

EVOLUZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI NELLA PRODUZIONE DI ACCIAIO AL FORNO ELETTRICO

A. Borroni*, G. Cadeddu**, C.M. Joppolo***,
B. Mazza*, G. Nano*

Con la presente indagine si è voluto studiare l'evoluzione tecnologica e dei consumi energetici, intervenuta in anni recenti nel processo produttivo delle acciaierie elettriche, confrontando tra loro due campioni di impianti e dei relativi dati di conduzione, l'uno rappresentativo della situazione negli anni 1979-80 e l'altro della situazione 1985-87. Gli input energetici dei forni esaminati con il secondo campione risultano più contenuti rispetto a quelli del campione precedente. Si registra una diminuzione globale degli input energetici, al primo e al secondo livello di analisi, del 20%: la contrazione è rilevante soprattutto per quanto riguarda gli input dovuti ai materiali di consumo (-42%). Anche l'energia elettrica consumata direttamente nel forno registra una contrazione del 17% e vede ridursi la sua incidenza dal 95% all'81% fra i vettori energetici utilizzati nel processo; corrispondentemente si assiste a un rilevante incremento della quota di energia, consumata nel forno, derivante da combustibile e da carbone, con parziale sostituzione fra fonti energetiche primarie.

Premessa

La situazione tecnologica e impiantistica del settore siderurgico elettrico si è profondamente modificata negli anni più recenti e si è assistito a un processo di concentrazione della capacità produttiva con modifiche e sostituzione degli impianti esistenti.

Nel 1981, periodo di massima espansione, con 228 forni in esercizio (trascurando le unità inferiori a 10 t), in Italia veniva realizzata una produzione di 12.715.000 t di acciaio. In meno di cinque anni la base produttiva risulta completamente mutata: nel 1986 vengono censiti 131 forni in esercizio e in riserva (80 forni in esercizio tutti superiori alle 30 t), che producono 12.531.000 t di acciaio. A fronte di una sostanziale stabilità della quota di acciaio prodotto, grazie a numerose modifiche impiantistiche e di processo, si è quindi consolidata una concentrazione, sia per quanto concerne il numero dei produttori che il numero di impianti utilizzati.

Il consumo elettrico del comparto siderurgico nel 1980 raggiungeva i 19,9 miliardi di kWh, costituendo il

19,9% dei consumi di elettricità nei settori industriali, ovvero il 12,2% del consumo elettrico nazionale. Negli anni successivi il consumo di settore si ridimensiona toccando il minimo di 16,5 miliardi di kWh nel 1983; nel 1987 risale a 17,8 miliardi di kWh e incide per il 16,7% rispetto al consumo industriale e per il 9,2% del consumo elettrico: rimane quindi elevata l'incidenza del settore siderurgico nel panorama energetico nazionale.

Per quanto riguarda l'utilizzo all'interno degli stabilimenti siderurgici, si è stimato un impiego complessivo nei forni ad arco di 7 miliardi di kWh nel 1987: questo impiego costituisce la componente più importante del consumo di energia elettrica per usi termici nel quadro energetico nazionale.

Per quanto riguarda la potenza elettrica massima impegnata dai forni, essa rimane elevata, pur riducendosi dai 3800 MVA del 1980 ai 3100 MVA del 1986 (stima: dati Enel), soprattutto a causa della struttura tariffaria multioraria.

Obiettivo dell'indagine

Con la presente indagine si è voluto studiare l'evoluzione tecnologica e dei consumi energetici, intervenuta in anni recenti nel processo produttivo delle acciaierie elettriche, confrontando fra loro due campioni di impianti e dei relativi dati di conduzione, l'uno rappresentativo della situazione negli anni 1979-80 e l'altro della situazione 1985-87. Gli impianti di entrambi i campioni producono acciai da costruzione al carbonio e basso legati, successivamente trasformati in laminati lunghi.

Le caratteristiche dei forni sottoposti a indagine nel 1979-80, cioè prima del processo di razionalizzazione e di ristrutturazione, sono riportate in tab. 1.

Le tecniche di analisi energetica e la loro applicazione a queste lavorazioni sono state illustrate in un precedente articolo [1], cui si rimanda anche per una più dettagliata descrizione del primo campione di forni.

Per quanto riguarda il secondo campione di forni, in tab. 2 sono riportate le principali caratteristiche impiantistiche; in tab. 3 sono raccolti i consumi rilevati, riferiti alla tonnellata di acciaio spillato.

