



ISTITUTO PER LA CULTURA
E LA STORIA D'IMPRESA
"FRANCO MOMIGLIANO"

STEELMASTER 2006



**Modello per la
determinazione dei tempi di
slingottamento minimi per
acciai non trattati**

AUTORE

Luca Piedimonte

RELATORE

Enrico Gibellieri

INDICE

1. IL PROCESSO DI COLAGGIO NELLE ACCIAIERIE A FORNO ELETTRICO	- 3 -
1.1. ACCIAIERIA A CICLO ELETTRICO	- 3 -
1.2. COLATA DELL'ACCIAIO	- 4 -
1.2.1 LA COLATA IN LINGOTTIERA.	- 5 -
1.2.2 LA COLATA CONTINUA.	- 6 -
2. CASO APPLICATIVO	- 8 -
2.1. PREMESSA	- 8 -
2.2. OBIETTIVI	- 9 -
3. MODELLO PER LE SIMULAZIONI	- 12 -
4. RISULTATI	- 15 -
4.1. LINGOTTO 1100 MM IN ACCIAIO 42CRMO4	- 15 -
4.2. LINGOTTO 800 MM IN ACCIAIO 42CRMO4	- 19 -
4.2. TABELLE TEMPI LIMITI DI SLINGOTTAMENTO	- 22 -
5. CONCLUSIONE	- 25 -
6. BIBLIOGRAFIA	- 26 -

1. IL PROCESSO DI COLAGGIO NELLE ACCIAIERIE A FORNO ELETTRICO

1.1. ACCIAIERIA A CICLO ELETTRICO

La filiera della rifusione dei rottami utilizza un forno a suola refrattaria, sulla quale sono posti i materiali da rifondere. L'energia termica è fornita dalla produzione di archi elettrici fra tre elettrodi e la carica. Riservato alla elaborazione di acciai speciali, il processo elettrico assicura attualmente una parte importante del tonnellaggio degli acciai correnti. In questo campo ha completamente rimpiazzato il forno Martin.

Il processo elettrico è il più utilizzato, ed è caratterizzato da:

- una elevata temperatura del bagno (1800°C), facilmente regolabile, che facilita la fusione delle loppe fortemente refrattarie e la riduzione degli ossidi;
- il non intervento dell'atmosfera del forno che è neutra. Le reazioni hanno unicamente luogo fra il bagno e le aggiunte, grazie alle quali si può realizzare un mezzo ossidante o riduttore. Si può inoltre realizzare la fusione degli elementi ossidabili, come il Cr, senza perdite per formazione di ossidi.

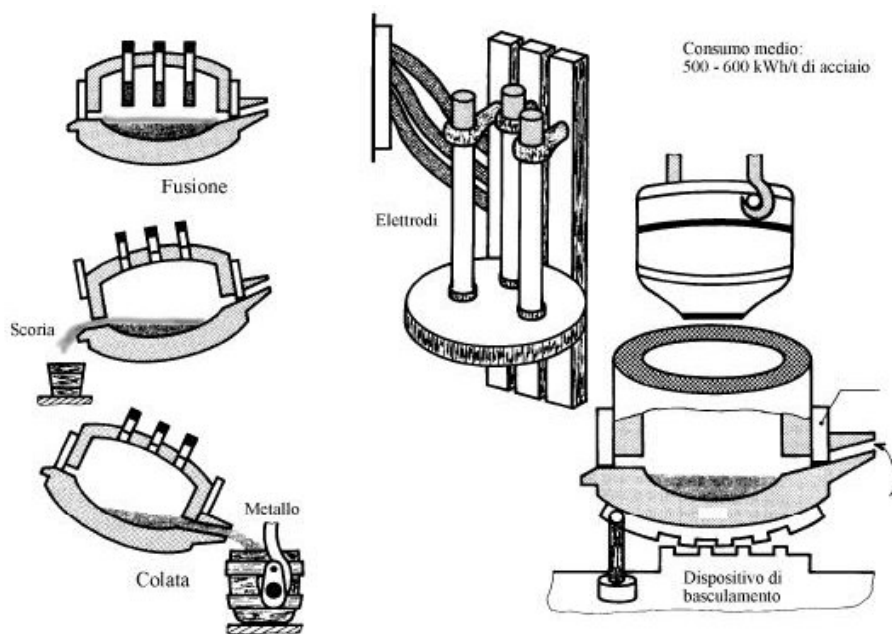


Figura 1 Forno Elettrico ad arco.

La figura 1 mostra il forno elettrico ad arco ed i suoi componenti. I forni, caratterizzati da una capacità variabile fra 5 e 250 tonnellate, sono alimentati con delle tensioni comprese fra 100 e 200V, con una intensità di corrente che può arrivare a 50000 A per elettrodo. La suola e le pareti sono ricoperti di dolomite (basica), e vengono periodicamente riparate.

L'utilizzazione delle pareti raffreddate ad acqua permette, fra l'altro, di aumentare la durata dei rivestimenti e di ridurre il consumo degli elettrodi.

La marcia comprende tre stadi:

a) **Fusione** : dopo il caricamento, la fusione ha inizio e dura qualche ora. Durante questo stadio, si aggiunge la calce che sarà necessaria alla formazione della loppa di defosforazione. Alla fine della fusione si introduce del minerale di ferro.

b) **Ossidazione e scorificazione**: l'ossido di ferro serve da vettore di ossigeno per eliminare il Si, il Mn, il C. La defosforazione può essere fortemente spinta. Alla fine dell'operazione il ferro inizia ad ossidarsi. L'alimentazione del forno si arresta e si procede alla scorificazione.

c) **Riduzioni ed aggiunte**: ricominciata l'alimentazione, si forma una loppa disossidante e desolforante mediante aggiunta di ferro-silicio, di calce e di spato fluoro. Si possono ottenere delle loppe carburate (carburo di calcio) fortemente riducenti. Al forno elettrico sono fortemente spinte sia la desolforazione che la disossidazione (lo zolfo può arrivare allo 0.008% e l'ossigeno allo 0.003%). Le aggiunte finali sono effettuate prima della seconda colata.

