

# Il forno elettrico: le opzioni tecniche e la salvaguardia dell'ambiente

**E. Repetto, F. Baldieri**

*Sono messe a confronto le principali tecnologie di fabbricazione dell'acciaio al forno elettrico, i cui elementi di differenziazione sono: sistema di alimentazione (in corrente continua o alternata) caricamento continuo o discontinuo del rottame, sistema di preriscaldamento.*

*Sono stati selezionati, per questo confronto, forni convenzionali di ultima generazione e forni con caratteristiche innovative purché installati in un consistente numero di esemplari.*

*Questi forni sono stati valutati sotto il profilo della produttività dei costi di produzione e su quello, sempre più importante dell'impatto ambientale.*

*Questa analisi ha anche permesso di delineare le tendenze tecnologiche in atto, confermate dall'esame delle soluzioni adottate su prototipi di nuova generazione su scala pilota e industriale.*

*Viene infine illustrato un nuovo approccio per il trattamento, a basso costo, di alcuni rifiuti risultanti dal processo di fabbricazione dell'acciaio.*

## 1. INTRODUZIONE

Ciclo da forno elettrico e ciclo integrale rivolti entrambi alla produzione dell'acciaio in realtà differiscono profondamente riguardo i seguenti aspetti:

- materie prime in ingresso a ciascun ciclo: rottame e minerale di ferro
- emissione di CO<sub>2</sub> sia diretta che indiretta (conseguente alla produzione di energia elettrica)
- impatto ambientale nelle diverse forme in cui si manifesta
- rifiuti solidi risultanti dal processo di fabbricazione.

Altre differenze significative si riscontrano all'interno di ciascun ciclo in funzione delle soluzioni tecnologiche adottate.

In una moderna società come l'Italia, orientata non solo a fare produzione ma sempre più a salvaguardare l'ambiente, l'analisi delle differenze sia tra i cicli sia all'interno di questi, con vantaggi e svantaggi conseguenti, diventa essenziale per operare corrette scelte impiantistiche e processistiche per migliorare le tecnologie esistenti e per individuare nuove vie tecnologiche.

È in atto a livello mondiale un generale ripensamento su come evolveranno i due cicli, su loro eventuali integrazioni e sulle strategie di impiego di rottame, ghisa liquida (risultante dalla riduzione del minerale in altoforno) e di altri sostituti a base Fe ottenuti con tecnologia specifica.

Non potendo trattare argomenti così ampi e diversificati in un unico rapporto l'attenzione è stata focalizzata sul ciclo da forno elettrico, nelle diverse alternative impiantistiche oggi disponibili, basate sull'impiego del rottame di cui e con riferimento alla realtà italiana, non si prevedono anche sul medio periodo materiali concorrenti.

Il rottame, prima di diventare, a seguito di selezione/condizionamento, materia prima per il forno è classificato rifiuto speciale ed in quanto tale il suo smaltimento va considerato come una necessità sociale.

Gioca a suo favore la fortunata circostanza che, a differenza del minerale impiegato nel ciclo integrale, produce acciaio con minori emissioni di CO<sub>2</sub>, con un minore impatto ambientale e con la generazione di rifiuti, alcuni dei quali, a loro volta, possono diventare materia prima per tecnologie

volte al recupero di elementi di valore in essi contenuti.

Lo smaltimento del rottame al forno elettrico, considerato il migliore riciclatore esistente, era fatto, fino agli anni '80, puntando ad una minimizzazione dei costi di produzione e ad un aumento della produttività. L'impatto ambientale era visto nella logica riduttiva del "quanto basta" per rientrare nei limiti imposti dalle norme.

Negli anni '90 ha iniziato a farsi strada il concetto che, attraverso miglioramenti al processo e nuove soluzioni impiantistiche, fosse possibile compatibilizzare un'elevata produttività con un basso impatto ambientale, contenendo al tempo stesso tutti i costi sia operativi che di natura ecologica.

Si tratta in pratica di conseguire contemporaneamente la maggior parte dei seguenti obiettivi:

- aumento della produttività
- riduzione dei costi di produzione
- miglioramento delle condizioni di lavoro
- riduzione dell'inquinamento atmosferico
- riduzione dell'inquinamento elettrico
- riduzione dell'inquinamento acustico
- riduzione del rischio di inquinamento radioattivo
- contenimento del costo per la riduzione dell'impatto ambientale
- riduzione, recupero e valorizzazione dei residui e degli scarti di lavorazione.

In relazione a quanto sopra, si intende fornire un aggiornamento sulle tecnologie elettrosiderurgiche con particolare riferimento al forno elettrico, dove maggiori sono i problemi legati all'impatto ambientale. L'attenzione che verrà rivolta a quest'ultimo aspetto è anche motivata dal fatto che, nella realtà italiana le acciaierie elettriche sono spesso ubicate vicino ad aree urbane e suburbane.

## 2. TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE

Il raggiungimento di una elevata produttività con un basso costo di trasformazione (energia, personale, materiali a consumo, investimenti) è un prerequisito per avere un buon ritorno economico nella fabbricazione dell'acciaio al forno elettrico.

Come verrà evidenziato nel corso dell'esposizione questo obiettivo non è conflittuale con quello di avere anche un basso impatto ambientale.

Per le acciaierie che sorgono vicino a centri abitati, situazio-

E. Repetto, Centro Sviluppo Materiali, Roma  
F. Baldieri, consulente CSM

Memoria pervenuta il 12 giugno 2000

ne piuttosto frequente nella realtà italiana, al forno elettrico di nuova installazione non verrà chiesto solo di rispettare i parametri di produttività con bassi consumi ma di essere anche intrinsecamente ecologico.

Se per forno si intende l'insieme impiantistico costituito dall'unità fusoria, dal sistema di caricamento rottame e dall'eventuale sistema di preriscaldamento, quest'insieme è definito intrinsecamente ecologico se:

richiede, in aggiunta al suo costo di installazione, minori investimenti per captazione fumi, insonorizzazione, trattamento residui, individuazione certa di fonti radioattive, etc., e minori oneri sia gestionali sia manutentivi per rispettare, all'interno e all'esterno dell'acciaiera, i limiti che sono o saranno imposti nelle grandezze che esprimono l'impatto ambientale; principalmente: inquinamento elettrico, acustico, radioattivo e da emissioni gassose.

Negli ultimi 10-15 anni la scelta del migliore impianto anche sotto il profilo ecologico è diventata difficile in quanto, a differenza di un più lontano passato, i costruttori di forno sono ora in condizioni di offrire un'ampia gamma di tecnologie ma a diverso grado di affidabilità che è funzione delle innovazioni introdotte e del numero di impianti già realizzati.

Si è allora adottato il criterio di selezionare preventivamente quelle categorie di forni sia di tipo convenzionale, ma appartenenti all'ultima generazione sia con caratteristiche innovative e tuttavia adeguatamente collaudati, essendo già in esercizio o in fase di installazione con un numero consistente di impianti (>10).

Sulla base di queste considerazioni la scelta è caduta sui seguenti tipi di forno:

- Forno convenzionale a caricamento discontinuo: F.C.
- Forno a doppio tino a caricamento discontinuo: D.T.
- Forno "Finger Shaft" a caricamento discontinuo con preriscaldamento rottame: F.S.
- Forno "CONSTEEL" a caricamento continuo con preriscaldamento rottame: C.S.

Mentre i primi due tipi sono commercializzati da tutti i principali costruttori di forno, gli ultimi due sono forniti in esclusiva rispettivamente da VAI-FUCHS e da TECHINT.

### 2.1 Forno convenzionale a caricamento discontinuo (F.C.)

Il forno elettrico ad un solo tino che nell'esempio di Fig. 1a ha una alimentazione trifase in corrente alternata (CA) è dotato di una volta che viene periodicamente aperta durante il ciclo di fabbricazione per consentire l'introduzione dall'alto, mediante cesta, del rottame da fondere (caricamento discontinuo).

Nella pratica più comune, a due ceste, il ciclo è articolato nelle fasi seguenti: caricamento prima cesta, parziale fusione del rottame, caricamento seconda cesta, completamento fusione, affinazione metallurgica, spillaggio acciaio, approntamento forno per la colata successiva cui corrisponde un programma di erogazione di energia elettrica, a potenza variabile, riportato a titolo esemplificativo in Fig. 1b.

Il periodo del ciclo, da spillaggio a spillaggio, viene chiamato convenzionalmente "tempo tap-to-tap" ulteriormente suddivisibile in: 1) periodo di erogazione dell'energia elettrica ("tempo di power-on") e 2) periodo, somma di interventi/operazioni durante il quale non si eroga energia ("tempo di power-off").

L'aumento della produttività, con contemporanea riduzione dei consumi energetici e di materiale (elettrodi e refrattari) si consegue attraverso la riduzione del tempo tap-to-tap. Gli sviluppi tecnologici che si sono succeduti a partire dagli anni '80 sono stati guidati da queste esigenze.

Per ridurre il tempo tap to tap, assieme all'aumento della potenza elettrica installata (fino a 800÷950 kW/t) si è incrementato l'apporto dell'energia chimica proveniente principalmente dalle reazioni esotermiche tra C e O<sub>2</sub>, con consumi di O<sub>2</sub> anche superiori di 40 m<sup>3</sup>(SPT)/t,

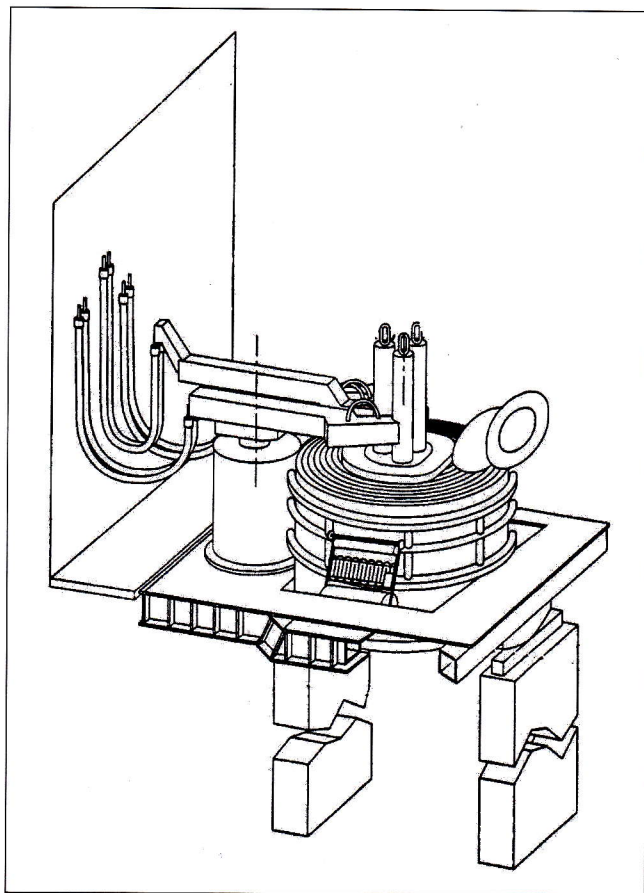


Fig. 1a - Forno F.C.: forno convenzionale a caricamento discontinuo [48].

Fig. 1a - F.C. Furnace: conventional furnace with discontinuous charge.

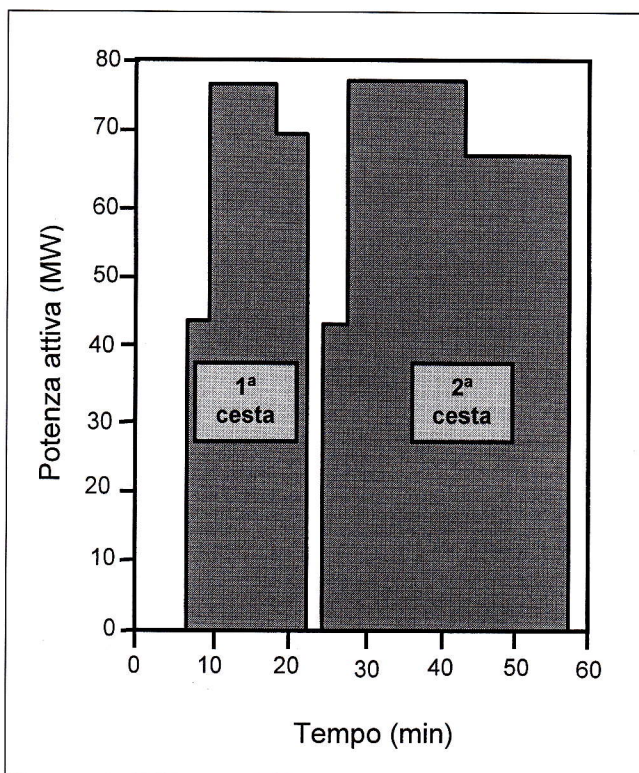


Fig. 1b - Programma erogazione potenza attiva, con caricamento a due ceste.

Fig. 1b - Active power delivery program with twin loading.

In tempi recenti sono stati fatti progressi significativi nelle tecniche e modalità di immissione di  $O_2$  e C nel bagno [1]. Nei forni ad alta produttività l' $O_2$  svolge contemporaneamente o in sequenza una serie di funzioni: accelerare la fusione del rottame, favorire la post-combustione  $CO \rightarrow CO_2$  all'interno del forno, generare e mantenere le scorie schiumose, favorire l'agitazione del bagno, aumentare la velocità di decarburazione.

Per raggiungere questi obiettivi il forno viene corredato di: lance consumabili, lance raffreddate subsoniche o supersoniche (fisse o governate da manipolatori) bruciatori oxy-fuel, iniettori sottobattente, secondo principi di impiego e soluzioni realizzative tipiche di ciascun costruttore.

Queste tecnologie vengono ormai correntemente impiegate su tutti i tipi di forno che verranno presi in esame.

Nel perseguire gli obiettivi di elevata produttività minore è stato l'impegno di trasformare il forno convenzionale in un forno intrinsecamente ecologico secondo la definizione data precedentemente.

### 2.2 Forno a doppio tino a caricamento discontinuo (D.T.)

Il forno a doppio tino è nato dall'esigenza di ridurre il tempo tap-to-tap ed in particolare il tempo di power-off con l'obiettivo di raggiungere una maggiore produttività

Un solo gruppo di potenza, in corrente continua (CC) o in corrente alternata (CA), alimenta alternativamente i due tini. Nella soluzione costruttiva di Fig. 2 la struttura formata dai montanti e dai rispettivi bracci portaelettrodi è in grado di ruotare per portare gli elettrodi nel tino dove avverrà la fusione del rottame.

Nell'esempio di Tab. I viene messa a confronto la pratica operativa relativa al forno convenzionale (monotino) con quella a doppio tino [2]. La riduzione del tempo di power-off complessivo, da 17 a 5 min, viene conseguita mettendo in sovrapposizione temporale l'erogazione di energia elettrica in un tino con le operazioni di spillaggio, manutenzione, caricamento cesta che vanno fatte sull'altro tino senza erogare energia.

Questa tecnologia presenta però l'inconveniente che aumentano le perdite termiche complessive dei due tini, per compensare le quali viene richiesto un supplemento di energia elettrica. A parità di potenza elettrica erogata occorre quindi aumentare il tempo di power-on ma in misura minore della diminuzione del tempo di power-off.

Il tempo tap-to-tap, somma di questi due tempi parziali, per conseguenza diminuisce e corrispondentemente aumenta la produttività dell'impianto, anche se al prezzo di un maggiore consumo energetico.

Per compensare le maggiori perdite termiche è stata sviluppata una soluzione di forno in cui il rottame in "stand-by" nel tino in fase non operativa veniva preriscaldato mediante bruciatori. Questa pratica è ora caduta in disuso perché responsabile di emissioni gassose pericolose.

### 2.3 Forno a caricamento discontinuo con preriscaldamento rottame (F.S.)

Il forno, il cui schema è riportato in Fig. 3 è dotato di un tino ("shaft") nel quale viene introdotto il rottame da preriscaldare con i fumi che si generano nel forno [3].

Dispositivi raffreddati ad acqua ("water cooled finger") a forma di dita, posti alla base dello "shaft" lasciano scorrere, quando sono aperti, il rottame verso il bagno e quando sono chiusi lo trattengono all'interno dello "shaft".

Le "dita" sono chiuse durante il periodo di affinazione quando lo "shaft" è riempito con il rottame della prima cesta della colata successiva.

Dopo lo spillaggio dell'acciaio le "dita" vengono aperte ed il rottame, che nel frattempo è stato preriscaldato con i fumi sviluppati durante la precedente fase di affinazione, cade nel forno.

