

MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART

NBS - 1010a

(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)



PHOTOGRAPHIC SCIENCES CORPORATION

770 BASKET ROAD

P.O. BOX 338

WEBSTER, NEW YORK 14580

(716) 265-1800

179500082

Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione

IL RISCALDAMENTO AD INDUZIONE NEL PROCESSO *IN-LINE STRIP PRODUCTION*

PIETRO COSTA, MAURIZIO SANTINELLI
ENEA- Dipartimento Energia
Centro Ricerche di Frascati, Roma

RT/ERG/FUS/95/06

VOL 26 No 23



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione

IL RISCALDAMENTO AD INDUZIONE NEL PROCESSO *IN-LINE STRIP PRODUCTION*

PIETRO COSTA, MAURIZIO SANTINELLI

ENEA- Dipartimento Energia
Centro Ricerche di Frascati, Roma

RT/ERG/FUS/95/06

Manoscritto ricevuto in forma finale nel settembre 1994

Stampato ne' maggio 1995

Questo rapporto è stato preparato da: *Servizio Edizioni Scientifiche* - ENEA, Centro Ricerche Frascati,
C.P. 65 - 00044 Frascati, Roma, Italia

Publicato da ENEA, Direzione Relazioni Esterne, Viale Regina Margherita, 125 - 00195 Roma, Italia

SUMMARY

I.S.P., a continuous process for steel strip production, has recently been set in an Italian innovative plant, where ecological impact and power requirements are lighter than usual. This new line up (thin slab cast rolling machine, coiler furnace, four-high stands finishing mill) is also much shorter and faster and has been possible thanks to ten inductive reheating facilities, that maintain the strip hot. This report describes the studies performed by ENEA, while a prototype reheating facility was arranged by Acciaieria I.S.P. in Cremona (Italy).

The authors, after a study of the prototype electromagnetic field, calculate the heating rate, with the thermal network method. Then they detect, with a 1-D-FEM, the heat diffusion through the strip cross section.

Afterward, since the heat distribution depends on the eddy current density one, which is given by the magnetic field distribution, the authors, with a 3-D-FEM, carry out a coupled, electromagnetic and thermal, analysis in the time domain. The strip temperature map is established by the balance between skin depth heating and surface cooling: a thermal analysis, performed with a moving 2-D-FEM, take into account the effects of the different heating and cooling situations, originated by the strip moving at a speed of 6 m/min through four consecutive reheating facilities.

The temperatures of a strip sample heated by the prototype have been monitored, acquired by a computer and related with the simulation results. The little difference between experiment and simulation assessed the qualitative and quantitative validity of this FEA, that has come out to be a tool, useful to evaluate the effects of possible improvements to the I.S.P. process.

RIASSUNTO

Il processo I.S.P., un processo continuo per la produzione di laminati piani di acciaio, attivato di recente in Italia in un impianto siderurgico innovativo, dove l'estensione dell'impianto e l'impatto ambientale, i tempi di produzione e il fabbisogno energetico sono stati ridotti, richiede dieci "zone" di riscaldamento ad induzione, per mantenere il laminato caldo. Questo rapporto descrive il contributo apportato dall'ENEA, nell'ambito del contratto di associazione tra ENEA e Acciaieria I.S.P. di Cremona, alla realizzazione di un prototipo.

Dopo uno studio del campo elettromagnetico del prototipo, gli autori calcolano l'andamento della temperatura nel tempo, servendosi del metodo delle reti termiche. Con un modello agli elementi finiti ad una dimensione, 1-D-FEM, studiano la diffusione del calore nel laminato. Successivamente, dato che la mappa termica dipende da quella delle correnti indotte, a sua volta dovuta a quella del campo magnetico, gli autori si impegnano in un'analisi accoppiata, elettromagnetica e termica, con un 3-D-FEM. Eseguono, poi, l'analisi termica con un 2-D-FEM in movimento, che tiene conto delle diverse situazioni di raffreddamento e riscaldamento incontrate dalla brama lungo il laminatoio, giacché la distribuzione del calore nel laminato è il bilancio tra il riscaldamento nello strato attraversato dalle correnti indotte e la perdita di energia dalla superficie esterna.

Infine la temperatura di una brama campione, riscaldata dalla "zona" prototipo, è stata misurata da tecnici dell'ENEA e messa a confronto con i risultati dell'analisi. La piccola differenza riscontrata ha permesso di validare l'analisi eseguita e trasformare il modello in uno strumento utile a valutare gli effetti di possibili modifiche al processo I.S.P..

INDEX

1	INTRODUZIONE.....	p.	7
2	STUDI PRELIMINARI	p.	8
3	ANALISI TERMICA AGLI ELEMENTI FINITI	p.	9
4	MODELLI AGLI ELEMENTI FINITI DELLA ZONA DI RISCALDAMENTO	p.	10
5	MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI DE' LAMINATO IN MOVIMENTO.....	p.	12
6	VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI	p.	13
7	CONCLUSIONI	p.	14
	BIBLIOGRAFIA	p.	17

IL RISCALDAMENTO AD INDUZIONE NEL PROCESSO I.S.P.

