

STEELMASTER 2000

Tesi di fine corso

Il reattore ibrido: la siderurgia del futuro?

Relatori
Ing. E. Repetto
Dott. F. Baldieri

Candidato
Gianluca Pulieri

Terni, Gennaio 2001

Indice.

1. Premessa.....	3
2. Caratteristiche costruttive e cicli di produzione di reattori ibridi.....	6
2.1 Ciclo produttivo dell'impianto CONARC.....	7
2.2 Ciclo produttivo dell'impianto ARCON.....	8
2.3 La tecnologia iCSMelt del CSM.....	8
2.3.1 Stima del consumo di energia elettrica.....	10
2.3.2 Definizione del ciclo operativo.....	11
3. Stime dell'emissione di anidride carbonica e della produzione di rifiuti.....	12
3.1 Stima dell'emissione di CO ₂ per un ciclo di produzione dell'acciaio da FEA.....	14
3.2 Stima dell'emissione di CO ₂ per un ciclo integrale di produzione dell'acciaio.....	16
3.2.1 Stima della CO ₂ emessa in convertitore.....	16
3.2.2 Stima della CO ₂ emessa in altoforno.....	16
3.2.3 Stima della CO ₂ emessa in cokeria.....	17
3.3 Stima dell'emissione di CO ₂ per un reattore ibrido.....	19
3.4 Stima della produzione di rifiuti da FEA, ciclo integrale e reattore ibrido.....	20
4. Valutazione dell'impatto ambientale dei cicli di produzione dell'acciaio.....	21
4.1 Materials ecology ed 'environmental load'.....	21
4.2 contenuto del Protocollo di Kyoto.....	23
4.3 Contributo della produzione da reattore ibrido alla riduzione delle emissioni di CO ₂	24
4.4 Contributo del ciclo con reattore ibrido alla riduzione della produzione di rifiuti.....	25
5. Effetto dei residuals sulle proprietà dell'acciaio da FEA.....	25
5.1 Effetto dell'azoto.....	25
5.2 Effetto dell'idrogeno.....	26
5.3 Effetto del rame.....	27
5.3.1 Impieghi dell'acciaio e residuals nel rottame.....	27
6. Conclusioni.....	29
Bibliografia.....	31

1. Premessa.

Da più parti, il 21° secolo è stato definito come il 'secolo dell'ambiente': qualsiasi industria, oggi, non può condurre la propria attività trascurando l'impatto ambientale dei processi di lavorazione. Lo sforzo deve essere rivolto al bilanciamento fra attività produttiva e salvaguardia dell'ambiente, concetto noto già dagli anni '70 e '80 come 'sviluppo sostenibile': la Commissione per l'Ambiente e lo Sviluppo dell'ONU coniò il termine nel 1987, sostenendo che tutela ambientale e sviluppo economico dovevano agire in sinergia.

Oggi, i continui e importanti cambiamenti climatici riportano all'attenzione del grande pubblico e delle istituzioni la necessità di ridurre le emissioni inquinanti. D'altra parte, alcuni progressi dei negoziati internazionali ed in particolare quelli registrati dalla Conference of the Parties (COP-3) tenutasi a Kyoto dall'1 al 10 Dicembre 1997, hanno trasferito il tema delle emissioni inquinanti e dell'effetto serra dalla sfera scientifica a quella delle strategie di intervento: si valuta la possibilità di imporre limiti alle emissioni inquinanti specifici per ogni Paese industrializzato, tasse 'ecologiche' sulle emissioni di CO₂ o sul consumo energetico.

Il settore industriale è largamente interessato a tali problematiche, come evidenzia il grafico in figura 1 che riporta, per l'Italia, la suddivisione per settori economici delle emissioni di CO₂ dal 1990 al 1998.

Nell'ambito della produzione industriale, gli sforzi sono rivolti alla ricerca di processi tecnologici a minore impatto ambientale, ma in grado di fornire prodotti con prestazioni ugualmente eccellenti: se da una parte si vuole la salvaguardia dell'ambiente, dall'altra si è coscienti del fatto che le leggi del mercato impongono la fornitura di prodotti con

caratteristiche idonee all'impiego.

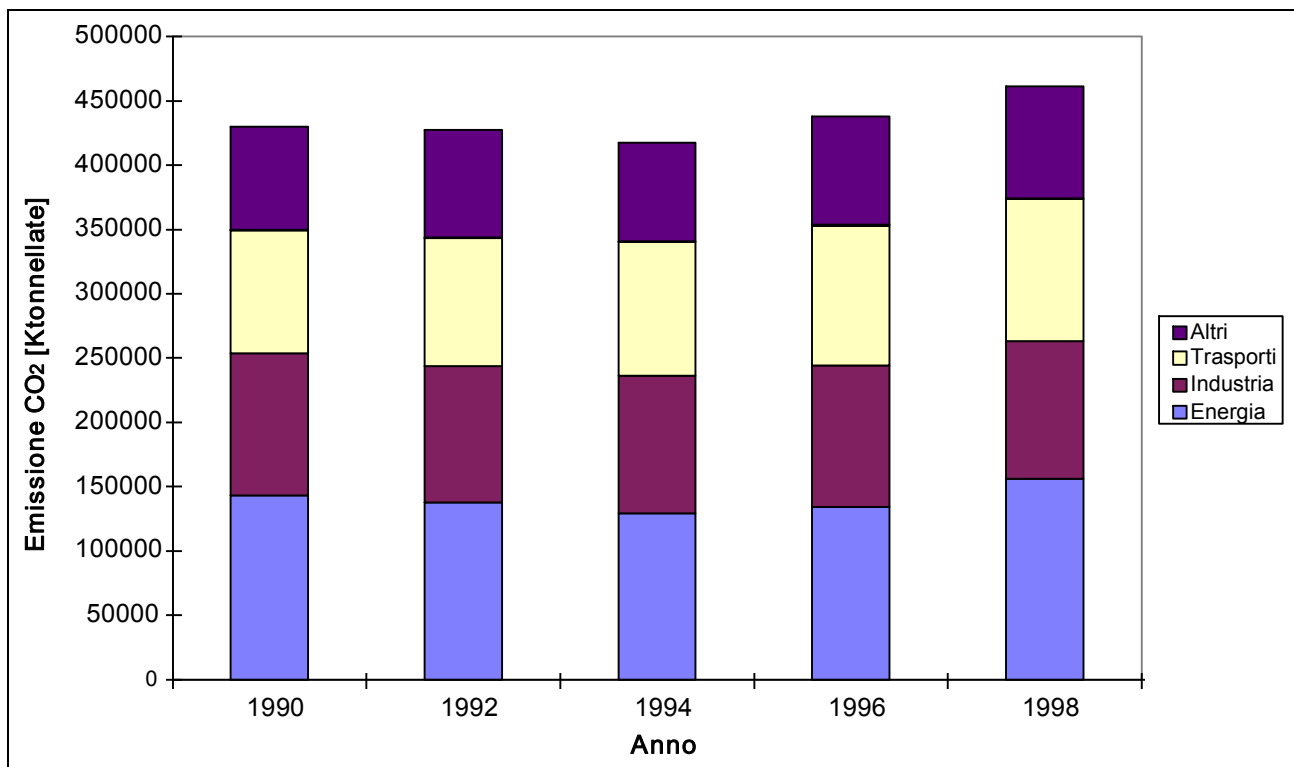


Figura A: Emissioni di CO₂ per l'Italia dal 1990 al 1998, per settori economici [elaborazione da (6)].

In questa tesi, l'attenzione è stata posta sulle potenzialità di un ciclo di produzione dell'acciaio con reattore ibrido, che utilizzi in carica dal 30 al 70% di ghisa. Tali forni rappresentano da una parte l'opportunità per la siderurgia elettrica di acquisire nuove porzioni di mercato e dall'altra un contributo all'abbattimento delle emissioni di CO₂ e della produzione di rifiuti da parte del settore industriale. Infatti, il reattore ibrido è in grado di fornire un prodotto da impiegare in quelle fasce in cui l'acciaio da ciclo integrale è utilizzato in condizioni di *overquality*, ma, comunque, preclude all'acciaio da siderurgia elettrica. Inoltre, l'impiego di acciaio da reattore ibrido al posto dell'acciaio da ciclo integrale, nei limiti prima descritti, rende pertinente stimare l'emissione di CO₂ e la produzione di rifiuti in termini di riduzione rispetto ai livelli propri della produzione di

acciaio da ciclo integrale.

Infine, è da considerare l'attuale tendenza della qualità del rottame a disposizione. Tradizionalmente, la carica di un FEA è costituita dal 70% al 100% di rottame. Ciò premesso, è evidente come la composizione dell'acciaio prodotto al FEA sia legata alla composizione del rottame utilizzato e la produzione di acciaio destinato a determinati impieghi risenta della disponibilità di rottame selezionato.

Il progressivo degrado temporale della composizione dei rottami [riportato, ad esempio, in (3)], dovuto al continuo aumento dei tramp elements in essi contenuti, unito all'incertezza dei prezzi registrati dai rottami di qualità, ha spinto il settore della siderurgia elettrica a ricercare fonti alternative che sostituiscano il rottame in carica (AIS - Alternative Iron Sources): preridotto (DRI / HBI), ghisa allo stato solido (CPI - Cold Pig Iron) e ghisa liquida (HM - Hot Metal). Ancora oggi, tuttavia, l'importanza relativa di tali fonti 'alternative', può essere ricavata dall'analisi di alcuni dati riferiti al 1995 [(3)]: acciaio prodotto per FEA: 245 Mt; consumo di rottame: 231,4 Mt; consumo di preridotto DRI: 30,2 Mt; consumo di ghisa solida 6,4 Mt. Le ragioni di tale evoluzione sono da ricercare essenzialmente nella scarsa convenienza economica della produzione del preridotto, tranne che in alcune aree come gli Stati Uniti.

