

EVOLUZIONE DEL FORNO ELETTRICO E AMBIENTE DI LAVORO IN SIDERURGIA

A. BORRONI - B. MAZZA - G. NANO - D. SINIGAGLIA

Istituto di Chimica-fisica, Elettrochimica e Metallurgia e Gabinetto di Ergotecnica del Politecnico di Milano

1. Premessa

L'idea più frequente che, tranne rare eccezioni, le industrie siderurgiche italiane basate sul forno elettrico hanno rispetto alla tecnologia da loro applicata è che, a parte gli aggiornamenti (aumento delle potenze, uso di refrattari di più alta qualità, sviluppo innovativo delle macchine di colata continua, ecc.), nulla possa essere mutato sostanzialmente. Un'altra idea è quella che il miglioramento delle condizioni ambientali di lavoro rappresenti solo un costo per l'azienda e quindi questo tipo di intervento viene messo, in fase di progettazione e di realizzazione degli impianti, all'ultimo posto.

Nulla o quasi nulla, poi, viene fatto nel campo del recupero e del risparmio energetico, circostanza questa che, unita all'uso dei forni Ultra High Power (UHP), ha contribuito ad aumentare in modo massiccio i consumi di energia elettrica (1-3). Una siffatta impostazione deriva dalla particolare genesi della maggior parte delle industrie di questo tipo (si veda ad esempio la siderurgia bresciana), dalla diffusa tendenza, in Italia, ad importare tecnologie e dalla assoluta mancanza, sia da parte delle industrie che da parte dello Stato, di qualsiasi attività di ricerca nel campo della progettazione ergonomica di unità produttive (4).

Nella situazione sopraddetta risulta spesso difficoltoso, molto costoso e, al tempo stesso, estremamente limitato l'intervento di bonifica ambientale che, per sopravvenute disposizioni legislative o più spesso per la pressione dei lavoratori, l'azienda è costretta a fare.

In questa relazione, dopo un'analisi delle motivazioni che hanno portato all'affermarsi della tecnologia basata sul forno elettrico, si prenderanno in considerazione le ricerche, le tendenze e le applicazioni che in questo settore si sono realizzate in campo internazionale, allo scopo di intaccare quei pregiudizi sopra descritti e di dare degli elementi concreti di dibattito intorno a questo problema (5). Da ultimo si confronteranno i criteri con cui sono state realizzate alcune recenti acciaierie in Italia e all'estero, con particolare attenzione alla nuova acciaieria Ceretti di Pallanzeno (NO), che appare quanto meno un'eccezione per l'Italia e forse non solo.

2. Affermazione del forno elettrico

Per molti anni la produzione dell'acciaio si è basata sul ciclo integrale, quello cioè che, partendo dal minerale e dal carbone, arriva all'acciaio greggio attraverso il per-

corso altoforno-convertitore a ossigeno. La disponibilità sul mercato di rottame in quantità sempre crescente ha portato alla nascita dei forni elettrici, in grado di poterlo meglio utilizzare; lo sviluppo di questi ultimi è stato però per molti anni limitato dalla scarsità e dal costo dell'energia elettrica (in generale di tipo idroelettrico e non trasportabile ovunque per mancanza di una rete elettrica capillarmente diffusa) e dalla scadente qualità dei materiali refrattari e degli elettrodi (6-11).

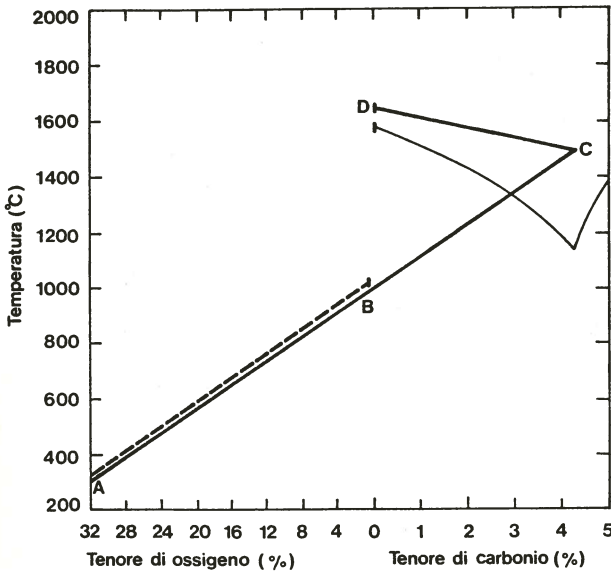
Negli ultimi 15-20 anni, per la sopraggiunta disponibilità di energia elettrica e di migliori materiali, il processo al forno elettrico ha avuto un notevole impulso tanto che, ad esempio, oggi in Italia esso copre circa il 50% della produzione totale di acciaio.

Oltre alle tecniche migliorative quali l'affinazione fuori forno, il preriscaldamento del rottame, ecc. che vedremo nel seguito, un particolare fattore di sviluppo delle acciaierie elettriche è costituito dalla preriduzione o riduzione diretta del minerale di ferro (12, 13). Questa tecnologia svincola il processo di produzione dell'acciaio dal coke, consentendo, oltre all'utilizzo di combustibili quali il metano e il petrolio (circa costanza particolarmente vantaggiosa per i paesi emergenti), anche quello di combustibili di basso pregio come ad esempio la lignite. Inoltre la preriduzione svincola l'acciaieria elettrica dall'asservimento al mercato del rottame, caratterizzato da forti fluttuazioni di prezzo con frequenti punte speculative.

Nella Fig. 1 vengono confrontati i due processi di produzione dell'acciaio a partire dal minerale di ferro. La linea tratteggiata rappresenta il processo di riduzione diretta, in cui il minerale con un determinato tenore di ossigeno viene ridotto allo stato solido (tratto AB), dando luogo alla cosiddetta spugna di ferro che viene successivamente fusa ed elaborata al forno elettrico. La linea continua rappresenta invece il processo tradizionale, in cui lo stesso minerale, ridotto con il coke nell'altoforno, arriva ad uno stato fuso contenente il 4-5% di carbonio (tratto A C); successivamente il tenore di carbonio viene diminuito in un convertitore ad ossigeno (tratto C D). Il consumo di energia, riferito all'energia primaria, nella via di produzione: riduzione diretta-forno elettrico è di circa il 30% più elevato che per la via: altoforno-convertitore ad ossigeno (9). Ciò è essenzialmente dovuto al fatto che, in quest'ultimo caso, il convertitore ad ossigeno è dal punto di vista energetico autosufficiente, essendo prevalentemente alimentato con ghisa liquida ed essendo per di più sede di reazioni esotermiche.

A favore della via: riduzione diretta-forno elettrico giocano però i minori costi di investimento per tonnellata di capacità produttiva, e soprattutto una maggiore versatilità e flessibilità degli impianti alle esigenze dei mercati. In Fig. 2 è riportato l'aumento percentuale del costo di produzione in funzione della diminuzione del grado di utilizzo degli impianti che compongono un ciclo integrale ad alta capacità. Si può osservare che impianti di questo tipo sono vantaggiosi solo con un alto grado di utilizzo. (Un grado di utilizzo limitato al 70% porta, ad esempio, a un aumento di costo

Fig. 1 - Confronto fra il processo convenzionale di produzione di acciaio (linea continua ABCD) e il processo di riduzione diretta (linea tratteggiata AB). La linea sottile è la curva di liquidus delle leghe Fe-C (12).



del 30% ed indica quindi una elevata incidenza dei costi fissi). Questo dato, legato alla non flessibilità dei grossi impianti in situazioni, come le attuali, di ristagno del mercato, gioca quindi decisamente a sfavore delle unità produttive a ciclo integrale.

Negli stabilimenti a ciclo integrale i costi di investimento sono più elevati poichè occorre tenere presente la necessità di un'alta disponibilità degli impianti (ovvero di una bassa probabilità che si verifichi un guasto e di un tempo minimo per riparare eventualmente il guasto stesso e per rimettere in esercizio l'impianto). La durata degli elementi costruttivi deve essere pertanto garantita dall'alta qualità dei materiali e delle apparecchiature e le riparazioni necessarie devono essere effettuate con opportune macchine ausiliarie che operino nel minor tempo possibile. Particolarmente curata, infine, deve essere la rete dei trasporti per i materiali in arrivo e in partenza, onde evitare la fermata per mancanza di materie prime, e al tempo stesso per non pagare forti penali per il mancato scaricamento delle navi.