1.2. COLATA DELL'ACCIAIO

Con l'eccezione degli acciai per getti, la colata dell'acciaio liquido si effettua secondo due tecniche differenti.

•**Colata in lingottiera**, era la tecnica preponderante nei paesi a tecnologia siderurgica poco sviluppata, oggi si ricorre ad essa per l'entità di produzione e per le leghe che non possono essere colate in altro modo.

•**Colata continua**, che è diventata la tecnica di colaggio più diffusa nella siderurgia.

1.2.1 LA COLATA IN LINGOTTIERA.

L'acciaio elaborato secondo le procedure precedenti è raccolto allo stato liquido nelle siviere. E' quindi colato e solidificato dopo una permanenza nella siviera da 5 a 10 minuti (decantazione).

Le lingottiere sono in generale in ghisa. La loro forma prefigura quella dei prodotti laminati che si devono produrre: lingotti a sezione quadrata per i prodotti lunghi, a sezione schiacciata per i prodotti piatti.

La colata si effettua secondo due procedure:

- Colata a caduta** : il metallo si versa direttamente nella lingottiera.
- Colata in sorgente**: il metallo arriva mediante un canale in refrattario attraverso la base della lingottiera. Questa tecnica permette di ottenere degli acciai di migliore qualità, ma è più costosa.

Quando la solidificazione è sufficientemente avanzata, ha luogo lo strippaggio ed i lingotti sono inviati in forni a fossa, dove la solidificazione si completa; la temperatura viene mantenuta a 1250°C.

I difetti principali dei lingotti sono:

- **L'eterogeneità chimica**, inerente al processo di solidificazione riguarda il fenomeno della macrosegregazione (alla scala del lingotto), che riguarda il C, S, P, O. La forgiatura seguita talvolta da una ricottura di omogenizzazione rimedia parzialmente a questo difetto.
- **La presenza del cono di ritiro**, dovuto al ritiro dell'acciaio durante il raffreddamento. Questo fenomeno riguarda essenzialmente gli acciai calmati, mentre gli acciai effervescenti ne sono esenti. Si può rimediare eliminando la parte superiore ove è localizzato il cono di ritiro, oppure mediante materozzatura, oppure ancora mediante compressione.
- **Le soffiature**, caratteristiche degli acciai effervescenti, sono dovute alla formazione di CO, H₂, N₂. Sono appiattite durante la forgiatura, ma le loro

pareti possono non saldarsi. L'utilizzazione degli acciai **semicalmati** permette di approfittare dei vantaggi delle due categorie (da 0.05 a 0.15 % di Si)

- **Le cricche superficiali**
- **La formazione di ponti di solidificazione interni**, dovuti a delle anisotropie di ritiro.

1.2.2 LA COLATA CONTINUA.

La siviera alimenta direttamente un ripartitore che alimenta a sua volta diverse linee di colata. Diversi sistemi permettono di non interrompere la colata durante il cambio della siviera:

- **macchine verticali** (figura 2);
- **macchine curve** (figura 3), con curvatura allo stato solido oppure parzialmente solidificato. Le macchine verticali sono più onerose e più ingombranti.

Tuttavia per alcuni prodotti l'estrazione a cuore liquido può portare alla formazione di cricche e di segregazioni. Inoltre sulle macchine curve si ha la decantazione delle inclusioni nella parte superiore dei prodotti. Le macchine verticali sono quindi preferite nel caso di acciai di alta qualità.

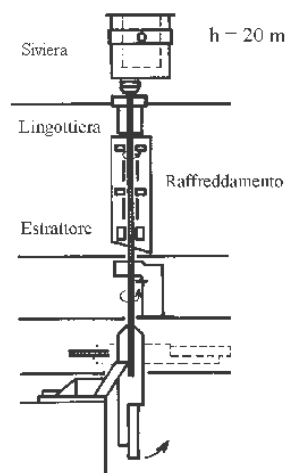


Figura 2 Colata continua - macchina verticale

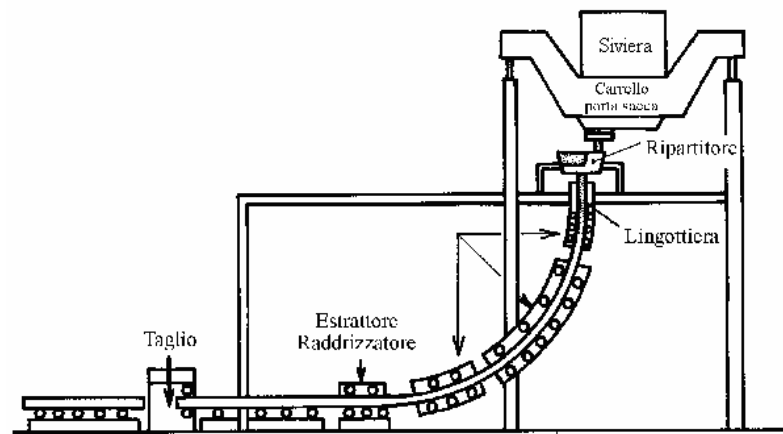


Figura 3 Colata continua - macchina curva

La colata continua comporta un aumento del ritmo di colata, e la assenza del cono di ritiro. In più essa sopprime il primo stadio della laminazione e permette di ottenere direttamente delle billette, dei blumi o delle bramme.