La carica mista, costituita da rottami e ghisa liquida, sembra essere, quindi, la strada da percorrere in tutte quelle regioni i cui la produzione di preridotto non è economicamente vantaggiosa. Ciò comporta, tuttavia, lo studio di soluzioni che portino allo sviluppo di un forno 'ibrido'. Infatti, per vincoli tecnologici ed impiantistici, il forno ad arco non può caricare più del 30% di ghisa; al contrario, il convertitore non riesce ad utilizzare tenori di rottame in carica superiori al 30%.

In questo lavoro, dopo aver mostrato il funzionamento e le caratteristiche di alcuni

impianti già esistenti o progettati, utilizzando carica mista, si espone il progetto di reattore ibrido studiato dal CSM e denominato iCSMelt. Valutata l'emissione di CO₂ e la produzione di rifiuti per un forno elettrico tradizionale e per un impianto a ciclo integrale, si stima l'emissione di CO₂ e la produzione di rifiuti per un reattore ibrido. In particolare l'abbattimento delle emissioni di CO₂ viene valutato in termini di contributo alla quota di emissioni fissata per l'Italia dal protocollo di Kyoto. Dal punto di vista dell'impiego del prodotto siderurgico, si evidenziano i limiti del prodotto ricavato da forno elettrico tradizionale, dovuti alla presenza di tramp elements, e le fasce di mercato acquisibili per mezzo dell'uso di una carica mista.

2. Caratteristiche costruttive e cicli di produzione di reattori ibridi.

La ghisa liquida costituisce la materia base trattata nei convertitori ad O₂, nell'ambito della produzione di acciaio da ciclo integrale. La carica di un convertitore può prevedere anche percentuali di rottame, DRI o HBI, o della ghisa solida, ma fino a certe quantità, limitate dall'energia generata durante il soffiaggio dell'O₂. In genere la percentuale di rottame o preridotto non supera il 15% della carica totale.

Per il forno ad arco, la carica è sostanzialmente costituita da rottame e l'aggiunta di ghisa liquida è limitata dalla quantità di O₂ che può essere soffiata all'interno di un forno elettrico. Infatti, il forno elettrico tradizionale non può tollerare alte velocità di soffiaggio dell'O₂, non essendo stato progettato per accogliere grosse quantità di schiuma e per permettere energiche agitazioni del bagno, generate dalle notevoli quantità di monossido di carbonio che si sprigionano durante la conversione.

Tuttavia, esiste una tendenza ad utilizzare maggiori quantità di ghisa liquida, DRI o HBI nei forni elettrici, dovuta alla necessità di innalzare la produzione e alla crescente

richiesta di acciaio a basso contenuto di tramp elements, cui si contrappone la limitata disponibilità di rottame pulito e il suo conseguente alto costo.

Venendo incontro a tali richieste, sono state proposte alcune soluzioni impiantistiche per la realizzazione di reattori ibridi, utilizzando una carica mista di rottame e ghisa liquida, con quantità variabili di rottame dal 30% al 70% della carica totale. Tra le altre soluzioni, ricordiamo l'impianto CONARC, progettato e realizzato dalla Mannesmann-Demag, per la produzione di acciaio inossidabile, l'impianto ARCON, progettato da Concast, e la tecnologia iCSMelt progettata dal CSM.

L'innalzamento della quantità di ghisa utilizzata porta alla necessità di operare una decarburazione con O_2 del bagno, mentre l'alta quantità di rottame impone un input dall'esterno di energia elettrica. Per motivi impiantistici e metallurgici, è opportuno che le operazioni di erogazione dell'energia elettrica e di blowing dell' O_2 avvengano in successione e non contemporaneamente. Dovendo evitare tempi di tap-to-tap elevati e tempi brevi di power on, si impone la scelta di utilizzare due vessel in grado di operare contemporaneamente svolgendo alternativamente le operazioni di erogazione dell'energia elettrica e di blowing. Per tali motivi, l'impianto ARCON, il CONARC e la tecnologia iCSMelt prevedono due vessel. Tuttavia, mentre nel caso dell'ARCON e dell'iCSMelt, la forma dei vessel è simile a quella di un convertitore ad O_2 , in modo da poter realizzare una decarburazione spinta ad alta velocità, nel caso del CONARC, la forma è prossima a quella di un normale forno ad arco di tipo tradizionale.

2.1 Ciclo produttivo dell'impianto CONARC.

Il CONARC è un impianto per la produzione di acciaio al carbonio ed inossidabile. Nel progetto non si fa esplicito riferimento al caricamento con ghisa liquida e rottame, ma alla possibilità di effettuare in successione le fasi di erogazione dell'energia elettrica e di

blowing tipiche della produzione di inox. Tuttavia le soluzioni tecnologiche adottate realizzano un impianto in grado di sfruttare cariche miste ghisa - rottame dopo aver opportunamente ideato un sistema di caricamento della ghisa liquida.

L'impianto è provvisto di una struttura con tre bracci porta elettrodi in corrente alternata e una unica top-blowing lance, entrambi posizionabili su uno o sull'altro dei due vessel. Il ciclo produttivo previsto ha inizio con il caricamento del rottame e delle ferroleghie attraverso la cesta di carico; è previsto l'utilizzo di due ceste di carico per il caricamento. Posizionata la colonna elettrodica, l'input di energia elettrica avviene per circa 40 - 45 minuti. Terminata la fusione, la colonna viene allontanata ed è posizionata la top-blowing lance per l'immissione di O₂. Altro ossigeno, insieme a sue miscele, viene immesso da lance laterali. Al termine dell'operazione, vengono immessi agenti riducenti come ferro-silicio o alluminio per il recovering del cromo ossidato.

2.2 Ciclo produttivo dell'impianto ARCON.

L'ARCON prevede l'utilizzo di un unico montante dotato di braccio porta elettrodo per elettrodo in corrente continua, posizionabile su uno o l'altro dei due vessel, e due top-blowing lance per il soffiaggio dell'O₂.

Il caricamento del reattore con ghisa liquida può avvenire dall'alto o attraverso una apertura laterale sulle pareti del vessel. In questo caso la ghisa è trasportata e caricata nel reattore grazie ad un carro. Durante la fase di erogazione dell'energia elettrica, l'apertura laterale per il caricamento è chiusa mediante un settore in materiale refrattario che riprende la curvatura de vessel.

Durante la fase di blowing, possibile dopo l'allontanamento della colonna elettrodica e l'avvicinamento di una top-lance, la stessa apertura laterale accoglie una lancia per il soffiaggio di O₂ dal basso, necessaria per l'agitazione del bagno e la formazione della

schiuma.

Il ciclo produttivo ipotizzato si riferisce ad una produzione annua di 1.6 Mt di acciaio, prevedendo un tempo di tap-to-tap di 46 minuti e un tempo di power on di 44 minuti. I consumi previsti sono stimati in 225 Kwh/t di energia elettrica, 45 m³(s.t.p.)/t di O₂ e 0.7 Kg/t di grafite per gli elettrodi.

2.3 La tecnologia iCSMelt del CSM.

La tecnologia iCSMelt messa a punto dal CSM si caratterizza per alcune soluzioni innovative che permettono di superare alcuni ostacoli di impedimento alla realizzabilità di reattori ibridi.

La necessità di eseguire una decarburazione ad alta velocità con O₂ impone l'utilizzo di vessel dalla forma simile a quella dei convertitori, creando notevole difficoltà nella installazione di pannelli refrigeranti per le pareti del forno.

La pratica operativa messa a punto dal CSM prevede la fase di erogazione dell'energia elettrica prima del blowing dell'O₂, in modo che il rottame possa esercitare un effetto schermante nei confronti dell'arco verso le pareti. Inoltre si suggerisce l'utilizzazione di una colonna elettrodica provvista di ugelli nella parte inferiore, per l'iniezione di olio, così da ottenere, a parità di potenza, un arco più corto e quindi meno irraggiante.

L'assenza di pannelli, infine, riduce la dispersione termica del forno stesso.

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto costituito da due vessel in grado di funzionare contemporaneamente utilizzando un unico montante al cui braccio viene montato un monoelettrodo in corrente continua, posizionabile sui due vessel, e due top-blowing lance per il soffiaggio dell'O₂. I vessel sono dotati di suola conduttrice, in modo da chiudere il circuito elettrico con il monoelettrodo attraverso il bagno.

I fumi emessi dalla conversione sono fatti evacuare da una struttura opportunamente dimensionata che sovrasta i due reattori e inviati al sistema di recupero calore (sensibile e chimico) ad alta efficienza.

Di fronte ai due reattori è collocata, a livello dei forni, la struttura di supporto per il trasformatore-raddrizzatore da forno. A 90° rispetto all'asse che collega le due strutture si trovano le attrezzature per l'immissione della ghisa liquida e per la scorifica mentre il colaggio dell'acciaio avviene con il sistema EBT o equivalente.

2.3.1 Stima del consumo di energia elettrica.

Numerose fonti bibliografiche, tra cui (7), riportano per diverse tipologie di forni ad arco il consumo specifico di energia elettrica.

In figura 2 è riportato l'andamento del consumo specifico di energia elettrica in base alle previsioni di un modello lineare, basato sulle rilevazioni sperimentali per forni in corrente continua contenute in (9). In base a tali andamenti, si può stimare, per un impianto funzionante con carica al 50% costituita da ghisa liquida e al 50% da rottame, senza preriscaldamento di quest'ultimo, un consumo specifico di 150 kWh/t.

La potenza installata, per forni ad alta produttività, è stimabile intorno ai 110 MW.