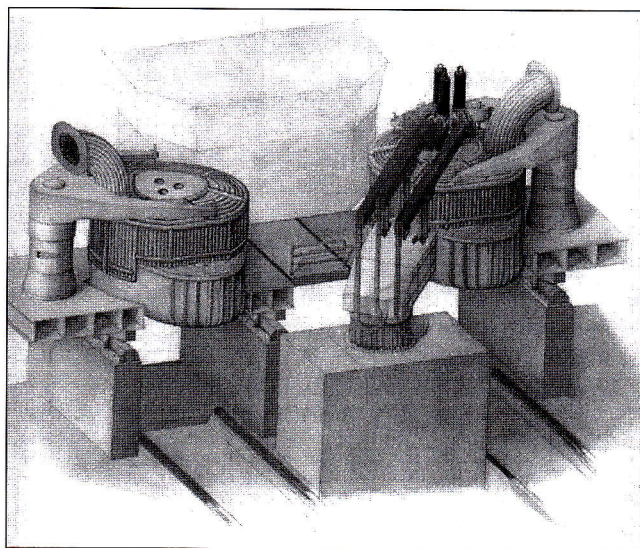


Fig. 2 - Forno D.T.: forno a doppio tino con caricamento discontinuo [48].

Fig. 2 - D.T. Furnace: discontinuous twin charge furnace.

OPERAZIONI	Monotino min	Doppio tino min
caricamento 1 <sup>a</sup> cesta	3	/
rotazione struttura portaelettrodi	/	2
caricamento 2 <sup>a</sup> cesta	3	3
rotazione struttura portaelettrodi	/	/
spillaggio	3	/
manutenzione	8	/
tempo totale di power-off	17	5

Tab I

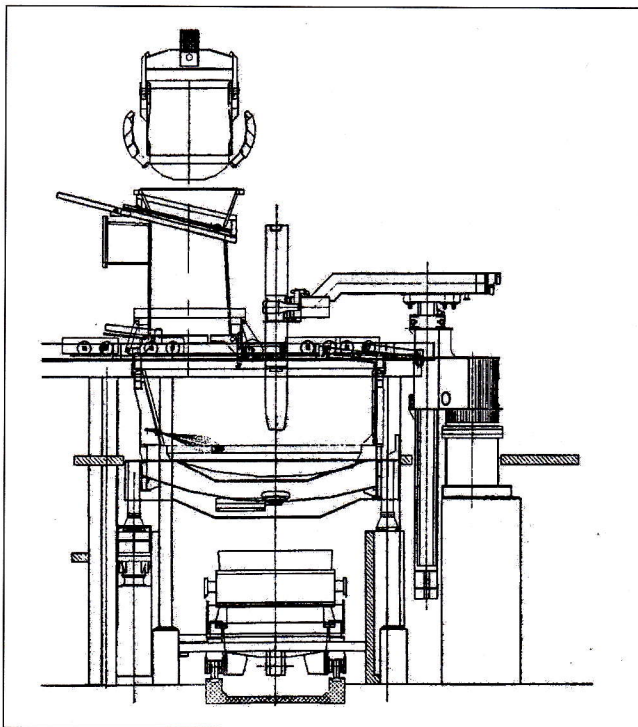


Fig. 3 - Forno F.S.: Forno "Finger Shaft" a caricamento discontinuo con preriscaldamento rottame [3].

Fig. 3 - F.S. Furnace: "Finger Shaft" furnace with discontinuous charge and scrap preheating system.

Lo "shaft" a "dita" aperte è immediatamente riempito con il rottame della seconda cesta. Essendo lo "shaft" in comunicazione con il forno quest'ultimo rottame preriscaldandosi con i fumi lascia progressivamente lo "shaft" fino al suo completo svuotamento.

Le "dita" vengono allora richiuse e lo "shaft" è così in grado di accogliere il rottame della prima cesta della colata successiva, ripetendosi il ciclo.

Poiché le operazioni di caricamento non comportano lo spostamento della volta o dello "shaft" si riducono sia il tempo di caricamento che le perdite termiche.

Il processo di fusione del rottame viene accelerato non solo per effetto del suo preriscaldamento ma anche dall'impiego di bruciatori oxy-fuel il cui apporto termico favorisce, tra l'altro, una migliore distribuzione del calore all'interno della colonna di rottame.

#### 2.4 Forno a caricamento continuo con preriscaldamento rottame (C.S.)

Il sistema CONSTEEL di cui in Fig. 4 è riportato uno schema di insieme [4, 5] si compone di due parti principali:

- convogliatore preriscaldatore
- forno elettrico

##### Convogliatore

Il convogliatore che rappresenta la parte più originale del sistema è costituito da due sezioni:

- sezione di carica: il rottame viene caricato (da vagoni, da parco rottame) sul convogliatore formando uno strato in movimento sostanzialmente continuo, attuato da dispositivi oscillanti incorporati nei segmenti metallici, posti in serie, che costituiscono il convogliatore.
- sezione di preriscaldamento: nel suo movimento il rottame entra nel tunnel attraversato in contro-corrente dai fumi provenienti dal forno elettrico, successivamente deviati verso l'impianto di abbattimento fumi grazie ad una speciale tenuta posta sul convogliatore, all'ingresso del tunnel.

Il rottame che nel frattempo si è preriscaldato con il calore dei fumi generato dalla loro post-combustione ad opera dell'aria iniettata nel tunnel, viene scaricato in maniera continua nel forno.

##### Forno elettrico

Il forno si caratterizza per l'assenza del foro sulla volta da cui vengono estratti i fumi (4° foro), sostituito dal tunnel, per il sistema di ribaltamento il cui centro di rotazione coincide con il centro geometrico del convogliatore, per la sua

forma interna atta a mantenere, dopo spillaggio, una consistente dote liquida.

Il rottame si immerge, dopo caduta dal convogliatore, nell'acciaio liquido dove, attraverso i moto convettivi, avviene la sua fusione per effetto del calore fornito dall'arco elettrico e dalle reazioni di ossidazione tra gli elementi del bagno (C, Si etc.) e l'ossigeno apportato.

Al tempo stesso le scorie schiumose costantemente generate e mantenute sul bagno riducono, attraverso la loro azione schermante sull'arco elettrico, il trasferimento, per irraggiamento, del calore verso il refrattario ed i pannelli di parete concentrandolo sul bagno e migliorando così l'efficienza termica del forno.

#### 2.5 Forni in CC ed in CA

Alla fine degli anni '80 il forno in corrente continua (CC) ormai disponibile su scala industriale, si è posto in alternativa al forno in corrente alternata (CA) in tutte le versioni illustrate nei par. precedenti, presentando rispetto a quest'ultimo alcuni significativi vantaggi:

- minore consumo di grafite dell'elettrodo
- minori disturbi sulla rete elettrica (flicker ed armoniche)
- minore generazione di rumore dell'arco elettrico.

Da allora, a causa dei progressi tecnologici nel frattempo intervenuti sul forno in CA con lo sviluppo di forni ad elevata impedenza o a reattori saturabili, parte di quei vantaggi si sono ridotti tanto che si può ritenere sia stata raggiunta una sostanziale parità nei costi di trasformazioni.

I costi di investimento, escludendo quelli legati all'impatto ambientale, sono ancora maggiori per il forno in CC nei casi in cui, per le caratteristiche della rete, non sia necessario dotare il forno in CA della costosa compensazione statica (SVC).

Parallelamente anche il forno in CC è progredito con l'adozione di elettrodi a sezione maggiorata ( $\geq 700$  mm) che permettono di eguagliare la potenza elettrica installata sui forni in CA (fino a 100-110 MW) e con lo sviluppo di elettrodi di fondo (per il ritorno della corrente elettrica) di lunga durata.

Tali elettrodi nelle versioni note sotto il nome di:

- tipo a suola conduttrice ("conductive bottom")
- tipo a barrotti ("pin-type")
- tipo a billetta ("billet-type")
- tipo a lamina ("fin-type")

raggiungono ormai durate comprese tra 1000 e 2000 colate, con un consumo specifico di 0.25-0.50 mm/colata [3].

Al tempo stesso una progettazione più accurata del circuito di ritorno della corrente dall'elettrodo di fondo ha eliminato il fenomeno della deviazione dell'arco responsabile di usure

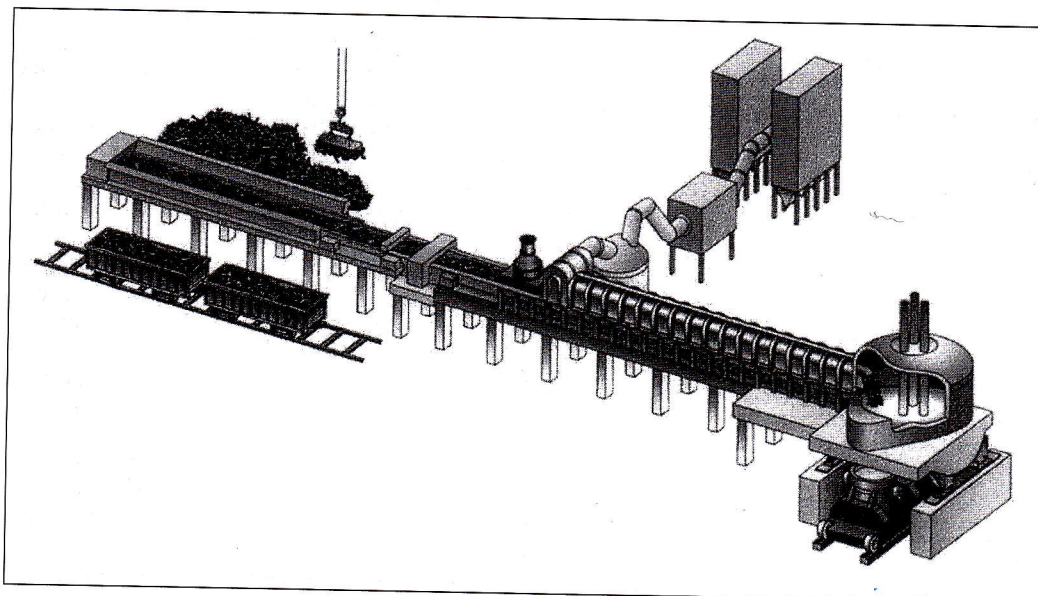


Fig. 4 - Forno C.S.: forno "CONSTEEL" a caricamento continuo con preriscaldamento rottame [4].

Fig. 4 - C.S. Furnace: "CONSTEEL" furnace with continuous charge and scrap preheating system.

		F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	F.C.	D.T.	D.T.	F.S.	F.S.	C.S.	C.S.
Forno convenzionale:	F.C.	CA	CA	CA	CA	CA	CA	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CC	CA	CA	CA	CC
Forno a doppio tino:	D.T.																	
Forno "Finger Shaft":	F.S.																	
Forno "CONSTEEL":	C.S.																	
Peso acciaio spillato	t	145	142	129	126	78	110	100	155	120	163	148	93	102	72	117		
Δ elettrodo	mm	610	610	610	610	558	710	762	762	710	762	762	610	558	500	710		
Potenza apparente	MVA	80	75	75	60	75	100	140	140	120	150	140	80	75	80	67		
Potenza attiva	MW	72	56	63	63	60	57	95	/	/	112	103	55	59	37	52		
Tensione max	V	950	940	700	750	950	735	750	800	820	920	855	900	990	/	550		
Corrente elettrica	kA	60	40	60	62	46	99	140	120	115	118	120	52	46	/	94		
Rottame + (ghisa solida)	t	1141	1044	1070	1093	1122	1170	/	/	/	1070	1086	1057	1141	/	/		
Temperatura spillaggio	°C	1635	1640	1600	1603	1630	1610	/	/	/	1657	1644	1650	1630	1600	1604		
Tempo power-on	min	50	57	48	54	35	50	/	/	40	40	48	37	40	37	/		
Tempo power-off	min	29	15	8	14	11	18	/	/	/	26	19	13	24	10	/		
Tempo tap-to-tap	min	79	72	56	68	46	68	50	60	/	66	67	50	64	47	60,6		
Consumo tot. O <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> (SPT)/t	29,0	27,8	23,4	26,8	32,1	30,0	30,0	35,0	35,9	25,4	15,9	17,5	25,0	33,0	29,0		
Consumo gas	m <sup>3</sup> (SPT)/t	1,6	0,7	2,3	2,2	4	/	4	7	6,9	/	9	12	5	0	0		
Consumo carbone	kg/t	/	/	/	/	/	/	8+10	5+9	6,3+7	/	/	/	/	/+9,2	9,5+11,8		
Consumo E.E.	kWh/t	408	373	392	373	375	420	354	405	344	350	422	308	385	335	323		
Consumo elettrodi(*)	kg/t	1,60	1,66	1,50	1,90	1,60	1,20	1,00	1,25	1,20	1,10	1,24	1,65	1,76	1,50	0,90		
Consumo tot. refrattari	kg/t	1,3	2,8	/	4,3	6,5	2,7	/	/	1,9	5,4	/	0,6	3,3	/	/		
Produttività oraria	t/h	110	119	138	111	102	99	/	155	/	148	133	112	96	91	116		
Capacità produttiva	Mt/a	/	/	/	/	/	0,750	/	0,865	/	/	/	/	/	/	0,800		

CA = corrente alternata; CC = corrente continua  
/ = Dato mancante

Tab. II

localizzate del refrattario di parete e ha favorito l'agitazione del bagno accelerando così le cinetiche di fusione del rottame e le reazioni metallurgiche. Allo stato attuale della tecnologia si può affermare che i due sistemi di alimentazione siano del tutto confrontabili, con parità di prestazioni per quanto riguarda sia la produttività sia i costi di trasformazione [6].

**3. PRODUTTIVITÀ E CONSUMI**

Nel mettere a confronto le prestazioni in termini di produttività e consumi dei forni appartenenti ai quattro tipi descritti si sono utilizzati i dati di esercizio provenienti da uno studio dell'IISI, "IISI Special Study on Developments of EAF Technologies", edito nel 1999 [7] integrandoli con altri estratti da memorie di recente pubblicazione [8+11]. Dal campione così raccolto sono stati esclusi i forni con produttività inferiore a 90 t/h per essere in linea con l'attuale tendenza che privilegia forni ad elevata produttività cui corrispondono minori costi di trasformazione, e quelli aventi abitualmente in carica ghisa liquida e preridotti. La seconda esclusione è motivata dal fatto che nei prossimi anni non si prevedono in Italia consumi significativi né di preridotti né di ghisa liquida. Questa situazione potrebbe mutare sul lungo periodo, almeno per la ghisa se, come è già avvenuto in talune realtà europee, questa venisse resa disponibile installando forni elettrici all'interno di stabilimenti a ciclo integrale o attraverso la realizzazione di impianti di "smelting reduction". L'esclusione dei casi che prevedono nella carica al forno ghisa liquida e/o preridotto ha, in ogni modo, il vantaggio di rendere più facilmente confrontabili i dati che esprimono le prestazioni del forno. Pur in presenza di tali vincoli è stato raccolto un campione sufficientemente rappresentativo costituito da 15 forni, installati in varie parti del mondo, con un minimo di 2 forni

per ciascun tipo di impianto. Utilizzando gli stessi parametri dello studio IISI riguardanti: grandezze elettriche, tempi operativi, consumi e produttività è stata costruita la Tab. II Dall'analisi dei dati di tabella emergono le seguenti considerazioni:

- i consumi di energia elettrica, per forni senza preriscaldamento del rottame (F.C. e D.T.) sono quasi sempre al di sotto di 400 kWh/t ma sempre superiori a 340 kWh/t
- i consumi di energia elettrica per forni con preriscaldamento rottame, (F.S. e C.S.) sempre inferiori a 385 kWh/t possono raggiungere valori vicini a 300 kWh/t
- il consumo di elettrodi per forni in CA si colloca nell'intervallo 1.5-1.9 kg/t
- il consumo di elettrodo per forni in CC si colloca nell'intervallo 0.9-1.5 kg/t
- il tempo tap-to-tap risulta frequentemente al di sotto di 60 min fino a minimi di 46 min e dipende di meno dal tipo di forno considerato e di più dalla potenza elettrica installata e dall'energia chimica erogata
- il tempo power-on risulta essere, a parità di condizioni e per effetto dei più bassi consumi di energia elettrica, minore per i forni con preriscaldamento rottami (F.S. e C.S.)
- il consumo di O<sub>2</sub> è compreso, per quasi tutti i forni, nell'intervallo 25-35 m<sup>3</sup>(SPT)/t
- il peso di acciaio spillato è compreso tra 72 e 155 t e per i pesi maggiori e con produttività attorno a 150 t/h si raggiunge per un tempo di esercizio di 7200 h una capacità produttiva superiore a 1 Mt/a
- i consumi di gas (metano in particolare) sono variabili da 0 per i forni C.S. fino a 12 m<sup>3</sup>(SPT)/t per i forni F.S.
- la potenza attiva richiesta, a parità di produttività, è minore per i forni C.S. in quanto viene erogata a valore costante nel tempo senza i picchi mostrati in Fig. 1b, che caratterizzano la gestione dei forni a caricamento discontinuo (F.C./D.T. ed F.S.)