Sempre con riferimento al ciclo integrale, maggiori costi di investimento sono legati all'equilibrato proporzionamento dei componenti che si trovano in successione nel ciclo produttivo, per cui il numero dei componenti singoli e quindi la gran

dezza di ciascun impianto devono essere decisi in base alla influenza che un arresto programmato o improvviso di questo impianto (ad esempio nel caso di rifacimenti del rivestimento o di grosse riparazioni) ha sul carico di produzione delle aree di lavoro disposte prima e dopo nel flusso di materiali. Ebbene, il rapporto ottimale tra gli altiforni appartenenti a una catena di produzione e i convertitori LD installati è da 1:1 a 1:2; il rapporto tra i convertitori LD e gli impianti di colata continua per bramme è 1:1 (per gli impianti di colata continua per blumi è 1:2). Nelle acciaierie elettriche, invece, il rapporto equilibrato tra forni elettrici e impianti di colata continua è 1:1; nelle acciaierie con più di quattro forni elettrici è da 1:0,7, a 1:0,9. Uno studio sulle previsioni tecnologiche su scala mondiale condotto nel 1976 dalla Hamersley Iron Pty. Ltd. (14) ha messo in evidenza come la produzione di preridotto è destinata ad arrivare nel 2005 a 110 Mt e di conseguenza anche la ripartizione dell'acciaio prodotto con le diverse tecniche è destinata a mutare (Fig. 3). La tendenza dei paesi in via di sviluppo a produrre acciaio porterà a una riduzione della quota parte della produzione mondiale ottenuta con il ciclo altoforno-convertitore LD. In alcuni casi la riduzione diretta sarà utilizzata in aggiunta alla pratica tradizionale (ove i costi di investimento risultino elevati), in altri casi essa sostituirà la

Fig. 2 - Andamento dei costi di produzione in funzione del grado di utilizzazione degli impianti in un ciclo integrale ad alta capacità (9).

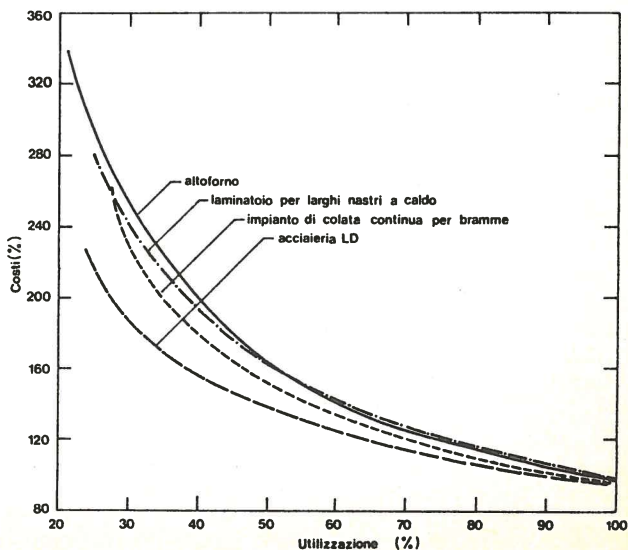
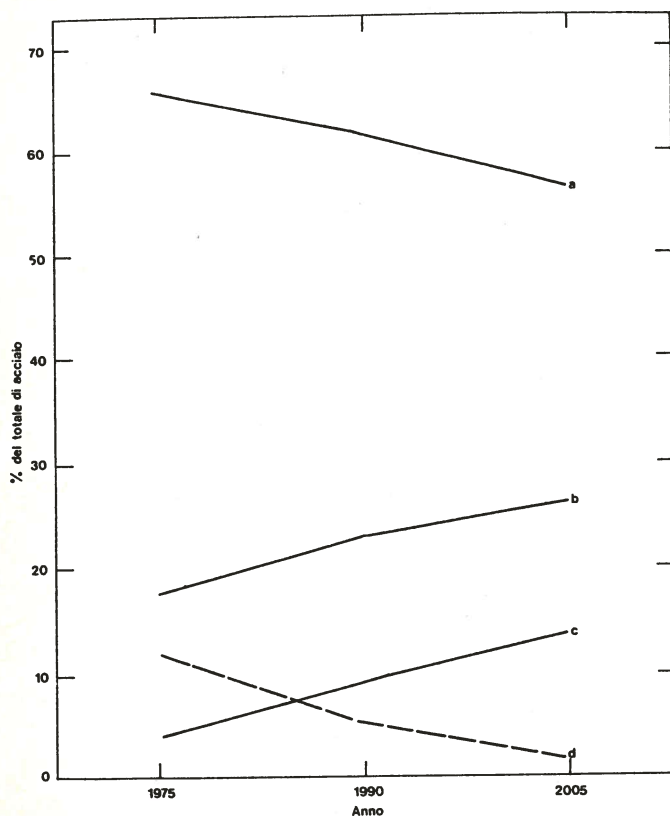


Fig. 3 - Evoluzione della produzione di acciaio secondo i diversi processi (14).

- a. ciclo altoforno - convertitore LD
- b. forno elettrico ad arco
- c. ciclo altoforno-acciaieria OBM (o simili)
- d. forno Martin-Siemens

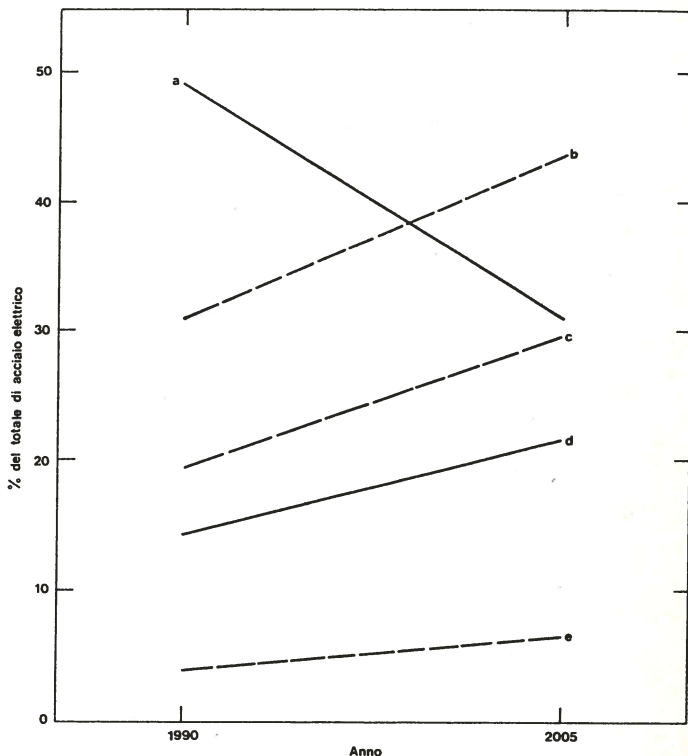


pratica tradizionale (ove risulterà necessario compensare la carenza di materie prime e in particolare di carbone da coke e di rottame). Si può prevedere, inoltre, la nascita di un numero crescente di piccoli stabilimenti con forno elettrico in zone vicine ai mercati di consumo: tali stabilimenti utilizzeranno le più moderne tecnologie e saranno in grado di operare con costi inferiori; pertanto la quota di acciaio prodotta dai grandi stabilimenti è destinata a diminuire.

La tecnologia di produzione dell'acciaio al forno elettrico sarà anche destinata a subire modificazioni (Figg.4 e 5).

Fig. 4 - Evoluzione delle caratteristiche dei forni elettrici e delle pratiche operative (14).

- a. pratica del 1977
- b. fusione accelerata
- c. fusione separata
- d. forni di capacità superiore a 200 t
- e. forni a induzione



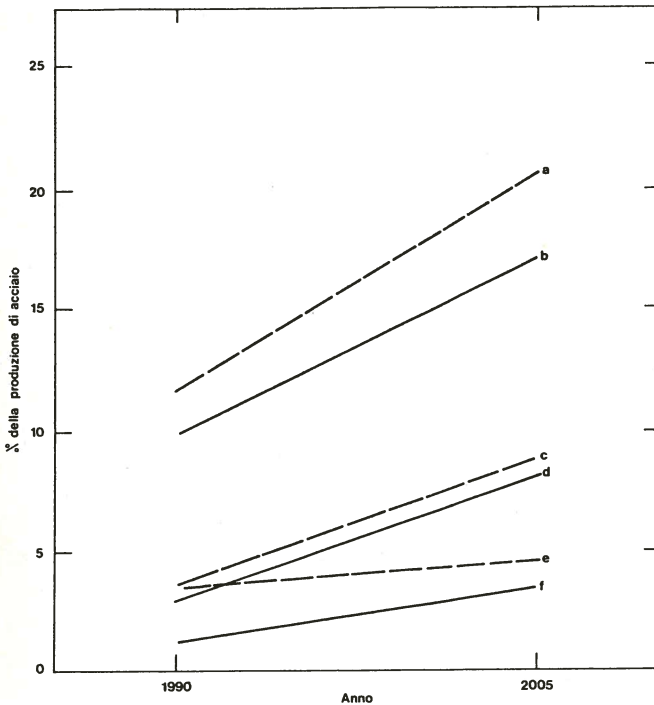
In particolare si presume che aumenteranno le dimensioni dei forni elettrici ad arco, che si estenderà la pratica della fusione separata dall'affinazione e che verrà sempre più adottata la pratica della fusione accelerata. Il trattamento sotto vuoto e l'affinazione in siviera subiranno un notevole incremento; il preriscaldamento dei materiali in carica sarà largamente adottato per risparmiare energia.