Evolutione tecnologica nel periodo indagato

Confrontando i due campioni si osservano rilevanti

* Dip. di Chimica Fisica Appl., Politecnico di Milano.

** Cestec, Milano.

*** Dip. di Energetica, Politecnico di Milano.

Tab. 1 - Principali caratteristiche impiantistiche e operative dei forni delle acciaierie considerate nel rif. [1] (periodo 1979-80)
Table 1 - Furnace features of the steel plants analysed in ref. [1] (period 1979-80)

Acciaieria elettrica n.	1	2	3	4	5
N. forni e capacità nominale (t)	3×33	2×50	1×50	2×50	1×50
Potenza elettrica nominale (MVA)	12	15	15	14	15
Potenza elettrica specifica (MVA/t)	0,36	0,30	0,30	0,28	0,30
N. bruciatori e potenza termica (MW)	2×2	—	2×2	—	—
Tempo tap-to-tap (min)	140	190	190	180	200
Produttività (t/h)	14	16	16	17	15
Messa a mille*	1099	1099	1099	1099	1099
Raffreddamento tino	no	no	no	no	no
Raffreddamento volta	no	no	no	no	no

* Il dato di messa a mille è riferito alla tonnellata di acciaio spillato

Tab. 2 - Principali caratteristiche impiantistiche e operative dei forni delle acciaierie del secondo campione (periodo 1985-87)
Table 2 - Furnace features of the steel plants analysed in this work (period 1985-87)

Acciaieria elettrica n.	6	7	8	9	10
N. forni e capacità nominale (t)	1×80	1×70	1×70	1×95	1×60
Potenza elettrica nominale (MVA)	36	30	60	50	36
Potenza elettrica specifica (MVA/t)	0,45	0,43	0,86	0,53	0,60
N. bruciatori e potenza termica (MW)	—	2×3	3×4	2×4	3×4
Tempo tap-to-tap (min)	133	95	90	105	110
Produttività (t/h)	40	44	47	54	39
Messa a mille*	1084	1067	1062	1059	1073
Raffreddamento tino	sì	sì	sì	sì	sì
Raffreddamento volta	no	sì	sì	sì	sì

* Il dato di messa a mille è riferito alla tonnellata di acciaio spillato

Tab. 3 - Consumi per tonnellata di acciaio spillato rilevati negli impianti considerati con il secondo campione
Table 3 - Consumptions per ton of liquid steel in the steel plants analysed in this work

	Unità	Acciaieria elettrica n.				
		6	7	8	9	10
Energia elettrica	kWh	524	513	503	512	517
Olio combustibile	kg	—	—	—	—	3,9
Gas naturale	Nm ³	—	5,6	7,7	5,0	—
Carbone	kg	10,0	6,0	20,0	11,1	—
Elettrodi	kg	3,8	4,6	3,1	4,8	4,1
Ferroleghie*	kg	15,0	13,8	17,3	13,7	11,0
Alluminio	kg	—	0,4	1,7	0,4	1,1
Ossigeno	Nm ³	13,0	11,5	24,6	15,9	21,0
Calce	kg	40,0	17,5	46,8	40,0	38,8
Refrattari forno	kg	8,0	7,5	2,1	2,1	3,2
Massa da spruzzo	kg	1,5	11,1	3,8	2,1	0,4
Rottame consumato	kg	54	42	40	26	47

* Impianto n. 6: FeSi (75%) = 3,5; FeMn (75%) = 11,5 kg

Impianto n. 7: FeSi (75%) = 3,3; FeMn (75%) = 5,9; FeSi (20%) Mn (70%) = 4,6 kg

Impianto n. 8: FeSi (75%) = 5,9; FeMn (75%) = 11,4 kg

Impianto n. 9: FeSi (75%) = 5,1; FeMn (75%) = 1,7; FeSi (20%) Mn (70%) = 6,9 kg

Impianto n. 10: FeSi (75%) = 3,7; FeMn (75%) = 7,3 kg

innovazioni intervenute nel periodo compreso tra il 1979-80 e il 1985-87:

- la capacità media dei forni sale da 45 a 75 t: nella miniacciaieria si generalizza la presenza di un solo forno utilizzato a pieno regime;
- la potenza elettrica specifica aumenta del 78% passando da 0,32 a 0,57 MVA/t di capacità;
- l'installazione di bruciatori ausiliari è generalizzata nei nuovi impianti; il valore medio della potenza termica fornita da tali bruciatori è pari a 8 MW per forno e costituisce una frazione rilevante della potenza termica totale;
- i pannelli raffreddati ad acqua sono presenti in tutti i forni mentre nel campione precedente non risultavano installati;
- il tempo medio di ciclo (tap-to-tap) passa da 172 a 106 minuti con una riduzione del 38%;
- la produttività media dei forni cresce fortemente e passa da 15,4 a 44,8 t di acciaio spillato/h.