I valori riportati in tabella sono medie riferite a periodi rela-

tivamente lunghi (su base almeno mensile). Non sono state invece riportate le prestazioni di punta dei forni conseguibili nell'arco delle 24 h, notevolmente superiori per alcune realtà impiantistiche ai valori di tabella ma non mantenibili su tempi più estesi.

In base ai dati di esercizio provenienti da due forni a doppio tino (D.T.) si constata che nella realtà operativa si sono conseguiti tempi di power-off maggiori di quelli di progetto riportati al § 2.2, paragonabili a quelli degli altri tipi di forno, da addebitare verosimilmente ad una gestione più complessa dei due tini ed a mancate sincronicità.

In termini più generali, e facendo riferimento alla fig. 5, si può attribuire ai forni con preriscaldamento rottame (F.S. e C.S.) un consumo di energia elettrica, a parità di energia chimica, inferiore a quello dei forni F.C. e D.T. Inoltre il consumo di elettrodi risente maggiormente del tipo di alimentazione (con valori minori per i forni in C.C.), più che del tipo di forno e delle sue modalità di conduzione.

Il raggiungimento di elevate produttività non è prerogativa dei forni F.C. e D.T. ma dipende dalla potenza elettrica installata e dalla capacità del forno.

I dati parziali sul consumo dei refrattari non permettono di ricavare elementi sicuri di valutazione; alcune considerazioni verranno sviluppate al § 4.

Come si è già evidenziato nel trattare gli aspetti di produttività e consumi, i forni F.C. e D.T. presentano, al proprio interno, differenze minori rispetto a quelle che si hanno con i forni F.S. e C.S., sicché nell'affrontare l'argomento dell'impatto ambientale non si farà distinzione fra i due forni se non dove esplicitamente indicato.

#### 4. IMPATTO AMBIENTALE

##### 4.1 La normativa

La normativa sull'impatto ambientale risulta complessa da sintetizzare poiché si deve tener conto sia delle disposizioni comunitarie, sia di quelle nazionali; l'emanazione di queste normative risponde poi a tempi e situazioni differenti.

Innanzitutto l'Europa di Bruxelles emana delle Direttive che successivamente debbono essere recepite dalla legislazione nazionale degli stati membri; tuttavia a causa delle differenti situazioni già esistenti nei paesi della comunità, i limiti fissati dalle norme sono in realtà la conseguenza di un complesso negoziato tra le parti, che si svolge prima di deliberare la norma stessa, e non piuttosto la sola ratificazione di una situazione o di un dato esclusivamente tecnico [12].

Mentre Bruxelles si prende poi cura di mettere via via a punto le norme con i tempi necessari e più opportuni, può anche accadere che le ultime conoscenze acquisite su un dato inquinante impongano addirittura la rapida emanazione di una normativa nazionale, per ovvii motivi di salute pubblica, senza attendere una specifica normativa comunitaria.

Questo stato di cose ha fatto sì che mentre Bruxelles sta solo da qualche anno prendendo in esame i singoli limiti dei vari agenti inquinanti, avendo in precedenza affrontato degli aspetti di carattere più generale, le normative nazionali hanno avuto nel tempo un loro sviluppo indipendente, pur restando via via le Direttive di Bruxelles. In particolare per quanto concerne i limiti tollerati nelle emissioni al camino per i vari agenti inquinanti, le attuali norme italiane, analogamente a quanto capita per altri paesi europei, non si discostano da quanto stabilirono nell'86 le TA Luft tedesche; oggi sta però facendo da capofila il Lussemburgo che, con le sue norme del 97, ha già formalizzato gli inquinanti ed i relativi valori tollerabili secondo le più recenti acquisizioni scientifiche e tecnologiche.

Per quanto concerne invece Bruxelles si può invece far riferimento alle Direttive europee IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) del 96, le quali si riferiscono non

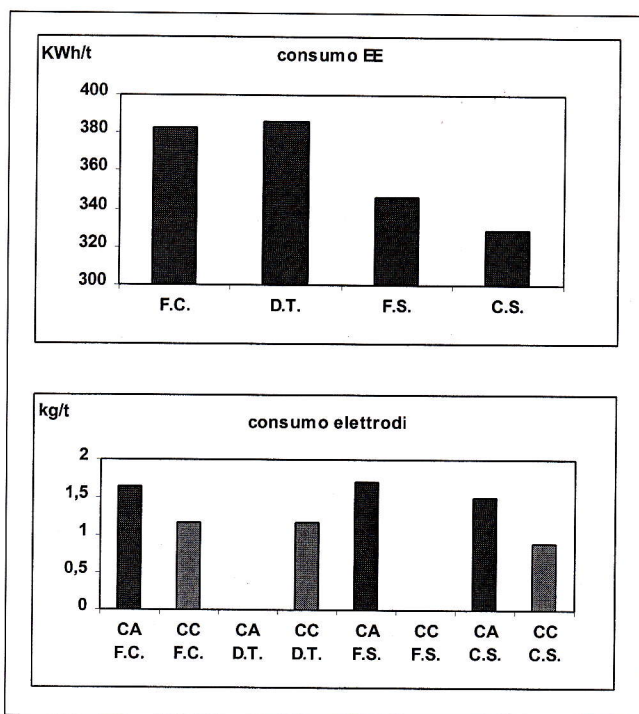


Fig. 5 - Consumo energia elettrica e consumo elettrodi in funzione del tipo di forno.

Fig. 5 - Power consumption and electrode consumption as a function of the type of furnace.

solo alle emissioni nell'aria e nell'acqua, ma anche ai rifiuti, ai rumori ed all'efficienza energetica.

Tali Direttive, interessate a tutti i tipi di industria, intendono garantire ogni componente sociale allorché vengono realizzate delle installazioni legate direttamente od indirettamente alla difesa dell'ambiente. Lo strumento utilizzato è il BATNEC (Best Available Technologies Not Entailing Excessive Cost), il quale deve appunto tenere conto sia delle caratteristiche tecnico-economiche e sia della località geografica interessata alla nuove installazioni.

Nel gennaio del 99 un documento europeo ha inteso precisare all'elettrosiderurgia quali tecnologie possano essere considerate BATNEC; pertanto una acciaieria dovrà installare, ad esempio, le seguenti tecnologie BATNEC, come da studio IISI [13], le quali debbono rispettare le condizioni indicate più sotto:

- un sistema di evacuazione dei fumi, allorché mostra una efficienza di raccolta delle polveri pari al 98%;
- un sistema di depolverizzazione dei gas emessi come reflu gassoso, allorché risulta corredato da filtri a manica in grado di assicurare meno di 5 mg/m<sup>3</sup>(SPT) sui nuovi impianti e 15 mg/m<sup>3</sup>(SPT) su quelli già esistenti;
- la tecnologia utilizzata per minimizzare i composti organici clorurati, allorché è corredata da un appropriato sistema di postcombustione nel circuito dei fumi, oppure da una apposita camera di combustione secondaria seguita da un rapido quenching o da iniezione di lignite;
- i sistemi di preriscaldamento dei rottami, allorché sono corredati da quanto indicato nel punto precedente, anche se debbono subire una ulteriore verifica locale per la loro definitiva applicazione.

Tale verifica locale non è tuttavia specifica di questi impianti: infatti una Direttiva comunitaria precedente (Directive 84/360/EEC) già prevedeva la concessione locale di una specifica autorizzazione per un ampio numero di processi industriali, cioè la concessione da parte dei singoli stati di una sorta di patente ad emettere i reflui nell'ambiente. Pertanto la precisazione di quali siano le tecnologie BATNEC

con le Direttive del gennaio del 99, deve essere considerata una integrazione della precedente normativa. A completamento di quanto detto sulle normative è opportuno precisare che il valore delle emissioni specifiche dei singoli inquinanti da parte dei forni elettrici, indicate nei paragrafi seguenti, provengono da misurazioni e statistiche effettuate da vari autori su impianti che nella gran parte dei casi sono ovviamente del tipo F.C., a ragione della loro maggior frequenza rispetto agli altri tipi di forni.

#### 4.2 Inquinamento atmosferico

##### 4.2.1 Il trattamento dei fumi nell'elettrosiderurgia

Le emissioni gassose del forno elettrico vengono trattate negli impianti di aspirazione e di depurazione, per essere poi emesse nell'atmosfera come gas esausti.

Nel corso dello studio già citato [13] è stato diffuso un questionario sull'impatto ambientale, al quale hanno risposto 53 acciaierie appartenenti principalmente agli USA, all'Europa Occidentale ed al Giappone; in merito agli impianti di depurazione dei fumi del forno ad arco è emerso quanto segue:

Sistema adottato	% degli intervistati
1 solo evacuazione diretta dal 4° foro	17
evacuazione diretta + canopy* o evacuazione capannone	65
evacuazione diretta + dog house* + evacuazione capannone	17

\* canopy: cappa collocata sopra il forno e sulla zona di colaggio;

\* dog house: struttura di incapsulamento del forno.

##### Tipo di installazione

Tipo	% di impianti
Sistemi indipendenti	29
Sistemi combinati	71

##### Collegamento tra evacuazione diretta ed evacuazione capannone

Sistema	Variabilità della capacità di aspirazione m <sup>3</sup> (SPT)/t	Valore medio m <sup>3</sup> (SPT)/t
Evacuazione diretta	346-9927	1636
dog house	2046-4667	3184
Evacuazione capannone	494-73036	9785

##### Capacità di aspirazione

Si evidenzia così il maggior utilizzo dell'aspirazione dal quarto foro (denominata anche sistema primario) in congiunzione con l'evacuazione del capannone; in effetti gli impianti collegati tra loro comportano minori investimenti, minore spazio impegnato, temperature minori soprattutto ai filtri a manica, ma lo svantaggio principale è quello di un più difficile controllo.

La capacità di aspirazione specifica ha un significato soltanto allorché gli impianti non sono collegati tra loro; la tendenza generale è comunque quella di utilizzare un valore circa tre volte superiore allorché si passa dall'aspirazione del quarto foro, alla dog house ed infine alla evacuazione del capannone; normalmente la capacità di aspirazione al quarto foro viene calcolata sulla base dei fumi sviluppati du-

rante la decarburazione con l'iniezione di ossigeno.

In merito alla tipologia di forni risulta quanto segue:

- Forni F.C./D.T.: le precedenti considerazioni sono ben adattabili a questo tipo di impianti, alimentati sia in CA, sia in CC;
- Forni F.S.: l'entalpia dei fumi di questi forni è circa un terzo di quella di un F.C.[3], mentre la portata del sistema di aspirazione fumi non varia nella stessa misura (si riduce, infatti di circa la metà l'aria necessaria a raffreddare i fumi nell'impianto di abbattimento a secco [14]): la conseguente temperatura più bassa lascia pensare che i fumi provenienti dal forno non riescano a realizzare nello shaft una combustione del materiale organico e delle particelle di carbone trascinate dai fumi stessi, analogamente a quanto accade all'uscita dei forni F.C.;
- Forni C.S.: la postcombustione dei fumi nel tunnel di preriscaldamento può produrre la distruzione ossidativa del materiale organico a temperature dell'ordine di 900-1000 °C [15]. E' poi da evidenziare una ridotta dimensione della canopy hood, oltre che l'inutilità di una evacuazione del capannone: infatti solo all'avvio di una campagna di colate viene realizzato il caricamento del rottame dalla volta del forno ed all'interno di un tino sostanzialmente a temperatura ambiente. La sola aspirazione sulla zona di colaggio del forno, circa la quarta parte di quanto richiede complessivamente un F.C., risulta più che sufficiente alle esigenze di questo tipo di forni [fonte Techint].

##### 4.2.2 Volatile Organic Carbons (VOC's)

Provengono dalla vaporizzazione e parziale combustione di grassi, oli e plastiche che possono accompagnare il rottame. Possono anche provenire in misura minore dal carbone, perché liberate come materie volatili, dal legno o dall'antracite. Oltre che tossici, i VOC's sono anche caratterizzati da cattivo odore e possono essere precursori e quindi dar luogo alla formazione di ozono, perossido di idrogeno e nitrato di perossiacetilene [16, 17].

Un ordine di grandezza su quale possa esserne il quantitativo prodotto dal forno elettrico è fornito dalla letteratura [18], che stima si possa giungere a produrne tenori massimi dell'ordine dei 68 g/t. Per contro non risulta che la normativa lussemburghese indichi il valore massimo dei VOC's tollerati nelle emissioni al camino.

Queste sostanze si sviluppano durante il caricamento a volta aperta in un forno F.C., cioè quando il sistema di aspirazione dal quarto foro non è operativo; sostanzialmente l'inquinante in questione interessa dunque la qualità dell'aria interna all'acciaieria e l'evacuazione avverrà ad opera dell'aspirazione del capannone o della canopy. Se il forno è invece dotato di dog house i VOC's diffonderanno al suo interno e quindi verranno evacuati.

Pertanto i forni F.C. non possono essere considerati intrinsecamente ecologici, almeno rispetto a questo inquinante, poiché richiedono necessariamente degli specifici accorgimenti per la loro eliminazione.

Nel caso dei forni F.S. si sviluppano ugualmente delle sostanze simili a quelle che compongono i VOC's, definiti per i forni F.C., ma a ragione dell'esistenza di regimi termici meno spinti rispetto al caso precedente [3, 14], la loro emissione avviene in modo totalmente differente per qualità, quantità ed, attendibilmente, con una maggiore continuità temporale.

In particolare in un forno F.S. si è rilevata un'emissione dei VOC's durante la fase di caricamento dello shaft e, nonostante il loro tenore medio fosse al di sotto di 20 mg/m<sup>3</sup>(SPT) (limite fissato solo in alcuni paesi); con un ingegnoso collegamento tra shaft ed aspirazione fumi, corredato da un particolare valvola aperta durante il caricamento, si è scesi a tenori di circa 9 mg/m<sup>3</sup>(SPT), risolvendo in tal modo non solo il problema dei VOC's, ma pervenendo an-

che dei benefici nel caso delle diossine (§ 4.2.5) [19].

Rispetto ai vari tipi di forni risulta pertanto quanto segue:

- Forni F.C./D.T./F.S.: l'inquinante in questione è definito tipicamente per questi forni, e costringe a ricorrere a particolari soluzioni impiantistiche per la loro eliminazione;
- Forni C.S.: i VOC's, differenti per natura e quantità rispetto ai casi precedenti, si possono sviluppare durante tutta la fase di caricamento, ma direttamente nel tunnel di preriscaldamento caratterizzato da un ambiente ossidante e da temperature dell'ordine di 900-1000 °C. Il postcombustore secondario dovrà provvedere in ogni caso alla loro definitiva distruzione.

#### 4.2.3 Ossido di carbonio e CO<sub>2</sub>

Anche in questo caso la letteratura suggerisce l'ordine di grandezza di quanto CO produce il forno elettrico, anche se si ritiene che il valore stimato in 900-2700 g/t possa essere in difetto a ragione degli attuali elevati consumi ossigeno e carbone [18]. Con riferimento alla portata media di 1636 m<sup>3</sup>(SPT)/t dell'aspirazione dal quarto foro (§ 4.2.1), il quantitativo indicato corrisponde a 550-1650 mg/m<sup>3</sup>(SPT).

La quantità appena indicata deve essere però abbattuta per ossidazione, poiché la normativa del Lussemburgo ne indica il limite massimo di 250 mg/m<sup>3</sup>(SPT) nelle emissioni al camino. Pertanto il conseguimento di tale limite non garantisce la totale ossidazione dei pericolosi composti organici (diossine) e dall'altro determina la conseguente formazione di elevate quantità di anidride carbonica.

In merito alla combustione dei composti organici trascinati dai fumi verranno successivamente fornite altre indicazioni ed, in questa sede, si evidenzia soltanto che nei vecchi impianti la postcombustione era vista solo in funzione del tenore di CO e non in relazione a questi composti. Pertanto dovranno essere rivisti in futuro tutti i criteri di progettazione dei postcombustori in relazione a questa, solo apparentemente, nuova situazione.

Sebbene le normative attuali non impongano dei limiti sul tenore dell'anidride carbonica nei gas esausti che fuoriescono dal camino, è ben noto che essa è la prima causa dell'effetto serra, seguita poi da metano, ossidi di azoto, idro-fluoro composti con o senza zolfo [20].

L'emissione globale della CO<sub>2</sub> non è tuttavia legata solo alla fabbricazione metallurgica, ma è soprattutto da mettere in relazione con il consumo di energia elettrica: infatti il settore energetico, rispetto agli altri tipi di industria, è quello che emette il maggior quantitativo di CO<sub>2</sub> (circa il 40% del totale) a causa della combustione del carbone, degli olii combustibili e del gas effettuata dalle centrali [20].