2. CASO APPLICATIVO

2.1. PREMESSA

L'acciaieria in questione produce lingotti da 2.5 t a 32 t, sia tondi (diametro da 310 ÷ 1300 mm ed altezza 3.5 ÷ 4.2 m) che poligonali (dimensioni di circa 1500 mm e altezza 2 m), in acciai basso legati (es. al Cr-Mo, al Ni-Cr-Mo) per fucinati e laminati.

Dopo il colaggio per mantenere il livello di durezza, misurato in pelle, al di sotto di 300 HB si utilizzano tre modalità di raffreddamento:

1. direttamente in lingottiera, nel caso di acciai al carbonio e basso legati
2. in cuffia, per acciai di media lega (si slingotta a 800-900 °C e si coprono i lingotti con una cuffia che consente di realizzare raffreddamenti con basse velocità, indicativamente 3 °C/h);
3. ricottura isoterma, per acciai legati (es Ni-Cr-Mo). Viene realizzata in forni simili alle cuffie, ma aventi 4 bruciatori e 2 termocoppie di controllo ed un sistema di programmazione del ciclo termico da seguire.

Riguardo la prima modalità di raffreddamento non è mai stata analizzata la possibilità di ridurre i tempi di slingottamento mantenendo inalterate le caratteristiche meccaniche e di lavorabilità. Per gli acciai che non necessitano del trattamento è quindi possibile che vi siano dei margini per ridurre i tempi di permanenza in lingottiera in modo da migliorare l'operatività aziendale.

Fornire i tempi di slingottamento per tre diversi tipi di acciaio e sei diverse dimensioni dei lingotti al fine di minimizzare i tempi di permanenza in lingottiera compatibilmente con il mantenimento delle caratteristiche meccaniche e di lavorabilità in termini di tensioni residue.



Figura 4 Lingottiera

2.2. OBIETTIVI

Per valutare i tempi di slingottamento è stato sviluppato un modello FEM termotensionale che simulando il processo di colaggio ed il successivo raffreddamento in lingottiera ed in aria del lingotto permette di valutarne lo stato tensionale alla fine del raffreddamento.

Con i tecnici è stato scelto come riferimento il lingotto di diametro 800 mm in acciaio 42CrMo4 mantenuto in lingottiera fino al raggiungimento di una temperatura in pelle pari a circa 300 °C e poi raffreddato in aria fino a temperatura ambiente. Tale lingotto presenta infatti le condizioni limite di lavorabilità agli utensili.

La simulazione numerica di tale caso ha permesso di ricavare i valori limite della tensione assiale da confrontare con quelli ottenuti analizzando le altre dimensioni e gli altri acciai.

Variando, in ognuno dei casi simulati, la permanenza in lingottiera ed analizzando lo stato tensionale del lingotto a fine raffreddamento si sono ricavati:

- i tempi di slingottamento necessari a garantire valori di tensione assiale inferiori a quelli limite
- i tempi di slingottamento oltre i quali non si registra un significativo decremento dello stato tensionale in direzione assiale.

Per le dimensioni ed i tipi di acciai presi in considerazione si individuano quindi due valori del tempo di slingottamento: il primo garantisce un valore della tensione assiale inferiore a quello limite ed il secondo un decremento trascurabile della stessa qualora si adottasse un tempo di permanenza in lingottiera maggiore.

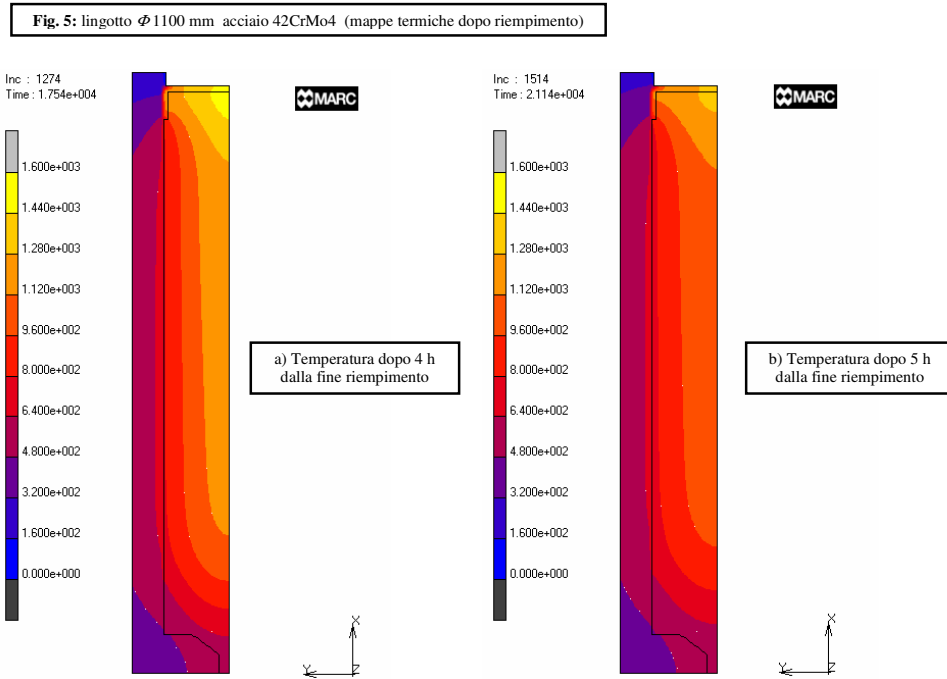
Si è scelto di considerare sei dimensioni ($\Phi 380$, $\Phi 480$, $\Phi 600$, $\Phi 800$, $\Phi 1100$ e $\Phi 1300$ mm) e tre acciai (42CrMo4, C45 ed LF2) al fine di poter in seguito estendere i risultati ottenuti alle dimensioni intermedie. Il lavoro è stato suddiviso in due parti:

- taratura del modello utilizzando i dati sperimentali relativi al lingotto $\Phi 1100$ in 42CrMo4
- calcolo dei tempi di slingottamento per le dimensioni e gli acciai scelti

Il modello è stato tarato dal punto di vista dello scambio termico utilizzando i rilievi di temperatura effettuati sul lingotto da 31600 kg ($\Phi 1100$ mm) dall'Università di Brescia.

