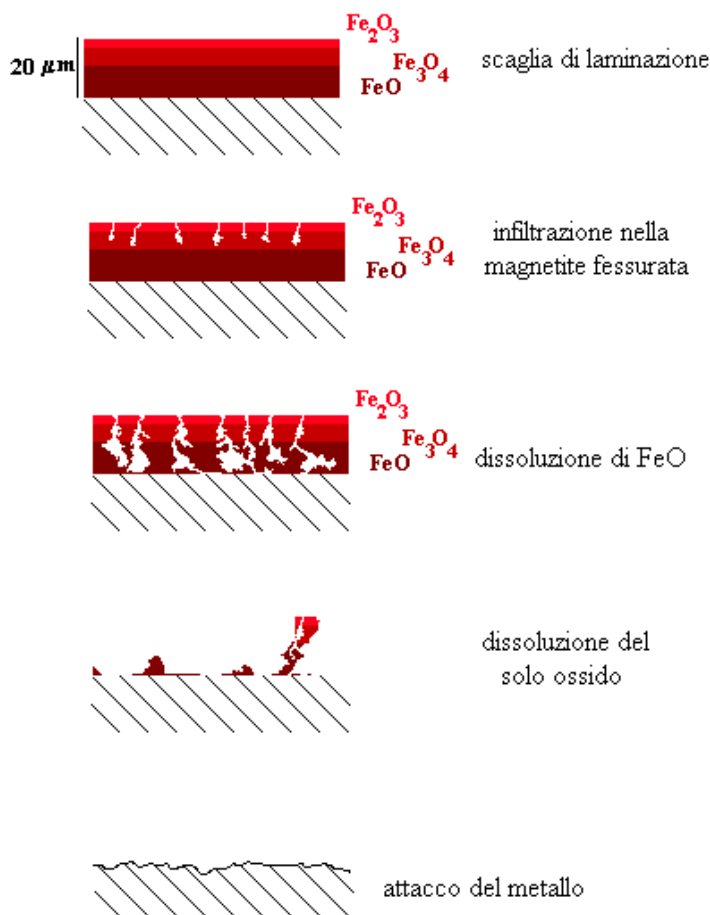
La protezione dei materiali metallici dai fenomeni corrosivi si ottiene in vari modi, che vanno dalla copertura della superficie con rivestimenti a base di un diverso materiale (verniciatura, bitumatura, zincatura, cromatura ...), alla promozione di un film superficiale proveniente dal materiale stesso (passivazione), al controllo elettrochimico dei fenomeni corrosivi (protezione catodica). L'impiego dei rivestimenti metallici è uno dei metodi più comuni di prevenzione dalla corrosione. La funzione del rivestimento non è solo quella di separare fisicamente il metallo dall'ambiente, ma soprattutto quella di modificare il comportamento elettrochimico del sistema, agendo come elemento sacrificale anche in presenza di discontinuità nella copertura. Nel rivestimento con metalli meno nobili, come nel caso dello Zn su acciaio, l'accoppiamento galvanico fa funzionare il metallo base da catodo e provoca il consumo del metallo di copertura che agisce da anodo. Il contrario avviene nel caso di protezione con un metallo più nobile. I rivestimenti metallici più diffusi sono quelli di Zn e di Sn, che hanno temperature di fusione rispettivamente di 491 °C e 232 °C.

I laminati rivestiti vengono prodotti in impianti continui che svolgono in serie i trattamenti di preparazione delle superfici, di eventuale trattamento termico, di rivestimento e di condizionamento finale. Nel caso del nastro, ad esempio, occorre provvedere allo sbobinamento, alla saldatura in linea per garantire la continuità tra bobine successive, allo sgrassaggio, al decapaggio, al rivestimento, al condizionamento dello strato rivestito, al controllo di qualità, al riavvolgimento in bobine. Il processo continuo ha bisogno di meccanismi di accumulazione del nastro sia in entrata che in uscita, così da garantire un flusso costante nella parte "utile"

dell'impianto. Questi polmoni vengono realizzati obbligando il nastro su numerosi rinvii a distanza variabile.