3. Evoluzione del forno elettrico

Con l'affermarsi delle acciaierie elettriche il forno e la relativa tecnologia hanno subito mutamenti in grado di metterle in competizione con le acciaierie LD, anche nella pro

Fig. 5 - Evoluzione delle tecnologie speciali di fabbricazione dell'acciaio (14).

- a. preriscaldamento dei materiali in carica
- b. trattamento sotto vuoto
- c. processi continui
- d. regolazione del flusso del materiale con campi elettromagnetici
- e. ciclo cubilotto - convertitore LD
- f. processi ad altissima temperatura



duzione di acciai di massa (15). La Fig. 6 mostra quali sono state le tre principali direttrici su cui ci si è mossi per migliorare le prestazioni dei forni, e cioè :

- a) riduzione dei tempi di fusione;
- b) riduzione dei tempi di permanenza in forno;
- c) riduzione dei tempi di fermata.

In particolare per il conseguimento del primo punto, nella maggioranza dei casi l'industria ha puntato sulla soluzione dei forni UHP, che aveva una giustificazione nella sua più immediata applicazione rispetto alle altre tecniche.

Per avere una indicazione della velocità di fusione di una carica solida in un forno elettrico, si può fare riferimento alla cosiddetta "capacità specifica di fusione" C_t (tonnella-

te fuse per ora e per tonnellata di carica, (t/h)/ t) espressa dalla relazione :

$$C_t = \frac{P_s \cdot \eta}{\Delta H_s}$$

dove : P_s (kW/t) è la potenza specifica del forno, η è il rendimento che tiene conto delle perdite e ΔH_s (kWh/t) è la entalpia necessaria a portare a fusione una tonnellata di carica.

$1/C_t$ rappresenta quindi il tempo (h) per portare a fusione la carica del forno.

Fig. 6 - Evoluzione del forno elettrico.

PRATICHE OPERATIVE TRADIZIONALI	RIDUZIONE DEI TEMPI DI FUSIONE	<p>aumento delle potenze elettriche</p> <p>preriscaldamento del rottame</p> <p>bruciatori ausiliari</p>	<p>forni HP e UHP</p> <p>forni a bassa potenza</p> <p>forni a bassa potenza</p>	regolazione automatica del forno
	RIDUZIONE DEL TEMPO DI PERMANENZA IN FORNO	<p>operazioni in siviera</p> <p>operazioni sotto vuoto in appositi impianti</p> <p>operazioni con apposite attrezzature</p>	<p>stirring: con tappo poroso con asta sommersa magnetico</p> <p>disossidazione (calmatura)</p> <p>desolforazione</p> <p>degasaggio</p> <p>affinazione</p> <p>aggiunte elementi di lega</p> <p>desolforazione con insufflaggio di polveri + gas</p> <p>disossidazione con insufflaggio di polveri + gas</p> <p>microleganti: immissione in fili o in grani</p>	forno scoria
	RIDUZIONE DEI TEMPI DI FERMATA	<p>miglioramento materiali</p> <p>diminuzione usura dei materiali</p> <p>diminuzione tempi di rifacimento</p> <p>diminuzione tempi di carica</p>	<p>refrattari</p> <p>elettrodi</p> <p>raffreddamento pareti e volta</p> <p>regolazione tensione elettrodi</p> <p>tino estraibile</p> <p>automazione della carica e delle aggiunte</p>	

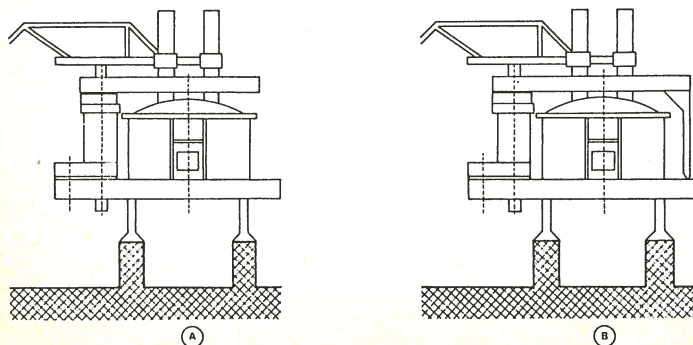
Dalla relazione soprascritta si osserva come la capacità specifica di fusione (e quindi la produttività) possa essere aumentata, a parità di rendimento, sia elevando la potenza specifica del forno (cosa che giustifica da un punto di vista teorico lo sviluppo dei forni UHP), sia ab bassando il debito entalpico del rottame. Se, però, si con sidera anche la "capacità relativa di fusione" C_{MW} , definita come numero di tonnellate fuse per ora e per megawatt di potenza installata del forno ((t/h)/MW), ovvero :

$$C_{MW} = \frac{C}{P_s} = \frac{\eta}{\Delta H_s}$$

si osserva che per migliorare anche questo indice, e quindi la resa energetica, fermo restando il rendimento, l'unica strada possibile è quella della diminuzione del debito entalpico del rottame. Questa strada, però, solo ultimamente sta trovando applicazione, mentre di gran lunga più utilizzata è la tecnica dei forni UHP legata alla costruzione di forni sempre più grandi (alla North Western Steel and Wire Co. è in servizio un forno da 400 t). Tenuta presente questa tendenza all'uso dei forni UHP, è importante conoscere i limiti e gli inconvenienti ad essi legati (16-18). L'utilizzo di forni con capacità sempre più grandi ha portato a dover rivedere alcune caratteristiche costruttive. Bisogna tener presente che l'aumento della capacità è legato all'aumento del diametro del forno stesso, cosa che comporta problemi nella costruzione del dispositivo di sostegno per la volta. In forni fino a 200 t e diametro fino a 9 m il dispositivo di sostegno della volta ruotante è costituito da un semiportico (Fig. 7A); ciò offre il vantaggio di poter ruotare la volta nella direzione della campata di colata e, se necessario, anche dalla parte della platea forno. Nei grandi forni con diametro superiore a 9 m questo sistema non può più essere utilizzato, ma deve essere rimpiazzato da un sistema a portico (Fig. 7B); la rotazione della volta in

Fig. 7 - Particolari costruttivi dei forni elettrici UHP (16).

- A) volta a semiportico
B) volta a portico



questo caso può avvenire solo dalla parte della platea forno e quindi devono essere prese misure protettive per il calore radiante.

Un altro aspetto legato all'aumento di capacità dei forni è la curvatura della suola. L'angolo di inclinazione del forno per la colata è infatti legato alla curvatura della suola, poichè deve essere garantito il totale svuotamento del forno. A questo fine l'angolo di inclinazione deve essere di almeno due gradi superiore a quello teorico per la completa colata.

La curvatura della suola è anche legata, per forni di data capacità, al diametro del tino; un forno con un grande raggio di curvatura abbisogna di un angolo di colata piccolo, ma di un grande diametro del tino; per contro con un diametro del tino più piccolo il raggio di curvatura è pure più piccolo e di conseguenza più grande è l'angolo di inclinazione, a meno di non operare con il becco di colata molto al di sotto del livello del bagno, cosa che può provocare grossi inconvenienti al momento del bussaggio.

La Fig. 8 mostra l'andamento dell'angolo di inclinazione e del raggio di curvatura in funzione della capacità per forni di dato diametro (6,1 m) e per una data profondità del bagno in corrispondenza dell'asse centrale (1300 mm). L'angolo di inclinazione è anche legato alla lunghezza dei cavi portacorrente che, per diminuire le impedenze, deve essere la più piccola possibile.

Il diametro del tino, a sua volta, deve essere scelto in funzione della tensione e della distanza elettrodo-parete onde limitare l'usura del refrattario per irraggiamento.

Fig. 8 - Variazione dell'angolo di basculamento (A) e del raggio di curvatura della suola (R) in funzione della capacità per forni di 6,1 m di diametro e per una profondità del bagno in corrispondenza dell'asse centrale di 1300 mm (16).

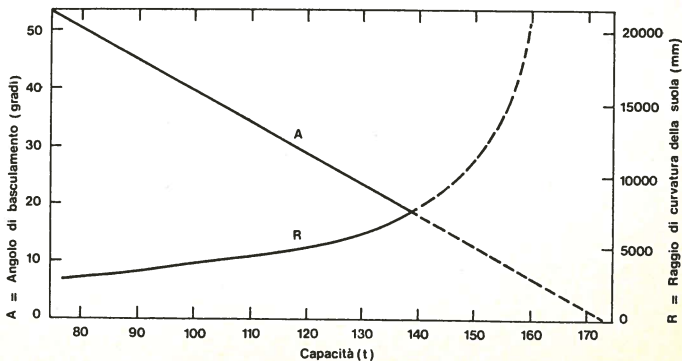
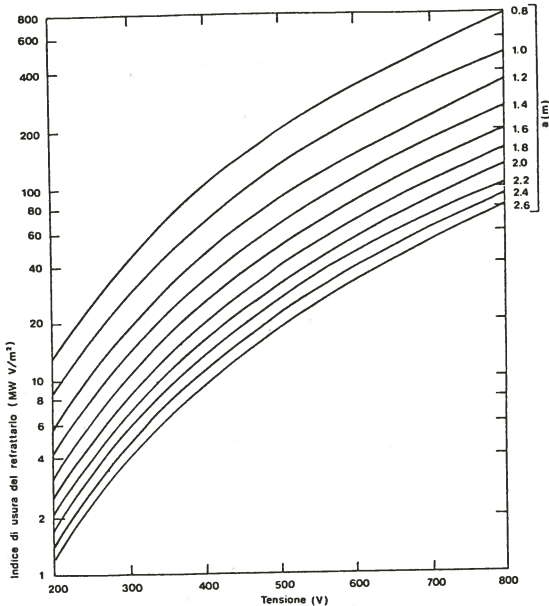


Fig. 9 - Variazione dell'indice di usura del rivestimento in funzione della tensione tra le fasi e della distanza (a) elettrodo-parete (16).