1 - INTRODUZIONE

Ovunque nel mondo, la produzione di laminati d'acciaio ha luogo in impianti lunghi più di 1400 m, che trasformano il rottame ferroso in laminato piano con processi della durata di alcune ore. In Italia, invece, è stato di recente messo in servizio un impianto siderurgico otto volte più corto, in grado di produrre i laminati anche in un quarto d'ora, con costi di produzione e di investimento limitati. Lo stabilimento, grazie alle nuove tecnologie impiegate, soddisfa altresì le esigenze di risparmio energetico e ridotto impatto ambientale.

Il nuovo impianto, chiamato I.S.P. (In-line Strip Production - Produzione continua di laminati piani), basato su una tecnologia di riduzione della bramma a cuore liquido (soft reduction), è costituito da una macchina di colata continua curva, che permette di ottenere bramme sottili di spessore compreso tra 32 e 60 mm, seguita da una sezione di alta riduzione a tre gabbie "quarto", nella quale lo spessore delle bramme viene ulteriormente ridotto fino a 1.5-2.5 mm dalla cesoia e dal "Cremona box": un forno innovativo, tutto italiano, che serve a separare la velocità di laminazione a valle da quella di colaggio a monte.

La brevità del processo I.S.P. e le contenute dimensioni del suo impianto sono in gran parte dovute a dieci "zone" di riscaldamento ad induzione magnetica, situate a valle della cesoia e a monte del "Cremona box", che mantengono la bramma in temperatura, reintegrando il calore perduto nella sezione di alta riduzione. La peculiare flessibilità del riscaldamento ad induzione consente, inoltre, di adattare facilmente il processo ad acciai di diversa qualità e di contenere i costi, quando la quantità di prodotto richiesta è ridotta. Per la cosiddetta "zona" di riscaldamento, realizzata con un importante contributo dell'ENEA, non esistono a tutt'oggi altre esperienze industriali a livello mondiale.

L'intervento dell'ENEA, che ha il compito istituzionale di razionalizzare i grandi impianti utilizzatori di energia italiani (tipicamente stabilimenti siderurgici, metallurgici e per la produzione di materiali di base e semilavorati), è stato focalizzato sulla parte innovativa dell'impianto I.S.P. attraverso rilievi sperimentali dei parametri di esercizio e di temperatura delle bramme, studi dei campi elettromagnetici delle "zone" di riscaldamento, simulazioni computerizzate dei comportamenti del laminato e con un'analisi del risparmio energetico

conseguibile, che ammonta, in un anno, riferito solo alla parte innovativa, ad oltre 38.300 TEP (tonnellate equivalenti di petrolio), circa il 65% in meno rispetto ad un impianto convenzionale.

Gli autori, due ingegneri esperti nella progettazione di impianti per la fusione nucleare di Cremona, sono stati incaricati di fornire un supporto teorico ai tecnici dell'industria metallurgica, nella realizzazione del prototipo di una "zona" di riscaldamento. Qui di seguito si descrivono le varie fasi, in cui si è articolata l'interazione tra i due gruppi, dalle prime discussioni sul dimensionamento ottimale di un prototipo della zona di riscaldamento, fino alla messa in servizio del componente industriale.

2 - STUDI PRELIMINARI

Le indagini sono iniziate, quando il processo I.S.P. ancora non esisteva, con una serie di studi preliminari, svolti al fine di fissare le principali variabili di progetto. In modo analitico, ad esempio, è stato affrontato il concetto di profondità "critica" di penetrazione delle correnti indotte, che determina la frequenza dell'alimentatore, che permette il miglior trasferimento di potenza dall'induttore all'indotto. Mediante la legge di Biot e Savart, poi, si è calcolato il campo elettromagnetico del prototipo, opportunamente schematizzato. Si è trovato così che, in prossimità dei conduttori, il campo, praticamente costante lungo il lato minore dell'avvolgimento induttore, ha invece, lungo il lato maggiore, una variazione di circa il 10%, che provoca un discreto effetto ai bordi.

Si è quindi cercato un metodo sintetico, adatto a descrivere tutti i complessi fenomeni interagenti: il campo magnetico creato dalla corrente e la sua propagazione nei diversi materiali (acciaio, aria, ferro, rame e materiali isolanti); il moto della bramma dentro di esso; il comportamento termico dell'acciaio laminato, riscaldato per effetto Joule dalle correnti parassite e raffreddato dall'ambiente circostante. Sono invece state trascurate le correnti di spostamento, data la frequenza di pochi kHz della corrente sorgente.