Ogni trattamento di superficie sui laminati a caldo ha bisogno di una superficie "pulita" con una rugosità controllata; sicuramente deve prevedere la rimozione preventiva della scaglia formata durante la permanenza alle temperature di lavorazione e durante l'avvolgimento in bobine. La scaglia (calamina) è uno strato più o meno spesso di ossidi; nel caso di acciaio non legato è costituita da ossidi di ferro a grado di ossidazione decrescente dalla superficie verso il cuore metallico, mentre è costituita da ossidi misti nel caso di acciaio legato. La descagliatura (*descaling*) avviene per via meccanica e/o per via chimica, sia in linea con gli impianti di laminazione, sia fuori linea in modo discontinuo. La descagliatura meccanica tradizionale utilizza tecniche di pallinatura e/o di molatura che determinano una elevata rugosità delle superfici; il decapaggio chimico (*pickling*) viene effettuato con acidi (nitrico, cloridrico, solforico ...) con elevati costi di gestione per sicurezza e protezione ambientale. Nella figura sono indicati schematicamente alcuni meccanismi di azione del decapaggio.

Alcuni trattamenti di deposizione su lamierini, come quelli a base di zinco o stagno, vengono tipicamente eseguiti in continuo a valle degli impianti di laminazione nell'ambito delle tecnologie proprie degli stabilimenti siderurgici e verranno trattati brevemente qui di seguito. I laminati rivestiti sono classificati come "prodotti finali".

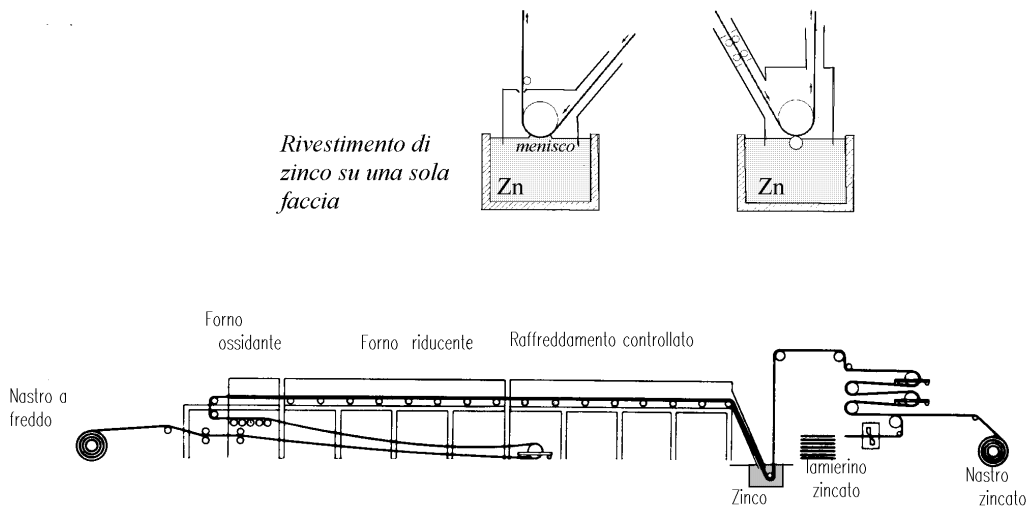


La lamiera zincata è un prodotto commerciale particolarmente diffuso per la esposizione all'atmosfera: la fabbricazione avviene prevalentemente per deposizione elettrolitica (spessori di 1-15 μm per faccia, con copertura anche di una sola faccia) o con processi di immersione a caldo a circa 450°C (*hot dipping*, spessori di 10-50 μm per faccia). Ai laminati piani zincati viene

richiesta, oltre la buona resistenza alla corrosione, una ottima formabilità ed una buona saldabilità. La formabilità è essenzialmente quella della lamiera di base; la saldabilità può essere inficiata dalla presenza dello zinco che verrebbe fuso in corrispondenza del cordone e passerebbe ad inquinarlo: è opportuno talora rimuovere una striscia prima della saldatura e ripristinarla localmente dopo. Il prodotto zincato può essere usato così come fabbricato o come base per ulteriori strati protettivi (cromo, alluminio, vernici ...).