Il tempo tap-to-tap è stato rilevato durante il funzionamento del forno a regime e non tiene conto dei tempi necessari per interventi di lunga durata (rifacimenti del rivestimento refrattario, sostituzione degli elettrodi, inconvenienti vari). Anche la produttività viene riferita al funzionamento a regime, in assenza quindi di soste prolungate.

Il gruppo dei forni sottoposto a questa indagine (come quello sottoposto all'indagine precedente) è stato scelto in modo da essere rappresentativo del livello tecnologico medio del settore e ciò per quanto riguarda capacità dei forni, impiantistica e pratiche operative. Va comunque precisato che il campione non è rappresentativo degli impianti più avanzati, che ora vedono ulteriori incrementi di potenza elettrica specifica (0,7-1,0 MVA/t) e l'introduzione di ulteriori innovazioni di processo: impiego di scorie sintetiche, iniezione di polverino di carbone, impianto per il trattamento dell'acciaio in siviera [2, 3]. In tutti i casi esaminati si procede a trattamento in siviera di insufflazione, di aggiustamento della composizione e della temperatura dell'acciaio; negli impianti nn. 8 e 9 si effettua anche l'operazione di desolfurazione.

Fig. 1 - Relazione produttività - potenza elettrica specifica per gli impianti considerati nel rif. [1] (nn. 1, 2, 3, 4, 5) e gli impianti analizzati in questo lavoro (nn. 6, 7, 8, 9, 10)
 Fig. 1 - Relationship between productivity and specific electric power for the steel plants analysed in ref. [1] (nos. 1, 2, 3, 4 and 5) and the steel plants analysed in this work (nos. 6, 7, 8, 9 and 10)

In fig. 1 si è evidenziata l'evoluzione consolidatasi in questi cinque anni, mettendo in relazione la produttività con la principale variabile impiantistica, cioè con la potenza elettrica specifica.

Metodologia di analisi energetica

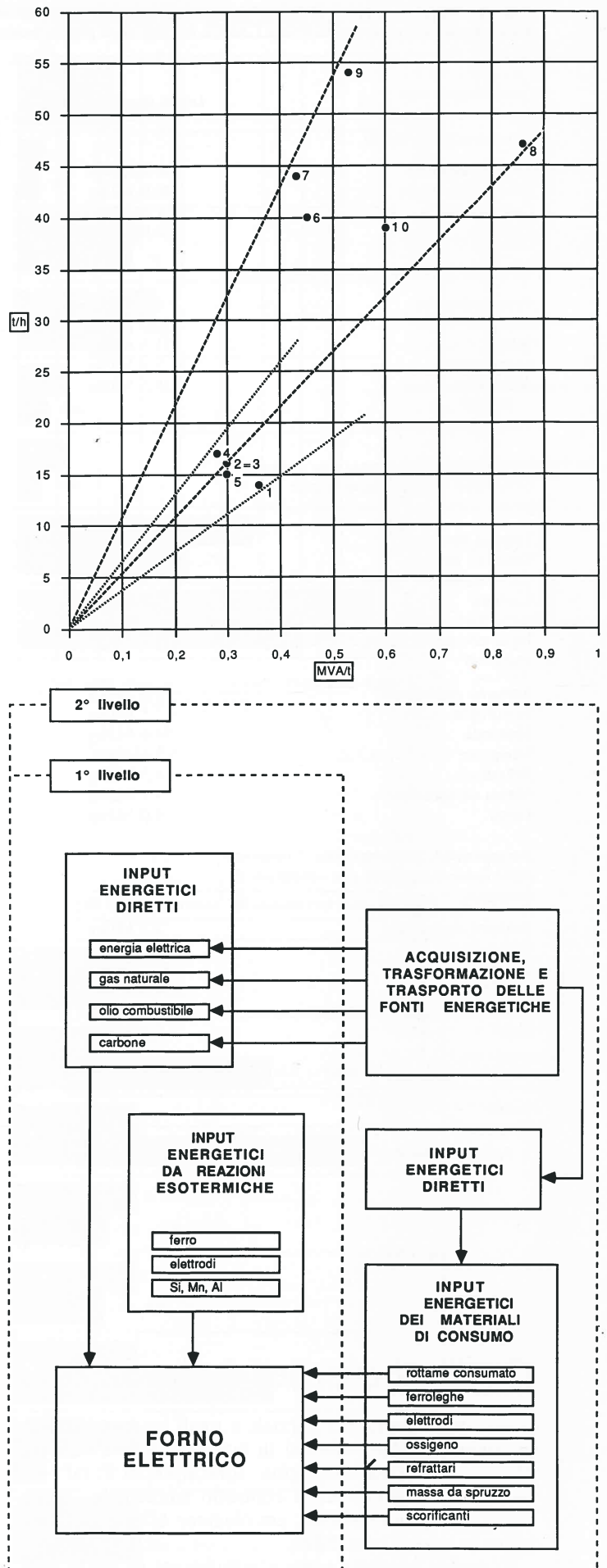
Con un'analisi energetica di processo si va a ricercare il fabbisogno totale di energia per la produzione di una data quantità di prodotto, nel nostro caso l'acciaio ottenuto con il forno elettrico; si prescinde quindi dagli altri fattori di produzione (materie prime non energetiche, capitale, lavoro, tecnologia), i quali possono essere valutati solo con analisi di tipo economico.