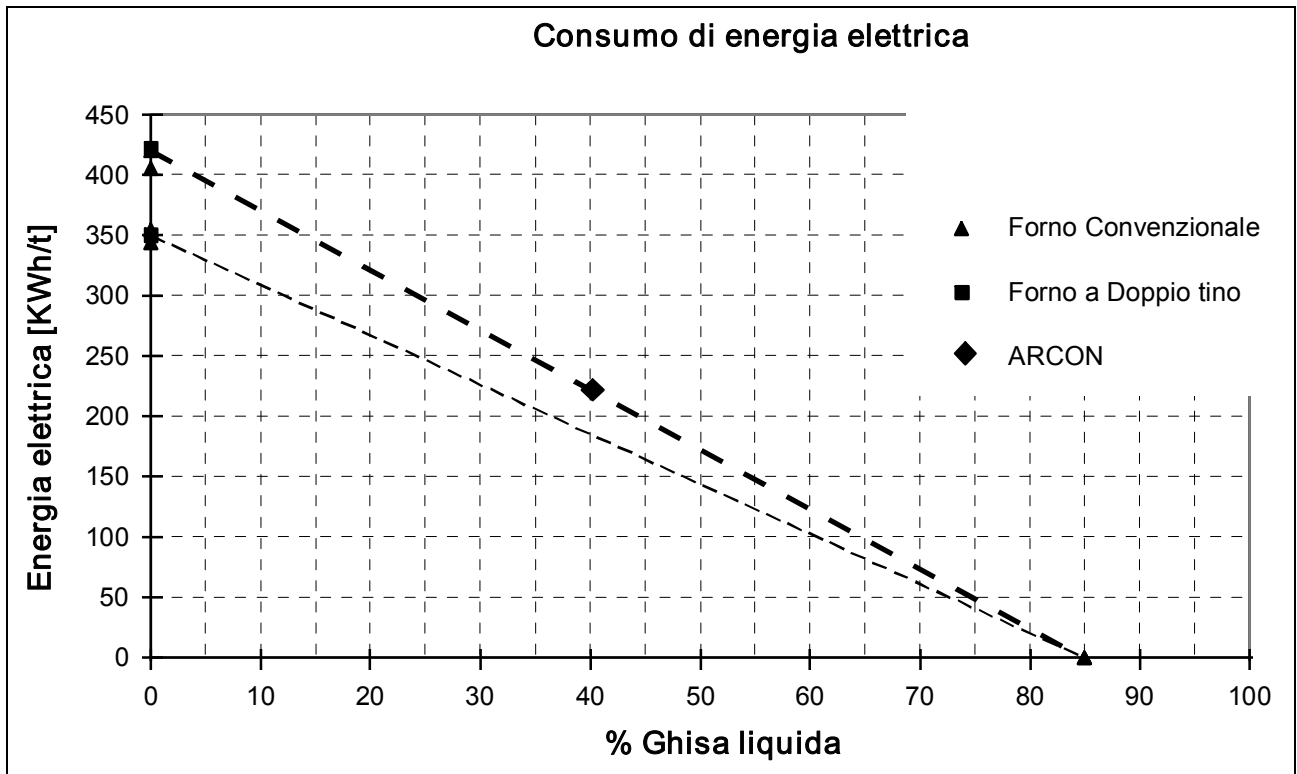


Figura 2: Consumo di energia elettrica stimato e sperimentale.

In condizioni di carica interamente costituita da rottame, si può ammettere un consumo di 350 KWh/t ed un tempo di power on di 40 minuti.

2.3.2 Definizione del ciclo operativo.

Il tempo di power on, a parità di potenza elettrica installata, è sostanzialmente proporzionale al consumo di energia elettrica, così che per il reattore ibrido risulta essere di circa 18 minuti.

Il tempo di soffiaggio di O₂ con lancia verticale è ricavabile dai dati di esercizio di convertitori ad O₂, dove mediamente si raggiungono durate di 17 minuti (con 80% di ghisa liquida). Considerando che nel caso in esame la ghisa liquida è al 50% della carica, applicando lo stesso criterio di proporzionalità, se ne deduce, per il reattore, un tempo di soffiaggio pari a 12 minuti.

Noti il tempo di power on e di soffiaggio dell'O₂, gli altri tempi caratteristici delle operazioni del ciclo sono ricavabili dalla letteratura.

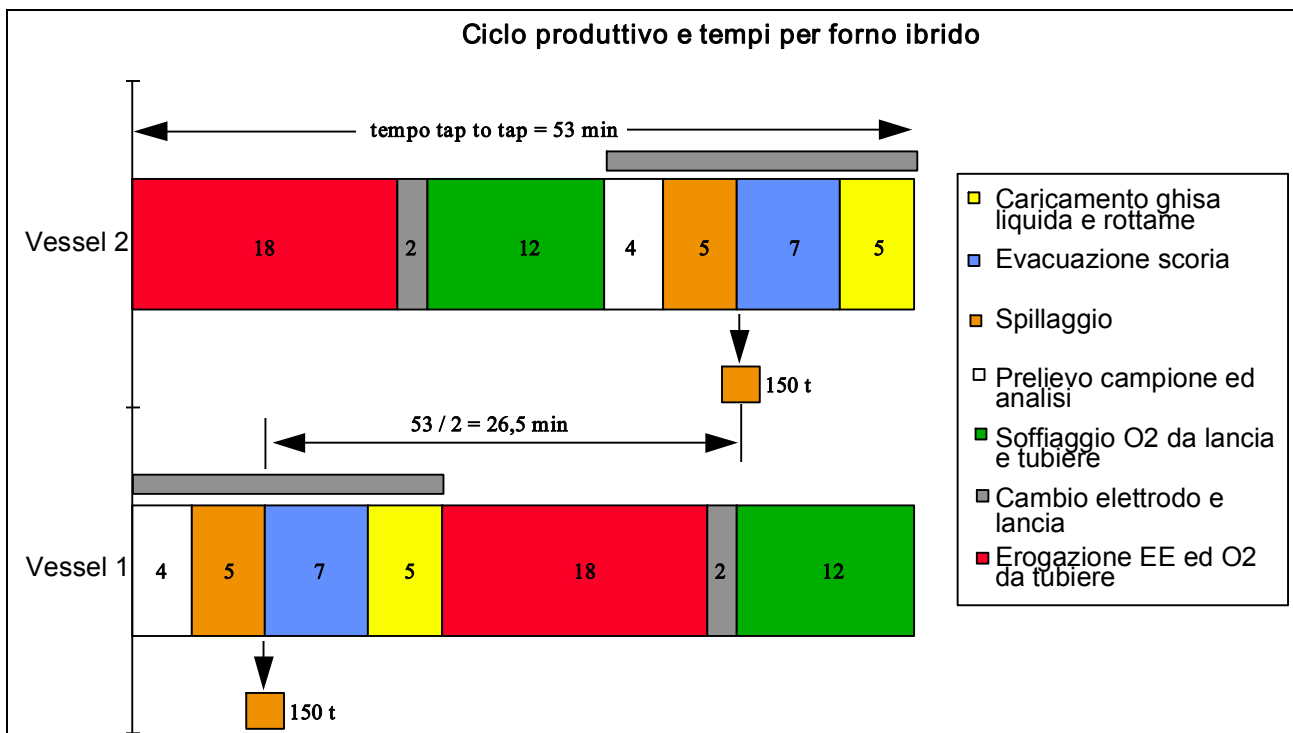


Figura 3: Ciclo produttivo e tempi per reattore ibrido, tecnologia iCSMelt.

Il ciclo tipico con i tempi considerati è riportato in figura 3.

Analizzando le diverse fasi del ciclo, si ottiene un tempo di tap to tap pari a 53 minuti. L'O₂ erogato, attraverso la lancia e le tubiere è stato calcolato in 4700 m³(s.t.p.). Sfasando il ciclo del secondo reattore di un tempo pari a metà di quello tap to tap, si evita di mettere in sovrapposizione temporale le stesse fasi dei due reattori. In linea teorica, tale sfasamento riduce a metà il tempo tap to tap. In pratica, ritardi su un reattore si ripercuotono negativamente sull'altro. Di questo si può tener conto utilizzando un coefficiente moltiplicativo del tempo tap to tap, valutato in 1.2. In base a queste considerazioni, ammettendo un vessel dimensionato per spillare 150 t/colata di acciaio, con un tempo tap to tap di 32 minuti, si ha una produttività oraria di 281 t/h. Considerando 7200 h/anno dedicate alla produzione, la capacità produttiva è pari a circa 2 Mt/anno di acciaio.

3. Stime dell'emissione di anidride carbonica e della produzione di rifiuti in cicli di produzione dell'acciaio.

La valutazione delle emissioni di anidride carbonica in un ciclo di produzione deve tener conto della CO₂ emessa 'localmente', durante una determinata fase del processo di produzione, e di quella emessa 'globalmente', cioè dell'anidride carbonica emessa per fornire gli input necessari ad ogni fase.

Nel caso della produzione da forno elettrico, è chiaro che la CO₂ emessa durante il consumo degli elettrodi in grafite o durante la combustione del carbonio con O₂ è una emissione 'locale'. La CO₂ emessa per la produzione dell'energia elettrica necessaria alla fusione è invece da considerare come una emissione 'globale' perché non avviene durante la fase di lavorazione, ma sta comunque a monte della disponibilità di energia. E' inoltre da prendere in considerazione l'energia elettrica necessaria per la produzione dell'O₂ e la relativa anidride carbonica emessa.

La valutazione della CO₂ emessa per la produzione di energia elettrica, è basata sull'emissione specifica netta, un indice fornito dagli enti produttori di energia, che esprime la quantità di sostanze emesse in atmosfera per ogni KWh netto di energia elettrica prodotta (termoelettrica o geotermica o totale). E' infatti evidente che la quantità di CO₂ prodotta deriva dal mix di fonti energetiche utilizzate nella produzione, dall'efficienza del parco produttivo, dalla composizione del vapore geotermoelettrico, dal livello di recupero della condensa del vapore stesso, ecc. Per il 1999, secondo quanto riportato nel rapporto (8), l'ENEL fornisce un valore di CO₂ emessa pari a 551 g/KWh di energia elettrica prodotta.