Nelle zincatura a caldo la superficie dell'acciaio viene messa a contatto con lo zinco fuso; come nei processi di cementazione si ha diffusione dell'elemento cementante nel metallo base. Seguendo il diagramma Fe-Zn, si prevede la formazione di composti intermetallici a tenori sempre maggiori di Zn man mano che si procede dal metallo base verso la superficie: lo strato esterno sarà costituito da Zn puro. A parità di ogni altro parametro, lo spessore di tali strati è funzione della temperatura e del tempo di immersione; la protettività aumenta in genere con lo spessore, ma uno spessore eccessivo può essere più fragile e suscettibile di cricatura durante le successive lavorazioni; quindi uno strato spesso può essere meno protettivo di uno spessore sottile.

Un ciclo di zincatura continua a caldo di nastro laminato a freddo prevede operazioni di



sgrassaggio, lavaggio, decapaggio (per ridurre lo strato superficiale di ossido, ad esempio in HCl al 50%), condizionamento chimico della superficie (per migliorare la bagnabilità della superficie), preriscaldamento (in atmosfera riducente per rendere la superficie più attiva), immersione in un bagno fuso di zinco ed, infine, raffreddamento.

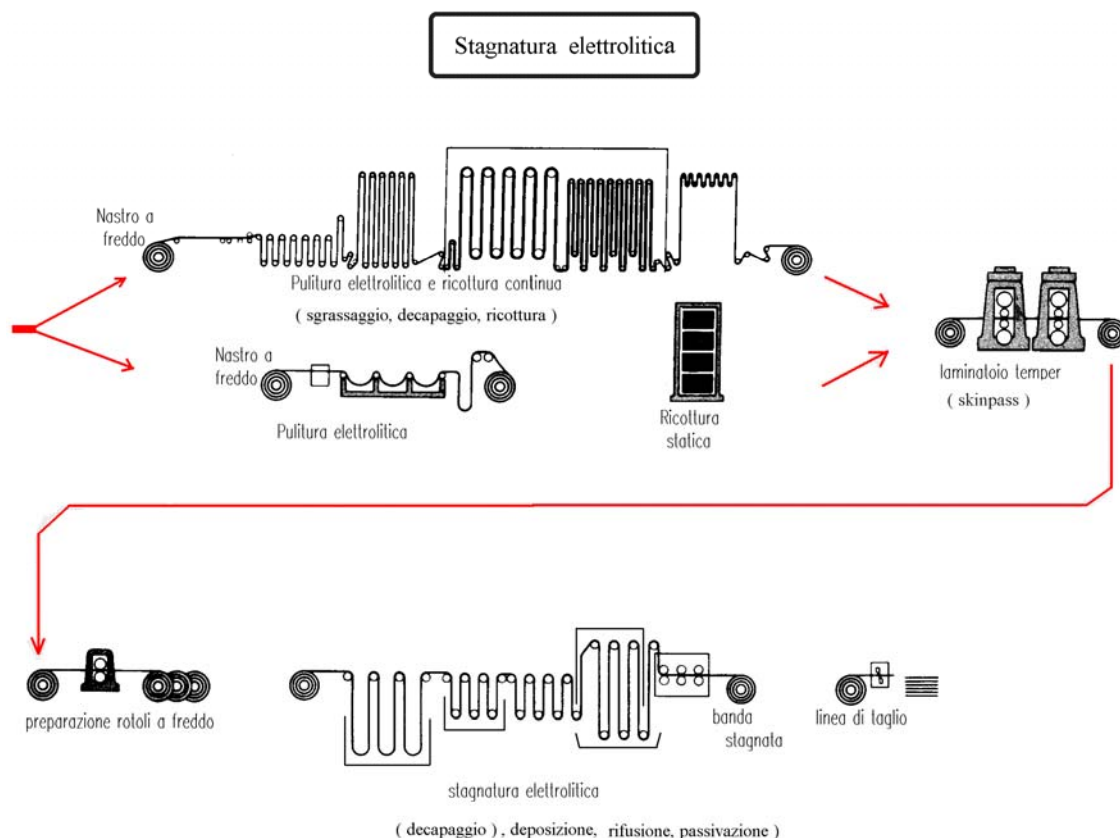
Il rivestimento di zinco rappresenta il sistema di protezione più diffuso contro la corrosione. Il mercato mondiale è attorno a 50 milioni di tonnellate all'anno e impiega il 45% dello zinco prodotto annualmente. Per il rivestimento a caldo si utilizza zinco di non elevata purezza (da 99,95 a 98,5 %) mentre per la zincatura elettrolitica si usano anodi al 99,99% di zinco. Nella tabella che segue sono riportate le produzioni europee di acciaio rivestito. Il rivestimento del nastro laminato a freddo con uno strato di Sn (banda stagnata o latta) trova ampia applicazione nei contenitori per l'industria alimentare.