La fig. 2 mostra lo schema che si è adottato per l'analisi. Il fabbisogno totale di energia è la somma di tutti gli input energetici direttamente o indirettamente richiesti, cioè tutta l'energia messa in gioco nel sistema produttivo e non solo quella utilizzata nell'impianto di produzione dell'acciaio: al primo livello di analisi si considerano dunque i combustibili e l'energia elettrica direttamente usati nel forno oltre al contributo fornito dalle reazioni esotermiche, mentre al secondo livello di analisi viene valutata l'energia consumata in altre parti del sistema produttivo per rendere disponibili i vettori energetici e per produrre i materiali necessari al funzionamento del forno stesso.

Per un più approfondito esame degli obiettivi, dei fondamenti e delle convenzioni utilizzate nell'analisi energetica si rimanda alle voci [1] e [4] della bibliografia. Qui si vuole solo precisare che, nella valutazione del costo energetico associato al rottame, si è fatto riferimento al costo medio di primo livello degli impianti ora considerati (2,8 MJ/kg di acciaio), computando solamente la quota di rottame «consumata» nel processo, cioè la quantità necessaria a coprire le perdite metalliche ricavabile dal valore di messa a mille; la presente analisi si differenzia quindi da altre realizzate con altri obiettivi, dove al rottame si attribuisce costo nullo [2]. Gli input energetici specifici associati alle diverse voci (combustibili, energia elettrica, materiali: indicati in tab. 4) in linea di massima sono stati mantenuti invariati rispetto all'articolo precedente per consentire un confronto significativo con riferimento alle condizioni dei forni prima e dopo la ristrutturazione.

Fig. 2 - Schema dell'analisi energetica di processo applicata alle acciaierie elettriche: definizione dei confini del sistema al primo e secondo livello e individuazione degli input energetici e degli input di materiali di consumo

Fig. 2 - Energy analysis scheme applied to electric steel plants: definition of system boundaries at levels 1 and 2, and specification of energy and material inputs



Tab. 4 - Input energetici di primo e secondo livello rilevati negli impianti considerati con il secondo campione (MJ/t acciaio spillato)
Table 4 - Energy inputs at levels 1 and 2 for the steel plants analysed in this work (MJ/t liquid steel)