In un primo tempo, per trovare l'andamento della distribuzione della temperatura nel tempo, si è simulato il laminato d'acciaio con l'analogia delle reti termiche. Suddivisa la bramma in 22 strati, nel senso del suo spessore, una rete elettrica, opportunamente configurata, ha permesso di simulare nel tempo l'andamento della temperatura dei vari strati, rappresentando con una corrente elettrica la diffusione del calore dagli strati esterni, portati inizialmente ad una temperatura più alta (mediante riscaldamento induttivo), a quelli interni e nell'ambiente circostante. Gli andamenti superficiali così trovati sono risultati in perfetto accordo con rilievi sperimentali effettuati successivamente su un prototipo allestito presso lo stabilimento I.S.P. In questa fase ci si è serviti del codice di calcolo ATP (Alternative Transient Program), in uso presso il C.R.E. Frascati.

Successivamente, scegliendo un codice di calcolo agli elementi finiti, tra i prodotti commerciali disponibili sul mercato, si è realizzato un modello molto semplice, in cui la

bramma, partendo da una temperatura uniforme iniziale, che corrisponde alla fase in cui essa ha appena subito un raffreddamento, perché è uscita dalla sezione ad alta riduzione ed è stata tagliata dalla cesoia, viene riscaldata adiabaticamente sulle due superfici maggiori. La bramma è stata suddivisa in elementi finiti ad una dimensione, nel senso del suo spessore. Gli elementi, del tipo LINK 32, ne rappresentano gli strati superficiali, riscaldati per effetto Joule dalle correnti indotte, il cuore caldo e la superficie radiante: si è ottenuta così una descrizione della diffusione del calore più dettagliata, ma pur sempre in accordo con i risultati dell'analogia delle reti termiche.

A conclusione di queste indagini preliminari:

- il progetto originario del prototipo è stato verificato, ed in parte modificato (cambiando la forma dei concentratori di flusso, così da limitare le dispersioni, ed aumentando la frequenza dell'alimentazione elettrica, al fine di adeguare la profondità di penetrazione della corrente allo spessore del laminato e ridurre nello stesso tempo la corrente erogata, con un netto miglioramento del bilancio energetico);
- la complessità dell'analisi ha portato all'impiego del metodo agli elementi finiti, ritenuto il più adatto a descrivere il processo in modo realistico; quale supporto su cui implementare il modello della zona, è stato adottato il codice di calcolo ANSYS, revision 4.4a, di larga diffusione nel settore metallurgico.

3 - ANALISI TERMICA AGLI ELEMENTI FINITI

Il modello preliminare, visto nel paragrafo precedente, è stato sviluppato in un modello a due dimensioni, che simula, in un quarto della sezione trasversale del laminato (spessore scelto: 25 mm), un riscaldamento degli strati superficiali della durata di 4 sec, con una contemporanea diffusione del calore al resto della sezione e all'ambiente circostante, ed un raffreddamento, che dura 15 sec. La perdita di calore, dato il range di temperatura del prodotto (sopra i 1000 °K), è dovuta essenzialmente all'irraggiamento verso le pareti della zona di riscaldamento. La fase di riscaldamento, ipotizzato svilupparsi nei primi strati della lamiera, senza particolare riferimento alla sua origine, è stata simulata in modo da tenere conto che, fin dall'inizio, si ha comunque perdita di energia per irraggiamento.

L'utilizzo di questo modello, che esegue l'analisi termica non solo alla superficie esterna, ma anche negli strati interni e nei bordi, ha permesso di studiare in dettaglio l'irraggiamento e la conduzione interna, partendo da differenti condizioni iniziali, e nello stesso tempo, di verificare il comportamento del codice scelto.

La distribuzione della temperatura nella bramma è determinata dal bilancio tra il calore generato nello strato superficiale, attraversato dalle correnti indotte, e quello perduto dalla superficie esterna. La mappa termica dipende da quella della densità di corrente, che, a sua volta, è data da quella del flusso magnetico prodotto dalle correnti ad alta frequenza, che

percorrono gli avvolgimenti induttori. Il codice agli elementi finiti prescelto dagli autori, ANSYS, permette di trattare contemporaneamente i due campi, elettromagnetico e termico, in un'analisi accoppiata.

Gli elementi finiti impiegati dal codice per le seguenti simulazioni sono essenzialmente di cinque tipi: PLANE 13, LINK 31, LINK 32, PLANE 55 e SOLID 96.

Il PLANE 13 è definito da quattro nodi, tutti sullo stesso piano, che possono avere ognuno, a seconda del tipo di simulazione effettuata, fino a quattro gradi di libertà, con caratteristiche strutturali, termiche, elettriche e magnetiche, anche accoppiate tra di loro. Per queste ultime è possibile la descrizione con la curva B-H. L'input di questo elemento è molto vario: dalla quantità di calore generato e dalla distribuzione iniziale di temperatura, per un'analisi termica, alla densità di corrente impressa, per una simulazione elettrica, al tensore di Maxwell, per un calcolo di forze magnetiche. In particolare, il PLANE 13 simula le correnti indotte, utilizzando il potenziale elettrico scalare, insieme alla componente ortogonale del potenziale vettore.