PRODUZIONE EUROPEA DI ACCIAIO RICOPERTO NEL 2001 (t)		
Nazione	Latta	Altri metallici
Francia	989 000	4 343 000
Germania	963 000	6 409 000
Olanda	679 000	737 000
Gran Bretagna	604 000	1 339 000
Spagna	533 000	2 054 000
Italia	270 000	2 536 000

	Belgio	253 000
--	--------	---------

Lo stagno, che normalmente ha comportamento catodico rispetto al ferro, nell'ambiente tipico delle sostanze alimentari, assume comportamento anodico e protegge l'acciaio; gli eventuali prodotti di corrosione risultano non nocivi. La modifica delle condizioni ambientali, prodotte ad esempio dall'apertura del contenitore, ripristina le condizioni di corrodibilità dell'acciaio. La buona formabilità della banda stagnata è garantita dal metallo di partenza e dall'effetto lubrificante dello strato stesso di stagno. La tecnica di giunzione tipica è la brasatura, con lega Sn - Pb, che non porta a fusione né l'acciaio né il rivestimento.

La stagnatura avviene per via elettrolitica e richiede, in analogia a quanto visto per la zincatura, dei trattamenti preventivi di preparazione delle superfici. Il nastro, tipicamente in acciaio dolce laminato a freddo, subisce una ricottura di ricristallizzazione e viene immerso nelle vasche dove funziona da catodo: lo stagno viene ridotto da bi- o tetra-valente a Sn metallico. Si forma un'interfaccia sottile con composti Fe-Sn di varia stechiometria ed una copertura di stagno che viene valutata in massa per unità di superficie, con valori tipicamente di 2,8-11,2 g/m². Il processo può funzionare con velocità di alimentazione del nastro di varie centinaia di metri al minuto. Lo strato di stagno risulta poroso e di aspetto opaco: occorre provvedere ad una fusione a temperature dell'ordine di 250°C in ambiente ossidante per avere un prodotto finale accettabile esteticamente e con una buona protettività. La stagnatura superficiale può essere ottenuta anche per immersione a caldo; i prodotti commerciali disponibili prevedono anche eventuali trattamenti chimici superficiali e deposizione di altri elementi, come cromo-cromo ossido.



Dato l'elevato valore dello stagno, che è pari a quello del nichel e tipicamente sono pari a 10 volte il prezzo del piombo, la banda stagnata viene quotata non al kg ma al metro quadro, con uno spessore definito di stagno, ad esempio 0,30 mm.

I prodotti rivestiti commerciali presentano tutti i difetti già illustrati sui semilavorati e sui prodotti finiti di partenza, introducendone di nuovi legati ai cicli tecnologici di preparazione delle superfici e di deposizione del rivestimento. Un decapaggio insufficiente (*underpickling*)

produce una superficie irregolare per la presenza di scaglia (*scale*) di laminazione, un decapaggio eccessivo (*overpickling*) produce una superficie irregolarmente corrosa; il rivestimento può essere sfogliato, non uniforme, con presenza di grumi metallici o di scorie. Un decapaggio non corretto può provocare un infragilimento del materiale (*pickling brittleness*) con cricche e fratture, soprattutto in presenza di tensioni residue da lavorazione.



