

# INFLUENZA DELLA CONVEZIONE NATURALE NEL PROCESSO DI SOLIDIFICAZIONE DI UN LINGOTTO D'ACCIAIO

M. Pilotelli\*      R. Santulli\*      G.P. Beretta\*\*      A.M. Lezzi\*\*

\*Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Brescia, via Branze 38, 25123 Brescia

\*\*INFM, Università di Brescia, via Branze 38, 25123 Brescia

## SOMMARIO

Si è simulato il processo di produzione di un lingotto d'acciaio con il codice termofluidodinamico Fluent su un dominio comprensivo di lingotto e lingottiera e tenendo conto degli scambi termici per convezione e irraggiamento con l'ambiente. Delle tre simulazioni eseguite, due hanno incluso i moti convettivi naturali che si sviluppano a causa dei gradienti di temperatura nell'acciaio, considerato una lega ferro-carbonio a concentrazione uniforme e costante: per la regione bifase si sono utilizzati il modello di mezzo poroso, normalmente utilizzato in letteratura, e il modello misto da noi introdotto per descrivere meglio la struttura della zona ad alta frazione di liquido. Il confronto eseguito tra i risultati numerici e i dati ottenuti in acciaieria con una telecamera a raggi infrarossi ha mostrato un miglioramento dell'accordo quando i moti convettivi vengono considerati, ma non ha fornito indicazioni definitive circa la scelta del modello per la regione bifase.

## 1 INTRODUZIONE

La solidificazione delle leghe metalliche nella produzione industriale dei lingotti da forgia è un processo complesso influenzato da molti fattori: massa e forma del lingotto e della lingottiera, effetti della convezione forzata (fase di riempimento) e della convezione naturale (fase di raffreddamento), presenza di un'intercapedine isolante, parzialmente riempita con polveri e gas, tra lingotto e lingottiera, ecc. La simulazione numerica del processo mediante un codice di termofluidodinamica computazionale in grado di descrivere una grande varietà di fenomeni fisici su geometrie complesse offre la possibilità di valutare singolarmente gli effetti dei vari fattori. In questo lavoro si è cercato di indagare l'influenza dei moti convettivi naturali sul processo di produzione di un lingotto di acciaio da trentadue tonnellate, mediante una serie di simulazioni con il codice Fluent.

La solidificazione di una lega metallica avviene in un intervallo di temperatura: al di sopra della temperatura di liquidus la lega è completamente liquida, al di sotto di quella di solidus è completamente solida, mentre fra le due temperature sono presenti entrambe le fasi. Lo studio dei problemi di solidificazione delle leghe metalliche con codici termofluidodinamici generali che non prevedono modelli *ad hoc* è possibile utilizzando

una formulazione matematica che descrive il comportamento delle regioni monofase liquida e solida e della regione bifase con un unico sistema di equazioni di conservazione: queste equazioni possono essere ricavate a partire dalla teoria delle miscele [1, 2] o con un procedimento di media sul volume [3] ed assumono la stessa forma delle equazioni di Navier-Stokes, con l'aggiunta di un termine sorgente nelle equazioni di conservazione della quantità di moto e dell'energia.

Il termine sorgente nell'equazione di conservazione dell'energia permette di tener conto del rilascio di calore latente, che avviene in modo continuo all'interno dell'intervallo di temperatura di solidificazione. In alternativa, l'equazione di conservazione dell'energia può essere scritta in una forma priva di termini sorgente attraverso l'introduzione di un calore specifico equivalente.

Il termine sorgente nell'equazione di conservazione della quantità di moto serve per descrivere il comportamento nella regione bifase: nella letteratura relativa ai problemi di solidificazione questa regione viene solitamente considerata come un mezzo poroso permeato dalla fase liquida secondo l'equazione di Darcy. Le relazioni tra permeabilità e porosità utilizzate in letteratura sono quella di Kozeny-Carman [4, 5] e quella di West [6]. Poiché non è possibile stabilire quale sia la più adatta a questo tipo di problemi, a causa della mancanza di dati sperimentali relativi all'acciaio, in un articolo precedente [7] si è effettuato un confronto tra le due nel caso test della solidificazione di un acciaio in una cavità rettangolare bidimensionale per due diverse condizioni al contorno e due diversi numeri di Rayleigh. I risultati ottenuti hanno messo in evidenza differenze nella forma delle isoterme e nel campo di velocità nel liquido e nella regione bifase in vicinanza dell'interfaccia con il liquido: la zona interessata dalle differenze è più ampia per numeri di Rayleigh maggiori. In tutti i casi la relazione di Kozeny-Carman permette moti convettivi più intensi di quella di West.