Dal punto di vista dell'impiantistica elettrosiderurgica risulta allora quanto segue:

- Forni F.C./DT.: considerate tutte le fonti di anidride carbonica, tali forni sono da considerare come quelli più inquinanti;
- Forni F.S. e C.S.: questi impianti, effettuando il preriscaldamento del rottame, debbono essere considerati come meno inquinanti dei forni F.C./D.F.; la minor richiesta di energia elettrica produce infatti un minor inquinamento da CO<sub>2</sub>. A ragione della mancanza di consistenti dati sull'argomento non è però possibile stabilire una differenza tra i forni F.S. ed i C.S.: d'altra parte la stessa Tab. II evidenzia come a fronte del più elevato consumo di ossigeno dei C.S., onde conseguire la scoria schiumosa durante l'intera colata, risulti che solo i forni F.S. utilizzino i bruciatori a metano.

#### 4.2.4 Gli NO<sub>x</sub>

Questi composti, precursori dell'ozono al pari dei VOC's, si formano allorché la temperatura è superiore a 1100 °C [17, 18, 21] e l'azoto e l'ossigeno hanno tempi di residenza adeguatamente elevati, poiché la formazione degli ossidi di azoto ha una cinetica molto bassa; la reazione richiede dapprima

la rottura della molecola molto stabile dell'azoto, e, successivamente, la formazione del legame tra l'ossigeno e l'azoto atomico grazie alle condizioni ossidanti dell'ambiente. L'arco elettrico, i bruciatori ossi-gas o quelli gas-aria mal regolati determinano condizioni favorevoli alla formazione degli NO<sub>x</sub>, in termini di rottura della molecola d'azoto, ma deve esistere anche un ambiente chimico favorevole alla loro definitiva formazione e successiva stabilizzazione. In pratica misure effettuate su vari forni elettrici hanno evidenziato tenori di questi composti compresi tra 141 e 245 g/t [18], come risultato del compromesso tra due opposti fattori: la presenza dell'arco e di eventuali bruciatori, quali fattori positivi alla formazione degli NO<sub>x</sub>, e le condizioni sostanzialmente riducenti del forno, quale fattore sostanzialmente negativo.

Qualora si prenda a riferimento la portata media di 1636 m<sup>3</sup>(SPT)/t al 4° foro (§ 4.2.1), il tenore massimo di 245 g/t di NO<sub>x</sub> consente di calcolare circa 150 mg/m<sup>3</sup>(SPT) emessi nei gas esausti al camino. Tale valore soddisfa non solo i 500 mg/m<sup>3</sup>(SPT) previsti dalle TA Luft dell'86, ma anche i 200 mg/m<sup>3</sup>(SPT) [12] imposti dalle normative lussemburghesi.

Le conclusioni del calcolo debbono tuttavia essere prese in modo molto conservativo, sia perché si sono utilizzati dei valori medi per la portata dell'aspirazione fumi e sia perché non si può escludere che, in futuro, non vengano prese in considerazione dalle norme anche gli NO<sub>x</sub> che vanno ad accumularsi in altri punti dell'impianto, come ad esempio accade per la pavimentazioni degli ambienti industriali [22].

Nel caso di un forno elettrico dotato di preriscaldamento del rottame, il tenore di questi composti non dovrebbe modificarsi sostanzialmente, rispetto ai forni F.C.: infatti solo le regioni dell'arco sono quelle particolarmente favorevoli alla formazione degli NO<sub>x</sub>. Non appare però possibile esprimere qualche più precisa considerazione sui forni a caricamento continuo, separandoli da quelli con shaft, a ragione della mancanza di specifici dati al riguardo.

Tuttavia, dalle considerazioni appena esposte, appare evidente che valori ridotti del tempo di power on ed un minor uso di bruciatori tradizionali sono da considerare fattori positivi in merito all'impatto ambientale da ossidi di azoto. Ulteriormente i "low NO<sub>x</sub> burners" per le camere di postcombustione e l'impiego della scoria schiumosa, la quale ricopre l'arco proteggendolo in una certa misura dall'azoto, sono anch'essi da considerare positivamente in merito all'inquinante in questione [19].

Con riferimento a queste ultime considerazioni, oltre a quanto già esposto in precedenza, è allora possibile formulare la seguente graduatoria tra le differenti tecnologie elettrosiderurgiche:

- Forni F.C./D.T.: con particolare riferimento ai valori del power on, riportati in Tab. II, oltre che all'uso generalizzato dei bruciatori, si può assumere che questi forni costituiscono il riferimento per valutare le altre tecnologie;
- Forni F.S.: poiché il preriscaldamento comporta necessariamente un tempo di power on più basso, rispetto ai forni F.C., questo tipo di impianti conduce ad una minore formazione di NO<sub>x</sub>; tale situazione non si modifica sostanzialmente a causa dei bruciatori impiegati, poiché questi ultimi si impiegano anche nei forni F.C.;
- Forni C.S.: il ridotto tempo di power on, la mancanza di bruciatori e la presenza continua della scoria schiumosa lasciano pensare che questi impianti siano più ecologici degli altri forni rispetto agli NO<sub>x</sub>; considerati poi i 900° C [15] della fine del tunnel ed i 1200 °C circa, assunti come temperatura all'ingresso del tunnel stesso (con tenori di CO che decrescono tra 1200 °C e 900 °C), si può ragionevolmente supporre che nel preriscaldamento non si creino condizioni favorevoli per una loro ulteriore e significativa formazione.

#### 4.2.5 Diossine e furani

Con il nome "diossine", utilizzato dai mass media, viene in realtà indicato un insieme di 17 sostanze organiche formate da C, H, O e Cl e classificabili nella famiglia chimica delle diossine ed in quella dei furani; tutti questi composti sono da considerare come particolarmente tossici [23].

Poiché una miscela gassosa può anche contenerli tutti e 17, si utilizza uno standard che esprime la tossicità dell'intera miscela come I-TEQ; ovvero come somma delle tossicità di ognuno di essi calcolata ponderalmente sulla base della loro singola percentuale in miscela e facendo riferimento al composto più tossico di essi (la 2, 3, 7, 8 tetracloro diossina).

In seguito con il termine "diossine", utilizzando il criterio dei mass media, si farà riferimento a tutti i 17 composti. Si consideri, comunque, che questo argomento è ancora oggetto di studio: pertanto quanto esposto di seguito, incluse le considerazioni che se ne desumono per le differenti tecnologie siderurgiche, pur congruente con le conoscenze oggi disponibili, non può considerarsi esaustivo.

Per comprendere le potenziali interazioni con l'elettrosiderurgia, occorre fare riferimento dapprima alle modalità con cui le diossine vengono generate e poi alle condizioni in cui è possibile distruggerle. Successivamente, sulla base delle condizioni esistenti negli impianti elettrosiderurgici in questione, si può desumere se esistono o meno le condizioni pratiche per controllare la formazione e la distruzione di questi composti.

Le diossine, in gran parte liquide al disotto degli 80 °C, si formano esclusivamente nell'intervallo di temperatura compreso tra 200 e 450 °C; i molteplici reagenti che le formano, con i più differenti percorsi di reazione, possono prendere origine anche dalla decomposizione termica delle vernici, oli e plastiche che spesso accompagnano il rottame [19,24]. Anche i fini di carbone, sospesi nei fumi che escono dal forno elettrico (a circa 1200 °C negli F.C. e circa 800 °C negli F.S.), possono generare le diossine durante il loro raffreddamento secondo un particolare percorso: una volta che questi fumi arrivano a temperature dell'ordine di 650 °C, reagiscono con il Cl che è sempre presente in tracce nell'ambiente. Creano così dei nuovi composti potenzialmente in grado di generare diossina. Pertanto, raggiunta successivamente la temperatura di 450 °C, si formano i cloroderivati in questione a partire da questi nuovi composti.

Le diossine possono comparire nei fumi del forno ad arco in quantitativi espressi normalmente in unità di ng/m<sup>3</sup>(SPT). Compresse le condizioni di formazione, si può ora vedere come possano essere distrutte le diossine.

In primo luogo ossidandole ad almeno 800 °C insieme ai reagenti che le formano. Si ritiene che tale ossidazione sia realizzata sufficientemente solo allorché il contenuto di CO nella miscela gassosa in equilibrio non supera i 50 mg/m<sup>3</sup>(SPT)[25]: nelle condizioni indicate tutte le sostanze organiche ed il carbone stesso risultano infatti ossidati totalmente a CO<sub>2</sub>, essendo l'equilibrio  $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons CO_2$  tutto spostato a destra.

E' anche possibile impedire la formazione delle diossine durante il raffreddamento delle particelle di carbone sospese nei fumi: infatti la cinetica di formazione ha tempi discreti e quindi un rapidissimo raffreddamento dei fumi può impedire la formazione dei cloroderivati in questione.

Vediamo allora nei vari tipi di forni elettrici quali possono essere le zone a rischio e le eventuali contromisure, facendo riferimento allo schema di Fig. 6.

Si noti che lo schema è adattabile a tutti i forni in questione: infatti la postcombustione si realizza già in misura limitata all'interno degli F.C. ed in misura maggiore e crescente rispettivamente nello shaft degli F.S. e nel tunnel di preriscaldamento dei C.S. Mentre nel caso degli F.C. e degli F.S. la postcombustione si completa nel sistema primario di aspirazione, nei forni C.S. risulta più spinta poiché, non solo av-

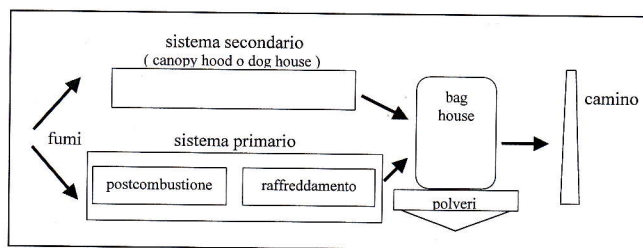


Fig. 6 - Percorso dei fumi.

Fig. 6 - Fumes flowchart.

viene nel lungo tunnel di preriscaldamento, ma si esaurisce nel postcombustore secondario, sempre presente in questo tipo di impianti [40].

I punti critici per la distruzione, o quanto meno per il controllo della formazione dei cloroderivati, sono i seguenti:

- durante la postcombustione;
- durante il raffreddamento;
- all'arrivo alla bag house;
- sui filtri a manica della bag house.

Nella postcombustione si raggiungono delle temperature sufficienti alla distruzione delle diossine e dei reagenti che le formano; tuttavia se le condizioni assicurano solo l'abbattimento del CO a valori inferiori a 250 mg/m<sup>3</sup>(SPT), ma superiori a 50 mg/m<sup>3</sup>(SPT), è solo il tenore del CO ad essere conforme alle norme: in tal caso rimangono infatti inalterate sia le diossine eventualmente formate, sia i reagenti che possono formarle successivamente.

Una soluzione viene però fornita dal raffreddamento brusco dei fumi indicato nello schema, subito dopo la postcombustione, fornendo così un metodo per controllare la formazione delle diossine proprio come è stato illustrato poco più sopra.

Durante il raffreddamento può accadere che la fluidodinamica del refrigeratore non risulti adeguata all'obiettivo di un rapido abbassamento di tutta la massa dei fumi; in tal caso è possibile operare con l'iniezione di materiali adsorbenti immessi tra la refrigerazione e la bag house, bloccando così diossine ed altre sostanze per adsorbimento. Naturalmente in tal caso si dovrà operare con lunghezze opportune dei condotti e con diaframmi antiscintille per impedire l'accensione del materiale adsorbente [19].

I fumi che giungono alla bag house provengono però anche dall'aspirazione secondaria, trascinando VOC's, diossine ed altro: infatti durante il caricamento del vessel degli F.C. e dello shaft degli F.S., infatti, l'aspirazione primaria è scollegata dal forno. Tutte queste sostanze organiche, non passando attraverso il postcombustore, possono solo essere bloccate dalle sostanze adsorbenti già viste più sopra.

Una soluzione ulteriore è stata trovata per gli F.S., mediante quello speciale collegamento tra shaft ed aspirazione primaria che è stato già presentato a proposito dei VOC's (§ 4.2.2).

Infine deve essere controllata accuratamente la temperatura dei filtri a manica della bag house, affinché la temperatura non superi gli 80 °C visti più sopra: infatti con temperature superiori si possono trascinare nei fumi che vanno al camino delle pericolose sostanze inquinanti [27].

Per quanto concerne le polveri di risulta, una volta garantite opportune precauzioni durante il maneggio, il problema finisce per interessare il campo dei rifiuti solidi, trattati successivamente nel relativo paragrafo.

Quanto descritto finora è il risultato degli studi e delle ricerche già realizzate sull'argomento, ma si comprende come l'area dei possibili interventi possa fornire ulteriormente ampia materia per controlli, ricerche ed ottimizzazioni a livello locale.

Le TA Luft dell'86, preso a riferimento dalle attuali norme

italiane, non prendono in esame questi composti, mentre le più attuali norme del Lussenburgo del 97 impongono al camino un limite inferiore a 0,1 ng I-TEQ/m<sup>3</sup>(SPT).

Per completezza si ricorda che le normative del Lussenburgo fissano ancora i limiti di 0,05 mg I-TEQ/m<sup>3</sup>(SPT) e di 1 mg I-TEQ/m<sup>3</sup>(SPT) rispettivamente per gli idrocarburi aromatici policiclici e per i PCB. Evidentemente tali limiti risultano garantiti, una volta che siano stati presi in esame tutti gli accorgimenti descritti per controllare le diossine.

Per quanto concerne le differenze tra le impiantistiche elettrosiderurgiche i dati pubblicati evidenziano che, con gli accorgimenti descritti più sopra, le diossine vengono portate al disotto dei limiti previsti dalle norme in tutti gli impianti; in caso emerge quanto segue:

- Forni F.C./D.T./F.S.: tutti i forni in questione, sostanzialmente indifferenziati tra loro, evidenziano la necessità degli accorgimenti visti più sopra e che debbono pertanto essere installati e messi a punto localmente, onde poter conseguire la messa a norma;
- Forni C.S.: un sistema di preriscaldamento, come quello di questi forni, sembra risultare particolarmente sicuro, specie perché a valle include anche un postcombustore secondario. Le lunghezze del tunnel di preriscaldamento, i molteplici punti di ingresso del comburente ed infine il postcombustore secondario possono garantire una postcombustione molto spinta. Si rilevi che anche all'estremità del tunnel stesso, in cui regnano le temperature più basse (ma pur sempre dell'ordine dei 900 °C), l'ambiente è ormai ossidante a ragione dell'avvenuta postcombustione: viene così esplicata una azione positiva nella distruzione delle sostanze organiche che si possono liberare allorché il rottame entra nel sistema di preriscaldamento (sostanzialmente del tipo dei VOC's). In particolare viene anche dichiarato come la presenza di un ragionevole carico di "fluff" automobilistico nel tunnel non comporti alcuna conseguenza per l'emissione di diossine [26]. Anche il ridotto carico di polveri che presenta questo tipo di forni gioca positivamente al riguardo (§ 4.6).

#### 4.3 Inquinamento elettrico

Esigenze legate all'aumento di produttività hanno portato all'introduzione di forni elettrici ad alta ed altissima potenza con valori che possono raggiungere i 140 MVA.

Questi livelli di potenza, le caratteristiche di non linearità dell'arco elettrico, l'alimentazione del forno in CC o in CA, le modalità di fusione, con caricamento continuo o discontinuo del rottame, sono i principali fattori che influenzano l'insorgenza nella comune rete elettrica di distribuzione di disturbi noti come "flicker" ed "armoniche".

Questi disturbi peggiorando la qualità dell'alimentazione elettrica incidono negativamente sul buon funzionamento delle varie utenze collegate alla medesima rete che, anche se forte, ossia con elevata capacità di corto circuito, non riesce a ridurli in modo significativo per la presenza di un carico variabile ad alta potenza costituito dal forno elettrico.

Il flicker viene definito come variazione casuale dell'intensità della luce generata da lampade ad incandescenza, causata da rapide fluttuazioni della potenza reattiva di una utenza connessa alla stessa rete di distribuzione [27].

Le armoniche, correnti sinusoidali con frequenza pari ad un multiplo intero (ordine di armonica) della frequenza fondamentale (50 Hz) generano distorsioni, spesso inaccettabili, nella tensione della rete di distribuzione [28].

Nel seguito verranno esaminate sia le soluzioni che vengono adottate sui forni in CC ed in CA per ridurre i disturbi elettrici sia l'influenza che hanno su questi le modalità di caricamento, continuo o discontinuo, del rottame.

##### 4.3.1 Flicker

Sono stati sviluppati diversi metodi per la misura del flicker,

ognuno con il suo standard, all'origine però di problemi quando si vogliono mettere a confronto dati sperimentali raccolti sul campo relativi a forni con caratteristiche diversificate.

In questa esposizione verranno considerati due metodi di misure:

- metodo descritto nel documento IEC868 con l'introduzione di un'unità di misura, PST (Perturbation Short Time) ricavabile attraverso una procedura di calcolo di tipo statistico e che fornisce i valori di flicker mediati in intervalli di tempo di 10 min [29].
- metodo sviluppato dalla GE (General Electric) con la creazione di curve che delimitano condizioni di visibilità o di irritabilità legate al flicker [30].