Linee analoghe alle precedenti servono per la produzione di laminati preverniciati: il pretrattamento consiste in operazioni di sgrassaggio e di spazzolatura, seguito da un trattamento di conversione chimica, come la fosfatazione, che depone uno strato idoneo ad accogliere la vernice su una sola o su entrambe le facce. La vernice viene deposta in una o più mani da teste automatiche; la cottura avviene per transito in forni continui alle temperature idonee alla polimerizzazione. Al vantaggio di deporre in continuo con un processo automatizzato la vernice su una superficie regolare, che nel caso dei coils è piana, si contrappongono le limitazioni nella foggatura dei manufatti finali che potranno subire agevolmente operazioni semplici di piegatura, profilatura e calandratura, ma non sopportano operazioni con elevate deformazioni plastiche che possono strappare, staccare o sfilacciare il rivestimento.

DESIGNAZIONE DEGLI ACCIAI

Le norme UNI EU 10027, suddividono gli acciai, ai fini della designazione, in due gruppi, a seconda se si vogliono evidenziare le caratteristiche meccaniche e di impiego o la composizione chimica. Ogni gruppo è diviso in sottogruppi. Nella tabella che segue sono riportati i criteri di formazione delle sigle con simboli (lettere e cifre) che esprimono alcune caratteristiche di base e possono essere obbligatorie o complementari. Sono, ad esempio, necessarie le sigle Fe o C o X, i numeri relativi ai carichi unitari di rottura o i punti di carbonio, gli elementi di lega, secondo lo schema della tabella. Le norme non sono obbligatorie per alcuni acciai di composizione e caratteristiche molto complesse (come, ad esempio, acciai per utensili ed acciai inossidabili) per i quali sono in uso designazioni convenzionali non unificate.

Le indicazioni di base sono, per gli acciai del gruppo I, il simbolo iniziale Fe o Fe G (nel caso di getti) seguito dalla caratteristica principale ed, eventualmente, dal simbolo dell'elemento chimico presente intenzionalmente nell'acciaio. La caratteristica principale, come indicato in tabella, può essere un numero indicante il carico unitario minimo garantito di rottura o di sneramento, oppure una lettera indicante l'impiego.

Per gli acciai del gruppo II le indicazioni di base sono il simbolo iniziale, il tenore di carbonio, gli elementi chimici caratterizzanti ed il loro tenore.

Le indicazioni complementari, che sono presenti quando necessarie a individuare un tipo particolare di acciaio, indicano qualità e requisiti particolari.

DESIGNAZIONE CONVENZIONALE DEGLI ACCIAI <i>schema semplificato</i>			
I designati in base alle caratteristiche meccaniche e di impiego		II designati in base alla composizione	
I1 car.meccaniche	I2 impiego	II1 non legati (1,3) <i>grado qualitativo?</i>	II2 legati (2) <i>grado qualitativo?</i> II21 <5% II22>
5%		C ...	X
Fe			
R_m (MPa)	(4)	tenore in carbonio C x 100	
(5) <i>elemento?</i>		(5) <i>elemento?</i>	elementi
(6)			(7) % conv. % vera
(8) <i>grado qualitativo?</i>			
(9) <i>requisiti particolari?</i>		(9) <i>requisiti particolari?</i>	

Nomenclatura

I : gruppo

I.1 : sottogruppo

Fe : simbolo iniziale

¹ Prefisso : se del caso una cifra indicante il grado qualitativo

[1 , 2 , 3 ...]

2 Prefisso : se del caso una lettera indicante il grado qualitativo [A , B , C ...]

3 lettera indicante l'impiego al quale l'acciaio è destinato:

D uso generale per vergella

B per bulloneria ...

4 lettera indicante l'impiego seguita da un numero a due o più cifre sul grado di questa caratteristica

V applicazioni magnetiche (grani non orientati)

M applicazioni magnetiche (grani orientati)

P per imbutitura

B per cemento armato; le cifre che seguono indicano il valore minimo dello snervamento in MPa

H per laminazione a freddo

D per deformazione a freddo

R per tubi saldati o per bordatura .