Nello stesso rapporto, è possibile anche ritrovare le emissioni specifiche nette per altre sostanze. Nella tabella I sono riportati tali valori e la loro evoluzione negli anni.

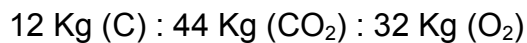
		1995	1996	1997	1998	1999	1999-95 %
Emissioni specifiche nette della produzione termoelettrica							
SO ₂ /prod.termo	g/KWh	4.0	3.8	3.5	3.5	2.9	-25.8
NOx/prod.termo	g/KWh	1.9	1.9	1.6	1.3	1.1	-45.9
polveri/prod.termo	g/KWh	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	-62.7
CO ₂ /prod.termo	g/KWh	738	735	723	719	707	-4.3
Emissioni specifiche nette della produzione geotermoelettrica							
H ₂ S/prod.geo	g/KWh	n.d.	6.07	6.11	6.01	6.06	n.d.
CO ₂ /prod.geo	g/KWh	472	472	439	453	435	-8.0
Emissioni specifiche nette riferite alla produzione totale							
CO ₂ (termo)/prod.totale	g/KWh	603	579	571	565	541	-10.2
CO ₂ (termo+geo)/prod.totale	g/KWh	611	588	580	575	551	-9.8

Tabella I : Emissioni specifiche nette nella produzione di energia elettrica in Italia [fonte (8)].

L'abbassamento dell'emissione specifica di CO₂ è da ricercare, essenzialmente, nella diminuzione dell'energia prodotta da olio combustibile e gasolio (-33.2% fra il 1995 e il 1999) e da carbone e lignite (-1.2% dal 1995 al 1999), a vantaggio della produzione da gas naturale (+75.4% fra il 1995 e il 1999) e da fonti rinnovabili [(8)].

Nella produzione di O₂, si stima un consumo di energia elettrica pari a 0.6 KWh/Nm³ di O₂ prodotto. Nella produzione della grafite per gli elettrodi, si assume un consumo di energia elettrica pari a 5 KWh/Kg di grafite prodotta. E' chiaro che, anche in questi casi, si può risalire all'emissione equivalente di anidride carbonica.

Il carbone bruciato produce anidride carbonica reagendo con l'O₂, secondo la proporzione:



La stima della produzione di rifiuti nei differenti cicli di produzione dell'acciaio è più agevole: alcuni dati della letteratura mostrano la produzione di fanghi, polveri e e la produzione di

3.1 Stima dell'emissione di CO₂ per un ciclo di produzione dell'acciaio da FEA.

All'emissione di anidride carbonica di un FEA concorre il consumo di energia elettrica, la combustione del carbone aggiunto come carburante, il consumo di carbonio sotto forma di grafite che costituisce gli elettrodi, nonché l'emissione indiretta dovuta alla produzione dell'ossigeno e alla produzione degli elettrodi. I dati relativi alle singole voci sono ricavabili da (7), considerando in particolare i forni in corrente continua, tradizionali o a doppio tino, senza preriscaldamento. I dati caratteristici dei forni considerati e le emissioni stimate sono riportate nella tabella II. Il diagramma in figura 4 esprime, in media, il peso delle fonti di emissione sull'emissione complessiva.

E' evidente che, oltre che dalla CO₂ emessa per la produzione dell'O₂, per la combustione del carbone e per il consumo degli elettrodi, il peso maggiore è dato dalla CO₂ emessa per la produzione dell'energia elettrica necessaria alla fusione, cui si aggiunge l'energia necessaria agli impianti fuori forno e agli impianti di aspirazione dei fumi. Complessivamente si può stimare una emissione di CO₂ fra i 300 e i 350 Kg/t di

acciaio prodotto.

		(a)		(b)		(c)		(d)	
		Kg(CO ₂)/t		Kg(CO ₂)/t		Kg(CO ₂)/t		Kg(CO ₂)/t	
Consumo totale O₂	m ³ (S.P.T.)/t	30	9.9	35	11.55	35.9	11.84	29	9.57
Consumo carbone	m ³ (S.P.T.)/t	8:10	66	5:9	51.3	6.3:7	48.75	9.5:11.8	78
Consumo elettrodi	Kg/t	1.0	6.41	1.25	8	1.20	7.7	0.9	5.76
Consumo E.E.	KWh/t	354	194.7	405	222.75	344	189.2	323	177.65
Consumo E.E. (fuori forno)	KWh/t	35	19.25	35	19.25	35	19.25	35	19.25
Consumo E.E. (asp.fumi)	KWh/t	30	16.5	30	16.5	30	16.5	30	16.5
TOTALE	Kg/t		313		329		293		307

Tabella II: Emissioni di anidride carbonica per FEA senza preriscaldamento

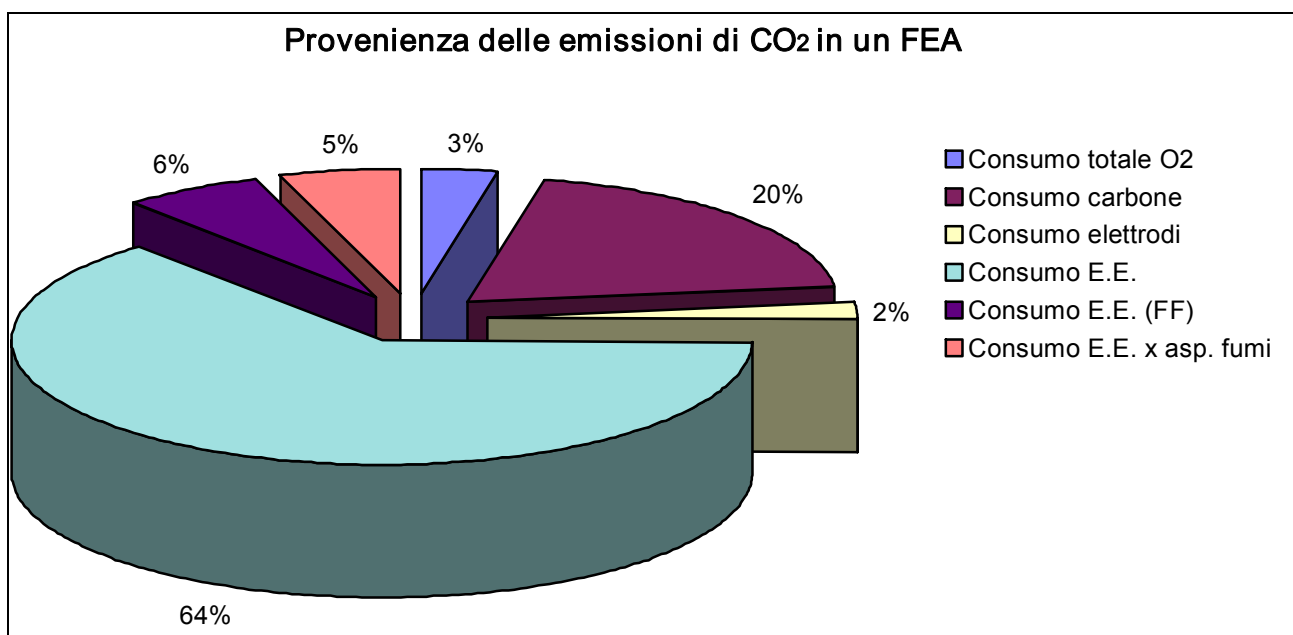


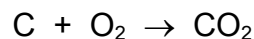
Figura 4: Provenienza delle emissioni di CO₂ in un FEA, in media.

3.2 Stima dell'emissione di CO₂ per un ciclo integrale di produzione dell'acciaio.

La stima delle emissioni di CO₂ per un impianto di produzione dell'acciaio a ciclo integrale impone una valutazione delle emissioni stesse nelle singole fasi della lavorazione. La figura 5 illustra il modello adottato per la valutazione delle emissioni. Per semplicità e per rilevanza nelle emissioni di CO₂, si ammette che l'impianto sia costituito dalla cokeria per la produzione del carbon coke, dall'altoforno per la produzione della ghisa liquida e da convertitori di tipo LD per la produzione dell'acciaio.

3.2.1 Stima della CO₂ emessa in convertitore.

Si può ammettere che la reazione fondamentale per l'emissione di CO₂ consista nella ossidazione di tutto il carbonio presente in carica, pari al 4% in peso della ghisa, secondo la reazione:



Per una carica costituita dall'85% di ghisa e dal 15% di rottame (ammettendo un tenore di carbonio del 4.5% in peso nella ghisa e praticamente nullo nel rottame) da cui si ricavano 1000 Kg di acciaio è emessa CO₂ per 147 Kg.

3.2.2 Stima della CO₂ emessa in altoforno.

In altoforno, la produzione di 1000 Kg di ghisa porta alla formazione di 2000 Nm³ di gas d'altoforno (BF-gas in figura 5) avendo in input 500 Kg di carbon coke. Il coke è costituito da 470 Kg di carbonio e 30 Kg di scoria. Soltanto 45 Kg di carbonio del coke, in realtà, passa nella ghisa. Si può ammettere che il gas d'altoforno sia bruciato, nelle sue componenti diverse dalla CO₂ per ottenere calore o energia.