Tali rilievi sono stati effettuati inserendo sedici termocoppie all'interno della lingottiera del $\Phi 1100$ (figura 5) e registrando l'andamento della temperatura durante il processo di colaggio ed il successivo raffreddamento. Confrontando i valori di temperatura calcolati nei nodi corrispondenti alla posizione occupata dalle termocoppie con quelli misurati si è effettuata la taratura dei coefficienti di scambio tra lingotto, lingottiera e fondello e tra la lingottiera e l'ambiente esterno.

I calcoli sulle altre dimensioni sono stati effettuati mantenendo gli stessi valori per i coefficienti di scambio tra lingotto e lingottiera e variando opportunamente quelli tra lingottiera ed ambiente esterno per tener conto del cambiamento del fattore di forma.



3. MODELLO PER LE SIMULAZIONI

Per il calcolo è stato utilizzato il codice FEM general purpose Marc versione K7.3 [1] sviluppando un modello con le seguenti ipotesi:

- calcolo assialsimmetrico;
- calcolo termo-meccanico;
- assenza di moti convettivi dell'acciaio durante il colaggio;
- materiale con comportamento viscoplastico $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$;
- proprietà fisiche dipendenti dalla temperatura $E=E(T)$, $\nu=\nu(T)$, $c=c(T)$ e $k=k(T)$;

Il processo di riempimento è stato simulato attivando progressivamente gli elementi lungo l'asse verticale del lingotto in funzione della velocità di colaggio in modo da poter considerare, pur trascurando i moti convettivi dell'acciaio, il progressivo innalzamento del livello in lingottiera. Lo scambio termico tra il lingotto, la lingottiera ed il fondello (o la placca) è stato simulato introducendo dei *gap element* con cui si tiene conto dell'intercapedine d'aria tra acciaio e lingottiera e del contatto acciaio – fondello. Tali elementi sono dotati di opportune proprietà termomeccaniche in modo da regolare il trasferimento di calore senza ostacolare la contrazione del lingotto in fase di solidificazione e raffreddamento.

Nello scambio termico con l'aria si tiene conto del contributo della convezione e dell'irraggiamento tra la lingottiera e l'ambiente esterno [2].

L'analisi chimica degli acciai è riportata in tabella 1, le caratteristiche della polvere esotermica e dell'isolante (curva di conducibilità termica media).

Tabella 1 Composizione chimica acciai

ACCIAIO	C	Mn	Cr	Ni	Mo
C45	0.45	0.65	0.15	0.15	0.004
42CrMo4	0.40	0.60	1.10	0.15	0.25

Le caratteristiche fisiche e le curve tensione deformazione degli acciai alle varie temperature sono state desunte da letteratura [3]. In figura 6a sono riportati i set di materiali usati nella simulazione, in figura 6b gli andamenti del calore specifico, della conducibilità termica interna e del coefficiente di espansione termica lineare per i tre acciai indicati.

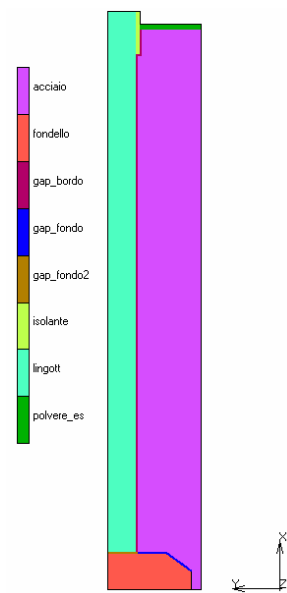


Fig. 6a) Materiali simulazione

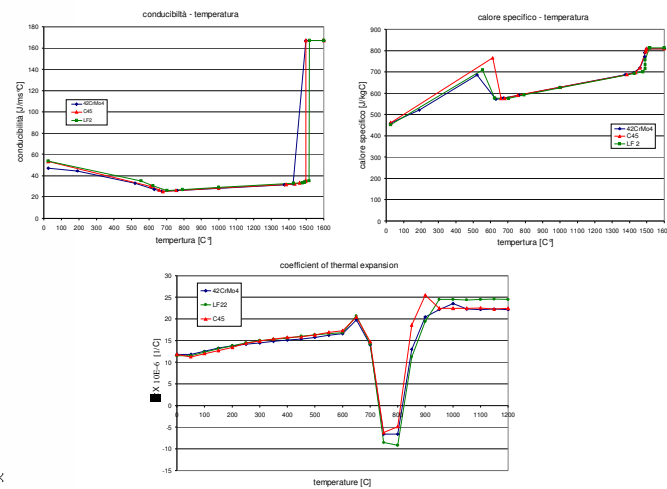


Fig. 6b) Caratteristiche termofisiche acciai

Ogni calcolo FEM è stato suddiviso in tre fasi successive:

- riempimento;
- raffreddamento in lingottiera;
- raffreddamento in aria;

Il tempo di riempimento è stato calcolato in base alla velocità di colaggio reale. I tempi di slingottamento vengono variati in modo da ricavare i valori limite della tensione assiale.

I tempi di raffreddamento in aria sono stati scelti in modo da portare il lingotto ad una temperatura finale media inferiore ai 50 °C.