5 se del caso il simbolo dell'elemento che conferisce particolari proprietà

6 se del caso il grado di insensibilità alla frattura fragile indicato con lettera crescente con l'insensibilità [A, B, C, D]

7 tenore dei principali elementi in % in peso moltiplicato per i fattori di tabella, per valori al di sopra delle soglie indicate

elementi	fattore
Co, Cr(>0,25%), Mn (>1%)	4
Ni(>0,5%), Si(>0,5%), W	
Al, Be, Cu(>0,4%), Nb,	
Mo(>0,1%), Nb, Pb, Ta,	10
Ta, Ti, V(>0,06%), Zr	
N, P, S	100
B (>0,001%)	1000

8 Grado qualitativo diverso dall'insensibilità alla frattura fragile, indicato con numerazione crescente con le esigenze [1, 2 , 3...].

9 I requisiti particolari vengono indicati con una lettera chiave, seguita da un'altra lettera maiuscola, indicativa del grado di questa prescrizione:

F modo di disossidazione

U effervescente

N non effervescente

F calmato a grano fine...

S saldabilità

K attitudini particolari all'utilizzazione:

- D deformazione a freddo
- G solo a Temp. ambiente
- P attitudine alla profilatura a freddo
- Q attitudine alla bordatura
- R produzione di tubi saldati
- S attitudine alla fucinatura
- T per impiego a basse Temp.
- W per impiego ad alte Temp. ...
- H modalità di produzione:
 - K prodotto allo stato incrudito
 - W grezzo di laminazione...
- M aspetto della superficie:
 - A con piccoli difetti
 - B impeccabile
 - G decapata
 - F ossido aderente (non decapata)...
- R finitura della superficie:
 - M matta
 - R rugosa
 - L liscia
 - N lucida ...
- N forma della superficie: nervata, striata..
- G rivestimento superficiale
- T trattamento termico
 - A ricottura di distensione
 - B ricottura di coalescenza
 - C ricottura completa
 - D normalizzazione
 - F bonifica ...

Esempi

Fe 510 C - Acciaio designato partendo dalle caratteristiche meccaniche, gruppo I, sottogruppo 1
 - Carico unitario di trazione minimo garantito di 510 MN m^{-2} , grado di insensibilità alla frattura fragile C

Fe 490-2 - I.1- Carico unitario di trazione minimo garantito di 490 MN m^{-2} , grado qualitativo 2

Fe 360-1 KW - I.1 - Carico unitario di trazione minimo garantito di 360 MN m^{-2} , grado qualitativo 1, atto all'impiego alle alte temperature

Fe G 440 -I.1 - Acciaio in getto, con carico unitario di trazione minimo garantito di 440

Fe 360 Pb - I.1 - Acciaio al Piombo, con carico unitario di trazione minimo garantito di 360 MN m^{-2} .

Fe E 355 Ni - I.1 - Acciaio al nichel, con carico unitario di snervamento minimo garantito di 355 MN m^{-2} .

Fe P 02 MB RL - I.2 - Acciaio designato in base all'impiego, per imbutitura, con grado di attitudine all'imbutitura 02, aspetto della superficie impeccabile, finitura superficiale liscia.

Fe B 250 - I.2 - Acciaio per cemento armato, con carico unitario di snervamento minimo garantito di 250 MN m^{-2} .

2 C 40 - II.11 - Acciaio destinato al trattamento termico, grado qualitativo 2, tenore mediano di carbonio di 0,40%.

C 35 S - II.11 - Tenore mediano di carbonio 0'35%, tenore minimo di zolfo.

G C 30 - II.11 - Acciaio da getto, con tenore mediano di carbonio di 0,30%.

3 CD 20 - II.12 - Acciaio designato in base alla composizione chimica, destinato ad impieghi particolari. Grado qualitativo 3, per vergella, tenore mediano di carbonio di 0,20%.

CD 40 Cr 2 - II.12 - Acciaio per vergella, con tenore mediano di carbonio di 0,40%, aggiunta di cromo al livello 2.