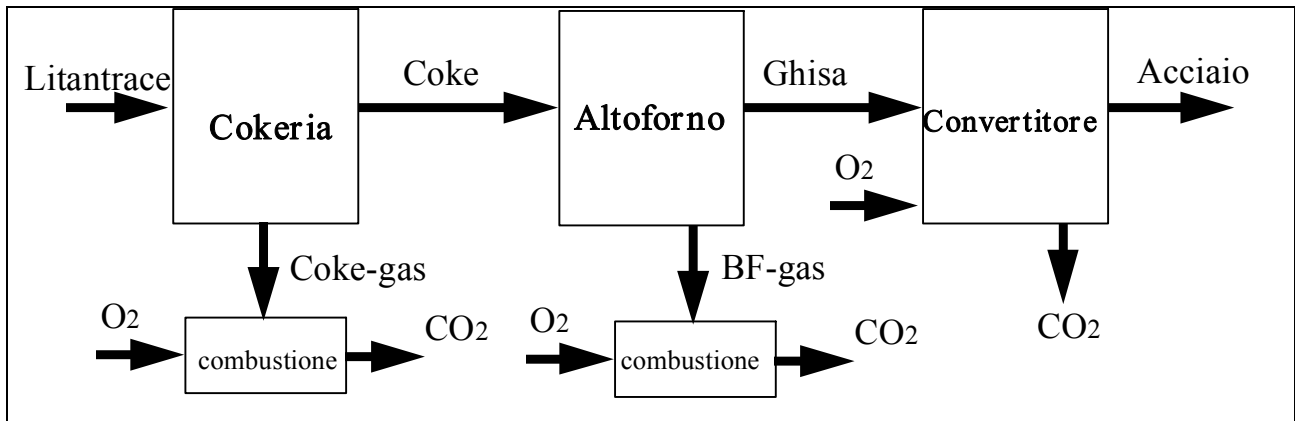
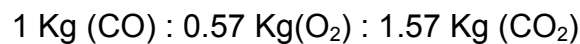


Figura 5: Divisione in sottosistemi di emissioni per un ciclo integrale.

La composizione del gas d'altoforno [(9)], in volume, è 26% di CO, 18% di CO₂, 55% di N₂. In particolare, la combustione del CO con O₂ segue la proporzione:



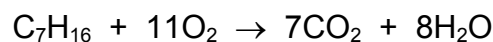
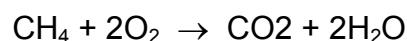
La produzione di 1000 Kg di ghisa porta all'emissione di 707 Kg di CO₂ da gas d'altoforno e 1021 Kg di CO₂ per combustione del CO, per mezzo di 371 Kg di O₂.

In conclusione, per produrre 1000 Kg di acciaio, da 880 Kg di ghisa, sono emessi in altoforno 1521 Kg di CO₂ e consumati 326 Kg di O₂.

3.2.3 Stima della CO₂ emessa in cokeria.

La produzione di 1000 kg di carbon coke porta all'emissione di 600 Nm³ di gas di cokeria, la cui composizione in volume è stimata in [(10)]: 58.15% H₂, 0.22% O₂, 5.14% N₂, 26.34% CH₄, 5.89% CO, 2.37% C₇H₁₆ e 0.135 g/Nm³ naftalina.

Per il recupero di energia, si ammette la combustione del CO, del C₇H₁₆ e del CH₄ secondo le reazioni:



Nella produzione di 1000 Kg di coke, l'emissione di CO₂ proveniente dalla combustione

del gas-coke è pari a 586 Kg, bruciando 711 Kg di O₂. In conclusione, per la produzione di 1000 Kg di acciaio da 500 Kg di coke, si emette in cokeria 293 Kg di CO₂, bruciando 356 Kg di O₂.

	Cokeria		Altoforno		LD		TOTALE	
		Kg(CO ₂) equiv.		Kg(CO ₂) equiv.		Kg(CO ₂) equiv.		Kg(CO ₂) equiv.
Acciaio	Kg				1000			1000
Ghisa	Kg		880					880
Coke	Kg	550						550
CO ₂	Kg			622		147		769
O ₂	Kg				107	25		25
CO ₂ (da comb.)	Kg			898				1191
O ₂ (per comb.)	Kg	356	82	326	75			157
E.E. (asp. fumi)	KWh						30	17
E.E. (fuori forno)	KWh						35	19
TOTALE								2178

Tabella III: Stima dell'emissione di CO₂ per produzione da ciclo integrale

Volendo stimare l'emissione complessiva di CO₂ dovuta alla produzione di 1000 Kg di acciaio con ciclo integrale si valuta la CO₂ emessa 'localmente' durante le fasi della lavorazione, la CO₂ emessa 'globalmente' per la produzione dell'energia elettrica e per la produzione dell'O₂. La tabella III è riassuntiva di tutto il procedimento, mentre il diagramma di figura 6 riassume il contributo all'emissione di CO₂ di ogni fase della produzione.

L'emissione complessiva di CO₂ risulta pari a 2178 Kg/t di acciaio prodotto. Il grafico di figura 6 evidenzia il peso delle diverse fonti nella emissione globale: fra CO₂ emessa direttamente ed emessa a seguito della combustione del gas, l'altoforno partecipa per il 73% all'emissione globale; se si tiene conto del meccanismo di emissione, invece, solo il 35% della CO₂ è emessa direttamente, mentre il 55% dell'emissione è dovuta alla combustione dei gas prodotti in cokeria ed in altoforno.

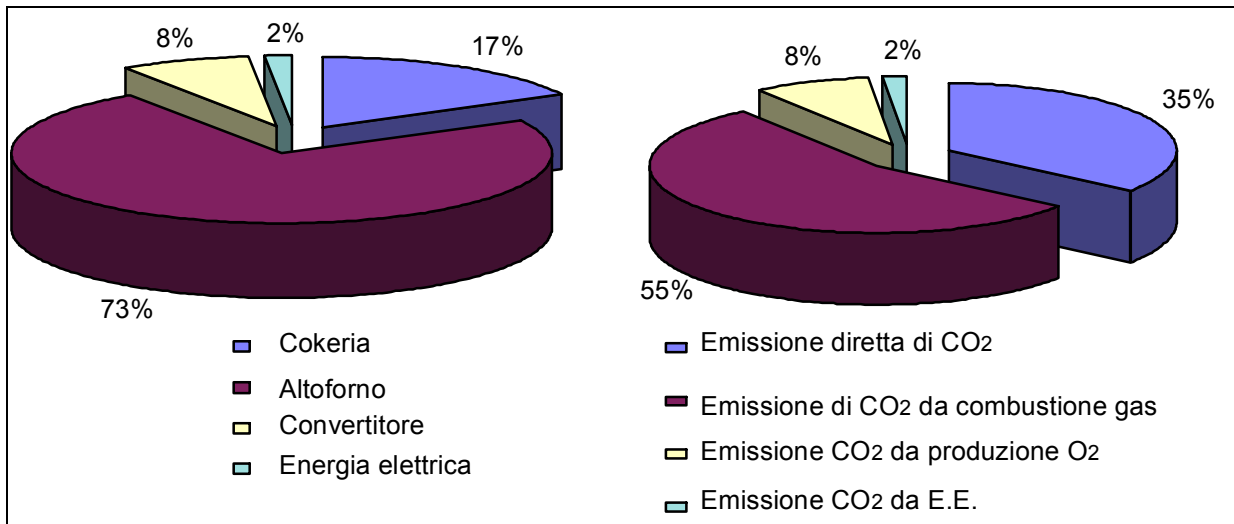


Figura 6: Emissioni percentuali di CO₂ in un ciclo integrale.

3.3 Stima dell'emissione di CO₂ per un reattore ibrido.

Nella produzione dell'acciaio da forno elettrico tradizionale, la carica è composta quasi esclusivamente da rottame. Per tali forni, alimentati in corrente continua e senza preriscaldamento, si è valutato nei paragrafi precedenti una emissione di CO₂ fra i 300 e i 350 Kg/t di acciaio prodotto. Nella produzione da ciclo integrale, ammettendo una carica costituita per il 15% da rottame e per l'85% da ghisa, si è stimata una emissione di CO₂ intorno a 2180 Kg/t di acciaio prodotto. Tali dati sono riportati nel grafico di figura 7, esprimendoli in funzione della quantità di ghisa utilizzata in carica.

Ammettendo, con buona approssimazione, che l'emissione di CO₂ segua un andamento lineare in funzione della quantità di ghisa in carica, il grafico in figura 7 evidenzia che per un reattore ibrido che utilizzi il 30% di ghisa, l'emissione dovrebbe attestarsi intorno ai 980 Kg/t, mentre utilizzando il 70% di ghisa tale emissione sarebbe di 1850 Kg/t. Nello stesso grafico, si evidenzia inoltre il valore di emissione per un forno funzionante con 50% di ghisa e 50% di rottame: in tal caso l'emissione è stimata intorno ai 1416 Kg/t.