La fase di solidificazione è stata simulata variando opportunamente le proprietà termofisiche dell'acciaio nel passaggio liquido-solido e tenendo conto del calore latente di solidificazione. I valori delle temperature caratteristiche (*zst temperature, solidus temperature, ..*) sono state calcolate con il software IDS in dotazione al CSM.

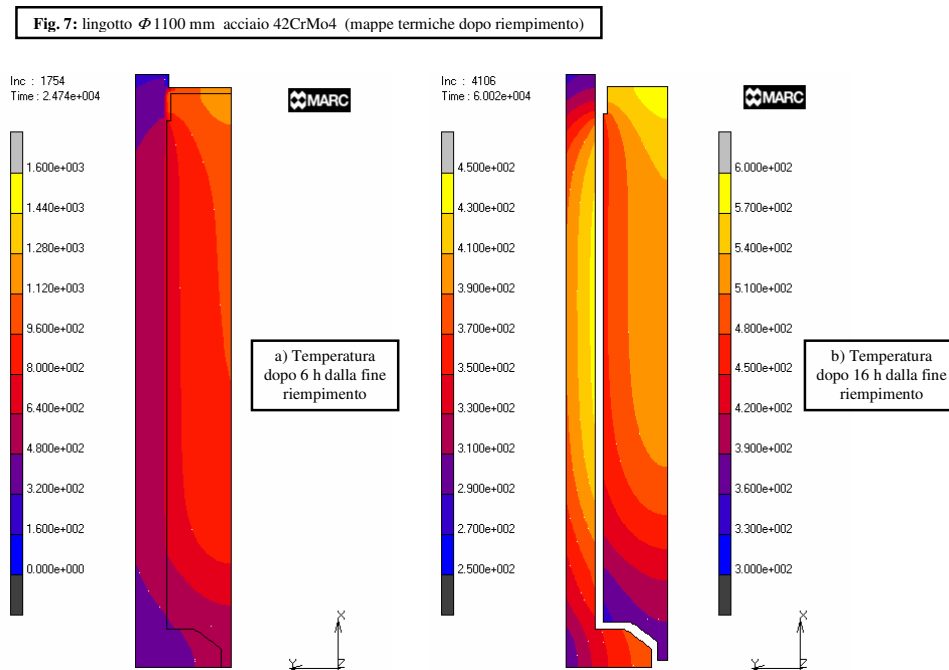
Lo slingottamento è stato simulato deaktivando gli elementi non appartenenti al lingotto per non sfalsare lo scambio termico con l'ambiente esterno e per annullare ogni possibile influenza della lingottiera e dei *gap element* sulla valutazione delle tensioni residue.

4. RISULTATI

I primi risultati si riferiscono alla taratura del modello e riguardano quindi il lingotto $\Phi 1100$ mm in acciaio 42CrMo4, i secondi ai vari casi simulati, a partire da quello di riferimento: lingotto $\Phi 800$ mm in acciaio 42CrMo4. Una serie di tabelle riassume infine i tempi di slingottamento e le tensioni assiali residue valutate in due sezioni caratteristiche di ogni tipologia di lingotto.

4.1. LINGOTTO 1100 MM IN ACCIAIO 42CRMO4

Le figure mostrano il campo termico del lingotto e della lingottiera a partire dalla seconda ora dopo la fine del riempimento, nella figura 7b vi sono invece i risultati relativi alla sedicesima ora in cui termina la registrazione delle temperature.



Le figure 8, 9 e 10 mostrano il confronto tra i valori della temperatura calcolati e misurati a partire dall'inizio del riempimento.

La figura 8 si riferisce alle termocoppie del fondello, la 9 e la 10 si riferiscono rispettivamente alle termocoppie della lingottiera inferiore e superiore. L'errore tra i valori calcolati e misurati si mantiene sempre inferiore al 10% ($e_{\max} = 9\%$ nella termocoppia 13 del fondello).

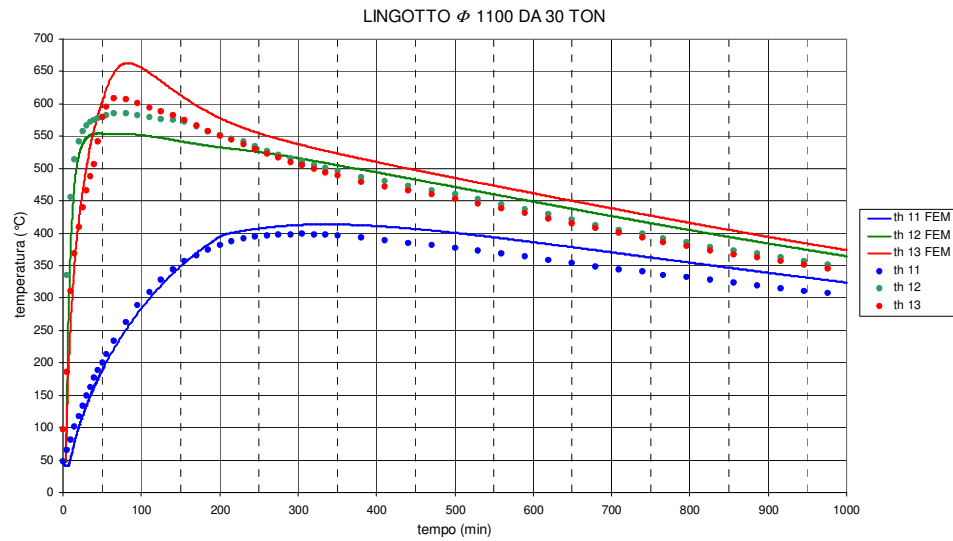


Fig. 8: lingotto Φ 1100 mm acciaio 42CrMo4
 Confronto tra le temperature calcolate e misurate con
 le termocoppie del fondello