In Fig. 9 è riportato un indice empirico di usura del refrattario R_E in funzione della tensione tra le fasi e della distanza minima tra parete ed elettrodo. R_E può essere calcolato in prima approssimazione con la formula (19):

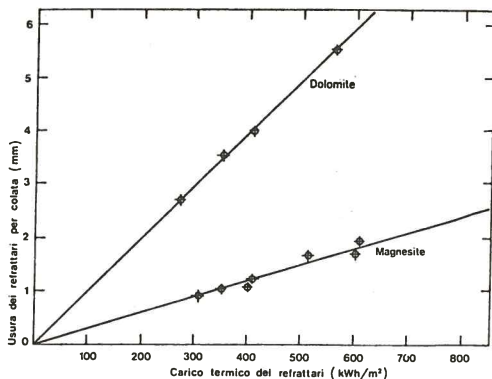
$$R_E = \frac{P_a \cdot V}{a^2} = \frac{I_a \cdot V_a^2}{a^2} = C \cdot \frac{V^3}{a^2} = (\text{MWV}/\text{m}^2)$$

dove: P_a è la potenza dell'arco, I_a e V_a sono la corrente e la tensione dell'arco, V è la tensione tra le fasi ed a la distanza elettrodo-parete.

Studi accurati sono stati condotti sull'usura dei refrattari (20): in Fig. 10 sono riportati i risultati più significativi ottenuti su due tipi di materiali refrattari. Si può anche notare come per carichi termici elevati sia necessario adottare refrattari magnesiaci, notevolmente più costosi della dolomite.

Un'alternativa di recente impiego, che permette di avere, a parità di usura, diametri del tino inferiori, è costituita dall'impiego di elementi di parete raffreddati ad acqua, accoppiati a rivestimenti refrattari (7, 21, 22). Il raffreddamento delle pareti con acqua è effettuato con due sistemi:

Fig. 10 - Variazione dell'usura dei refrattari in funzione del carico termico (per colata) (20).



- a) sistema Daido, costituito da casse di raffreddamento in lamiera d'acciaio saldate;
- b) sistema IHI Permablock, costituito da casse di raffreddamento in ghisa con tubi incorporati per la circolazione d'acqua; negli interstizi della parete interna sono contenuti refrattari fusi. Queste casse vengono normalmente installate nei settori di massima sollecitazione termica. Il sistema Permablock, a differenza del sistema Daido, non può essere utilizzato nei forni UHP a causa della limitata durata dei blocchi refrattari.

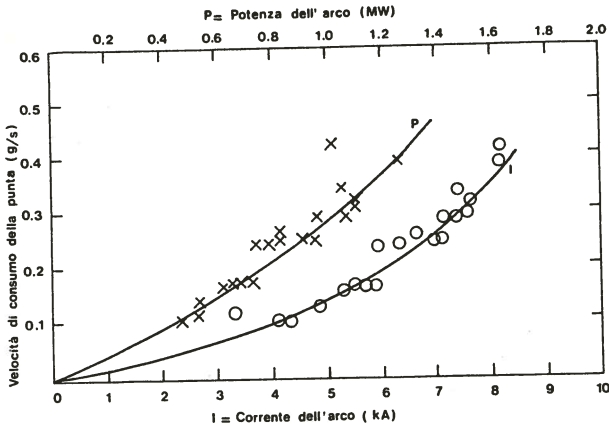
E' possibile anche raffreddare la volta del forno, cosa che però presenta maggiori problemi (23).

Altra questione legata all'uso degli UHP è il consumo degli elettrodi e la necessità di avere elettrodi di migliore qualità (24, 25). E' possibile individuare tre cause principali di consumo degli elettrodi di grafite:

- a) rottura per caduta di rottame o per shock termico;
- b) ossidazione da parte dell'atmosfera del forno;
- c) evaporazione della punta principalmente associata alla dissipazione locale di potenza dell'arco elettrico.

La Fig. 11 mostra i risultati ottenuti in una ricerca sperimentale per quanto concerne la velocità di consumo della punta in funzione della corrente e della potenza dell'arco. Da tali risultati non è possibile dedurre precisamente se la variabile che controlla il consumo degli elettrodi sia la corrente o la potenza; tuttavia da prove con elettrodi di piccolo diametro, nelle quali si è potuto ottenere un arco stabile in un ampio range di correnti e di tensioni (per quanto concerne queste ultime variando la lunghezza dell'arco), sono emerse chiare indicazioni che la variabile controllante è la corrente. In particolare la parte prevalente del consumo della punta è dovuta alla evaporazione diretta per le elevate correnti d'arco.

Fig. 11 - Variazione della velocità di consumo della punta dell'elettrodo in funzione della corrente dell'arco (I) o della potenza dell'arco (P) (elettrodi di 230 mm di diametro) (24).

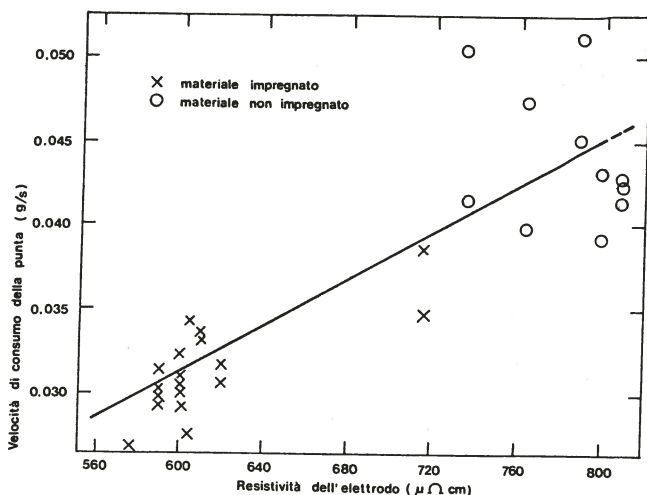


Per quanto attiene all'effetto della qualità degli elettrodi sulla velocità di consumo della punta si è sperimentalmente accertato che la resistività è il parametro dominante, e l'analisi statistica (metodo della regressione lineare) dei risultati ottenuti ha permesso di stabilire una correlazione lineare tra velocità di consumo e resistività, come mostra la Fig. 12.

I forni UHP presentano anche problemi di resistenza meccanica e di surriscaldamento; infatti le forze elettromagnetiche messe in gioco da intensità di corrente elevate sollecitano fortemente le parti meccaniche del forno ed in particolare i bracci degli elettrodi. Molte parti metalliche, per effetto delle correnti indotte, devono essere raffreddate ad acqua. Maggiorati risultano anche i costi dei componenti elettrici. E, soprattutto, notevoli diventano i costi di investimento per l'automazione e per il controllo "on-load" della marcia del forno, asservito ad un calcolatore di processo. Questi costi hanno peraltro un rientro da un lato per il massimo grado di utilizzo del forno, a livello ottimale di qualità di acciaio prodotto, e dall'altro per il minimo consumo dei refrattari e degli elettrodi.

Un altro problema di notevole portata è legato alla necessità di riequilibrare le correnti tra le tre fasi (18); generalmente le briglie che portano la corrente dal trasformatore ai tre elettrodi sono di lunghezza diversa e sono diversamente disposte nel campo magnetico, cosa che appunto genera uno squilibrio tra le correnti. Tale squilibrio si accentua quando viene forzata la condotta del forno; per questa ragione il rottame non fonde uniformemente e l'efficienza del forno diminuisce.

Fig. 12 - Variazione della velocità di consumo della punta in funzione della resistività dell'elettrodo (24).



Per la conduzione del forno UHP è necessario, più che per gli altri forni, avere, oltre che una condotta automatizzata, anche un controllo del flusso e del tipo di materiali a monte e a valle del forno stesso, per non essere costretti a fermate non desiderate (15, 18, 26-28).

Infine è noto come il rumore prodotto da un forno elettrico sia funzione della potenza applicata (29, 30) e come la fase più rumorosa sia quella di fusione (con il livello sonoro che decresce dalla fusione della prima cesta a quella dell'ultima). La Fig. 13 è un esempio di registrazione simultanea della potenza elettrica e del livello sonoro, che mostra come variano le due grandezze.