Un sistema efficace per ridurre il flicker, applicabile a forni sia in CC sia in CA, denominato SCV (Static Var Compensator) permette la compensazione pressoché istantanea delle rapide variazioni della potenza reattiva assorbita dal forno.

La Fig. 7 illustra come avviene questa compensazione, con la generazione di una potenza reattiva QSVC da parte dello SVC uguale e di segno opposto a quella, QFEA, generata dal forno [31].

La Fig. 8 mette a confronto il flicker, espresso in PST generato da un forno in CA di 110 MVA in periodi con e senza inserimento dello SVC. Il fattore di riduzione del flicker, conseguente alla presenza dell'SVC è vicino al valore due [31].

Nei forni in CC la corrente può essere rapidamente controllata grazie ai tiristori. Per conseguenza le fluttuazioni di potenza reattiva e quindi il flicker sono minori. Nel confronto con i forni in CA, la diminuzione del flicker, ottenuta con il sistema convenzionale di controllo a tiristori, è dell'ordine del 40% [29].

Se questa diminuzione non è sempre sufficiente ad evitare lo SVC consente almeno di ridurre la taglia e quindi il costo di installazione.

In anni recenti sono stati fatti progressi nella riduzione già alla fonte, ossia all'interno dello stesso sistema di controllo, sia della potenza reattiva che delle sue fluttuazioni rendendo così superfluo l'impiego dello SVC, anche nel caso di reti deboli. Questa tecnologia ha trovato la prima applicazione su un forno in CC da 110 MVA, permettendo di raggiungere valori di PST, misurati alla tensione di rete di 150 kV, pari a 0,59 quando la richiesta da parte della Società erogatrice di energia elettrica era <0,8 [29].

Adottando un diverso ma ugualmente innovativo sistema di controllo applicato ad un forno da 80 MVA, si sono ottenuti, senza SVC, valori di flicker uguali a quelli con un sistema convenzionale ed in presenza di SVC [27].

Un altro modo per ridurre flicker (ed armoniche di corrente) è quello di intervenire sulla causa principale di questi disturbi, ossia sull'arco elettrico.

Il caricamento continuo del rottame la cui fusione avviene prevalentemente all'interno del bagno metallico, evita o riduce la presenza di rottame nella zona dell'arco, diversamente dal caricamento discontinuo dove il rottame circonda l'arco per buona parte del ciclo di fusione. L'effetto risultante è un arco più stabile, con minori variazioni nei livelli di tensione e di corrente conseguenti a corto-circuiti con il rottame.

Per vedere quale è l'effetto della modalità di caricamento sui parametri elettrici sono state fatte prove di confronto su un forno alimentato in modo discontinuo mediante ceste o in modo continuo. È stato scelto un forno in CA da 30 MVA collegato ad una rete da 100 kV [30].

Il confronto ha riguardato le principali grandezze elettriche: potenza apparente (kVA), potenza attiva (kW), potenza reattiva (kVAR), flicker ed armoniche.

In Fig. 9 è riportato il confronto, per le tre potenze, tra caricamento discontinuo e continuo, durante un periodo di 10

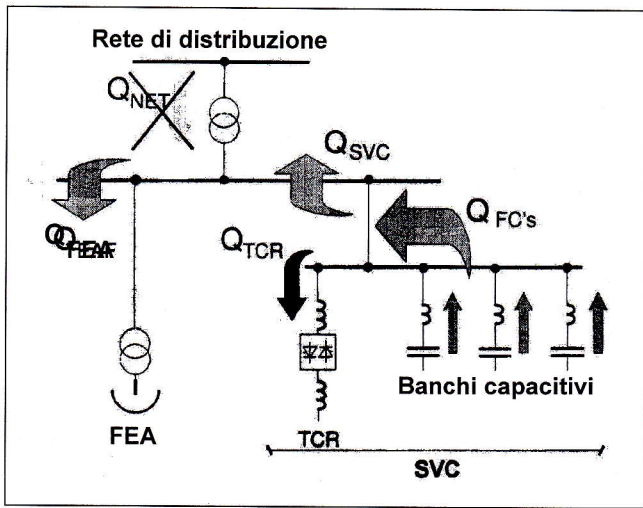


Fig. 7 - Flussi di potenza reattiva in acciaieria elettrica [31].  
 Fig. 7 - Reactive power flows in electric steelmaking.

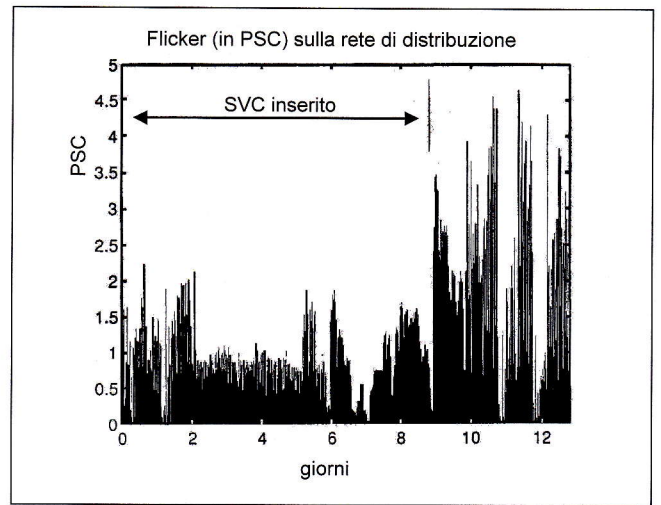


Fig. 8 - Registrazione del livello di flicker in un periodo di due settimane [31].  
 Fig. 8 - Flicker level recording in a period of two weeks.

Fig. 9 - Evoluzione della richiesta di potenza  
 a) con caricamento discontinuo,  
 b) con caricamento continuo[30].

Fig. 9 - Evolution of the power requirement  
 a) with discontinuous charge  
 b) with continuous charge.

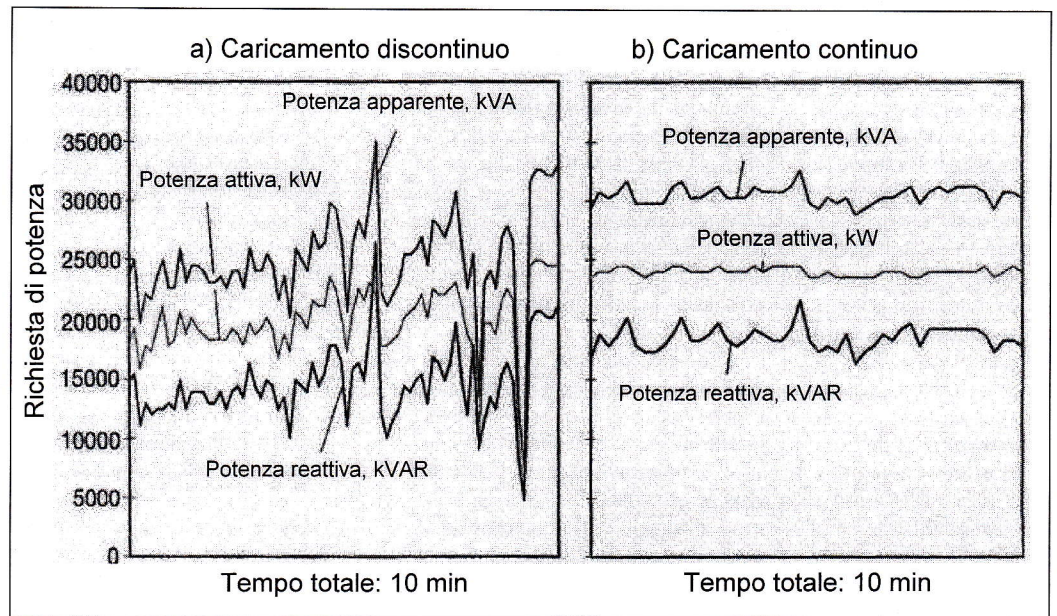
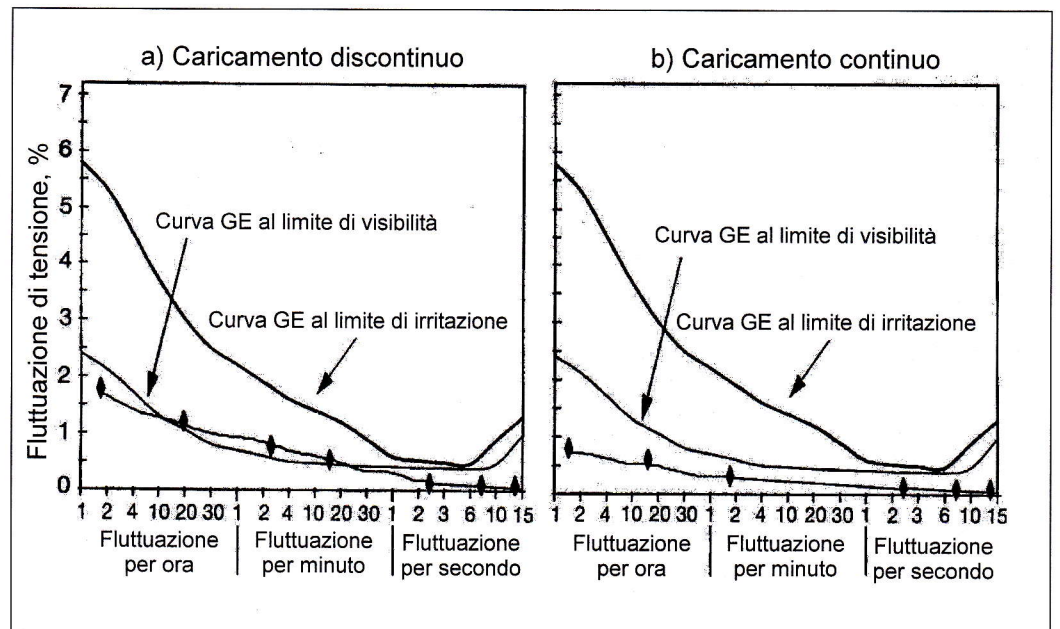


Fig. 10 - Misure di flicker vs. curve GE di flicker [30].

Fig. 10 - Flicker measurements vs. flicker GE curves.



min. L'estrema variabilità di carico nel forno condotto con caricamento discontinuo ha portato a concludere che in questo caso è necessario dotare il forno di uno SVC, per compensare le variazioni di potenza reattiva, mentre con il caricamento continuo risulta sufficiente una compensazione ottenuta con un semplice banco di condensatori.

Le misure di flicker sono state confrontate con le curve standard della GE che indicano i livelli a cui tale fenomeno è visibile all'occhio o può causare irritazione (Fig. 10).

La figura mostra che i livelli di flicker, nel caricamento discontinuo, son al di sotto della curva di visibilità nel caso di valore mediato su un secondo, mentre sono al di sopra nel caso di misure estese al minuto e all'ora, senza però mai superare la curva di irritazione. Nel caso invece di caricamento continuo, i valori si mantengono sempre al di sotto della curva del visibile.

Sulla base di una campagna di misure si è concluso che le fluttuazioni di tensione con caricamento continuo sono solo il 30-40% di quelle con caricamento discontinuo e che pertanto non sono richiesti nel primo caso sistemi di compensazione del flicker [30].

#### 4.3.2 Armoniche

La riduzione della distorsione nella tensione di rete dovuta alle correnti armoniche si ottiene normalmente con l'impiego dello stesso SVC la cui potenza capacitiva installata viene ripartita in una serie di filtri tarati selettivamente.

Un'altra via, applicabile ai forni in CC è quella adottata sul già citato forno da 110 MVA (§ 4.3.1) che riduce contemporaneamente flicker e distorsioni da correnti armoniche senza dover ricorrere al costoso SVC [29].

Infine un'ulteriore possibilità applicabile ai forni sia in CC sia in CA è quella di mantenere l'arco stabile durante tutto il periodo di fusione del rottame, condizione che può venire soddisfatta pienamente solo quando il caricamento del rottame avviene in modo continuo.

È quanto emerge da un confronto fatto tra caricamento continuo e discontinuo utilizzando il forno da 30 MVA di cui al § 4.3.1.

Esprimendo la distorsione totale da armoniche in THD (Total Harmonic Distorsion), da 12% con caricamento continuo si scende a 2,3% con caricamento continuo.

La Fig. 11 mostra l'andamento nel tempo delle correnti di 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, e 7<sup>a</sup> armonica relativa alle due modalità di caricamento [30].

Le considerazioni riportate ai § 4.3.1. e 4.3.2. riguardo flicker ed armoniche possono essere così sintetizzate:

- L'alimentazione in CA, a causa delle caratteristiche degli archi elettrici, è una naturale generatrice di flicker ed armoniche. L'adozione dello SVC permette di risolvere il problema anche se con un aggravio di costo.
- L'alimentazione in CC, grazie al controllo mediante tiristori permette di ridurre flicker ed armoniche, di conseguenza, se lo SVC fosse ancora necessario, viene dimensionato su di una taglia minore, meno costosa. Nuovi sistemi di controllo riducendo il flicker all'origine rendono superfluo lo SVC.
- Forni F.C./D.T. a caricamento discontinuo sono specie nelle fasi iniziali di fusione del rottame, generatori sia di flicker che di armoniche, i cui valori vengono riportati al di sotto dei limiti consentiti solo grazie all'inserimento di SVC o di sistemi equivalenti.
- Forni C.S., avendo un arco stabile durante tutto il periodo della fusione possono non richiedere lo SVC anche quando sono alimentati in CA.
- Forni F.S. Non disponendo di dati di letteratura, si può ipotizzare che il caricamento laterale del rottame, anche se discontinuo, ne riduca la presenza attorno agli elettrodi, sicché in un tentativo di classificazione questo forno verrebbe a posizionarsi tra i due precedenti.

#### 4.4 Inquinamento acustico

Un forno a bassa emissione di rumore (e quindi intrinsecamente ecologico) richiede minori investimenti per portare il livello di rumore ambientale, sia all'interno dell'acciaieria sia nelle aree confinanti, di sotto le norme. Per acciaierie situate in aree urbane o suburbane viene normalmente richiesto di raggiungere al di fuori del confine dell'acciaieria livelli di rumore fra 60 e 70 dB(A) ed in taluni casi (zone destinate al verde, etc.) di scendere anche a 45 dB(A).

Limitando l'analisi alle emissioni acustiche direttamente associate alla fabbricazione dell'acciaio, quantitativamente le più rilevanti, queste vanno distinte in:

- rumore emesso dall'arco elettrico
- rumore emesso dall'impianto d'aspirazione fumi primari e secondari (motori e ventilatori)
- rumore emesso durante il caricamento discontinuo mediante ceste o continuo del rottame.

##### a) Rumore emesso dall'arco elettrico

Un forno F.C./D.T. in CA raggiunge durante la fusione del rottame i maggiori livelli di intensità sonora, 110-115 dB(A), pur con ampia variabilità, che poi decrescono fino a 80-90 dB(A) nella fase finale a bagno piano ed in presenza

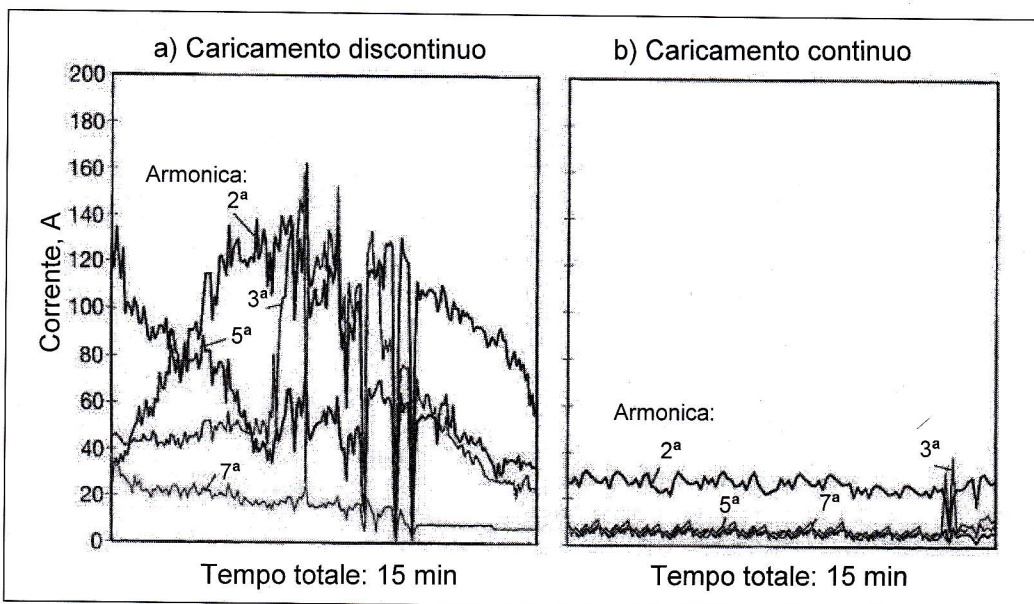


Fig. 11 - Evoluzione nel tempo delle singole correnti di armonica (2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> armonica) [30].