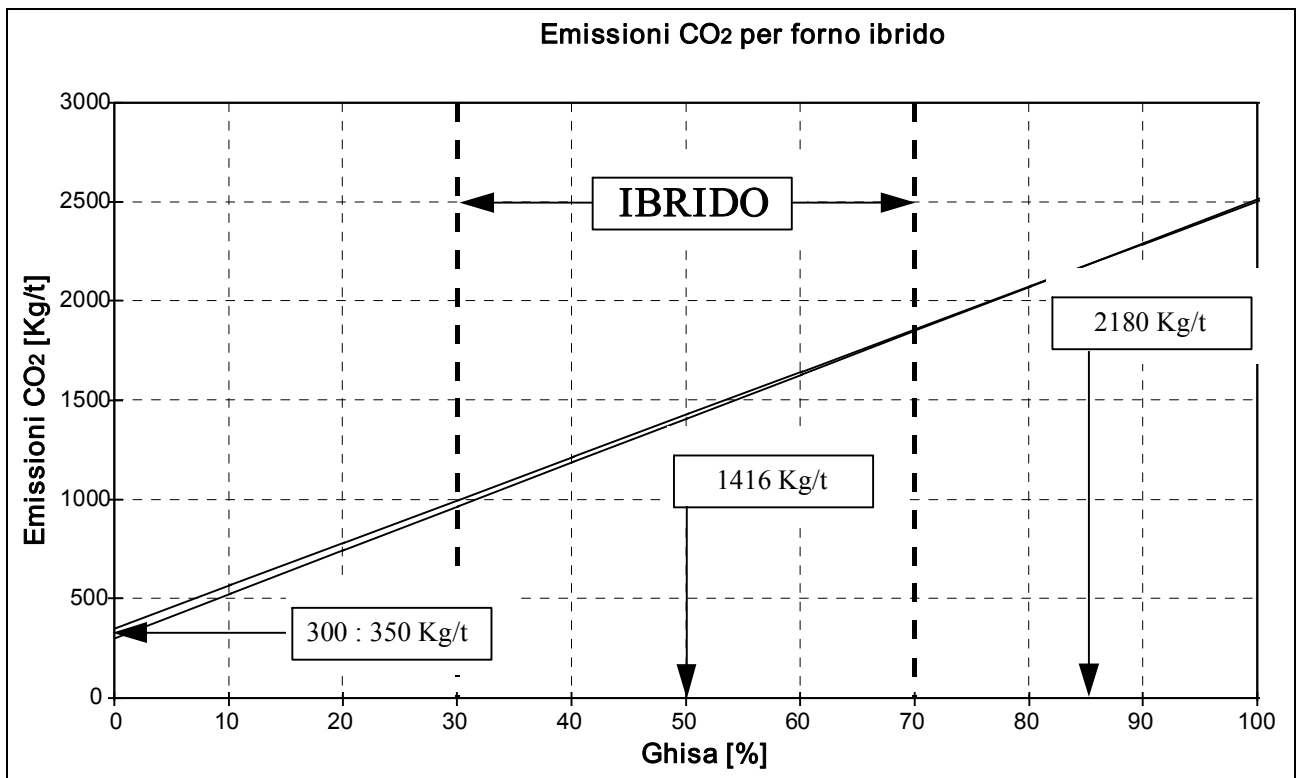


Figura 7: Emissioni di CO₂ per reattore ibrido in funzione della ghisa in carica.

3.4 Stima della produzione di rifiuti da FEA, ciclo integrale e reattore ibrido.

I dati contenuti in alcune fonti in letteratura, tra cui (11), permettono di risalire all'entità dei rifiuti prodotti nella produzione di acciaio da FEA e da ciclo integrale e, di conseguenza, di stimare i rifiuti producibili da reattore ibrido.

Nel ciclo integrale, in altoforno, per ogni tonnellata di ghisa prodotta, si producono dai 135 ai 300 Kg di scoria e, complessivamente, dai 9 ai 40 Kg di polveri e fanghi. In convertitore, per ogni tonnellata di acciaio prodotto, si producono dai 135 ai 200 Kg di scoria e dai 4 ai 28 Kg di polveri e fanghi.

Nel forno elettrico tradizionale, per ogni tonnellata di acciaio prodotto si producono dai 50 ai 190 Kg di scoria e dai 9 ai 20 Kg di polveri e fanghi.

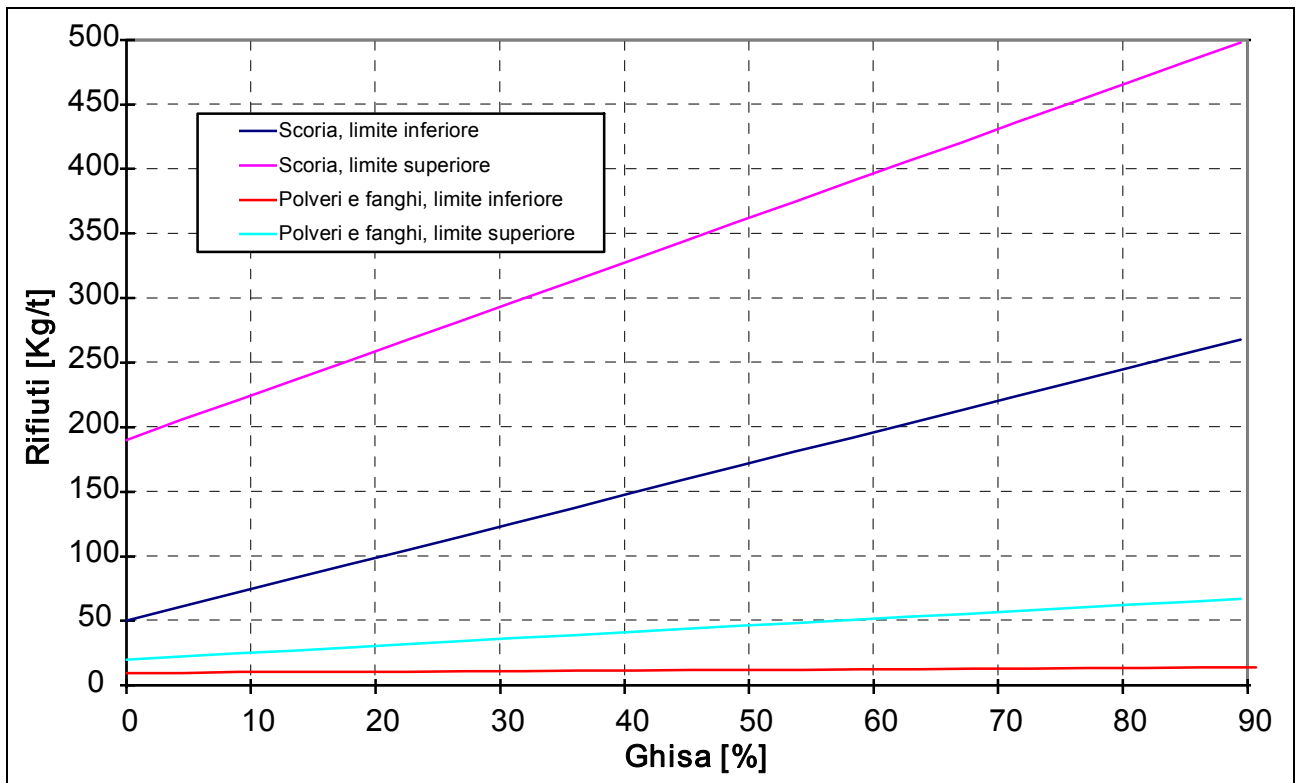


Figura 8: Produzione di rifiuti da FEA, da ciclo integrale e da reattore ibrido.

A titolo esclusivamente approssimativo, volendo ottenere una stima semi-quantitativa dei rifiuti prodotti in un reattore ibrido, è possibile utilizzare l'approssimazione lineare in figura 8: per un reattore ibrido operante con carica mista costituita per il 50% da ghisa, si può stimare una produzione di scoria fra 170 e 365 Kg e una produzione di polveri e fanghi fra 11 e 46 Kg.

4. Valutazione dell'impatto ambientale dei cicli di produzione dell'acciaio.

4.1 Materials Ecology ed 'Environmental Loads'.

Il recente interesse per l'impatto ambientale dei materiali e dei cicli produttivi e le numerose ricerche svolte nel settore hanno portato alla nascita di una disciplina nota

come *materials ecology*, sviluppatasi come branca della Scienza e dell'Ingegneria dei materiali: l'oggetto di studio è la definizione dell'*Environmental Loads* di un prodotto o di un processo.

E' ampiamente riconosciuta una suddivisione di tale disciplina in tre rami: *ecomaterials*, *ecotechnology* ed *ecomangement*, che studiano l'impatto ambientale da punti di vista differenti. Se l'aspetto dominante di tale impatto per un certo prodotto risiede nella composizione delle materie prime e la variazione della composizione o il cambiamento nella scelta delle materie stesse conduce ad una diminuzione dell'impatto, si è di fronte ad un caso di *ecomaterials research*. Ma se l'impatto ambientale può essere ridotto attraverso una variazione nei processi produttivi o utilizzando tecnologie innovative, è più logico parlare di *ecotechnology research*. E' possibile, inoltre, che l'impatto ambientale complessivo per una serie di prodotti sia abbassato attraverso una concatenazione di processi, in modo da utilizzare gli scarti o i sottoprodotti del processo principale: si parla, in tal caso, di *ecomangement*.

Sebbene il concetto di impatto ambientale sia intuitivamente compreso, è necessario quantificare l'*environmental load* di un prodotto, utilizzando definizioni che rendano confrontabili dei prodotti con stesse caratteristiche, ma ottenuti a partire da materie prime o processi tecnologici diversi.

Qualitativamente, una espressione significativa dell'*environmental load* può essere:

$$EL = \frac{\sum_i (M_i + E_i) + \sum_i (W_i - R_i)}{L}$$

in cui:

- EL è l'indice che esprime l'environmental load;
- M_i ed E_i sono l'input di materie prime ed energia nel processo i-esimo;
- W_i è l'output di rifiuti dal processo i-esimo;

- R_i è la quantità di rifiuti recuperabili nel processo;
- L è il service time, o tempo di utilizzo, del materiale o del prodotto.

Dall'espressione precedente, è chiaro che l'*environmental load* può essere minimizzato sviluppando tecnologie che migliorino lo sfruttamento delle materie prime e dell'energia e che riducano la produzione di rifiuti, oppure aumentando la quantità e qualità dei materiali riciclati o il tempo di utilizzo di un prodotto.

Nell'ambito di questo lavoro, come espressioni dell'impatto ambientale dei diversi cicli di produzione dell'acciaio, si è scelto di utilizzare l'emissione specifica di CO_2 e la produzione specifica di rifiuti (scoria, polveri e fanghi).

4.2 Contenuto del Protocollo di Kyoto.

Nel Dicembre 1997 fu concordato a Kyoto, in Giappone, un protocollo internazionale per contenere le emissioni di anidride carbonica al livello più basso possibile, almeno fino a quando i combustibili fossili fossero rimasti componenti importanti della produzione mondiale di energia.