In un lingotto il processo di solidificazione avviene a partire dall'interfaccia tra la lega metallica e la lingottiera, dove la velocità di raffreddamento raggiunge i valori più alti a causa della temperatura iniziale relativamente bassa della lingottiera [8]. Di conseguenza, per un primo breve intervallo di tempo molti piccoli grani con orientazione casuale nucleano sulla superficie della lingottiera (outer equiaxed zone). Questi grani diventano rapidamente dendriti e sviluppano dei rami che crescono lungo direzioni cristallografiche preferenziali. Poiché le dendriti che crescono in una direzione parallela e opposta a quella del flusso termico avanzano più rapidamente delle altre, si ha la formazione di una caratteristica struttura a colonne (columnar zone). Si è spesso osservato che nella zona centrale del lingotto, principalmente a causa del distacco di rami dalle dendriti che formano la struttura a colonne, si forma un'altra zona (inner equiaxed zone), in cui queste particelle solide crescono in tutte le direzioni all'interno del liquido leggermente sottoraffreddato. La transizione da crescita a colonne a crescita in ogni direzione è fortemente dipendente dall'entità dei moti convettivi presenti nel liquido. Nella regione bifase possono quindi essere identificate una zona (outer equiaxed zone e columnar zone) in cui la fase solida costituisce una matrice continua stazionaria e una zona in cui sono presenti particelle solide trasportate dal liquido (inner equiaxed zone). In questa seconda zona, in cui non esiste una matrice solida continua, il modello di mezzo poroso non sembra coerente con la fenomenologia della solidificazione: pare invece preferibile applicare il modello della

viscosità equivalente, che tiene conto dell'aumento della resistenza al moto della fase liquida dovuto alla presenza delle particelle solide introducendo una viscosità crescente con la frazione di solido. Per questo motivo si è introdotto per la regione bifase un modello misto, che tiene conto della diversa struttura delle due zone: esso utilizza il modello di mezzo poroso nella zona ad alta frazione di solido e quello della viscosità equivalente nella zona a bassa frazione di solido, in cui il comportamento dell'acciaio viene assimilato a quello di una sospensione omogenea [9, Cap. 5]. Utilizzando questo modello sul caso test della cavità bidimensionale rettangolare si è visto che esso predice moti convettivi molto più intensi rispetto a quello di mezzo poroso, con conseguenti differenze significative nella forma delle isoterme e nel campo di velocità sia nel liquido sia nella regione bifase in vicinanza dell'interfaccia con il liquido [9, Cap. 5].

In questo lavoro si è passati a simulare il processo di produzione di un lingotto d'acciaio di grosse dimensioni su un dominio comprendente anche la lingottiera che lo contiene, tenendo conto degli scambi termici per convezione e irraggiamento fra la lingottiera stessa e l'ambiente. Si sono eseguite tre simulazioni, la prima trascurando i moti convettivi all'interno dell'acciaio e le altre due includendoli e utilizzando per la regione bifase i modelli di mezzo poroso ed il modello misto. Allo scopo di verificare l'entità dell'influenza dei moti convettivi naturali e di decidere quale dei due modelli descrive meglio il comportamento della regione bifase si è effettuata una serie di misure in acciaieria con una telecamera a raggi infrarossi durante il processo di produzione del lingotto e si sono confrontati i dati sperimentali con i risultati numerici delle tre simulazioni. Il confronto è stato eseguito sul campo di temperatura sulla superficie esterna della lingottiera.

## 2 PRODUZIONE DEL LINGOTTO

Il lingotto da trentadue tonnellate viene prodotto in un'apposita lingottiera a pianta ottagonale (Figura 1). La lingottiera poggia su un fondello a sua volta poggiato su una placca che funge da sostegno. Sopra la lingottiera viene posizionato un portamaterozza. La lingottiera viene posta accanto ad altre lingottiere in una fossa rettangolare lunga approssimativamente 35 m, larga 5 m e profonda 1.5 m. Poiché nelle simulazioni numeriche del processo il problema viene trattato come assialsimmetrico in modo da poter ridurre l'onere computazionale, si è cercato di fare in modo che anche il processo reale fosse caratterizzato da simmetrie il più vicino possibile a quella assiale: con una modifica del canale di colata, la lingottiera è stata posta equidistante dai due lati lunghi della fossa e intorno ad essa sono state posizionate delle lingottiere fredde. L'acciaio colato, ottenuto dalla fusione di rottami uniti a particolari leganti, viene raccolto in una siviera che viene trasportata da un carro ponte fin sopra la lingottiera da riempire. Accanto alla lingottiera sono presenti due canali verticali: nel primo, a forma di tronco di cono, viene scaricato lo strato superficiale dell'acciaio contenuto in siviera, non adatto alla colata perché ricco di scorie; il secondo è in comunicazione con la lingottiera tramite un canale sotterraneo. Il flusso di acciaio fuso riempie la lingottiera dal basso: per questo motivo la colata viene chiamata "in sorgente". L'acciaio ha una concentrazione di carbonio dello 0.3% e tra gli altri elementi in lega quelli presenti in percentuali maggiori sono nichel, cromo