Input specifico	Acciaieria elettrica n.					
	6	7	8	9	10	
Input energetici diretti		2186	2220	2676	2348	2021
Energia elettrica	3,6 MJ/kWh	1886	1847	1811	1843	1861
Olio combustibile	40,9 MJ/kg	—	—	—	—	160
Gas naturale	34,4 MJ/Nm ³	—	193	265	172	—
Carbone	30,0 MJ/kg	300	180	600	333	—
Input energetici da reazioni esotermiche		515	511	536	488	506
Ferro (rottame)	4,7 MJ/kg	254	197	188	122	221
Elettrodi	30,0 MJ/kg	114	138	93	144	123
Silicio	31,8 MJ/kg	83	108	141	166	88
Manganese	7,4 MJ/kg	64	57	63	45	41
Alluminio	28,5 MJ/kg	—	11	51	11	33
Totale primo livello		2701	2731	3212	2836	2527
Acquisizione, trasformazione e trasporto delle fonti energetiche utilizzate al primo livello		2858	2791	2778	2800	2806
Energia elettrica	5,4 MJ/kWh	2830	2770	2716	2765	2792
Distillati petrolio	3,5 MJ/kg	—	—	—	—	14
Gas naturale	0,7 MJ/Nm ³	—	4	6	4	—
Carbone	2,8 MJ/kg	28	17	56	31	—
Input energetici diretti di materiali di consumo		746	713	805	769	725
Rottame consumato	2,8 MJ/kg	151	118	112	73	132
Ferroleghie	* MJ/kg	147	183	206	241	130
Elettrodi	34,6 MJ/kg	131	159	107	166	142
Ossigeno	6,5 MJ/Nm ³	85	75	160	103	137
Refrattari	8,3 MJ/kg	66	62	17	17	27
Massa da spruzzo	4,1 MJ/kg	6	46	16	9	2
Calce	4,0 MJ/kg	160	70	187	160	155
Acquisizione, trasformazione e trasporto delle fonti energetiche per i materiali di consumo		687	642	763	628	679
Rottame consumato	3,3 MJ/kg	177	138	131	85	154
Ferroleghie	15,9 MJ/kg	239	219	275	218	175
Elettrodi	32,2 MJ/kg	121	147	99	154	132
Ossigeno	9,4 MJ/Nm ³	122	108	231	149	197
Refrattari + massa da spruzzo	1,2 MJ/kg	11	22	7	5	4
Calce	0,4 MJ/kg	17	8	20	17	17
Totale secondo livello		4291	4146	4346	4197	4210
Totale		6992	6877	7558	7033	6737

* FeSi: 24,9 MJ/kg; FeMn: 5,2 MJ/kg; FeSiMn: 15,2 MJ/kg

Consumi energetici rilevati

Gli input energetici parziali e totali, espressi in MJ/t di acciaio spillato, rilevati in ciascuna delle cinque acciaierie sottoposte a indagine, sono riportati in tab. 4. I consumi energetici per il controllo ambientale (aspirazione fumi, ventilazione, circolazione acque) non rientrano in questa contabilità.

L'analisi condotta porta a individuare un costo ener-

getico al primo livello compreso fra 2527 e 3212 MJ/t di acciaio, con valore medio 2800 MJ/t. Si tratta di costi che si differenziano soprattutto in funzione del livello qualitativo richiesto ai diversi acciai da costruzione prodotti. In particolare nelle acciaierie nn. 8 e 9, dove si registrano i costi più elevati, viene condotta una più prolungata lavorazione in siviera, che comporta un ulteriore costo energetico al primo livello di circa 150 MJ/t non contabilizzato in questa analisi.

Rispetto agli input rilevati al primo livello negli anni

Fig. 3 - Confronto tra i fabbisogni energetici medi, al primo e secondo livello, per tonnellata di acciaio spillato, rilevati negli impianti considerati nel rif. [1] e in quelli analizzati nel presente lavoro

Fig. 3 - Comparison between the average energy requirements per ton of liquid steel at levels 1 and 2 for the steel plants analysed in ref. [1] and in this work

1979-80 (fig. 3) si registra una contrazione del 7%*; tale riduzione è da accreditare principalmente agli input da reazioni esotermiche, mentre per gli input energetici diretti si osserva una sostanziale stabilità, come risulta anche dalla tab. 5.

Si assiste a un rilevante incremento (dal 5% al 19%) della quota di energia, consumata nel forno, derivante da combustibile e da carbone rispetto a quella derivante da energia elettrica: ciò può corrispondere, almeno in parte, a una sostituzione fra fonti energetiche primarie, sostituzione che andrebbe valutata a fianco del risparmio di energia realizzato.

Il consumo di energia elettrica si riduce del 17% (fig. 4): tale risparmio è da attribuire principalmente all'aumento della potenza elettrica specifica e all'introduzione dell'involucro raffreddato, che consentono di operare per lunghi periodi a elevate potenze (pratica UHP), ottenendo un rapido trasferimento del calore: l'energia dell'arco elettrico viene ceduta alla carica metallica con un rendimento superiore rispetto alle procedure prima adottate. Quindi, nonostante la quota di energia che viene asportata dai pannelli raffreddati (corrispondente a circa 40 MJ/t di acciaio) e il calore sottratto dal sistema di aspirazione, le cui prestazioni sono state adeguate a garantire una migliore captazione delle emissioni, la quantità di energia elettrica consumata diminuisce.