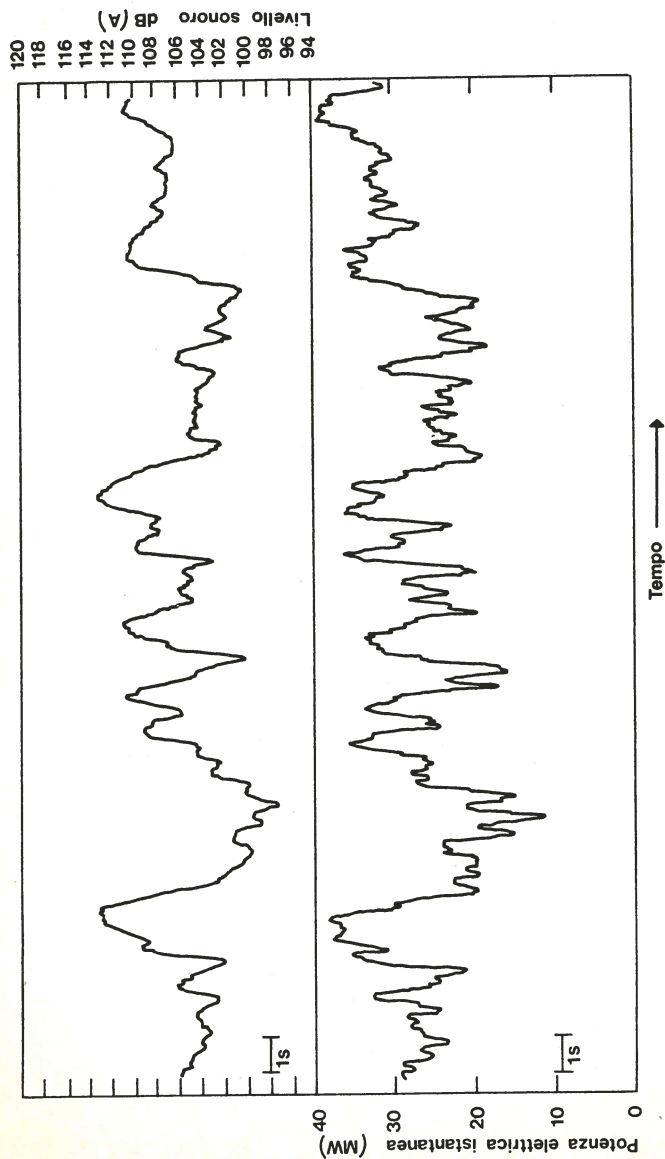
Per il calcolo del livello sonoro, in relazione ai parametri di funzionamento del forno ad arco, sono stati messi a punto alcuni modelli teorici (29), la cui verifica sperimentale è stata fatta su piccoli forni di laboratorio ed in alcune acciaierie elettriche svedesi. Da questi modelli è stato possibile stabilire che il livello sonoro è tanto più alto quanto più :

- le perturbazioni dell'arco (variazione istantanea della energia) sono elevate;
- la temperatura dell'arco è bassa;
- l'atmosfera del forno è "sporca".

Inoltre giocano un ruolo non trascurabile nel senso di elevare il livello sonoro: la frequenza, il raggio medio e la lunghezza dell'arco; un'azione inversa è esercitata invece dal diametro dell'elettrodo.

Oltre a tutti i problemi tipici dei forni UHP sopra discus-

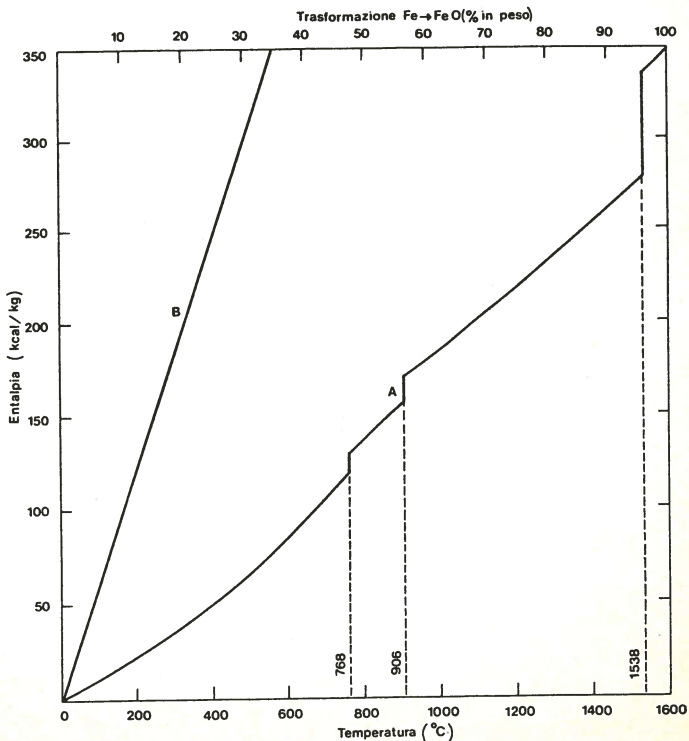
Fig. 13 - Registrazione simultanea della potenza elettrica applicata e del rumore emesso da un forno ad arco (29).



si, la situazione è aggravata dalla enorme quantità di energia dispersa con l'espulsione dei fumi caldi, energia che costituisce una considerevole quota dell'energia consumata. Quest'ultimo inconveniente può essere evitato mediante l'adozione del preriscaldamento della carica di rottame, che può essere effettuato anche recuperando il calore dei fumi (31, 32). Tale tecnica ha posto e pone, però, parecchi problemi di natura chimico-fisica ed impiantistica.

I problemi di natura impiantistica hanno inizialmente limitato il preriscaldamento ai 500°C. A tale temperatura, però, il contenuto entalpico della carica è modesto e solo intorno a 1000°C si raggiunge circa la metà del contenuto entalpico dell'acciaio fuso, come mostra la curva A di Fig. 14. Il ri-

Fig. 14 - Relazioni: entalpia/temperatura del rottame (curva A; i gradini corrispondono a trasformazioni di fase alle temperature indicate) ed entalpia/grado di avanzamento della reazione $\text{Fe} \rightarrow \text{FeO}$ (retta B; ordinate in kcal/kg di ferro). La corrispondenza tra la scala delle temperature e quella dei gradi di avanzamento è del tutto arbitraria (31).



scaldo del materiale in carica fino a queste ultime temperature implica, d'altro canto, il problema della ossidazione del ferro che si manifesta in modo cospicuo: ossidazione che può annullare o addirittura rendere negativi i vantaggi energetici del preriscaldamento, come dimostra la retta B della stessa Fig. 14 che riporta il calore di formazione dell'FeO (in valore assoluto, riferito al kg di ferro) in funzione della percentuale formata. Si osserva infatti come i vantaggi di un preriscaldamento intorno ai 1000°C vengano del tutto annullati da una ossidazione del ferro pari al 17-18% (dato teorico, che presuppone un rendimento unitario nella successiva riduzione da FeO a Fe e un costo zero del preriscaldamento; tenendo conto anche di questi ultimi fattori la percentuale di ossidazione del ferro che annulla il vantaggio del preriscaldamento intorno ai 1000°C scende al 13-14%). E' questa una condizione assai limitante, che può essere risolta solamente con la progettazione di unità di preriscaldamento strettamente connesse con il forno elettrico e in grado di assicurare un ambiente poco ossidante e un'elevata velocità di preriscaldamento, in modo da limitare la formazione degli ossidi di ferro.

I vantaggi che la tecnica del preriscaldamento consente, una volta superati i problemi di cui si è detto, sono sufficienti a giustificare un impegno delle aziende in questo senso; in particolare :

- si realizza un notevole risparmio energetico;
- si ha un basso consumo del refrattario e degli elettrodi;
- si possono usare materiali meno pregiati (ad esempio dolomite al posto di magnesite);
- si riducono le perturbazioni sulla rete elettrica di alimentazione;
- si ottiene un notevole abbassamento del livello di rumorosità.