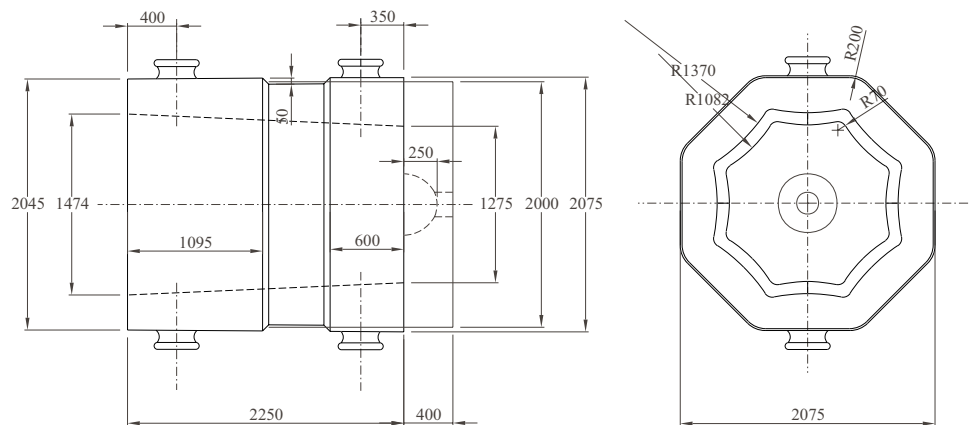


Figura 1: Lingottiera e fondello. Quote in millimetri.

e manganese. Il processo di riempimento avviene lentamente e dura complessivamente circa mezz'ora. Il riempimento si conclude quando anche il portamaterozza è colmo. A questo punto del processo vengono posti sopra l'acciaio liquido dei sacchi di polveri che a contatto con l'acciaio fuso danno origine a reazioni chimiche esotermiche, rallentando il raffreddamento della materozza, che deve essere l'ultima parte a solidificare in modo da garantire un afflusso di acciaio fuso, per compensare il ritiro del lingotto dovuto alla contrazione dell'acciaio durante la solidificazione. Per rallentare ulteriormente il raffreddamento della materozza, il portamaterozza è rivestito al suo interno da un anello di fibra isolante. Dopo circa quattordici ore la lingottiera viene sollevata dalla fossa e trasportata mediante un carro ponte in un'apposita area, detta area di "strippaggio", dove il lingotto viene estratto dalla lingottiera e posizionato su di un carrello. Esso viene poi trasportato in un'altra fossa e ricoperto di vermiculite per rallentare l'ulteriore raffreddamento che all'aria aperta sarebbe troppo rapido.

### 3 MISURE TERMOGRAFICHE

Durante il processo di solidificazione del lingotto da trentadue tonnellate si sono effettuate in acciaieria misure termografiche utilizzando una telecamera a raggi infrarossi FLIR modello "Thermacam PM595" di tipo FPA con matrice costituita da  $320 \times 240$  sensori microbolometrici che rilevano la radiazione emessa nella banda compresa tra 8 e  $14 \mu\text{m}$  e non necessitano di raffreddamento. Le prove sperimentali sono consistite in una serie di riprese termografiche ad intervalli di circa un'ora. Le riprese sono state effettuate da diversi punti di vista.

Dopo aver eseguito le riprese, si è verificato che l'ipotesi di simmetria assiale fosse ragionevolmente rispettata confrontando l'andamento della temperatura lungo una linea verticale sulla superficie esterna della lingottiera su due immagini riprese da due punti di vista diversi. Un ulteriore riscontro si è avuto osservando che il profilo di temperatura lungo una linea orizzontale sulla superficie esterna della lingottiera risulta sostanzialmente

uniforme.