Il consumo di combustibili solidi, liquidi e gassosi nel forno registra elevati incrementi: +488% per il carbone caricato in cesta o nel forno come polverino (impianto n. 8); +109% per i combustibili alimentati tramite i bruciatori ausiliari.

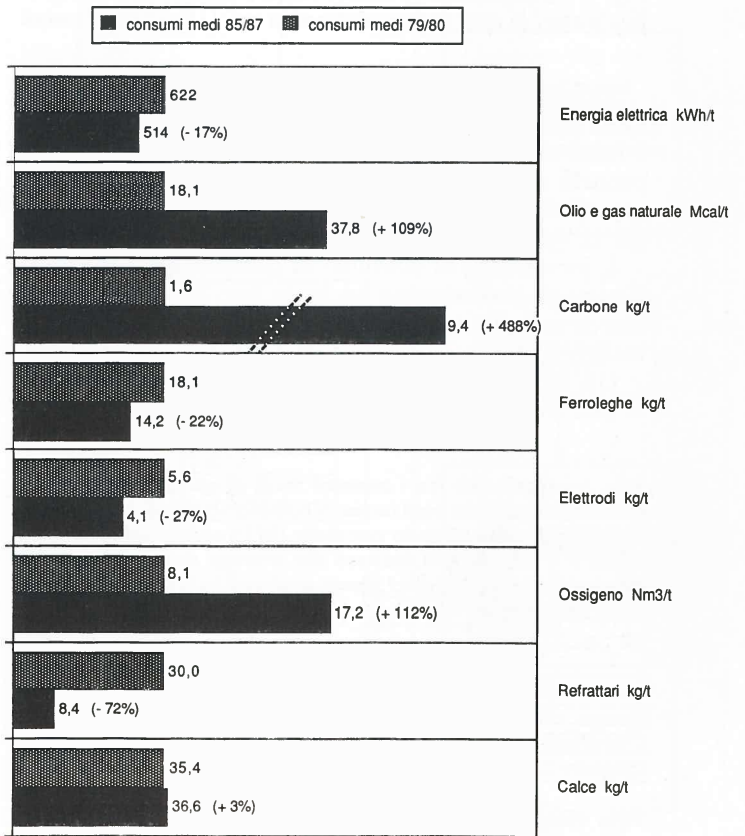
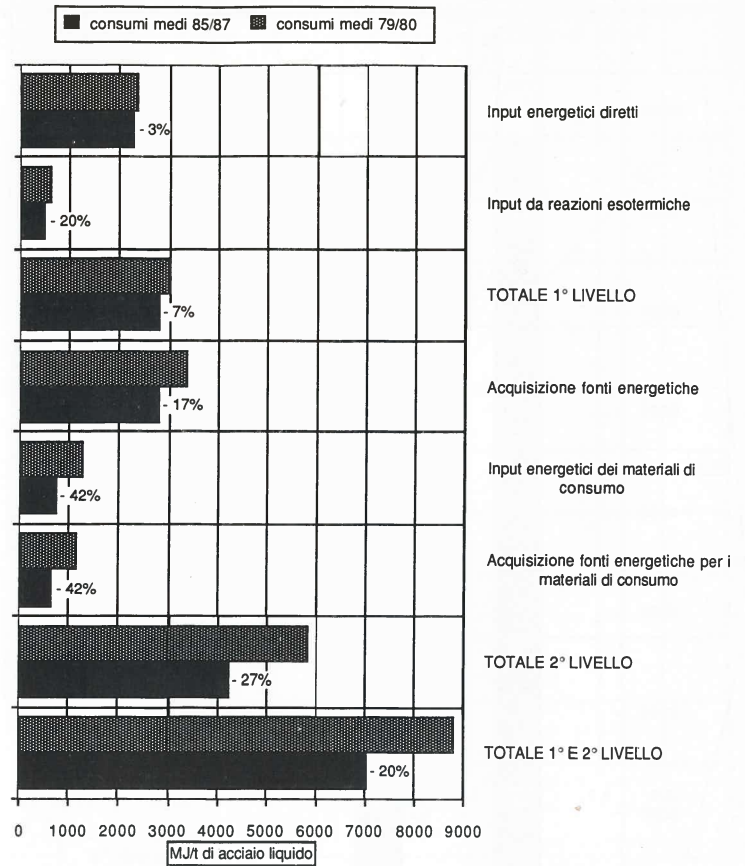
La riduzione del consumo di elettrodi (-27%) è da attribuire principalmente alla pratica UHP e alla riduzione dei tempi di fusione.