Il LINK 31 è il cosiddetto Radiation Link: un elemento monodimensionale, che modella lo scambio di calore per irraggiamento tra due punti nello spazio, tenendo conto del fattore di forma, del coefficiente di emissività e della costante di Stefan-Boltzmann. Nel modello ad una dimensione è stato utilizzato il LINK 32, che simula il flusso di calore per conduzione tra i due nodi dell'elemento. L'area associata a questo elemento è stata assunta pari alla superficie della faccia maggiore della lamiera. Il nodo libero dell'elemento (nel modello suddetto, il cuore del laminato) è assunto essere adiabatico.

Anche il PLANE 55 ha quattro nodi complanari, come il PLANE 13, ma questi hanno un solo grado di libertà: la temperatura, cui sono legate pure le proprietà del materiale. Il lato libero dell'elemento è assunto essere adiabatico. Elemento prettamente termico, permette, tra l'altro, di simulare la fusione di un solido.

Un discorso a parte merita il SOLID 96, che all'epoca di questo lavoro era in beta-test. Il SOLID 96 ha otto nodi e consente di modellare campi magnetici tridimensionali, servendosi del potenziale scalare o del potenziale vettore. Il potenziale magnetico scalare può essere impiegato solo in quelle regioni dove, quando la permeabilità tende a infinito, il campo risultante tende a zero. Altrove si utilizza il potenziale vettore. Per il calcolo delle correnti indotte, è necessario fornire anche il potenziale elettrico. Il SOLID 96 può essere impiegato anche con le forze di Lorentz o il tensore di Maxwell, per modellare sforzi, deformazioni e spostamenti.

4 - MODELLI AGLI ELEMENTI FINITI DELLA ZONA DI RISCALDAMENTO

Le zone di riscaldamento sono forni ad induzione, che hanno lo scopo di mantenere caldo il laminato d'acciaio, reintegrandone il calore perduto durante il processo. L'incremento e

l'equalizzazione della temperatura sono ottenuti grazie alla particolare configurazione adottata, che consente di concentrare il flusso elettromagnetico in accordo con la geometria del prodotto. Ogni zona dispone di due avvolgimenti rettangolari identici coassiali in tubo di rame, raffreddati ad acqua, percorsi da una corrente sinusoidale di 15 kA per spira, alla frequenza di 6.7 kHz, determinata (vedi paragrafo 2) sulla base della profondità di penetrazione (pari a 12.5 mm) delle correnti ingotte. Allo scopo di allontanare dalle parti metalliche della zona le linee d'induzione e spingerle nella bramma (il cui acciaio, essendo sopra la temperatura di Curie, si comporta come amagnetico), il riscaldatore è provvisto di due concentratori di flusso in acciaio (laminato, per ridurre le perdite per correnti parassite), raffreddati ad acqua, posti uno sopra ed uno sotto il percorso della lamiera.

In figura 1 appare la sezione longitudinale del prototipo della zona di riscaldamento, che la bramma attraversa da sinistra verso destra, spinto da una serie di rulli nel passaggio lasciato al centro. Sono indicati gli avvolgimenti induttori e il materiale dei concentratori di flusso; le dimensioni sono espresse in mm.

Come primo approccio, per avere la mappa del campo magnetico e della densità delle correnti