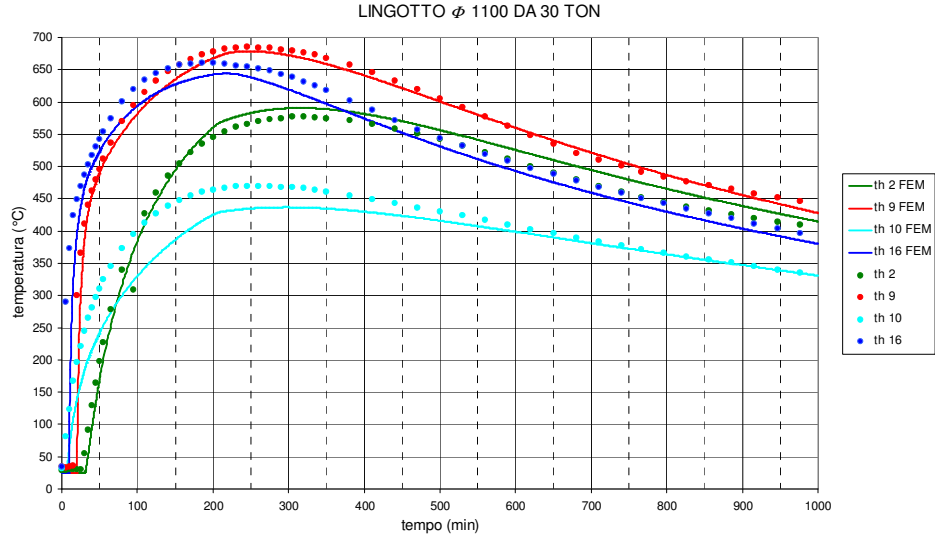


Fig. 9: lingotto ϕ 1100 mm acciaio 42CrMo4
 Confronto tra le temperature calcolate e misurate con le termocoppie della lingottiera inferiore

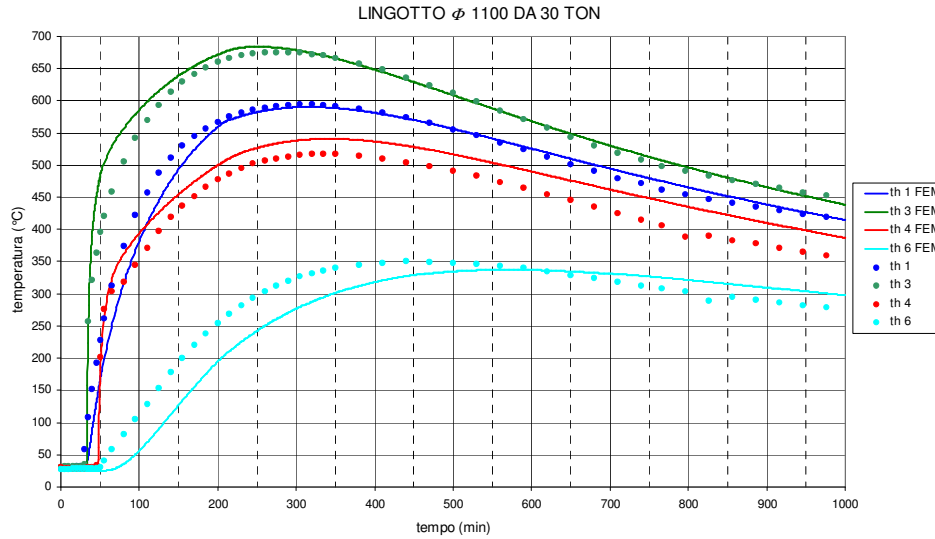
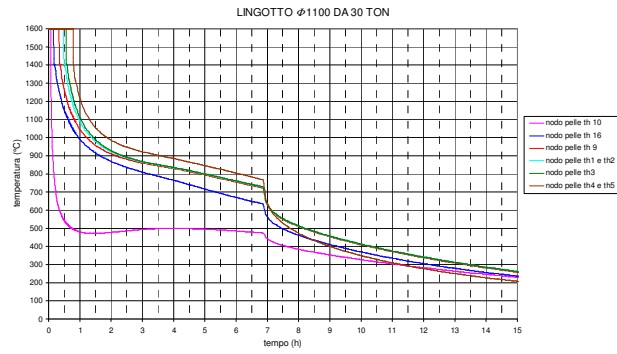


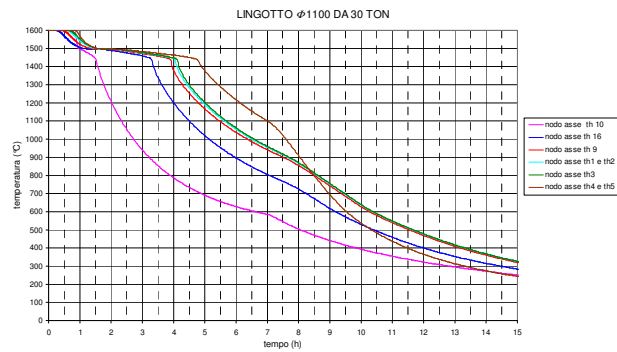
Fig. 10: lingotto ϕ 1100 mm acciaio 42CrMo4
 Confronto tra le temperature calcolate e misurate con le termocoppie della lingottiera superiore

La figura 11 mostra gli andamenti della temperatura in funzione del tempo, a partire dall'inizio del riempimento, nel lingotto ϕ 1100 in 42CrMo4. I nodi a cui si riferiscono tali andamenti sono stati presi in corrispondenza delle

termocoppie, la figura 11a riporta i risultati relativi al lato lingottiera e la 11b quelli relativi all'asse del lingotto.