I costi energetici al secondo livello (fig. 3) registrano una contrazione del 27% sia come trascinamento degli input energetici diretti che diminuiscono e quindi implicano una riduzione anche dell'energia necessaria alla loro acquisizione, sia a causa della rilevante riduzione dei costi energetici associati ai materiali di consumo.

* I consumi rilevati per i cinque insediamenti analizzati in [1] venivano riferiti alla tonnellata di billetta. Per rendere omogenee le quantità confrontate si è tenuto conto delle perdite successive allo spillaggio, cioè per spuntature in colata continua e fondi siviera, valutate rispettivamente pari al 3 e al 2% in peso rispetto al rottame caricato in forno. La messa a mille rispetto all'acciaio spillato risulta quindi di 1099 e i consumi riferiti alla tonnellata di acciaio liquido si riducono al 94,5% rispetto ai corrispondenti valori indicati nel riferimento [1] per la tonnellata di billetta.

Fig. 4 - Confronto tra i consumi medi di energia e di materiali, per tonnellata di acciaio spillato, rilevati negli impianti considerati nel rif. [1] e in quelli analizzati nel presente lavoro

Fig. 4 - Comparison between the average energy and material requirements per ton of liquid steel for the steel plants analysed in ref. [1] and in this work



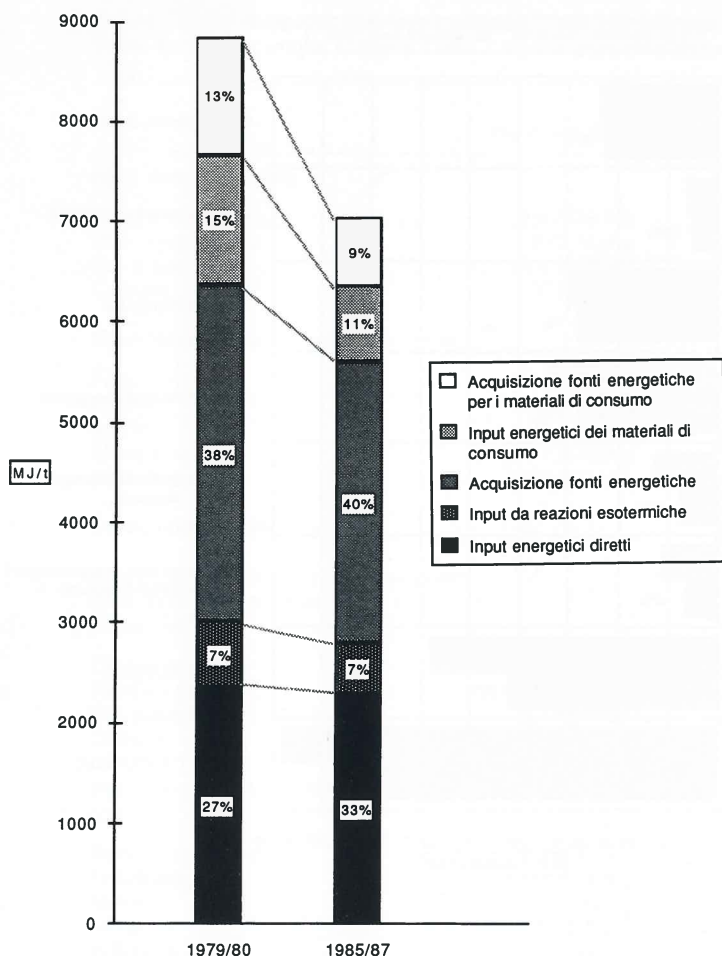


Fig. 5 - Composizione del fabbisogno energetico per la produzione di 1 t di acciaio liquido negli impianti considerati nel rif. [1] e in quelli analizzati nel presente lavoro

Fig. 5 - Components of energy requirement for producing 1 t liquid steel in steel plants analysed in ref. [1] and in this work

Il consumo di refrattari (rivestimento del forno e massa da spruzzo) si riduce del 72% (fig. 4), in quanto tutti i forni esaminati nel secondo campione sono dotati di pannelli raffreddati per il tino (che coprono il 70% della superficie) e quattro forni, ad esclusione del n. 6, anche per la volta (90% della superficie).