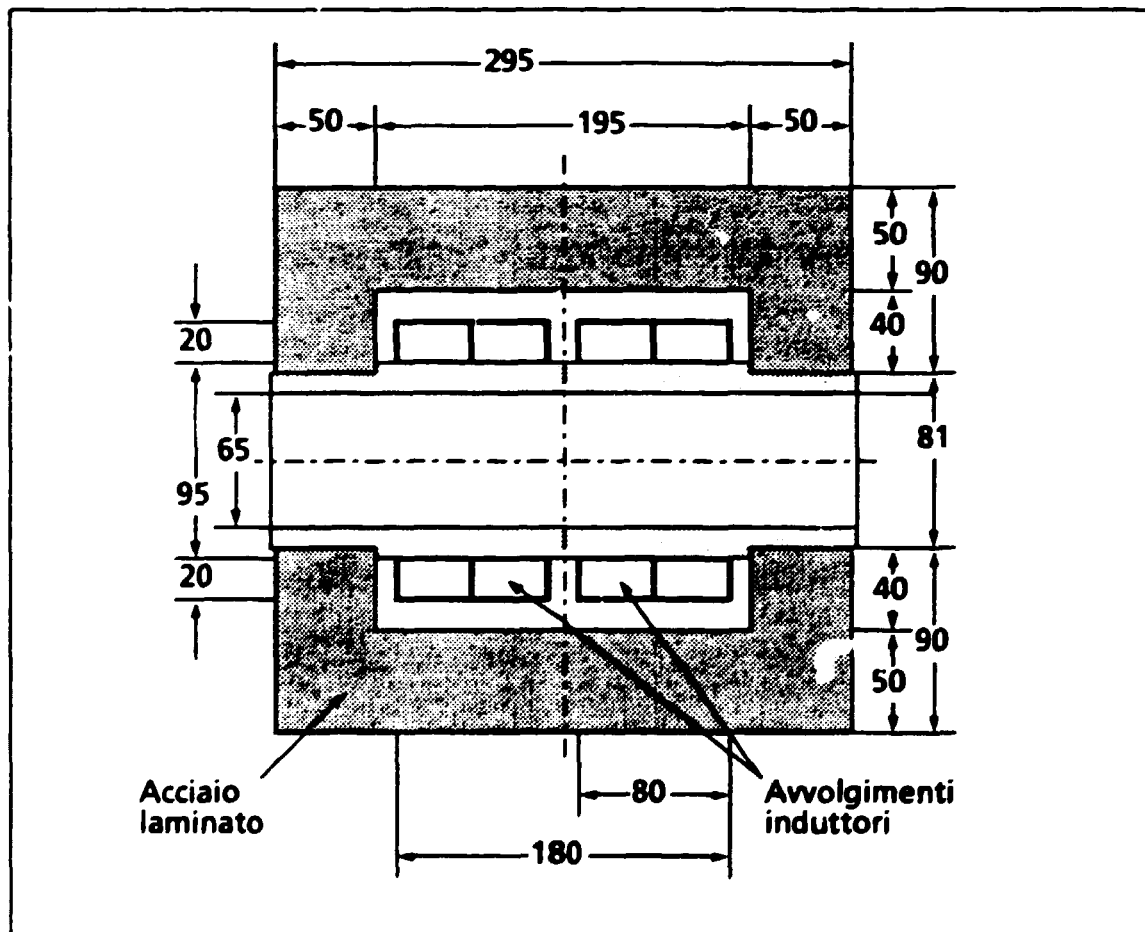


Fig. 1 - Sezione longitudinale del prototipo della zona di riscaldamento

indotte, è stato realizzato un modello a 3 dimensioni. In base alla definizione precisa della geometria del riscaldatore, fornita dalla ditta assistita, 1820 elementi SOLID 96 simulano un ottavo del prototipo e della bramma (spessore scelto: 25 mm) che lo attraversa.

Con questo modello preliminare, si è eseguita l'analisi armonica a 6.7 kHz. Dato che con questo modello la disuniformità del campo magnetico, descritta nel paragrafo 2, tra la parte centrale del laminato ed i suoi bordi non è risultata rilevante ai fini del riscaldamento, gli autori hanno preso in esame la possibilità di utilizzare un modello a due dimensioni, allo scopo di ridurre la richiesta di capacità di calcolo. L'analisi, di tipo armonico, eseguita con il metodo del potenziale vettore, mediante un modello di 150 elementi PLANE 13, che descrivono un quarto della sezione trasversale del laminato, del concentratore, dell'avvolgimento e dello spazio tra loro interposto, ha dato risultati molto simili a quelli dell'analisi a tre dimensioni.

Gli autori hanno quindi scelto il modello a due dimensioni, per portare a termine tutta una serie di simulazioni, volte a stimare l'influenza di ogni parametro sul prodotto finito.

5 - MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI DEL LAMINATO IN MOVIMENTO

Si è così giunti alla definizione di un modello, che descrive il riscaldatore nel suo funzionamento termo-elettromagnetico: la geometria del sistema rende adeguato un modello a due dimensioni, che considera un quarto della sezione della zona. L'analisi accoppiata elettromagnetica e termica porta alla determinazione della mappa della densità della corrente indotta nel laminato e permette quindi di ricavare il file, che descrive, elemento per elemento, il flusso di calore generato per effetto Joule durante l'attraversamento. Ma in tutti i modelli agli elementi finiti illustrati nei paragrafi precedenti, ciascun punto del laminato o si trova all'interno della zona, oppure al suo esterno, sempre in una posizione fissa. In realtà il singolo punto della bramma, nel suo moto nel riscaldatore, vede prima aumentare il campo magnetico (e quindi correnti indotte, calore e temperatura), che raggiunge due valori massimi in corrispondenza delle due spire del riscaldatore, e poi lo vede diminuire nella fase di uscita da questo. Questi modelli, inoltre, non tengono conto dei periodici riscaldamenti e raffreddamenti della lamiera, che attraversa, nel corso del processo I.S.P., tutte le zone di riscaldamento: quando vi entra, si riscalda, quando ne esce, perde parte del calore acquistato.

Gli autori hanno allora realizzato un modello più accurato, che permette di simulare il comportamento termico del laminato in movimento alla velocità di 6 m/min, attraverso quattro zone consecutive. Il codice descrive, in due dimensioni, la metà superiore della sezione longitudinale della bramma, lunga 2480 mm, suddivisa in 124 segmenti, ognuna formata da otto elementi PLANE 13. Nell'analisi termica, condotta con il grado di libertà temperatura, il laminato avanza di due segmenti per iterazione. Ad ogni elemento, quando si trova all'interno di una zona di riscaldamento, viene associato il flusso di calore scritto sul file di uscita del calcolo magnetotermico.



Fig. 2 - Mappa termica sezione laminato piano.