(a)



(b)

Fig. 11: lingotto ϕ 1100 mm acciaio 42CrMo4
Temperature lato lingottiera (a)
e sull'asse del lingotto (b) in
corrispondenza delle termocoppie
per il lingotto ϕ 1100 in 42CrMo4

4.2. LINGOTTO 800 MM IN ACCIAIO 42CRMO4

Fig. 12 a) lingotto Φ 800 acciaio 42CrMo4 slingottamento 18h
(tensione assiale, circonferenziale e radiale in Pa)

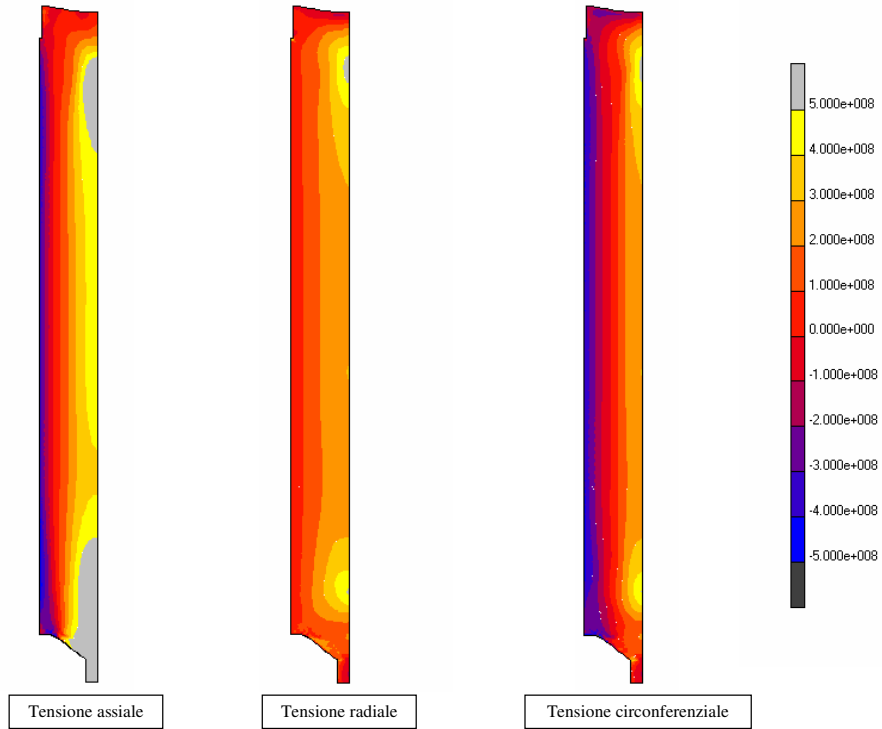
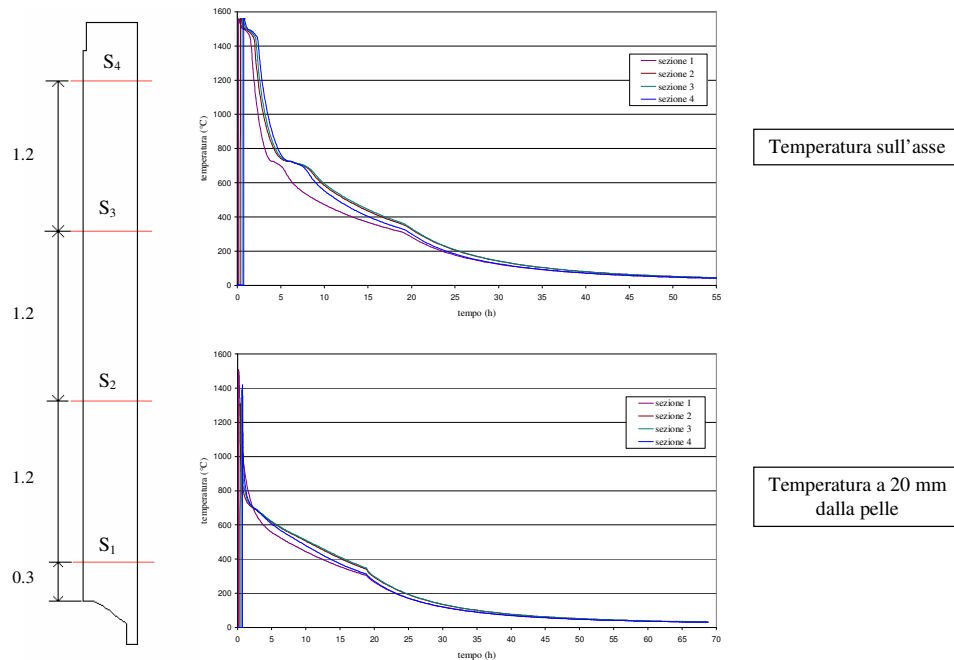


Fig. 12 b) lingotto $\Phi 800$ acciaio 42CrMo4 (temperature in $^{\circ}\text{C}$)



La figura 12 si riferisce al lingotto di riferimento: $\Phi 800$ mm in acciaio 42CrMo4.

La figura 12a mostra la distribuzione delle tensioni residue assiali, radiali e circonferenziali dopo una permanenza in lingottiera di 18h (dalla fine del riempimento) ed il successivo raffreddamento in aria. Le 18h ore in lingottiera sono necessarie per portare la temperatura di parete del lingotto attorno ai 300°C .

I valori delle tensioni residue calcolate dipendono dalle curve tensione-deformazione adottate e vanno quindi utilizzati per effettuare i confronti con i valori ottenuti negli altri casi esaminati (differenti dimensioni dei lingotti e differenti tipi di acciaio). Il confronto è possibile dato che le leggi costitutive sono le medesime nel caso del 42CrMo4 e vengono scalate in rapporto alla tensione di rottura fornita in letteratura nel caso degli altri due acciai (C45 ed LF2).