Fig. 11 - Evolution in time of the single harmonic currents (2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> and 7<sup>a</sup> harmonic) [30].

Fig. 12 - Livello di rumore per forno in ca con caricamento discontinuo a) e con caricamento continuo b) [5].

Fig. 12 - Noise level for A.C. furnace with discontinuous charge a) and with continuous charge b) [5].

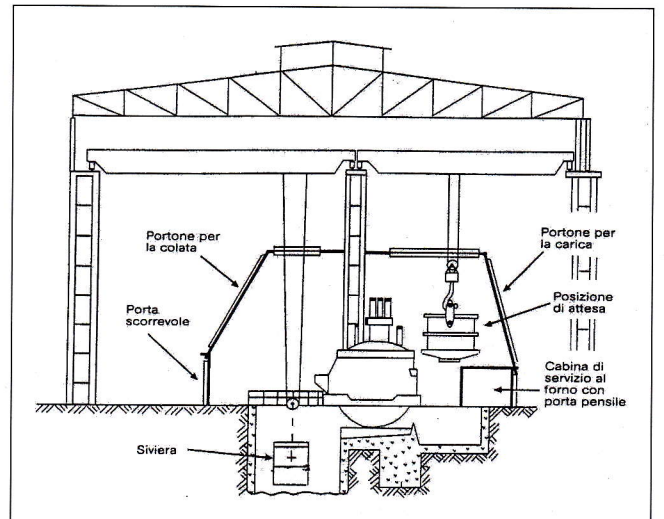
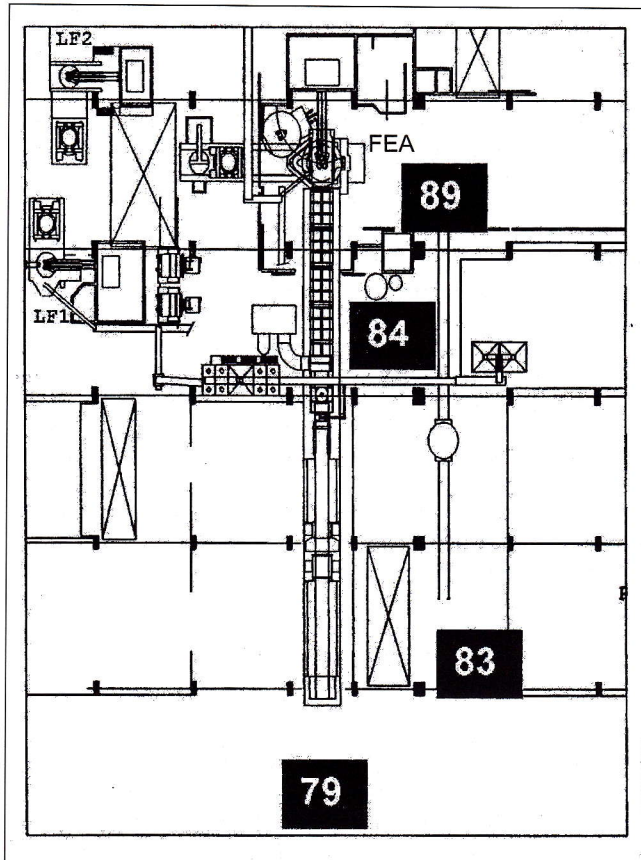
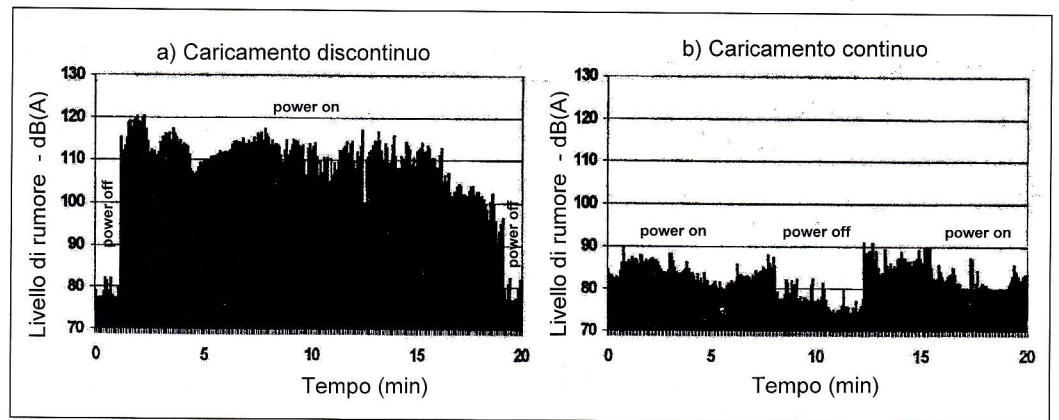


Fig. 14 - Incapsulamento forno (dog-house) [32].

Fig. 14 - Dog house [32].

Fig. 13 - Livelli di rumore nei punti indicati, misurati in dB(A) e mediati su periodi di 30 min [5].

Fig. 13 - Level of sound in the indicated points as measured in dB(A) and mediated on 30 min periods [5].

di scorie schiumose a causa della maggiore stabilità dell'arco e dell'effetto schermante della scoria.

Condizioni risultanti più favorevoli si presentano per i forni C.S. in quanto operano a bagno piano ed in costante presenza di scoria schiumosa durante l'intero periodo della colata.

La Fig. 12 mette a confronto i livelli di intensità sonora per forni F.C./D:T: e per forni C.S., in CA misurati a dieci metri di distanza dalla porta di scorifica, da cui si possono rilevare differenze stimabili in alcuni periodi a 20-30 dB(A)[5].

Per un forno C.S. inoltre (vedi Fig. 13) sono stati misurati i livelli tipici di rumore su periodi di mezz'ora in alcuni punti dell'acciaieria[5].

I forni F.S. si collocano in una situazione intermedia in quanto il caricamento laterale del rottame, nello shaft, pur discontinuo migliora le condizioni di stabilità dell'arco.

Si è constatato infine che l'adozione della CC nella alimentazione elettrica porta, nei confronti della CA, una riduzione alla fonte dell'intensità di rumore stimata in 4 dB(A), a parità di tutte le altre variabili.

Stanti queste differenze legate al tipo di forno e alla alimentazione i metodi principali per abbattere il rumore sono:

- sigillatura del forno in corrispondenza di: alveoli attorno agli elettrodi, volta e porta di scorifica
- incapsulamento del forno all'interno di un vano "dog-house" acusticamente isolato, in comunicazione con l'esterno mediante pareti mobili: portone di carica, di colata, porta di servizio, Fig. 14 [32].
- isolamento acustico di un volume più ampio dell'acciaieria comprendente la campata forno, "elephant-house" attuato con pannelli di cemento rivestiti all'interno di pannelli isolanti.

A parità di risultati richiesti sul livello di rumore ambientale è da ritenere che il forno C.S. rispetto ai forni F.C./D.T. ed in misura minore al forno F.S. necessita di un isolamento acustico ottenibile con soluzioni più economiche o possa farne a meno, affidandosi, per forni di non elevatissima potenza, alla semplice sigillatura.

Nei casi più critici, quando cioè debbano essere soddisfatti standard antirumore particolarmente severi può essere necessario, in aggiunta alle misure indicate, costruire muri antirumore all'interno o sulla linea di confine dell'acciaieria [33].

*b) Rumore emesso dell'impianto di aspirazione fumi*

Barriere insonorizzate insieme a silenziatori offrono soluzioni efficaci e sufficienti. Non vi sono differenze significative a questo riguardo fra i diversi tipi di forno considerati.

*c) Rumore emesso durante il caricamento*

Occorre distinguere fra caricamento discontinuo mediante ceste e caricamento continuo.

Nel primo caso (forni F.C./D.T. ed F.S.) le fonti di rumore sono lo scarico del rottame nelle ceste e lo scarico da queste nel forno. La creazione di un muro antirumore con lo scarico del rottame che avviene ad un livello inferiore a quello del muro riduce la prima fonte.

La seconda fonte viene notevolmente attenuata quando il forno è incapsulato nella "dog-house" ed è prevista al suo interno una posizione di attesa per la cesta in modo da effettuare lo scarico con l'incapsulamento totalmente chiuso.

Per il forno C.S. è sufficiente schermare acusticamente il tratto del convogliatore dove avviene lo scarico del rottame mentre la caduta continua del rottame nel forno non dà emissioni di rumore significative.

In sintesi da questa analisi emerge quanto segue:

- Forni F.C./D.T. sono i più intrinsecamente rumorosi specie nelle fasi iniziali di fusione del rottame di ciascuna cesta.
- Forno F.S. avendo il caricamento laterale, anche se discontinuo, del rottame si colloca in una posizione più favorevole.
- Forno C.S., operando a bagno piano in presenza di scoria schiumosa, ha un'emissione di rumore costante e a bassa intensità.
- L'alimentazione di corrente continua da un contributo aggiuntivo alla riduzione del rumore.

**4.5 Inquinamento radioattivo del rottame**

La presenza nel rottame ferroso di materiale radioattivo è un evento tutt'altro che raro. Esistono dati al riguardo di fonte sia internazionale che italiana.

Dopo l'adozione nel 1997 di un'ordinanza da parte della Giunta Regionale Lombarda che impone l'obbligo della sorveglianza radiometrica per evitare il rischio di fusioni accidentali di materiale radioattivo, nell'arco di un anno circa, sono stati rilevati più di 100 carichi di rottami radiocontaminati, l'84% dei quali costituiti da rottami ferrosi. La provenienza è stata, di solito, nazionale o comunitaria [34].

Il materiale radioattivo può essere fatto rientrare semplificando, in cinque principali tipologie [35]:

- oggetti contaminati superficialmente provenienti da: pozzi di perforazione, impianti nucleari etc. Possono essere individuati non visivamente ma con strumenti appropriati
- materiale irraggiato o contaminato internamente: in genere materiale ferroso nel quale è mescolato intimamente un elemento radioattivo
- piccole sorgenti per usi vari: rivelatori di fumo, parafulmini, quadranti fosforescenti di strumenti vari, etc.
- sorgenti "sigillate" per usi industriali: usate ad es. per: misure di livello, misure di densità, radiografie di saldature
- sorgenti per uso medico: quali ad es.: grandi sorgenti per radio-terapia, piccole sorgenti per irraggiamenti localizzati.

Gli strumenti correntemente utilizzati per individuare la presenza di radioattività nei rottami e basati sulla misura di raggi gamma emessi dalla fonte (rottame radiocontaminato o sorgenti radioattive) vengono distinti in:

- portali radiometrici: posti di norma ai lati dei varchi di passaggio di carichi di rottame (carri ferroviari, autocarri, container)
- strumenti manuali o portatili: insostituibili per la ricerca di sorgenti in rottami a terra o ammassati alla rinfusa.

Le operazioni di controllo della radioattività, sia visive sia

con l'ausilio di strumentazione, sono normalmente fatte durante le fasi di raccolta e di preparazione del rottame da parte di ditte specializzate, a seguito delle quali il rottame, considerato come rifiuto, assume lo status di materia prima secondaria.

Un ulteriore controllo avviene all'ingresso dell'acciaieria dei carichi di rottame facendo normalmente uso degli anzidetti portali. Tali strumenti, pur dotati di altissima sensibilità, non eliminano completamente la possibilità di far passare sorgenti radioattive anche ad alta densità ma molto bene schermate (come ad es. le sorgenti appartenenti alle ultime due tipologie elencate). Questi schermi fortunatamente non "fermano" del tutto le radiazioni pertanto le sorgenti sono sempre individuabili purché vengano rimosse le cause che sono all'origine della mancata individuazione.

Le cause sono sostanzialmente:

- presenza attorno alla sorgente di importanti masse metalliche che impediscono ai raggi gamma di raggiungere lo strumento di misura. Tale situazione si può presentare quando la sorgente è all'interno di un carico
- presenza di un fondo naturale (insieme di raggi gamma cosmici ed emessi dal sito), che può generare un rumore di fondo paragonabile al segnale debolissimo che si vuole registrare.

Queste due cause possono essere rimosse nei forni a caricamento continuo grazie alla presenza di convogliatore (tipo C.S.) e nei forni a caricamento discontinuo (tipo F.S.) purché lo "shaft" venga alimentato in modo continuo mediante convogliatore, come ipotizzato per nuove installazioni.

In entrambi i casi il rottame si dispone sul convogliatore in un strato relativamente sottile (riduzione delle masse attorno alla sorgente) mentre lo strumento di misura, ad altissima sensibilità, può essere posizionato al di sotto del convogliatore dotando al tempo stesso il convogliatore, nel tratto interessato alla misura, di una schermatura ad alto assorbimento progettata per ridurre in maniera significativa l'intensità del rumore di fondo. Una versione automatizzata di stazione di rilevazione con estrazione automatica del rottame radioattivo, senza perdite di produttività, è l'obiettivo di un progetto CSM (Conveyor Rad-gate) [36].

**4.6 Inquinamento da rifiuti solidi**

In molti paesi da un lato esiste il problema della classificazione dei rifiuti solidi, in relazione all'inclusione o meno nelle specifiche legislazioni in atto od in corso di sviluppo e dall'altro si va facendo strada anche il concetto di processo a zero waste, idealizzandolo come un reale obiettivo perseguibile.

Nei paesi europei si applicano poi degli oneri di significativa entità per l'invio dei rifiuti solidi in discariche più o meno speciali; il relativo valore è più che significativo una volta che venga comparato con il vero e proprio costo di produzione, sospingendo così i tecnici ad esaminare le più differenti tecniche per il riutilizzo di tutti i materiali di risulta del processo produttivo.

I sottoprodotti solidi generati dal forno ad arco includono la scoria, le polveri da forno elettrico ed infine i refrattari utilizzati.

E' naturale considerare i forni F.C. come riferimento di base nei confronti dei forni con preriscaldamento del rottame e con caricamento continuo. L'alimentazione elettrica dei forni non influenza invece la formazione della scoria e delle polveri, almeno in prima approssimazione, poiché quest'ultima è essenzialmente legata a fenomeni in cui la natura della corrente non è coinvolta.

**4.6.1 Scoria del forno elettrico**

Il problema relativo è stato affrontato in una recente indagine ed i risultati sono stati presentati nella Conferenza sul Forno elettrico del 99 [13].

7 8/2000  
7-8/2000

Si è così constatato che la scoria prodotta dal forno elettrico varia tra 78-80 kg/t per gli acciai speciali e 25-200 kg/t per gli acciai al carbonio; nel primo caso andrebbe però considerata anche quella prodotta nei trattamenti fuori forno.

Tra le utilizzazioni possibili della scoria di risulta sono da citare le fabbricazioni stradali, la sostituzione parziale o totale del cemento nella realizzazione di particolari manufatti ed, infine, l'uso come agente limificante.

Sebbene la specifica letteratura non prenda in esame questo tipo di inquinante in modo da consentire un confronto tra le differenti tecnologie, è possibile sviluppare le seguenti riflessioni.

In merito alla quantità di scoria formata i forni F.C. e quelli F.S., dovrebbero attendibilmente risultare indifferenziati. Per contro quelli C.S., se gestiti minimizzando la scorifica, compatibilmente con la qualità dell'acciaio prodotto, possono comportare recuperi maggiori nel passaggio da una colata alla successiva.

Sempre con riferimento ai C.S., la pratica operativa metallurgica che viene realizzata in questi forni comporta dei benefici sulla resa dell'acciaio liquido dell'ordine dell'1%, a ragione del minor contenuto di ossido di ferro nella scoria [15]: infatti la permanenza della scoria schiumosa per tutta la durata della colata mantiene le composizioni più vicino ai valori di equilibrio, con benefici sia sulla qualità metallurgica, sia sui quantitativi di scoria consumati.

Tuttavia mancando degli specifici dati al riguardo, che tra l'altro dovrebbero includere anche gli aspetti metallurgici legati al mix degli acciai fabbricati, non si può assumere che la procedura del parziale spillaggio e l'aumento della resa comportino delle sostanziali differenze tra i C.S. e gli altri due tipi di forni. D'altra parte si è visto che per gli acciai al carbonio il consumo di scoria varia in un ampio intervallo, evidenziando così un prevalente effetto del processo su quello dell'impianto.

Le differenze tra le tecnologie risultano allora come segue:

- Forni F.C./D.T./F.S./C.S.: risultano sostanzialmente indifferenziati;

#### 4.6.2 Polveri da forno elettrico

Le polveri da forno elettrico raccolte, prima che i fumi vengano inviati al camino, risultano pari a 13 e 16 kg/t, rispettivamente per gli acciai speciali e per gli acciai al carbonio [13].

Tale materiale è considerato come uno dei più inquinanti, tanto che in alcuni paesi ne viene previsto un trattamento di stabilizzazione prima dell'invio in discariche speciali. Molto spesso ne è previsto l'invio all'industria non ferrosa per il recupero dello zinco, essendo tale metallo presente con un tenore medio di circa il 21%. In alcuni casi si realizza anche il riciclo nello stesso forno elettrico iniettandolo come polvere, oppure caricandolo nelle ceste sotto forma di pellets.