L'analisi termica transitoria non ha calcolato solo il riscaldamento dei singoli elementi e la trasmissione del calore nel laminato, ma anche il loro raffreddamento, che è dovuto essenzialmente a irraggiamento, sia verso le pareti della zona, che verso l'ambiente esterno. Di quest'ultimo si è tenuto conto nell'analisi, per mezzo dell'elemento LINK 31. Durante il movimento, cambiano pure le condizioni di irraggiamento, che dipende dalla temperatura ambiente, fuori dai 10 riscaldatori, e da quella delle loro pareti, dentro di esse. Anche le temperature delle pareti dei riscaldatori sono legate alla posizione che questi occupano lungo il percorso: a queste si sono assegnati valori crescenti nel verso di avanzamento della bramma.

Con il modello del laminato in movimento, si è analizzata l'evoluzione della distribuzione della temperatura (omogeneizzazione) durante le successive fasi di riscaldamento-irraggiamento, attraverso il percorso della bramma. Nella figura 2 è visibile una mappa termica (in gradi Kelvin) della sezione del laminato, passato attraverso quattro zone di riscaldamento consecutive.

6 - VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEL MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI

Nell'ambito del contratto di associazione con l'industria metallurgica di Cremona, i tecnici dell'ENEA hanno prelevato un campione di laminato e vi hanno inserito alcune termocoppie a differenti profondità, allo scopo di valutare la penetrazione del riscaldamento a induzione. Il campione prelevato, delle stesse dimensioni dei laminati standard, è stato fatto passare più volte attraverso il prototipo della zona di riscaldamento: ogni volta i tecnici dell'ENEA misuravano con due pirometri ad infrarosso, posti all'ingresso ed all'uscita del prototipo, l'incremento di temperatura sulla superficie del campione di laminato. Un sistema di monitoraggio assistito da un personal computer ha acquisito tutte le misure di temperatura e le ha messe in relazione a misure di tensione, frequenza e corrente, eseguite sugli avvolgimenti induttori, allo scopo di valutare il rendimento del prototipo.

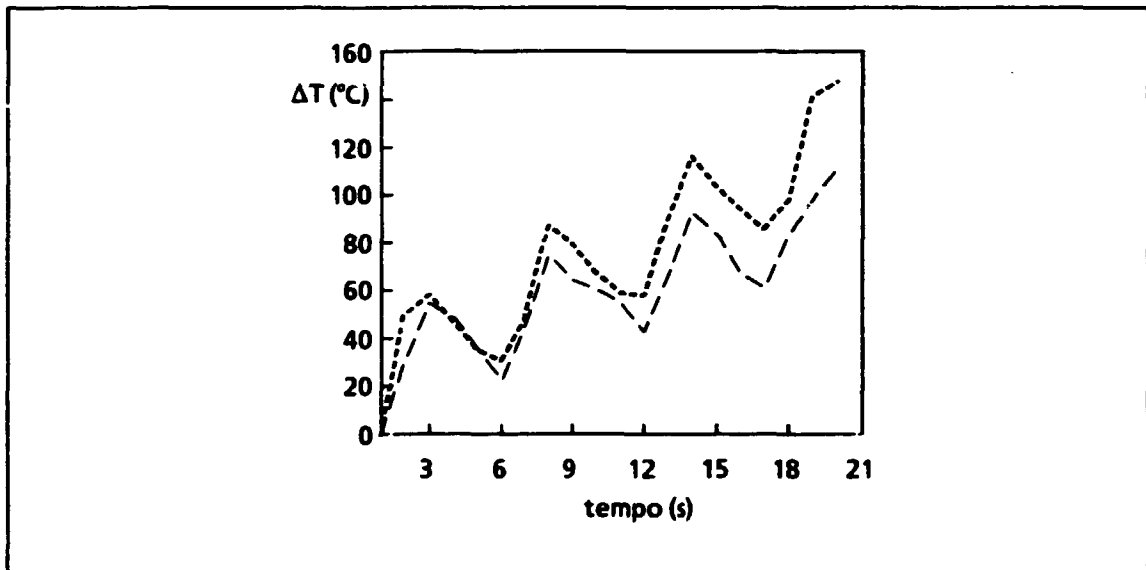


Fig. 3 - Valore misurato (.....) e calcolato (-----) del riscaldamento del laminato.

Questi rilievi sperimentali, poi, sono stati confrontati con i risultati dell'analisi agli elementi finiti. In figura 3 sono messi in relazione i valori misurato (linea punteggiata) e calcolato (linea tratteggiata) dell'evolversi della temperatura della bramma, nell'attraversamento delle quattro zone.

Tenuto conto delle inevitabili inesattezze di un modello agli elementi finiti (basti pensare, ad esempio, al coefficiente di emissività dell'irraggiamento termico o al fatto che molti parametri, che dipendono dalla temperatura, sono invece stati assunti costanti), la corrispondenza tra il modello e la realtà è da considerarsi soddisfacente. Tanto più che un'analisi agli elementi finiti è volta a simulare il comportamento complessivo di una zona di riscaldamento.