L'incremento di consumo di combustibili nel forno e l'impiego generalizzato anche in fase di fusione tramite lancia vede quindi aumentare (+112%) il consumo di ossigeno da 8 a 17 Nm³/t di acciaio.

Gli input energetici dei cinque impianti rappresentativi dell'evoluzione in atto si distribuiscono per il 40% al

Tab. 5 - Confronto fra i consumi medi di energia elettrica e di combustibili rilevati negli impianti considerati nel rif. [1] e in quelli considerati con il secondo campione (MJ/t acciaio spillato)

Table 5 - Comparison between the average electricity and fuel requirements for the steel plants analysed in ref. [1] and in this work (MJ/t liquid steel)

	Campione 1979-80 Campione 1985-87	
Energia elettrica	2241 (95%)	1850 (81%)
Olio e gas naturale	79 (3%)	158 (7%)
Carbone	49 (2%)	283 (12%)
Input energetici diretti	2369	2290 (-3%)

primo livello (energia direttamente entrante nel processo) e per il 60% al secondo livello: in fig. 5 la struttura degli input viene confrontata con quella ricavata negli anni 1979-80.

Insieme alla contrazione globale del consumo specifico per tonnellata di acciaio (-20%, si veda la fig. 3), si può osservare la minore quota dell'energia elettrica fra gli input energetici diretti, che ora incide per l'81% rispetto al precedente 95% (si veda la tab. 5).

Il vantaggio che si osserva allo stadio finale del processo, nel nostro caso il forno elettrico, non è stato conseguito penalizzando i consumi di materiali considerati al secondo livello dell'analisi: anzi, proprio le voci connesse con i materiali di consumo registrano i progressi più evidenti.

Conclusioni

Gli input energetici dei forni esaminati con il secondo campione risultano più contenuti rispetto a quelli individuati negli anni 1979-80. Si registra una riduzione globale (primo e secondo livello) del 20%: la contrazione è rilevante soprattutto per quanto riguarda gli input dovuti ai materiali di consumo (-42%).

L'energia direttamente entrante nel processo (primo livello) per ottenere 1 t di acciaio indica una diminuzione del 7% (del 17% per quanto concerne l'energia elettrica). Questo risultato è da attribuire al più efficiente trasferimento del calore dall'arco elettrico con la pratica UHP e, come ulteriore conseguenza del tempo di fusione ridotto, alla minimizzazione delle perdite termiche.

In questi cinque anni la contrazione del consumo specifico si accompagna alla triplicazione della produttività resa possibile da numerose innovazioni tecnologiche e di processo. Le prestazioni rilevate con il secondo campione sono il risultato di un'evoluzione ancora in corso, in quanto nei forni esaminati non erano ancora adottate le più recenti soluzioni: ulteriore incremento della potenza elettrica specifica, estensione dell'impiego di carbone, decentramento in altro impianto dell'intera fase di affinazione.

L'evoluzione tecnologica e di processo ha percorso strade che in sostanza non hanno tenuto conto del parametro energia, privilegiando anzitutto quegli interventi direttamente utili al miglioramento della produttività e della qualità del prodotto. Soluzioni quali il preriscaldamento del rottame, il recupero di calore dagli effluenti, il contenimento del calore sottratto dai sistemi di aspirazione, allo stato attuale vedono rare applicazioni, in quanto il costo dell'energia, in particolare dell'energia elettrica tramite la struttura tariffaria per i grandi utilizzatori, non rende appetibili interventi rivolti al contenimento dei consumi che comportino una rilevante quota di innovazione.

Bibliografia

- [1] A. Borroni, C.M. Joppolo, B. Mazza, G. Nano e D. Sinigaglia, «Analisi energetica del processo produttivo delle acciaierie elettriche e applicazione a cinque impianti lombardi», La Metallurgia Italiana, n. 6, 1981, pp. 251-263.
- [2] International Iron and Steel Institute, «Energy and the Steel Industry», Brussels, 1982.
- [3] H.W. Kreutzer and P.J. Salomon, «Electric Furnace Development and Technology Overview», La Metallurgia Italiana, n. 3, 1987, pp. 207-215.
- [4] T.V. Long, Ed., «Energy Analysis and Economics», IFIAS workshop report, Resources and Energy, n. 1, 1978, pp. 151-204.