In merito alle polveri emerge che i forni C.S. generano clamorose riduzioni nel loro sviluppo, realizzando contestualmente anche un naturale arricchimento di zinco senza particolari accorgimenti. Numerosi articoli evidenziano, infatti, una riduzione del 40% del quantitativo di polveri prodotte [15, 26, 37], a cui deve essere associato l'ulteriore effetto su diossine e furani dovuto al ben noto adsorbimento dei clororganici da parte delle polveri è ben noto e quindi meno polveri da trattare implica meno diossine in circolazione.

Si rilevi che simili valutazioni, effettuate con i forni F.S., hanno indicato una analoga riduzione delle polveri, anche se di minore entità; il valore denunciato infatti è dell'ordine del 20% in meno [14].

Le polveri trascinate dai fumi si riducono in ambedue i casi poiché, come è noto, possono perdere di velocità sia per la lunghezza dell'impianto in cui il rottame è posto a preriscaldare, sia per l'urto con lo stesso rottame. Alle riduzioni del 40 e del 20%, indicate più sopra, si deve aggiungere l'ulteriore

effetto di una selezione granulometrica che è comunque da attendersi nelle circostanze in esame. In ogni caso le polveri rimaste intrappolate nel rottame, quelle con la granulometria più elevata, una volta rientrate nel forno si rimescolano con la scoria, determinandone un naturale arricchimento in Zn e di altri metalli.

Ulteriormente deve essere precisato che alcuni autori hanno evidenziato che la produzione specifica di polveri non è invariante con il quantitativo di acciaio prodotto [18], ovvero tale grandezza non è la sola che determina la quantità di polvere sviluppata: ad esempio la capacità del sistema di aspirazione fumi può avere un effetto rilevante. Si comprende allora che un prevedibile restringimento dei limiti tollerati dalle normative porterà ad un esame critico della situazione impiantistica che va ben oltre la tipologia del forno elettrico utilizzato; naturalmente tale esame critico risulterà più severo per i forni caratterizzati da un più elevato impatto ambientale da polveri.

In definitiva per quanto concerne polveri da forno elettrico e tecnologie siderurgiche risulta quanto segue:

- Forni F.C./D.T.: sono quelli con un maggiore impatto ambientale;
- Forni F.S.: risultano migliorativi rispetto agli F.C.;
- Forni C.S.: è la tecnologia a minor impatto ambientale per quanto concerne la polveri da forno elettrico.

#### 4.6.3 Refrattari usati

Il consumo di refrattari è ovviamente funzione del tipo utilizzato, oltre che del particolare processo impiegato per produrre l'acciaio, come evidenzia la seguente tabella [13]:

Utilizzo	Media	Variazione
Mattoni	0,6	0,06-16
Riparazione a spruzzo	2,0	0,3-9,0
Formatura	0,9	0,06-10
	Kg/t	

Ovviamente non tutti i refrattari utilizzati sono adatti al riciclo e per alcuni tipi non si può fare altro che inviarli in discarica; in particolare questo è il destino dei tipi alluminosi. Tra quelli riutilizzabili si citano i mattoni carbonio magnesiaci: il relativo impiego è l'uso per il foro di colata o come additivo della scoria, oltre che la cessione al fabbricante degli stessi mattoni originali. Tale ultima soluzione può essere adottata anche nel caso dei mattoni alluminio magnesiaci.

In merito ai refrattari di risulta e quindi al quantitativo di materiale generato, non si evincono evidenze sperimentali in grado di differenziare le varie tecnologie elettrosiderurgiche. Pertanto, similmente al caso della scoria, si possono sviluppare solo alcune considerazioni di massima non consolidate però da specifici lavori.

In primo luogo è evidente che l'utilizzo di rottame preriscaldato sollecita meno il forno, rispetto ad un F.C.; il tempo di power on è minore se parte o tutto il rottame entra già preriscaldato nel forno (vedi Tab. II).

Poiché anche gli ultimi shaft furnace con finger sono in grado di preriscaldare tutta la carica, sembra ragionevole affermare che esiste comunque un minor impatto ambientale per quanto concerne la produzione di refrattari di risulta per tutti i forni dotati di preriscaldamento, rispetto ovviamente agli F.C. Ulteriormente si rilevi che mentre la collocazione laterale dello shaft comporta una metà del forno scoperta all'effetto erosivo dell'arco, i forni C.S. lavorano con una potenza elettrica minore per tutta la durata della colata: ne segue una presumibile minor formazione di refrattari di risulta per questo tipo di forni.

La Tab. II indica un consumo medio di refrattari pari a 3,1 e

3,3 kg/t rispettivamente per i forni in CA e CC; sia pure nell'ambito della ridotta numerosità dei dati e dell'ampia variabilità di essi, si comprende come il consumo di refrattari dei forni in corrente continua, ormai più che consolidati industrialmente, non si discosti da quello dei forni alimentati in corrente alternata. Il punto ritenuto sovente come più critico è quello dell'anodo dei forni in CC, ma i relativi consumi di 0,14 e 0,13 kg/t, dichiarati da alcuni autori [3, 10], implicano una incidenza di questa voce soltanto dell'ordine del 5% sul consumo totale dei refrattari.

Anche in considerazione di quanto appena esposto, la mancanza di specifici dati al riguardo porta infine alla seguente differenziazione tra le tecnologie:

- Forni F.C./D.T.: sono i forni che producono una maggiore quantità di refrattari di risulta.;
- Forni F.S./C.S.: sostanzialmente indifferenziati tra loro, ma superiori rispetto agli F.C.;

#### 4.7 Tecnologie di trattamento dei residui

Al § 4.6.2. si è evidenziato che le tecnologie che prevedono il preriscaldamento del rottame sono anche quelle che generano meno polveri FEA.

Pur in presenza di quantitativi minori, occorre in ogni caso dare una risposta al problema del loro trattamento o smaltimento in discarica.

La seconda soluzione sarà sempre meno praticabile in futuro sia perché in contrasto con le raccomandazioni espresse dal decreto Ronchi del 1997 sia perché non ammessa qualora nelle polveri venisse riscontrata la presenza di diossina.

Il riciclo nel forno elettrico delle polveri eventualmente bricchettate o pellettizzate è una pratica non priva di inconvenienti di tipo operativo e che in ogni caso non elimina le polveri ma ne riduce solo i quantitativi da trattare o da smaltire. In Italia i più diffusi processi di trattamento e livello industriale sono il Waelz per polveri provenienti prevalentemente dalla fabbricazione degli acciai al C e il PLASMINOX (processo ad arco-plasma) per polveri da acciaio inox e al C[38]. Sono entrambi processi pirometallurgici che operano a 1200-1300 °C (Waelz) e a 1500-1600 °C (PLASMINOX) quest'ultimo con apporto di calore da arco-plasma.

Il processo ad arco-plasma ha il principale vantaggio di generare una scoria priva di tossicità residua, di termodistruggere, per effetto delle altissime temperature, l'eventuale diossina presente ed in prospettiva di rappresentare lo smaltitore ideale per residui e scarti di lavorazione compatibili, secondo il concetto di "upsizing".

Per upsizing si intende l'aggregazione di residui/scarti fra loro compatibili (a valore zero o negativo) provenienti normalmente da cicli industriali diversi che attraverso un idoneo trattamento danno origine a prodotti derivati, a valore aggiunto, generano energia e/o termodistruggono sostanze tossico-nocive[39].

Nella pratica si tratta di selezionare gruppi di residui compatibili e per questi individuare un processo di trattamento da attuare mediante impianto polivalente con l'obiettivo di ridurre il costo unitario di trattamento rispetto a quello con impianti specializzati sul singolo residuo la cui scala, per i volumi di materiali disponibili, risulta economicamente inadeguata.

In Fig. 15 è riportato lo schema di un impianto ad arco-plasma monolettrodo in corrente continua, per impieghi polivalenti.

Questo impianto, la cui scala, in uno studio di fattibilità del CSM[38], è stata tarata sul residuo base (65000 t/a di polveri FEA) e su residui di origine siderurgica è contemporaneamente in grado di trattare residui e prodotti a fine vita di varia provenienza nazionale, in particolare: oli non riciclabili o contenenti PCB, polveri da cubilotto, pneumatici frantumati comprendenti la frazione metallica, pile e batterie esauste (alcaline, Zn-carbone, Ni-Cd, Ni-MH), medicinali scaduti.

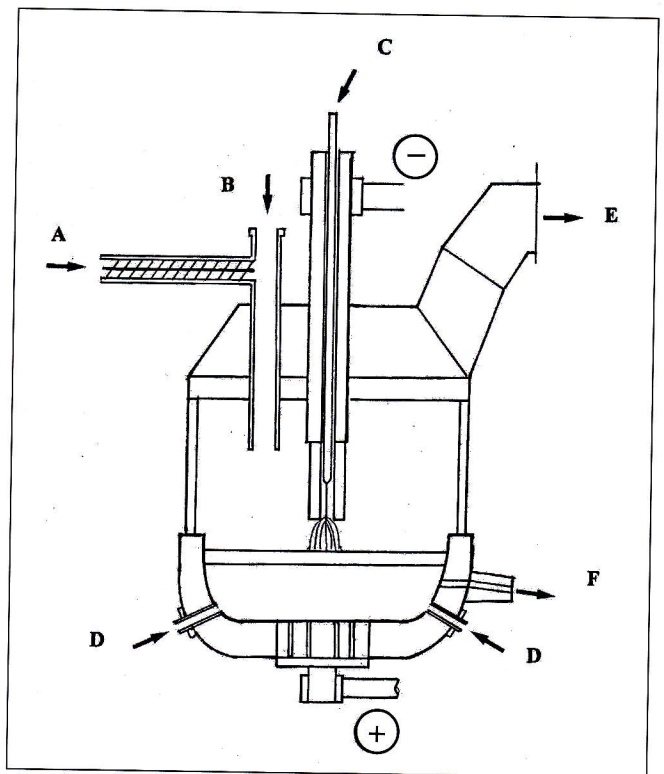


Fig. 15 - Schema impianto ad arco-plasma per il trattamento di rifiuti compatibili.

A, B, C, D: polveri FEA, pneumatici non rigenerabili, pile esauste, farmaci scaduti, oli non riciclabili.  
E: fumi.  
F: scoria, ferrolega.

Fig. 15 - Scheme of an arc-plasm plant for the treatment of wastes.

A, B, C, D: FEA dusts, non-recyclable tyres, exhausted batteries, expired medicines, non recyclable oils.  
E: fumes.  
F: slag.

All'interno del forno avvengono reazioni che portano alla riduzione degli ossidi metallici, alla generazione di energia chimica, a parziale sostituzione di quella elettrica, alla termodistruzione e decomposizione molecolare di sostanze pericolose contenute nei medicinali, negli oli contaminati da PCB, etc.

I sottoprodotti risultanti da queste reazioni sono:

- ferrolega da riutilizzare come carica al forno elettrico nella fabbricazione di acciai speciali
- scoria inerte, per sottofondi stradali o da mandare in discarica
- ceneri ad alto contenuto di ZnO e dove si concentrano altri metalli volatili come Cd e Pb. Le ceneri costituiscono la materia prima per processi elettrolitici volti al recupero di ciascun metallo.

L'applicazione dell'"upsizing", permette di ridurre grandemente i costi di trattamento, portandoli, come nel caso delle polveri FEA, al di sotto del costo di discarica, purché si operi con un impianto tipo "multi-client" dimensionato per una utenza interregionale.

## 5. CONFRONTO FRA LE TECNOLOGIE

### 5.1 Confronto ambientale

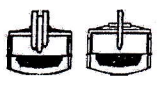
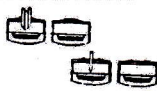
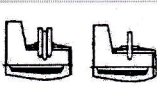
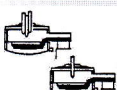
Il forno elettrico, quando corredato di tutte le attrezzature ed impianti integrativi (sistema captazione e trattamento fumi, incapsulamenti, barriere anti-rumore, strumenti per l'individuazione di fonti radioattive etc.) è potenzialmente in grado

Fig. 16 - Valutazione semiquantitativa delle tecnologie siderurgiche.

Fig. 16 - Semiquantitative evaluation of steelmaking technologies.

Variabili ecologiche	F.C./DT		F.S.		C.S.	
	CA	CC	CA	CC	CA	CC
VOC's						
CO-CO2						
NOx						
Diossine						
Armoniche						
Flicker						
Rumore						
Scoria						
Polveri						
Refrattari						
Rottame radioattivo						

Tab. III

TIPO FORNO	Fornitore	Caricamento	Preriscaldamento rottame	Vantaggi/Svantaggi Euro/t
Forno convenzionale (F.C.) 	principali costruttori	discontinuo	no	0
Forno a doppio tino (D.T.) 	principali costruttori	discontinuo	no	-1
Forno "Finger Shaft" (F.S.) 	VAI-FUCHS	discontinuo	si	+2,5
Forno "CONSTEEL" (C.S.) 	TECHINT	continuo	si	+2,5

di rispettare anche le più severe norme ambientali, ma con costi di investimento diversi.

Ciò in relazione al fatto che, come esplicitato nei paragrafi precedenti, esistono in realtà profonde differenze fra i forni riguardo il loro impatto ambientale intrinseco, secondo la definizione data al § 2.

Per sintetizzare queste differenze è stata costruita la Fig. 16 dove compaiono i tipi di forno esaminati e le variabili ecologiche ad essi associate. A ciascuna di queste è stata attribuita una tonalità di grigio che va dal grigio scuro al grigio chiaro, se si procede nella direzione di impatto ambientale decrescente.

Pertanto ogni forno si caratterizza per una diversa gamma di grigi che indica un forno intrinsecamente ecologico quando vi è la prevalenza di grigio chiaro.

Appare così evidente come i forni dotati di preriscaldamento e caricamento continuo, cioè i C.S., siano quelli in grado di esprimere la maggiore potenzialità ecologica; ulteriormente le versioni in CC risultano sempre (con riferimento a: flicker, armoniche e rumore) a minore impatto ambientale, a parità di tecnologia siderurgica prescelta.

In aggiunta alle considerazioni sin qui sviluppate, finalizzate ad un confronto tra i forni elettrici circa tecnologia, produttività, consumi ed impatto ambientale, occorre completare il quadro con una valutazione economica delle diverse tecnologie.

### 5.2 Confronto tecnico-economico

Per un confronto delle tecnologie dal punto di vista non solo

ecologico, ma anche economico, si può far riferimento al già citato studio IISI[6] che, pur partendo da considerazioni diverse, arriva a selezionare gli stessi tipi di forno che sono stati oggetto di questo lavoro.

Non viene fatta distinzione fra forni in CC ed in CA in quanto, sulla base delle esperienze accumulate e dei progressi registrati negli ultimi 10 anni è stato ritenuto che, in termini di produttività e costi di trasformazione, non vi siano differenze significative fra i due tipi di alimentazione.

Il forno convenzionale (in CC o in CA) è stato preso a riferimento ed il confronto ha riguardato, oltre ai parametri indicatori dell'impatto ambientale, anche quelli tradizionali: consumo di energia elettrica e chimica, personale, materiali di consumo, produttività ed investimenti.

Esprimendo in Euro/t i vantaggi/svantaggi di ciascuna tecnologia nei confronti di quella convenzionale si rileva dalla Tab. III che i vantaggi per i forni F.S. e C.S. sono dell'ordine di 2.5 Euro/t.

Il forno D.T. risulta invece essere penalizzato per -1 Euro/t tanto che, sulla base dell'esperienza odierna, non sarebbero più giustificate nuove installazioni.

### 5.3 Confronto con tecnologie emergenti

Assieme alle tecnologie descritte, messe a punto attraverso esperienze maturate su più forni, ne esistono altre a vari stadi di sviluppo: da progetto fino alla realizzazione su scala industriale.