7 - CONCLUSIONI

La differenza accettabile riscontrata tra esperimento e simulazione ha permesso agli autori di validare l'analisi agli elementi finiti, che è risultata essere uno strumento utile a valutare, in breve tempo e ad un costo relativamente basso, gli effetti di possibili modifiche al processo I.S.P.

Validi risultati dell'impiego dell'analisi agli elementi finiti al processo I.S.P. sono stati:

- ottimizzazione delle alimentazioni elettriche, riducendo i valori della corrente fornita agli avvolgimenti;

- miglioramento della qualità del prodotto finito, aumentando la penetrazione delle correnti nella lastra, e quindi l'omogeneità del riscaldamento, adattando la frequenza delle alimentazioni elettriche al tipo d'acciaio;
- crescita del rendimento, riducendo le perdite di calore, mediante l'installazione di schermi termici.

Il processo I.S.P. presenta, infatti, molti punti, in cui l'acciaio in lavorazione irradia energia nell'ambiente. Nei punti, in cui la dispersione di calore è particolarmente elevata, si è pensato di limitarla per mezzo di schermi, che, una volta raggiunto l'equilibrio termico, portandosi a temperature prossime a quelle superficiali del laminato, ne riducano le perdite. Gli schermi previsti nel modello agli elementi finiti sono costituiti da due lastre di materiale coibente, poste, una sopra e una sotto la bramma, nei punti di passaggio da un riscaldatore all'altro; per non impedire al personale addetto al controllo la vista della bramma, lungo i lati corti della sezione del laminato gli schermi non sono presenti. Poiché si trattava di una prima verifica sull'efficacia della schermatura, non sono state prese in esame le caratteristiche fisiche dei materiali costituenti gli schermi (ad esempio, schermi refrattari, o metallici con recupero di calore).

Le figure 4 e 5 mostrano le mappe termiche (in gradi Kelvin) della sezione trasversale di un laminato, con le stesse caratteristiche fisiche e geometriche di quello studiato sopra, ottenute

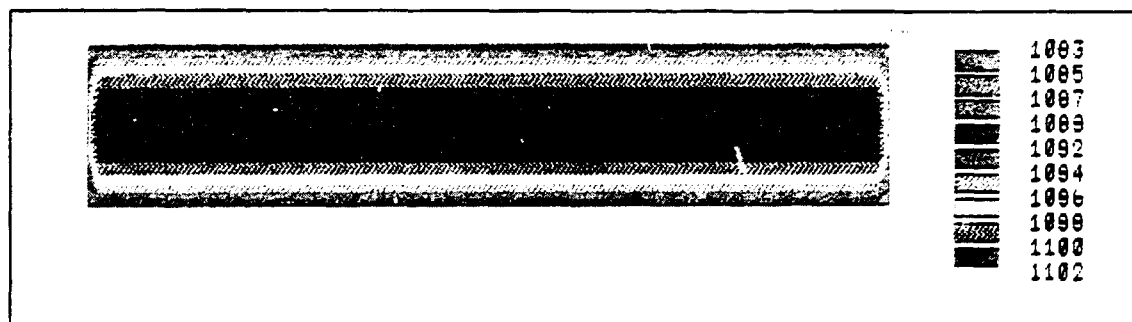


Fig. 4 - Temperatura a lastra dopo 3.2 sec di irraggiamento senza schermo.

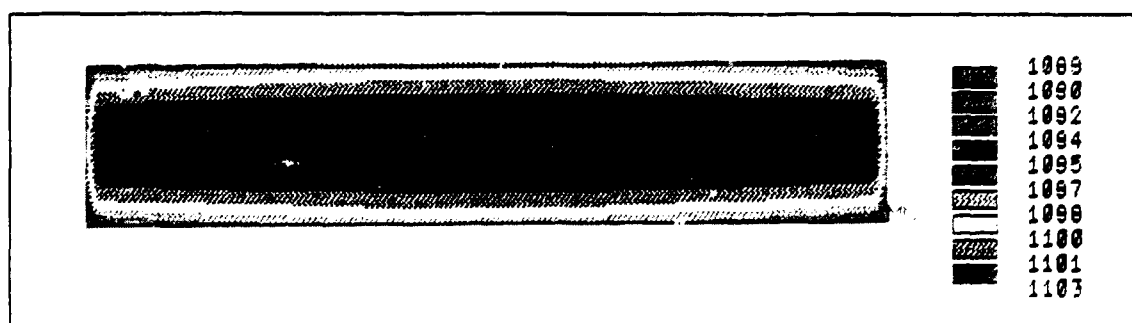


Fig. 5 - Temperatura del laminato dopo 3.2 sec di irraggiamento e 180 sec di irraggiamento a temperatura costante per riscaldamento schermo.

entrambe dopo 3.2 sec di irraggiamento, partendo da una temperatura uniforme di 1103 °K ed una temperatura ambiente di 313 °K. Nel caso in cui sono presenti gli schermi termici (figura 5), portati a regime in 1800 sec, si assiste ad una diminuzione di temperatura inferiore (14° invece di 19°) e la diversa forma della mappa indica minori perdite di energia nella parte centrale della sezione.