4. Nuove tecnologie di produzione dell'acciaio al forno elettrico

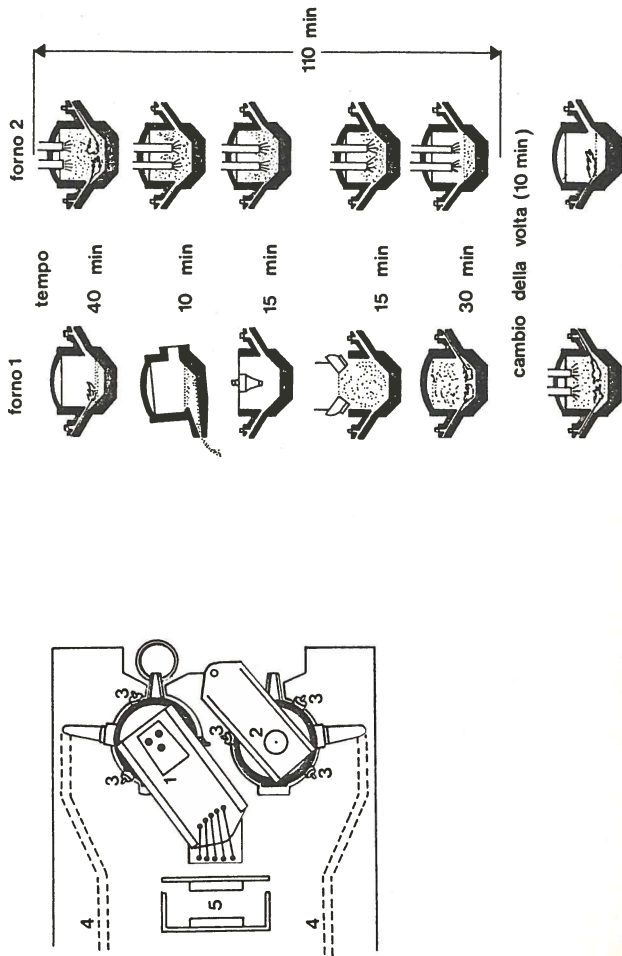
A partire dagli studi sopraddetti sono state realizzate o sono in fase di studio nuove tecnologie di produzione dell'acciaio al forno elettrico, che tendono essenzialmente al risparmio energetico e all'aumento di produttività, ma che prendono in considerazione anche quegli aspetti che, in alcuni casi, portano a migliorare decisamente le condizioni di lavoro.

4.1 Procedimento SKF con preriscaldamento della carica (33)

Tale procedimento è basato sull'utilizzo di due tini (di diametro 6 m e capacità 70 t, basculabili di 10 gradi) e di due volte: una, con elettrodi, per la fusione, e una senza per il preriscaldamento. La potenza massima utilizzata è di 18 MW, il preriscaldamento è assicurato da tre bruciatori per tino. Il trasformatore trifase ha una potenza nominale di 20-30 MVA, con una gamma di regolazione della tensione secondaria da 400 a 136 V su 11 posizioni. Gli elettrodi di grafite di 500 mm di diametro portano una corrente massima di 43,3 kA.

La Fig. 15 mostra la sequenza delle operazioni nel forno a

Fig. 15 - Procedimento SKF di produzione dell'acciaio con preriscaldamento della carica (8).
 1. volta con elettrodi - 2. volta di preriscaldamento - 3. bruciatori -
 4. condotti aspirazione fumi - 5. trasformatore



doppio tino.

L'affinazione viene fatta sotto la volta di preriscaldamento (vedi avanti).

La colata avviene come nei forni Martin-Siemens attraverso un foro di colata otturato da un tappo, posto alla base del forno: il che presenta dei vantaggi, quali il completo svuotamento, la possibilità di avere una migliore curvatura della suola e la possibilità di effettuare la pulizia senza perdita di tempo e di temperatura, ma presenta anche il grave inconveniente dei fumi e delle polveri durante l'operazione di bussaggio con ossigeno. Il canale di colata è cambiato ad ogni colata e riparato a distanza dal forno.

Le riparazioni del rivestimento del forno sono effettuate con una macchina rotativa a lancio di guntapite.

Il caricamento avviene mediante cesta.

Il preriscaldamento si effettua mediante tre bruciatori che portano il rottame a 1000 -1100 °C.

La fusione avviene dopo il cambio della volta utilizzando una potenza massima di 18 MW.

L'affinazione viene fatta sotto la volta di preriscaldamento; il bagno è mantenuto fluido dai bruciatori; la temperatura può essere aumentata usando una lancia ad ossigeno con portate superiori a 25 Nm³/min. La defosforazione è effettuata durante l'ultimo periodo di fusione utilizzando tecniche di insufflazione.

La sequenza delle operazioni riprende così dall'inizio. In definitiva, mentre in uno dei due tini (con volta con elettrodi) si effettua la fusione, nell'altro (con volta di preriscaldamento) vengono svolte le rimanenti operazioni: affinazione, colata, riparazioni, caricamento e preriscaldamento. Al termine, si effettua lo scambio delle volte tra i due tini, e il ciclo ricomincia.

Il procedimento descritto ha il difetto di non recuperare il calore dei fumi caldi e quello di non permettere il basculamento del forno durante la fusione; l'abbassamento del livello di rumorosità dovuto all'uso di basse potenze è parzialmente annullato dal rumore dei bruciatori. Permette di ottenere acciai speciali o di qualità non elaborabili al forno ad arco, a parità di costi.

4.2 Procedimento BBC - Brusa con preriscaldamento della carica (34)

La caratteristica principale del procedimento BBC-Brusa, applicato nella nuova acciaieria elettrica della Ceretti di Pallanzeno è quella di utilizzare un forno di preriscaldamento continuo a metano, collegato a due forni elettrici ad arco. Il forno di preriscaldamento ha una capacità di 80 t/h e la temperatura di preriscaldamento è di 1200°C. I forni elettrici hanno una capacità nominale di 100 t, con tempo di fusione di 132 min. Il tino è completamente asportabile e in aggiunta agli usuali movimenti può ruotare intorno al suo asse di 360 gradi con una velocità variabile da 0 a 1 giri/min. La volta (fissa) è composta da un anello esterno raffreddato e da una struttura raffreddata ad acqua che sostiene il materiale refrattario. Nella volta vi è un'apertura che serve sia per il caricamento in continuo del

rottame sia per l'uscita dei fumi. L'arco lavora praticamente sempre in bagno fuso; la tensione è di 300 V e la corrente di 55.000 A con $\cos\varphi$ di 0,8-0,85; la potenza del trasformatore è di 30 MVA. Il trasformatore è basculabile con il forno.

La carica del rottame nel forno di preriscaldamento avviene in continuo mediante uno skip alimentato da un nastro trasportatore (le dimensioni massime dei pezzi caricabili sono 2x1x0,2 m); il rottame dopo il passaggio nel forno di preriscaldamento viene caricato alternativamente nei due forni elettrici che lavorano sfasati di mezzo ciclo. La carica degli additivi è completamente automatizzata e viene fatta, con nastri trasportatori chiusi, direttamente in forno.

Il preriscaldamento è effettuato nell'apposito forno utilizzando bruciatori a metano la cui aria di combustione viene preriscaldata dai fumi dei forni elettrici.

La fusione avviene nel forno elettrico che lavora sempre in bagno fuso.

La scorifica è effettuata in continuo.

L'affinazione è fatta in forno mediante lancia ad ossigeno; l'aggiunta di ferroleghie avviene in siviera mediante proboscide.

La colata è effettuata basculando il forno e versando l'acciaio in una siviera nella quale viene contemporaneamente insufflato argon.

La riparazione del rivestimento del forno è fatta utilizzando una macchina pneumatica a lancio.

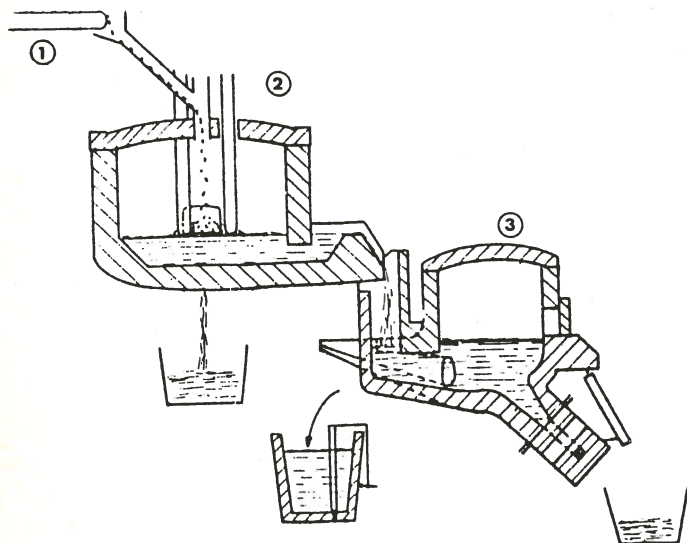
I vantaggi del procedimento descritto sono di natura energetica, di conduzione del processo e di carattere ambientale. L'uso di basse potenze limita il consumo di energia elettrica, mentre il recupero del calore dei fumi permette di realizzare un buon risparmio energetico. Inoltre il funzionamento dell'arco a basse tensioni ed alte correnti (arco "corto") limita l'usura dei refrattari. Il preriscaldamento della carica a 1200 °C in un forno apposito permette di separare i metalli basso fondenti e di avere quindi una migliore qualità dell'acciaio. Il sistema del tino rotante permette di distribuire uniformemente la carica nel forno, lavorando così con temperature del bagno molto basse (sotto i 1500 °C) ed aumentando quindi sensibilmente il rendimento di trasmissione termica dall'arco all'acciaio fuso. Oltre a ciò, la distribuzione del rottame lungo le pareti del forno le protegge dallo irraggiamento dell'arco e ne diminuisce l'usura. L'utilizzo del trasformatore basculabile con il forno permette di ottenere elevati valori di $\cos\varphi$. L'ambiente di lavoro risulta essere notevolmente migliorato sia per quanto riguarda la polverosità, avvenendo la movimentazione delle materie prime in campate esterne a quella di lavoro ed essendo tutto l'impianto in depressione; sia per quanto riguarda il rumore, in relazione all'uso di basse potenze e alla pratica dell'arco sommerso.