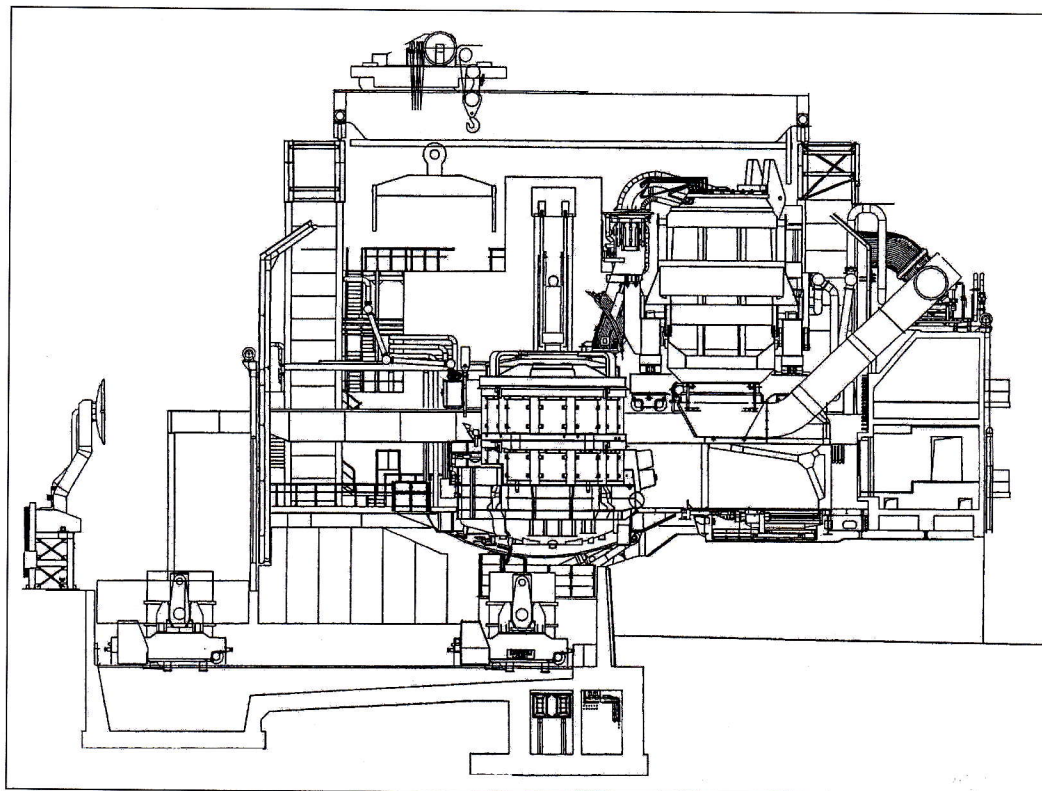
Queste tecnologie sono raccolte nella Tab. IV. Il gruppo più numeroso (DANARC PLUS m<sup>2</sup>, IHI-bielettro-

Denominazione forno	Costruttore	Stadio cod.	N° forni n°	Tipo carica cod.	Caricamento cod.	Preriscaldamento cod.	Alimentazione	
							n° elettrodi CC	n° elettrodi CA
DANARC PLUS M2	DANIELI	industriale	1	rottame	discontinuo	si	1	/
BIELETTRODO C.C.	DANIELI	industriale	2	rottame	continuo	no	2	/
BIELETTRODO C.C.	IHI	industriale	1	rottame	continuo	si	2	/
CONARC	SMS/DEMAG	industriale	1	rottame preridotto ghisa liquida	discontinuo continuo	no	/	3
CONTIARC	SMS/DEMAG	industriale	1	rottame	continuo	si	1	/
ECOARC	NKK	pilota	1	rottame	semicontinuo	si	1	3
COMELT	VAI	pilota	1	rottame	continuo	si	4	/
VERTICON	SMS/DEMAG	progetto	0	rottame	continuo	si	1	3
LEAF	BSE	progetto	0	rottame	discontinuo	si	1	3

Tab. IV

Fig. 17 - Forno DANARC PLUS m<sup>2</sup> [40].

Fig. 17 - DANARC PLUS m<sup>2</sup> Furnace [40].



do, CONTIARC, ECOARC, VERTICON e LEAF) [40, 41, 42, 43, 44, 45] è costituito da forni ad alta produttività ed alimentati da rottame, progettati per ridurre assieme all'impatto ambientale (forni intrinsecamente ecologici) il consumo di energia elettrica. Pertanto tutti prevedono sistemi di preriscaldamento del rottame e l'adozione delle più moderne tecniche di impiego dell'O<sub>2</sub>.

In questi forni, con l'esclusione del DANARC PLUS m<sup>2</sup> e del LEAF, prevalgono tecniche di caricamento rottame continuo o semicontinuo.

L'alimentazione è sempre in CC per i forni su scala industriale, oppure viene proposta sia in CC che in CA per i forni ancora allo stadio pilota o di progetto.

In un elenco a parte vanno inseriti il forno bielettrodo in CC della Danieli [46] ed il forno CONARC [47], in quanto sono nati per trattare materie prime costituite prevalentemente da preridotti, ghisa liquida e solo marginalmente da rottame; ciò ha richiesto l'adozione di soluzioni tecnologiche non estendibili ad una carica con solo rottame.

Il DANARC PLUS m<sup>2</sup>, prototipo industriale installato presso l'Acciaieria Bertoli-Safau (ABS) e di cui in Fig. 17 è rappresentata una vista, adotta un originale sistema di preriscaldamento con carica monocesta per forno ad alto tino di elevata capacità volumetrica.

I vantaggi dichiarati, oltre ad elevata produttività con bassi consumi, sono di natura ecologica.

In definitiva, la preferenza accordata dai costruttori dei forni di nuova generazione al preriscaldamento del rottame, ed in linea subordinata al caricamento continuo/semicontinuo del rottame e all'alimentazione in CC, non fa che confermare partendo da un diverso approccio, le conclusioni cui si è giunti al § 5 dall'analisi dei forni industriali a tecnologia consolidata.

## 6. CONCLUSIONI

Il forno elettrico svolge una duplice funzione: a) essere il migliore riciclatore di rottame che, all'origine, prima di es-

sere condizionato/selezionato e diventare materia prima è considerato un rifiuto, e b) trasformare questa materia prima in acciaio di qualità con una emissione di CO<sub>2</sub>, comprensiva anche della frazione per produrre l'energia elettrica di fusione, inferiore a quella con il ciclo integrale.

Queste considerazioni, assieme ai minori investimenti per nuove installazioni, fanno prevedere un aumento, a livello mondiale, della quota di acciaio prodotta al forno elettrico, dall'attuale 33% al 45% entro il 2010.

L'attenzione nel prossimo futuro sarà rivolta non solo ad aumentare la produttività del forno a fronte di bassi consumi, obiettivo già in parte raggiunto, ma anche a ridurre in maniera significativa l'impatto ambientale all'interno e all'esterno dell'acciaieria.

Quest'ultima esigenza è particolarmente avvertita in paesi come l'Italia dove le acciaierie elettriche sono spesso ubicate vicino a zone residenziali ad elevata densità abitativa.

Per acciaierie esistenti occorrerà modificare o sostituire il sistema di trattamento ed abbattimento fumi, installare barriere anti-rumore e, se necessario, revampare il forno; per le acciaierie che prevedono l'installazione di un nuovo forno diventa invece cruciale la scelta di un impianto che sia intrinsecamente ecologico ossia che riduca l'impatto ambientale già all'origine.

Da un'analisi comparativa condotta a livello mondiale su forni esistenti convenzionali od innovativi, e su forni di nuova generazione su scala pilota ed industriale è emerso che i forni con preriscaldamento e caricamento continuo del rottame nel forno oltre ad essere intrinsecamente ecologici possono raggiungere elevate produttività con costi di trasformazione contenuti.

L'alimentazione in corrente continua del forno offre, rispetto a quella in corrente alternata, benefici addizionali in termini di riduzione del rumore generato dall'arco elettrico e di minori disturbi in rete, come flicker ed armoniche.

La presenza nel rottame di sostanze eterogenee (plastiche, oli, rivestimenti, etc.), l'aggiunta durante il processo di fabbricazione di materiali formatori di scoria, portano alla generazione di rifiuti solidi fra cui le polveri raccolte dall'impianto di abbattimento fumi, considerate queste ultime particolarmente inquinanti.

Al riguardo viene proposto un nuovo approccio per il recupero degli elementi di valore contenuti in queste polveri consistente nell'aggregare alle polveri altri rifiuti compatibili provenienti da cicli industriali diversi, secondo il principio dell'"upsizing". Sottoponendo questi materiali ad un idoneo trattamento pirometallurgico, si ottengono prodotti derivati, a valore aggiunto, viene generata energia chimica e vengono termodistrutte sostanze tossico-nocive eventualmente presenti. L'impiego di un unico impianto polivalente consente per tale via di ridurre in maniera significativa il costo unitario di trattamento di ciascun rifiuto.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- 1) J. E. Schindler, L. Hacquard, "Advanced Oxygen Technology for Electric Arc Furnace Steelmaking" *Steel World* Vol. 4. N° 2
- 2) SMS-Demag, "Technological Variants of Electric Arc Melting Processes", 1999
- 3) J. Ehle, et al., "Finger Shaft Technology: Latest Improvements and Results", *Steel World* Vol. 3 N° 2
- 4) U. de Miranda, P. Bosi, "Saving Energy and Protecting the Environment: the First CONSTEEL® Plant in Europe", METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
- 5) E. Lombardi, P. Argenta, "Esperienze Operative alla ORI Martin" Acciaierie ad Impatto Ambientale Zero, Brescia, Novembre 1999
- 6) K.-H. Klein, "Where is EAF Technology Heading?", IISI Special Study on Developments of EAF Technologies, Pittsburgh, Novembre 1999
- 7) S. Köhle, "Improvements in EAF Operating Practices over the Last Decade", IISI Special Study on Developments of EAF Technologies, Pittsburgh, Novembre 1999
- 8) J.-L. Junquè et al., "The New EAF Plant of Profilarbed Berval", METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
- 9) M.D. Lee, et al., "Bottom Refractory Performance in CONSTEEL® and Top Charged DC Furnaces", I&SM, Febbraio 1998
- 10) J. Wolfram, et al., "Operational Results of the 120 t DC-Arc Furnace at Stahlwerk Thüringen, Germany", MTP International 3/1999
- 11) J.-M.J. Dengler, et al., "Success of DC-ARC® Furnace Technology at Stahlwerk Thüringen", METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
- 12) H. Herlitz, "European Developments Concerning the Environment", *Stahl und Eisen*, Aprile 2000
- 13) R. Engel, P. Butterworth et al., "Towards Environmentally Friendly Steelmaking Processes", 1999 Electric Furnace Conference Proceedings
- 14) W. Burgmann et al., "Scrap Preheating Shaft Furnaces-Development and Results", *Steel Times International*, Gennaio 1995
- 15) J.A. Vallomy, "Consteel®, The Best Electric Steelmaking Process for the 21st Century in Terms of Energy and Environment", 1994 Electric Furnace Conference Proceedings
- 16) F. Baldieri, E. Repetto; Osservatorio Tecnologico 1997; Rapporto finale n° TR/R350
- 17) R.R. Geddis, R.V. Chalfant et al. CO, VOC's and NOx Emission Factors for Electric Arc Furnaces; 86th Annual Meeting & Exhibition Denver, Colorado, Giugno 1993
- 18) R.R. Geddis, R.V. Chalfant, "Advanced Approaches to Title V Permits", I&SM Agosto 1995
- 19) E. Kaiser, J. Lehner et al., "Emission Control for Arc Furnace Technology", METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
- 20) I. Titchell, "Comparing Carbon Dioxide Emissions from the Steel Industry", *Steel Times*, Marzo 1999
- 21) J.C. Agarwal and N.S. Jessiman, "Nitrogen Oxide Emission in the Steel Industry", I&SM Agosto 1995
- 22) J.P. Birat, "A Future Study Analysis of the Technological Evolution of the EAF by 2010", 1999 Electric Furnace Conference Proceedings
- 23) B. Lindblad and E. Burström, "A Scandinavian view on Scrap and the Environment", 1992 Steelmaking Conference Proceedings
- 24) C. Werner, "Maîtrise des émissions de micropolluants organiques au four électrique", *La Revue de Métallurgie-CIT*; Aprile 1999
- 25) Optimization of Environment and Related Energy Utilization in Scrap Based Steelmaking; Appendix for Draft Final Report; september 1993 (Agreement No. 7210/CB/901)
- 26) H.H. Herin and T. Busbee, "The Consteel® Process in Operation at Florida Steel", I&SM Febbraio 1996
- 27) M. Ritz et al., "Low Flicker Design for DC Electric Arc Furnace Rectifiers", METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
- 28) *Elettronica Oggi* N. 279-Settembre 1999
- 29) C. Morettin et al., "Minimum Network Disturbances

- for DC EAF Using a Free-Wheeling Diodes Rectifier”, METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
- 30) J.A. Vallomy, C. Fallon, “Continuous Melting in EAF-a Way to Mimimize Flicker and Harmonics”, MTP-Metallurgical Plant and Technology International” N. 4/1997
  - 31) T. Johansson, “State-Of-The Art Var-Compensators Review of Worldwide Experience”, 1999 Electric Furnace Conference Proceedings
  - 32) G. Bisio et al., “Emissioni ed Immissioni Acustiche dell’Industria Siderurgica”, Inquinamento N. 7 Luglio-Agosto 1999
  - 33) A. Sanz, “Danieli Environmental Solutions for Steel Meltshops”, La Metallurgia Italiana, 2/99
  - 34) A. Anversa, V. Carreri, “Provvedimenti Regionali in Tema di Prevenzione dei Rischi di Contaminazione dei Rottami Metallici”, Conferenza Internazionale su: La Radioattività nei Rottami Metallici, Brescia, Giugno 1998
  - 35) A. Gandellini, “La Radioattività nei Rottami Metallici: Conseguenze e Soluzioni”, Giornata di Studi su: “Impatto Ambientale nello Sviluppo delle Acciaierie Elettriche” Giugno 1998
  - 36) CSM, “Automatic Device for Detection of Radioactive Sources in the Scrap of EAF Furnaces”, proposta progetto CECA
  - 37) S. Nakamura et al., “Les résultats d’exploitation du procédé Consteel® et leur signification”, La Revue de Métallurgie – CIT, Aprile 1993
  - 38) G. Vespasiani, M. Magini, E. Repetto, G.R. Todarello, “Pyro and Pyro-hydrometallurgical Technologies for the Treatment of EAF dusts”, METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
  - 39) G. Pauli, “Il Progetto ZERI”, Il Sole 24 Ore, Mondo Economico 26, 1999
  - 40) A. Sanz, G. Lavaroni, “Gestione e Trattamento Avanzati dei Fumi di Forno Elettrico ad Arco”, Acciaierie ad Impatto Ambientale Zero, Brescia, Novembre 1999
  - 41) T. Furukawa, “5000 Annual Tons per Worker at Tokyo Steel”, New Steel, Maggio 1995
  - 42) E. Malamakis, et al., “Contiarc Commissioning of the New Contiarc Process Halvourgia Thessalias”, METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
  - 43) EcoArc: A New Concept in Shaft Furnaces, STEEL TIMES, Gennaio 2000
  - 44) SMS-DEMAG, “Verticon Scrap Preheater Combined with SMS Electric Arc Furnace System”, 1998
  - 45) K.-H. Klein et al., “The BSE Low Energy Electric Arc Furnace (LEAF)” METEC Congress 99, Düsseldorf, Giugno 1999
  - 46) W.A. Opalka, “DC Arcs Make Power Play in Electric Furnace Present and Future”, I&SM, Gennaio 2000
  - 47) A.T. Holmes, “Saldanha Steel Project: The Zero Emission Philosophy”, 1997 Ironmaking Conference Proceedings
  - 48) Danieli Centro Met, “Advanced Melting Technologies”, 1996

ABSTRACT

**THE ELECTRIC-ARC FURNACE: TECHNICAL OPTIONS AND ENVIRONMENTAL PROTECTION**

Various technologies for the manufacture of steel at the electric-arc furnace (EAF) are compared. They differ for the power supply (DC or AC) used, the scrap charging system that can be continuous or discontinuous and the availability of a preheating system.

This comparison addresses both productivity and consumption figures of the EAF as well as its environmental impact in terms of noise, electric disturbances (flicker and harmonics), gas emissions in the atmosphere (dioxin, VOC's, NOx, CO, CO<sub>2</sub>, etc.), solid wastes (bag-house powder, refractory material and slag) and radioactive sources in the scrap.

Either latest-generation furnaces of conventional design or furnaces having innovative characteristics have been selected for comparison, provided the latter were installed in a sizeable number of steelworks.

The EAF has been defined as a plant assembly including a melting unit and its electric supply, a scrap loading system and a scrap preheating plant, if provided. Starting from this

definition, the study has highlighted significant differences in the performance of the individual furnaces and especially in the parameters expressing their environmental impact.

In this respect, the selection of the equipment (off-gas treatment system, anti-noise barriers, anti-flicker systems) that can ensure compliance with the environmental regulation – which is especially strict if the steelworks is located near a human settlement – requires investments that strongly depend on the furnace characteristics.

The study has also emphasised the evolution of the EAF technology. This evolution has been confirmed examining the characteristics of the latest-generation furnaces on either pilot or industrial scale, but still at a prototype stage.

Finally, the disposal of solid wastes which are output by the steel production process is dealt with. A pyro-metallurgical technology based on plasma-arc treatment of the EAF dusts collected from the bag-house is illustrated.

Aggregation of EAF dusts with other chemically compatible wastes from different industrial routes together with scrapping items is suggested. All these waste types would be treated in one larger-size integrated plant in order to reduce treatment costs.