Il protocollo di Kyoto prevede una riduzione totale del 5.2% delle emissioni di gas ad effetto serra (rispetto al 1990 e nel periodo dal 2008 al 2012), solo per i paesi maggiormente sviluppati, che comprendono USA, Unione Europea, Giappone, Europa dell'Est, Russia, Australia, Canada, Norvegia, Nuova Zelanda e Svizzera. In particolare agli Stati Uniti è stata assegnata una quota di riduzione pari al 7%, all'Unione Europea dell'8%, di cui all'Italia il 6.5%, al Giappone ed al Canada il 6%. I Paesi in via di sviluppo sono esclusi da questi accordi, benché dalle previsioni più accreditate risulta che nel 2020 da Cina e India proverranno le più alte emissioni di gas ad effetto serra nel mondo.

La riduzione delle emissioni potrà essere attuata sia con misure interne sia con alcuni meccanismi di flessibilità (IET - International Emission Trading; JI - Joint Implementation;

CDM - Clean Development Mechanism): tali meccanismi, denominati 'Kyoto mechanisms', consentono di cogliere le migliori opportunità tecnico-economiche di riduzione delle emissioni e di promuovere trasferimenti di tecnologie molto importanti per una strategia globale di sviluppo sostenibile.

4.3 Contributo della produzione da reattore ibrido alla riduzione delle emissioni di CO₂.

Le emissioni nell'ambito europeo dei gas responsabili dell'effetto serra sono monitorate dalla Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) che, annualmente, mette a disposizione i dati raccolti [(6)].

L'emissione totale di CO₂ in Italia è aumentata da 429694 Kt nel 1990 a 461060 nel 1998 (aumento del 7% rispetto al 1990), in netta contrapposizione con gli obiettivi auspicati dal protocollo di Kyoto. Secondo tale protocollo, l'Italia si è impegnata alla riduzione del 6.5% delle emissioni di CO₂ rispetto al 1990, pari a 27930 Kt. Ammettendo che parte dell'acciaio prodotto con ciclo integrale (con emissione di 2180 Kg(CO₂)/t) sia prodotto con reattore ibrido caricato al 50% con ghisa (con emissione di 1416 Kg(CO₂)/t), si avrebbe una riduzione di 764 Kg/t nelle emissioni di CO₂. Rispetto alla quota di riduzione delle emissioni assegnata all'Italia a Kyoto, ogni milione di tonnellate di acciaio prodotto con ibrido, piuttosto che da ciclo integrale, coprirebbe il 2.25% della quota totale di riduzione spettante all'Italia.

In realtà, le emissioni di CO₂ dovute ai soli processi industriali (produzione di minerali, industria chimica, produzione di metalli e altre) sono diminuite dal 1990 al 1998 da 110752 Kt a 107057 Kt (riduzione del 3.3% rispetto al 1990). Tenendo conto delle emissioni del 1990, ammettendo per ogni settore (energia, industria e trasporti) una quota di riduzione delle emissioni di CO₂ proporzionale alla quota con cui partecipa

all'emissione totale, ogni milione di tonnellate di acciaio prodotto con ibrido, piuttosto che da ciclo integrale, ridurrebbe di circa l'11% le emissioni di CO₂ dovute ai soli processi industriali.

Questo significa che l'impianto descritto in precedenza e operante secondo la tecnologia iCSMelt, in grado di produrre 2Mt/anno di acciaio, se sostituisse la produzione di una uguale quantità di acciaio da ciclo integrale, da solo sarebbe in grado di contribuire per il 4.5% all'abbattimento delle emissioni di CO₂ spettanti all'Italia e parteciperebbe per il 22% all'abbattimento spettante al solo settore industriale.

4.4 Contributo del ciclo con reattore ibrido alla riduzione della produzione di rifiuti.

Il ciclo integrale produce, per ogni tonnellata di acciaio prodotto, dai 276 ai 484 Kg di scoria e dai 13 ai 65 Kg di polveri e fanghi. Per un reattore ibrido, operante con il 50% di ghisa in carica, si può stimare, in via del tutto approssimativa, una produzione fra 170 e 365 Kg di scoria e fra 11 e 46 Kg di polveri e fanghi per ogni tonnellata di acciaio prodotto.

Questo significa che, per ogni tonnellata di acciaio prodotto con ibrido, piuttosto che da ciclo integrale, si otterrebbe una riduzione della produzione di scorie fra i 100 ed i 120 Kg e una riduzione nella produzione di polveri e fumi fra 2 e 20 Kg.

5. Effetto dei residuals sulle proprietà dell'acciaio da FEA.

Nell'acciaio prodotto da FEA, se non vengono adottati provvedimenti particolari, gli elementi residui non desiderati sono tipicamente costituiti da rame, azoto ed idrogeno, fermo restando la necessità di condurre le operazioni di defosforazione e desolfurazione.

5.1 Effetto dell'azoto.

Di tutti gli elementi residui, l'azoto è il più difficile da controllare nel processo al FEA e costituisce la limitazione maggiore alla produzione di acciai per impieghi speciali. In assenza di ghisa in carica, la sua presenza nell'acciaio da FEA varia da 50 a 120 ppm, in funzione degli accorgimenti utilizzati per controllare la sua presenza (copertura con scoria, ionizzazione dell'azoto da parte dell'arco, natura delle materie prime utilizzate, etc.).

La presenza di azoto dà origine al fenomeno noto come *strain ageing*, caratterizzato dallo snervamento negli acciai a basso contenuto di carbonio, dovuto alla diffusione degli atomi di azoto verso le dislocazioni e alla formazione di nuove atmosfere di atomi interstiziali che bloccano lo scorrimento di queste.

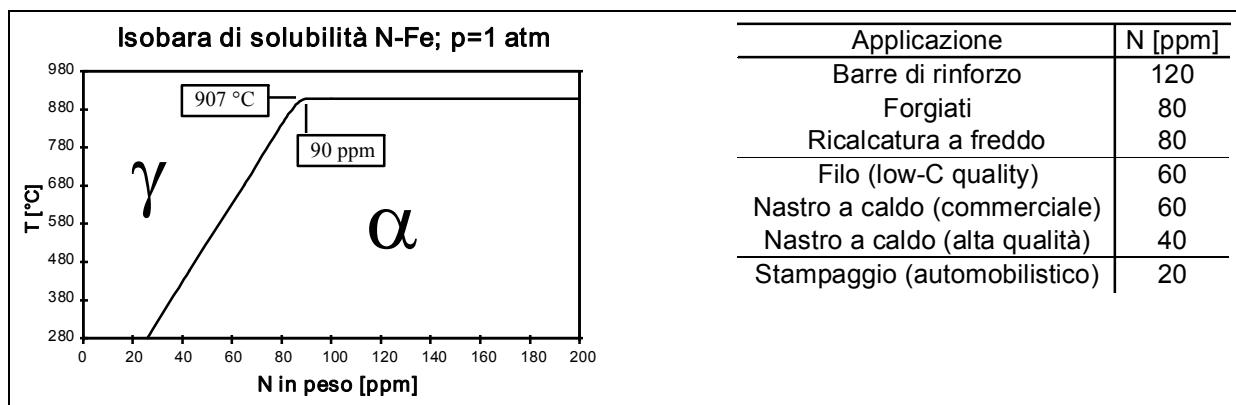


Figura 9: Isobara di solubilità N-Fe a 1atm e quantità di N tollerate in diverse applicazioni.

Dal punto di vista pratico, è fondamentale eliminare il fenomeno negli acciai da profondo stampaggio, poiché la ricomparsa del punto di snervamento conduce in questi casi alla formazione delle *bande di deformazione* durante lo stampaggio, dovute a deformazioni locali eterogenee.

La figura 9, con la relativa tabella, evidenziano la quantità di azoto ammessa nelle diverse applicazioni, legandola alla solubilità dell'azoto stesso nel ferro, che è il motivo di fondo

dello strain ageing.

5.2 Effetto dell'idrogeno.

L'idrogeno, anche in quantità molto modesta, può essere la causa di un marcato infragilimento dell'acciaio. Le dimensioni atomiche estremamente ridotte favoriscono la diffusione dell'elemento all'interno della struttura anche a temperature poco al di sopra di quella ambiente. Le teorie più accreditate suggeriscono che l'idrogeno diffonda sotto l'influenza di un gradiente di tensione verso le regioni ad elevata tensioni, dove interagisce con il reticolo metallico riducendone la coesione. Altre teorie sottolineano invece la capacità degli atomi di idrogeno di migrare verso le zone ad elevata concentrazione di tensione, in particolare gli inneschi di cricca, e di accumularsi sull'apice della cricca riducendo l'energia superficiale ed abbassando l'energia necessaria all'avanzamento della stessa: da questo punto di vista l'infragilimento da idrogeno appare come un caso particolare di *stress-corrosion cracking*.

5.3 Effetto del rame.

Il rame è alla base della comparsa, durante la lavorazione a caldo degli acciai, del fenomeno noto come *hot shortness* (o *burning*). In generale, il limite superiore per la temperatura utilizzabile nelle lavorazioni a caldo è determinato dalla comparsa di zone di microfusione o di eccessiva ossidazione. La bassa solubilità del rame nel ferro, contribuisce alla formazione di zone segregate a bassa temperatura di fusione che abbassano notevolmente la temperatura massima a cui condurre le lavorazioni a caldo.

Si ricorda inoltre che il rame, al contrario di quanto avviene per zolfo e fosforo, e di quanto può avvenire per idrogeno e azoto, non è rimovibile dal bagno attraverso semplici procedimenti metallurgici. Rientra, quindi, nella classe dei residuals noti come tramp elements, insieme a Sr, As, Sb, Cd, Zn e Bi. Anche Ni, Cr e Mo devono essere considerati

tramps, a meno che non vengano aggiunti appositamente nell'acciaio in concentrazioni tali da esplicare una azione sulle sue caratteristiche (acciai legati).