In figura 6, le indagini effettuate durante la realizzazione del prototipo sono state sintetizzate in una sequenza, con l'intento di proporre un metodo di supporto alla progettazione. Per limitare l'utilizzo di mezzi di calcolo onerosi, la sequenza proposta parte dal modello a una dimensione, per arrivare, qualora le necessità di progetto richiedessero una simulazione dei fenomeni più spinta, a quello a tre dimensioni. Il suo uso può essere efficace per progettare impianti simili a quello realizzato a Cremona. Un diagramma di flusso simile potrebbe altresì essere impiegato in un controllo di processo, per acquisire informazioni utili alla gestione dell'impianto di laminazione nelle diverse condizioni di esercizio: basti pensare a come si potrebbe perfezionare la adattabilità dell'impianto I.S.P. a diverse quantità e qualità di prodotto.

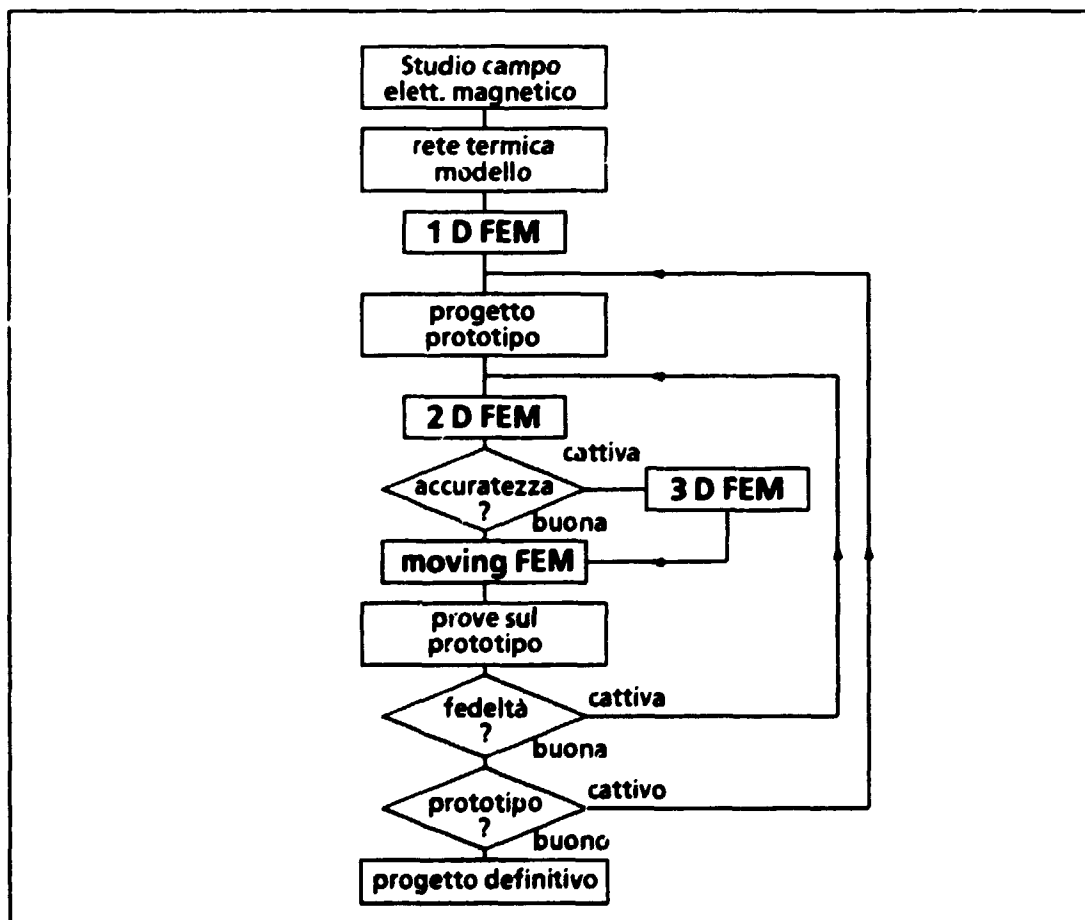


Fig. 6 - Diagramma di flusso riassuntivo.

BIBLIOGRAFIA

1. ANSYS User's Manual, Revision 4.4a, SAS, Inc. 1989
2. ASTM, Annual book of ASTM standards. 1977
3. KRUPP WIDIA Magneettechnik, Magnetic materials and components, 1984
4. Semiatin, S.L., Zinn, S., Elements of Induction Heating, EPRI, Inc., 1988
5. Sòshin Chikazumi, Physics of Magnetism, J. Wiley & Sons, 1981
6. Smithells, C.J., Metals Reference Book, Butterworths, 1962
7. Standard Handbook for Electrical Engineers, 1980
8. TERNI, Acciaio per l'energia, 1981

Edito dall'Enea
Direzione Relazioni Esterne
V. le Regina Margherita, 125 - 00198 Roma
Finito di stampare nel mese di maggio 1995
presso il laboratorio Tecnografico