4.3 Procedimento di fusione continua IRSID (35)

Il procedimento IRSID (Fig. 17) è ancora su scala sperimentale; la caratteristica principale è quella di aver collegato un

Fig. 17 - Processo IRSID di produzione dell'acciaio a fusione continua (8, 35).

1. alimentazione continua della carica
2. primo stadio (fusione) in forno ad arco
3. secondo stadio (affinazione) in forno a induzione a canale



forno ad arco di fusione, alimentato in continuo, con un forno ad induzione a canale nel quale viene eseguita l'affinazione.

Il forno ad arco ha un diametro di 2,7 m, capacità di 5 t, potenza 3MVA; il tino è fisso. Il passaggio del metallo liquido dal primo al secondo forno avviene per trabordamento da un sifone. Il forno a induzione a canale ha una capacità di 10 t ed è equipaggiato con un induttore BBC-CEM da 500 kW; è dotato di un dispositivo di basculamento che permette di non interrompere il travaso in continuo dal primo forno.

La carica del forno di fusione avviene in continuo da un foro al centro della volta per i materiali di piccole dimensioni, o dalla porta laterale per i materiali più grossi. La scorifica è fatta dalla porta di lavorazione nel primo forno e per basculamento nel secondo forno.

L'affinazione viene fatta nel forno a canale usando la tecnica di insufflazione delle polveri.

La colata avviene per basculamento del forno a induzione.

5. Confronto dei criteri di progettazione di nuove acciaierie

Negli ultimi anni sono state realizzate numerose nuove acciaierie (34 - 39), ma rari sono gli esempi di reali mutamenti tecnologici con favorevoli ripercussioni sull'ambiente di lavoro.

Una prima parziale novità è costituita dall'acciaieria realizzata dalla Demag in Danimarca nel 1975 (37), acciaieria da 500.000 t/anno, con due forni da 66 MVA, capacità 100 t. In questa acciaieria è stato particolarmente curato il flusso dei materiali, che avviene senza interferenze, ed è stata realizzata tutta una serie di accorgimenti (caricamento automatico additivi, cappa di aspirazione a settori variabili, ecc.) atti a migliorare le condizioni di lavoro. In particolare il problema del rumore è stato risolto incapsulando i forni in una campata e limitando al minimo la presenza dell'uomo in detta campata. Questa soluzione, che pure rappresenta un notevole passo in avanti, ha la grossa limitazione di non risolvere il problema dall'origine (in rapporto cioè alla potenza applicata), di non affrontare il problema energetico e di peggiorare notevolmente le condizioni di lavoro per quegli operatori che occasionalmente si trovino a dover lavorare nella campata forni.

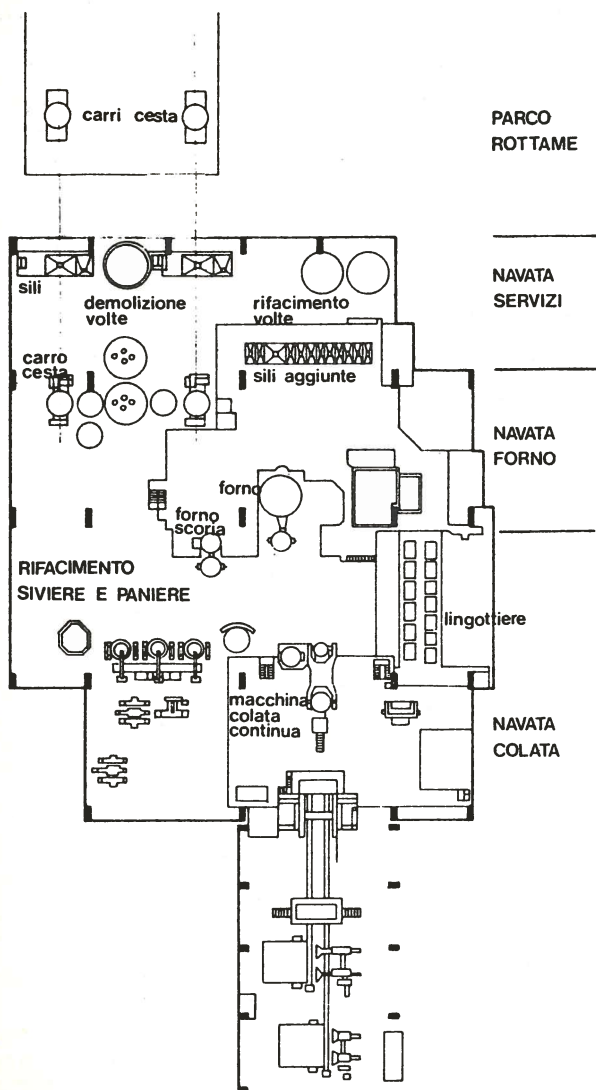
Un altro esempio è costituito dalla nuova acciaieria Ceretti che, come si è detto, applica il procedimento BBC-Brusa; in essa il problema del rumore è stato affrontato in stretto collegamento con quello energetico ed entrambi sono stati risolti in fase di progettazione.

Per meglio capire l'importanza della soluzione dei problemi in fase di progettazione confrontiamo tre nuove acciaierie: la prima (Falck Unione di Sesto S. Giovanni) costruita secondo i vecchi schemi, la seconda (Dalmine) costruita secondo i vecchi schemi e con un successivo intervento di bonifica, la terza (Nuova Ceretti di Pallanzeno) costruita con criteri completamente nuovi.

Nel primo caso (Fig. 18) l'acciaieria è stata costruita secondo gli schemi classici che prevedono il forno collocato tra le campate forno e colata, in modo che il carro ponte possa servire sia il forno che la colata continua; tale soluzione genera non pochi problemi. Il carro ponte di colata si trova ad operare in una campata in cui si trovano accomunati il forno, la colata, i servizi e il rifacimento siviere. Dal layout di questa acciaieria si può osservare come i flussi dei diversi materiali si sovrappongano. I lavoratori risultano esposti, oltre che alle nocività della propria area, anche a quelle delle aree vicine. Il problema più grosso è però costituito dal rumore del forno UHP, che investe tutti i lavoratori dell'acciaieria ed in particolare, per la disposizione frontale, gli operatori della colata continua, che si trovano in posizione di lavoro proprio durante le fasi più rumorose del forno. E' evidente come, in questa situazione, risulti molto difficoltoso e dispendioso fare un intervento di bonifica.

Nel secondo caso l'acciaieria, costruita con gli stessi criteri della prima, è stata successivamente modifi-

Fig. 18 - Layout della nuova acciaieria elettrica della Falck-Unione (39).



cata nel tentativo di migliorare le condizioni ambientali. Le differenze più significative rispetto al caso precedente sono costituite dall'esistenza di un impianto sotto vuoto e di un reparto esterno per il rifacimento dei rivestimenti

refrattari (circostanza, questa, che evita l'interferenza di operazioni con elevato sviluppo di polveri). Anche in questo caso vi è sovrapposizione dei flussi dei materiali, e particolarmente grave è risultato il problema del rumore, tanto che successivamente si è costruito un muro per separare la campata forno dalla campata colata continua. Tale soluzione, che pure ha risolto parzialmente il problema del rumore per gli addetti alla colata, è risultata molto costosa, di portata limitata e ha introdotto ulteriori intralci nelle operazioni (apertura e chiusura di portelloni ad ogni colata, ecc.). Nel terzo caso l'acciaieria, completamente realizzata a piano terra, è caratterizzata da un flusso dei materiali estremamente lineare: la movimentazione e il caricamento del rottame avvengono in una apposita campata, gli additivi vengono caricati con un impianto automatico, lo spillaggio dal forno avviene in una siviera collocata entro una buca aperta a piano terra. Il layout, la tecnologia e le pratiche operative, in questo caso, migliorano notevolmente le condizioni di lavoro.