A 38 Cr 4 - II.21 - Acciaio designato in base alla composizione chimica, debolmente legato. Grado qualitativo A, tenore mediano di carbonio di 0,38% e di cromo 1%.

41 Cr Mo 4 - II.21 - tenore mediano di carbonio di 0,41% , di cromo 1% e di molibdeno inferiore ma non specificato

35 SMn 10 - II.21 - tenore mediano di carbonio di 0,35% e 0,10% di zolfo

G 22 Ni 10 - II.21 - per getti, tenore mediano di carbonio di 0,22% e di nichel 4%

GX 15 CrMo 5 - Acciaio legato designato in base alla composizione chimica, con tenore di almeno un elemento > 5%; gruppo II, sottogruppo 22 - per getti, con tenore mediano di carbonio di 0,15% , di cromo 5% e di molibdeno non specificato

AX 15 Cr 9 - II.22 - grado qualitativo A, con tenore mediano di carbonio di 0,15% e di cromo 9%

X 22 CrNi 2520 - II.22 - tenore mediano di carbonio di 0,22% , di cromo 25% e di nichel 20%

X 106 WMoV 6 5 3 KU - II.22 - acciaio da utensili con un tenore mediano di carbonio di 1,06%, tungsteno 6% , molibdeno 5% e vanadio 3%

Tabella di dati termodinamici sul ferro

T(°C)	T (K)	C _p (cal/K g-atomo)	H _T – H _{st} (cal/g-atomo)	C _p medio (cal/K g-atomo)
25	298,15	5,97	0	9,27
≈ 127	400	6,54	637	
≈ 327	600	7,66	2057	
≈ 727	1000	13,01	5820	
≈ 911	1184 α	9,90	8030	
≈ 911	1184 γ	8,10	8245	
≈ 1392	1665 γ	9,06	12372	
≈ 1392	1665 δ	9,83	12572	
≈ 1536	1809 δ	10,17	14012	
≈ 1536	1809 liq	11,00	17312	
1600	≈ 1873	11,00	17952	
≈ 1627	1900	11,00	18313	

1 cal = 4,184 J
 R = 1,98 cal/K mole = 8,31 J/K mole
 N = 6,022 10²³ mole⁻¹
 Peso atomico : Fe = 55,847

TABELLA DI CONVERSIONE DI UNITA' DI MISURA

Oltre alla tradizionale sovrapposizione tra unità di misura che si riscontrano nei vari settori dell'ingegneria, in Siderurgia la situazione è complicata dal ricorso ai sistemi di misura americani. Qui di seguito sono riportate alcune tabelle di conversione.

Lunghezza - 1 inch = 25,4 mm \ 1 yard = 0,91 m

Peso - 1 Kg_f = 2,2 Pound = 9,8 10⁻⁴ Ton (long) = 1,1 10⁻³ Ton (short) \ 1 Ton (short) = 0,9 t \ 1 Tonn (long) = 1,01 tonn \ 1 Ounce (troy) = 31,1 g \ 1 Ounce (avoirdupois) = 28,3 g

Volume - 1 Gallon (US, dry) = 4,4 litri \ 1 Gallon (US, liquid) = 3,78 litri \ 1 m³ = 28,3 Bushel = 8,6 Barrel (US, dry)

Forza - 1 Kg_f = 9,8 N = 2,2 Pound-force

Pressione, sforzo - 1 atm = 760 Torr (mmHg) = 1,01 Bar = 1,01 10⁵ Pa (N/m²) = 10,33 mH₂O \ 1 Psi (pound / square inch) = 6894 Pa (N/m²)

Temperatura - °F = 9/5 °C + 32 \ °C = 5/9 (°F - 32)

Tenacità - 1 MN m^{-3/2} = 1 MPa m^{1/2} = 10⁵ Kg_f m^{-3/2} = 31,6 N mm^{-3/2} = 0,91 Ksi √in

Lavoro, energia - 1 J = 0,2388 cal = 9,4 10⁻⁴ BTU \ 1 BTU = 251,9 cal \ 1 kWh = 3,6 MJ