5.3.1 Impieghi dell'acciaio e residuals nel rottame.

Focalizzando l'attenzione sul contenuto finale di rame nell'acciaio, è utile tenere in conto la tabella IV. La normativa europea impone, inoltre, il contenuto massimo di alcuni tramp elements nei rottami, in particolare per quanto riguarda il contenuto di rame e stagno. Tali norme sono riassunte nella tabella V, con la relativa denominazione del rottame.

Produttore	% Cu	Nota
Lukens, specifiche	0 -1.1	Lamiere basso legate
Behlehem, ris. medi	0.080	Acciai al C
LTV Cleveland, val. max.	0.200	Piani al C
Rouge Steel, medi	0.048	DDQ HSLA
Natoinal Great Lakes, medi	0.069	Coils a caldo
Minimill A, 1 col	0.090	AISI 1008
Minimill A, 1 col.	0.048	AISI 1008
Minimill A, 1 col.	0.070	AISI 1006
Minimill B, medi	0.140	Coils a caldo

Tabella IV: Presenza di rame in acciai di differenti produttori.

Il grafico in figura 10 sintetizza la situazione, almeno limitatamente al contenuto di rame nel prodotto siderurgico.

E' chiaro che è praticamente impossibile produrre acciaio da profondo stampaggio per uso automobilistico, denominato DDQ HSLA prodotto dalla Rouge Steel, contenente lo 0.048% di rame: in tal caso è d'obbligo ricorrere al ciclo integrale, utilizzando, se il rottame di tipo shredded contenesse lo 0.5% di rame, ben il 90% di ghisa nel convertitore. Inoltre, con forno elettrico sarebbe ugualmente problematico ottenere i livelli richiesti di azoto, intorno alle 20ppm.

Tipo di rottame	Classifica europea	% Cu	% Sn	%(Cu+Sn)
Obsolete	E3	<= 0.25	<= 0.01	<= 0.25
	E1	<= 0.40		
Prompt	E2	totale <= 0.30		
	E6			
	E8			
Shredded	E40	<= 0.25	<= 0.02	
	E46	<= 0.50	<= 0.07	
Torniture	E5H	<= 0.4	<= 0.03	<= 1.00
	E5M			
Alti residuals	EHRB	<= 0.45	<= 0.03	<= 0.35
	EHRM	<= 0.40	<= 0.03	<= 1.00

TABELLA V: Schema di denominazione del rottame e relativo contenuto di tramp

elements secondo la normativa europea.

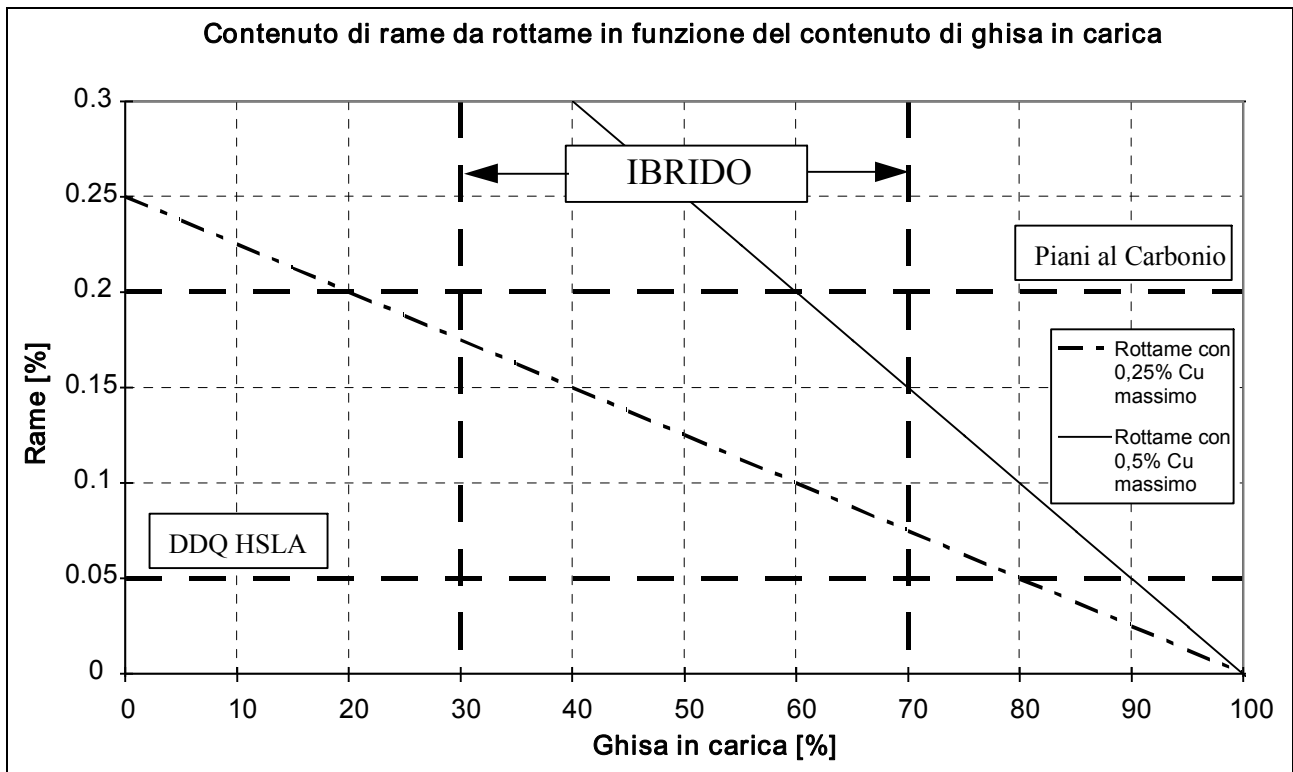


Figura 10: Contenuto di rame per un acciaio prodotto da carica mista, in funzione della ghisa in carica.

Diverse, invece, le considerazioni per i piani al carbonio come quelli prodotti dalla LTV Cleveland, contenenti lo 0.2% di rame: tale acciaio è ottenibile, utilizzando il peggior shredded fornito, utilizzando in reattore ibrido il 60% di ghisa liquida.

In generale, è evidente che con il 70% di ghisa, ai limiti del reattore ibrido, è possibile ottenere un acciaio con un contenuto di Cu da 0.075% a 0.15%. Va ancora rilevato che, disponendo di ottimo rottame, tipo obsolete E3, e utilizzando il 50% di ghisa in carica, è possibile produrre acciaio con lo 0.15% di rame, paragonabile a quello in tabella IV proveniente da 'Minimill B'.

6. Conclusioni.

L'utilizzazione della carica mista all'interno di reattori ibridi rappresenta la strada da percorrere per la siderurgia elettrica nel tentativo di conquistare quelle fasce di mercato tradizionalmente precluse e dominate dall'utilizzazione di acciaio da ciclo integrale. Tale situazione è tanto più provata dall'attenzione che alcune case fornitrici di impianti e società di engineering stanno ponendo nella progettazione e realizzazione di impianti ibridi ad alta flessibilità.

Inoltre lo sviluppo di tali tecnologie rappresenta un valido contributo al rinnovamento di impianti a ciclo integrale che potrebbero dotarsi di reattori ibridi per la produzione di una gamma di acciai fino ad ora forniti in situazione di *overquality* rispetto alle esigenze del cliente.

Tutto questo, si unisce alla possibilità di riduzione dei consumi energetici da parte delle acciaierie elettriche, passando da una media di 350 Kwh/t a 150 Kwh/t, ancora riducibili utilizzando impianti di preriscaldamento dei rottami.

Dal punto di vista delle emissioni di anidride carbonica, stimate per una acciaieria elettrica fra i 300 e i 350 Kg di CO₂ per tonnellata di acciaio prodotto e intorno ai 2180 Kg/t per un impianto a ciclo integrale, si può stimare, utilizzando il 50% di ghisa in carica, una emissione di CO₂ pari a 1420 Kg/t.

Ottenendo da reattore ibrido un prodotto siderurgico dalle caratteristiche paragonabili, fino ad una gamma medio-alta, all'acciaio ottenuto da ciclo integrale, è lecito considerare la riduzione delle emissioni ottenibile convertendo parte della produzione da ciclo integrale al reattore ibrido. Rispetto alla quota di riduzione delle emissioni assegnata all'Italia a Kyoto, ogni milione di tonnellate di acciaio prodotto con ibrido, piuttosto che da ciclo integrale, coprirebbe il 2.25% della quota totale di riduzione spettante all'Italia.

Tenendo conto della quota di riduzione ipotizzabile per i soli processi industriali, ogni milione di tonnellate di acciaio prodotto con ibrido, piuttosto che da ciclo integrale, ridurrebbe di circa l'11% le emissioni di CO₂.

Bibliografia.

1. L'industria siderurgica italiana nel 1999. Federacciai, relazione annuale. Elaborazione da dati IISI.
2. Latest EAF statistics from IISI. November 1999. Dal sito www.aise.org.
3. Quality steel from the EAF. Millman, S., EAF Seminar. Pittsburgh, November 15, 1999.
4. Eco-steel design for balancing "Environmental loads" and "Mechanical properties". Tsuchida, N., Tomota, Y. and Nagai, K.
5. Ecomaterials? Materials ecology? Boade Sun, Yaohe Zhou
6. Data service. European Environment Agency. Dal sito <http://warehouse.eea.eu.int>
7. Il forno elettrico: le opzioni tecniche e la salvaguardia dell'ambiente. Repetto, E., Baldieri, F. La metallurgia italiana, 7/2000.
8. Rapporto ENEL per il 1999. Dal sito www.enel.it
9. Metallurgia e tecnologia dei materiali metallici. Burdese, A. UTET, Torino 1997.
10. Impianto per la produzione di ossigeno: bilancio energetico ed interventi per l'ottimizzazione dei consumi specifici. F.Cantore, tesi di laurea, Politecnico di Torino (1990).
11. Steel Technology Roadmap. Dal sito www.aise.org.