Bibliografia

- (1) W.E. Schwabe: "Fabricación de acero en hornos eléctricos de arco de potencia ultraelevada", *Stahl u. Eisen*, 89, 927 (1969).
- (2) P.J. Kakela: "Iron ore: energy, labor, and capital changes with technology", *Science*, 202, 1151 (1978).
- (3) ATS, Commission "Aciéries sur sole", Sous-Commission "Affinage hors du four": "Contribution à l'étude économique de différents procédés d'affinage de l'acier hors du four électrique à arcs", *CIT*, 34, 1129 (1977).
- (4) B. Mazza, D. Sinigaglia: "La siderurgia italiana nel dopoguerra", *Sapere*, n. 781-782, Aprile-Maggio 1975, pp. 41-53.
 S. Carta, F. Gheza, B. Mazza, G. Nano, D. Sinigaglia: "Le miniacciaierie", *Sapere*, n. 811, Giugno 1978, pp. 34-44.
 B. Mazza, G. Nano, D. Sinigaglia: "Crisi e prospettive della siderurgia in Italia", Relazione presentata al Convegno: "Elementi per un programma economico di parte operaia" organizzato da Praxis, Roma, Aprile 1978.
- (5) L. Bodini, A. Borroni, B. Mazza, G. Nano, D. Sinigaglia: "Fattori di rischio nell'industria siderurgica: analisi dei rischi in relazione ai processi produttivi e alle aree di lavoro", *Dibattito Sindacale*, n. 1-2, Gennaio-Aprile 1979.
- (6) K.J. Irvine: "Arc-furnace research and development", *Ironmaking Steelmaking*, 4, 110 (1977).

- (7) G. Gagliardi: "I forni elettrici ad arco UHP per acciaieria: una rassegna dei forni UHP installati o progettati nel mondo così come dichiarati dalla letteratura tecnica", Rapporto CSM n. 550 V, Roma, Settembre 1978.
- (8) J. Antoine: "Récents progrès effectués dans le domaine de l'élaboration d'acier au four électrique", CIT, 33, 1671 (1976).
- (9) H. Graf: "Sviluppi della tecnologia dei processi e dell'impiantistica e loro influenza sull'espansione degli stabilimenti siderurgici", BTF, n. 372, Gennaio-Febbraio 1978, pp. 31-37.
- (10) H. Fiedler: "État de la technique de la fusion au four à plasma dans la République Démocratique Allemande", CIT, 33, 2073 (1976).
- (11) G. Zingel: "Il forno ad arco di elevatissima potenza nella fabbricazione degli acciai di qualità", BTF, n. 325, Marzo 1974, pp. 203-207.
- (12) J.R. Miller: "La riduzione diretta dei minerali di ferro", Le Scienze, n. 99, Novembre 1976, pp. 92-102.
- (13) P. Kehl: "L'usine de Hambourg, exemple d'une aciérie fondée sur la réduction direct du mineral", CIT, 31, 1759 (1974).
- (14) Hamersley Iron Pty. Limited: "Tendenze tecnologiche nell'industria siderurgica", BTF, n. 375-376, Luglio-Ottobre 1978, pp. 274-280.
- (15) J. Antoine, J. Astier, C. Roederer: "Le différentes filières d'élaboration de l'acier. Importance du four électrique et perspectives d'avenir", CIT, 33, 899 (1976).
- (16) H. Essmann: "Limites dans la conception et la construction des gros fours à arcs UHP", CIT, 35, 227 (1978).
- (17) M. Rossi, C. Scalabrini, F. Fratini: "Esperienze di esercizio e manutenzione di due forni elettrici ad alta potenza", La Metallurgia Italiana, 68, 242 (1976).
- (18) S. Yasukava, M. Aoshika: "I forni ad arco UHP. Problemi, nuovi accorgimenti", BTF, n. 284, Ottobre 1970, pp. 697-705.
- (19) W.E. Schwabe, G.C. Robinson: "Nouveaux développements de l'UHP théorie et pratique", Communication au Congrès international sur le four électrique à arc en aciérie, Cannes, Giugno 1971.
- (20) B. Bowman: "Relationship between power programme and refractory consumption in an arc furnace", Ironmaking Steelmaking, 1, 212 (1974).

- (21) M. Ottaiano: "Nota tecnica sul rivestimento di un tino di un forno elettrico con casse raffreddate ad acqua", Relazione presentata alla giornata AIM "Nuove tecniche di rivestimento del forno elettrico", Milano, Aprile 1979.
- (22) R. Rosso: "Pannelli raffreddati ad acqua in parziale sostituzione del rivestimento di refrattari nei forni elettrici ad arco", Relazione presentata alla giornata AIM "Nuove tecniche di rivestimento del forno elettrico", Milano, Aprile 1979.
- (23) R. Assenmacher, H. Kelin, E. Elsner, D. Ameling, G. Fuchs: "Voûtes refroidies à l'eau pour fours à arc", CIT, 36, 471 (1979).
- (24) G.R. Jordan: "Electrode erosion in electric arc furnaces - the controlling parameters", Ironmaking Steelmaking, 5, 177 (1978).
- (25) A. Nicholson, J. Woodhouse, G.R. Jordan: "Quality control of arc-furnace electrodes", Ironmaking Steelmaking, 3, 315 (1976).
- (26) J. Antoine, J.J. Mathieu: "Étude du contrôle électrothermique du four à arcs", CIT, 32, 391 (1975).
- (27) D. Engledown, F.D. Winter: "BSC experience of arc - furnace continuous charging", Ironmaking Steelmaking, 3, 359 (1976).
- (28) J. Woodhouse: "Effect of varying raw materials on large arc furnace plant operations", Ironmaking Steelmaking, 3, 377 (1976).
- (29) J. Antoine, J. Michelet, M. Bojic, G. Engler, J. Raguin: "Le bruit des fours à arc en sidérurgie. Situation présente et perspectives d'avenir", Revue de Metallurgie, 75, 433 (1978).
- (30) M. Bojic, G. Engler, P. Schmidt: "Premiers travaux du LECES sur le bruit en sidérurgie", CIT, 36, 437 (1979).
- (31) U. Brusa: "Esperienze sul preriscaldamento della carica di rottame al forno elettrico", Relazione presentata al Congresso internazionale sul forno elettrico ad arco in acciaieria, Cannes, Giugno 1971.
- (32) A.T. Sheridan: "Energy use in scrap preheating", Ironmaking Steelmaking, 2, 262 (1975).
- (33) M. Tiberg: "Le four à double cuve SKF", CIT, 32, 1139 (1975).
- J. Uggla: "Le procédé ASEA-SKF", CIT, 32, 611 (1975).

- (34) H.W. Leu, U. Brusa, F. Neumann, R.H. Ptach: "O Processo BBC/Brusa para a produção de aço em forno elétrico", *Metalurgia*, 30, 843 (1974).
- F. Neumann, H. Leu, R. Ptach, U. Brusa: "Le procédé BBC-Brusa d'élaboration de l'acier", *CIT*, 32, 1043 (1975).
- Brusa U.: "Preriscaldamento continuo della carica al forno elettrico utilizzando i gas caldi provenienti da uno o più forni", *La Metallurgia Italiana, Atti e Notizie*, 30, 425 (1975).
- R.H. Ptach, H.W. Leu, F. Neumann: "Le procédé Brown Boveri/Brusa, une contribution pour la fabrication économique de l'acier dans le four à arc", *Rev. Brown Boveri*, n. 1-2, 5 (1975).
- F. Neumann, H. Leu, R. Ptach, U. Brusa: "Procedimento BBC-Brusa per l'elaborazione dell'acciaio", *La Fonderia Italiana*, 24, 357 (1975).
- H.W. Leu, R. H. Ptach: "L'élaboration d'acier par le procédé Brown Boveri/Brusa à l'aciérie de Villadossola en Italie", *Journal du Four Électrique*, n. 1, 13 (1976).
- U. Brusa: "Criteri adottati nella progettazione di uno stabilimento siderurgico (acciaieria elettrica-laminatoio) da 500.000 t/anno per l'ottimizzazione energetica", *La Metallurgia Italiana*, 69,1 (1977).
- U. Brusa: "Le projet de mini-usine de la société P.M. Ceretti S.p.A. à Villadossola (Italie)", *Revue de Métallurgie*, 74,309 (1977).
- U. Brusa: "Esperienza in una acciaieria elettrica con preriscaldamento della carica", *Relazione presentata al secondo Congresso nazionale di ergonomia, Milano, Giugno 1979*.
- (35) J. Antoine: "Le four électrique de fusion continue de l'IRSID", *CIT*, 34, 1235 (1977).
- J. Antoine, A. Berthet, R. Perie: "Développement industriel du four à induction à canal en aciérie: fabrication d'acier en duplex à l'usine SACILOR d'Hagondange", *CIT*, 32, 1447 (1975).
- (36) C.C. Schueppert: "Melting - plant design and operation at Sheerness Steel Co. Ltd.", *Ironmaking Steelmaking*, 3, 373 (1976).
- (37) G. Scheffler, G. Dikta: "Pollution control is the keyword: ultra-modern electric steelworks commenced production", *Elektrowärme International*, Ed. B5 (1975).
- (38) B. Petocchi, V. Picardi, A. Pollarolo: "La nuova acciaie-

ria elettrica di Dalmine ", BTF, n. 352, Giugno 1976, pp. 377-388.

- (39) A. Borroni, B. Mazza, G. Nano, D. Sinigaglia: "Acciaieria elettrica: impiantistica, organizzazione del lavoro e fattori di rischio" (Parte 1a e 2a), Impianti, 1979, in corso di stampa.