Per ogni tempo di slingottamento vengono considerati i valori della tensione assiale residue a circa 15 - 20 mm dalla pelle e lungo l'asse in due sezioni S₂ ed

S₃ del lingotto di cui si sta effettuando l'analisi. Tali valori vengono confrontati con quelli ottenuti per il lingotto di riferimento:

- $(\sigma_a)_{pelle} = -290$ Mpa $(\sigma_a)_{asse} = 420$ Mpa nella sezione S₂
- $(\sigma_a)_{pelle} = -310$ Mpa $(\sigma_a)_{asse} = 430$ Mpa nella sezione S₃

al fine di stabilire il tempo limite inferiore di slingottamento. Nel caso in cui non si raggiunga la tensione limite (lingotti $\Phi 380$, $\Phi 480$ e $\Phi 600$ mm in acciai C45 ed LF2) si adotta un tempo di permanenza in lingottiera tale da non far superare alla pelle del lingotto i $550 \div 600$ °C.

Il tempo limite superiore di slingottamento viene invece determinato confrontando i valori delle tensioni assiali nelle sezioni S₂ ed S₃ per permanenze crescenti in lingottiera e fermandosi quando si ottiene un decremento trascurabile delle stesse.

La figura 12b mostra l'andamento delle temperature in funzione del tempo nei nodi presi in corrispondenza delle sezioni S₁ ÷ S₄ a circa 20 mm dalla pelle e lungo l'asse.

4.2. TABELLE TEMPI LIMITI DI SLINGOTTAMENTO

Nelle tabelle riportate nelle pagine seguenti, suddivise per tipo di acciaio, vengono riportati, per ogni dimensione del lingotto, i tempi di slingottamento ed i valori delle tensioni assiali residue in nodi appartenenti alle sezioni S₂ ed S₃ presi uno a 15÷20 mm dalla pelle e l'altro sull'asse del lingotto. In rosso viene indicato il tempo limite inferiore di slingottamento, in grassetto quello superiore.

TABELLE ACCIAIO 42CrMo4

<i>Φ 800 mm</i> acciaio 42CrMo4					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
18 h	-290	420	-310	430	302

<i>Φ 600 mm</i> acciaio 42CrMo4					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
5 h	-200	385	-211	390	510
8 h	-187	353	-195	345	420
15 h	-181	345	-190	335	290

<i>Φ 480 mm</i> acciaio 42CrMo4					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
4 h	-215	402	-176	405	495
7 h	-207	371	-173	375	385
10 h	-207	371	-171	375	310

<i>Φ 380 mm</i> acciaio 42CrMo4					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
3 h	-205	390	-153	410	490
5 h	-200	377	-145	388	395
7 h	-199	375	-143	388	328

TABELLE ACCIAIO C45

Φ 1100 mm acciaio C45					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
15 h	-210	295	-209	325	490
20 h	-170	216	-180	243	410
24 h	-157	193	-160	212	360
30 h	-154	185	-155	198	295

Φ 800 mm acciaio C45					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
7 h	-218	280	-228	308	515
10 h	-142	185	-166	212	445
18 h	-94	123	-113	146	295
24 h	-90	117	-109	139	250

Φ 600 mm acciaio C45					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
5 h	-142	213	-148	220	520
8 h	-80	124	-74	130	450
10 h	-61	110	-62	117	425
15 h	-40	92	-44	100	300
20 h	-36	88	-38	95	224

Φ 480 mm acciaio C45					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
3 h	-158	227	-163	245	557
5 h	-97	148	-107	154	465
7 h	-70	120	-85	123	395
8 h	-63	109	-77	113	365
9 h	-60	106	-75	110	340

Φ 380 mm acciaio C45					
Slingottam.	tensione assiale sez. 2 [Mpa]		tensione assiale sez. 3 [Mpa]		Temp. parete [°C]
2 h	-133	210	-143	226	565
3 h	-95	155	-68	160	505
5 h	-61	108	-33	110	405
7 h	-47	94	-22	92	335

5. CONCLUSIONE

È stato sviluppato un modello assialsimmetrico agli Elementi Finiti per la simulazione del processo di colaggio e raffreddamento di lingotti in acciai non trattati.

Questo modello è stato tarato su misure effettuate con lingottiere strumentate mediante termocoppie poste in diverse posizioni. Il modello è strutturato per simulare il colaggio secondo le pratiche operative effettive. Peraltro nella simulazione della fase di riempimento del lingotto $\phi 380$ mm è stato necessario aumentare la velocità di colaggio (del 30%) per evitare la solidificazione del canale di ingresso. I tecnici hanno confermato che spesso per evitare l'otturazione del canale di colaggio è effettivamente necessario aumentare la velocità rispetto alla pratica operativa standard.

Le simulazioni condotte su diversi diametri di tre differenti acciai ha permesso di determinare le tensioni residue ottenibili con diversi tempi di slingottamento per ogni tipologia di prodotto.

Si sono valutati:

- I tempi minimi di permanenza per i quali le tensioni raggiungono il livello critico;
- I tempi di permanenza oltre i quali non si hanno più riduzioni di tensione residue significative;
- Le tensioni residue assiali a tempi di permanenza intermedi;

È probabile che una volta effettuate le prove industriali si possano ridurre i tempi di permanenza in lingottiera ottimizzando i cicli di produzione.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Marc Analysis Research Corporation, vol. A Theory and User Information, vol. B Element Library, vol. C Program Input, vol. D User Subroutines and Special Routines, Palo Alto CA 94306 USA 1998.

- [2] H. Y. Wong, Heat Transfer for Engineers, Longman Inc, New York, 1977

- [3] BISRA, Table of physical constants for Pure Iron, Carbon Steel and Microalloy Steel