## 4 SIMULAZIONI NUMERICHE

Il processo di produzione del lingotto è complesso ed è stato perciò necessario introdurre delle semplificazioni per poterlo simulare numericamente. Una prima semplificazione introdotta riguarda la geometria. La lingottiera utilizzata per la produzione del lingotto (Figura 1) è a pianta ottagonale: per evitare l'eccessiva complessità di una simulazione tridimensionale, si simula il processo considerando una lingottiera avente la forma di un tronco di cono cavo. I raggi alla base e all'apice delle superfici interna ed esterna della lingottiera sono calcolati in modo che le sezioni conservino la stessa area delle rispettive sezioni reali: essi valgono rispettivamente 0.666 m e 0.769 m per la superficie interna e 1.064 m e 1.049 m per quella esterna. La seconda semplificazione consiste nel fatto che la fase di riempimento non viene simulata, ma il processo di solidificazione viene studiato partendo da una configurazione iniziale in cui acciaio, in quiete e a temperatura uniforme, riempie completamente la lingottiera e il portamaterozza. La terza semplificazione consiste nel fatto che il ritiro dell'acciaio nel corso della solidificazione viene trascurato. Particolare attenzione è necessaria nella determinazione delle condizioni al contorno. Il dominio di calcolo include lingotto e materozza, lingottiera e portamaterozza, anello di fibra, fondello e basamento. Per tener conto degli scambi termici per convezione e irraggiamento con l'ambiente esterno si è effettuata una simulazione preliminare al fine di determinare l'andamento del coefficiente di scambio termico sulle superfici esterne del portamaterozza, della lingottiera, del fondello e del basamento. In questa simulazione, descritta nel Paragrafo 4.2, vengono incluse le pareti della fossa e l'aria circostante e trascurati i moti convettivi all'interno dell'acciaio.

### 4.1 Formulazione matematica

Il comportamento dell'acciaio che solidifica nella lingottiera può essere descritto mediante un sistema di equazioni di conservazione valide sia nelle regioni monofase solida e liquida sia nella regione bifase. Esse possono essere ricavate a partire dalla teoria delle miscele ideali, seguendo la trattazione di Incropera e collaboratori [1, 2] e sono scritte in termini di quantità mediate sulla massa o sul volume delle due fasi. In generale, il sistema è costituito dalle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia e delle specie. In questo lavoro, che presenta un approccio semplificato al problema, si assume che l'acciaio, considerato una lega binaria ferro-carbonio, mantenga una concentrazione di carbonio uniforme e costante durante il processo di solidificazione. In questo modo l'equazione di conservazione delle specie risulta identicamente soddisfatta e il sistema di equazioni si riduce alle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia: per chiudere il problema è però necessario fornire una relazione tra la frazione di liquido e la temperatura.

Di seguito sono riportate le equazioni di conservazione utilizzate per descrivere il comportamento dell'acciaio: la loro derivazione e tutte le ipotesi necessarie per la loro validità

sono riportate per esteso in [9, Cap. 2].

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \mu_e \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p' - \rho \beta (T - T_0) \mathbf{g} + \mathbf{S}_{qm} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_e T) + \nabla \cdot (\rho c_e \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

Nelle equazioni sopra scritte si assume che le due fasi abbiano la stessa densità  $\rho$ , uniforme e costante: di conseguenza le frazioni di liquido e di solido in massa  $f_l$  e  $f_s$  coincidono con le relative frazioni volumetriche  $g_l$  e  $g_s$ . Il sistema è immerso nel campo gravitazionale terrestre, perciò  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ : per tener conto delle forze di galleggiamento dovute alle variazioni di densità si utilizza l'approssimazione di Boussinesq, perciò  $p'$  rappresenta la pressione senza il contributo idrostatico e  $T_0$  è una temperatura di riferimento. Si può infine notare che  $p'$  e  $T$  rappresentano la pressione e la temperatura di entrambe le fasi, poiché si è fatta l'ipotesi di equilibrio termodinamico parziale tra le fasi ( $T_s = T_l$ ,  $p_s = p_l$ ), parziale perché l'ipotesi di concentrazione uniforme e costante di carbonio implica che i potenziali chimici delle due fasi siano diversi.

Nell'equazione di conservazione dell'energia  $c_e$  rappresenta il calore specifico equivalente, che tiene conto anche del contributo del calore latente di solidificazione all'interno dell'intervallo tra le temperature di liquidus  $T_l$  e di solidus  $T_s$ .

L'equazione di conservazione della quantità di moto (2) permette di tener conto dell'aumento della resistenza al moto della fase liquida nella regione bifase a causa della presenza della fase solida secondo due modelli distinti. Nel primo si considera la regione bifase come una matrice porosa continua (fase solida) permeata dalla fase liquida: questo modello, nel quale  $\mu_e = \mu_l$ , prevede l'introduzione di un termine sorgente nell'equazione di conservazione della quantità di moto in modo da rappresentare le perdite di carico secondo Darcy

$$\mathbf{S}_{qm} = -\frac{\mu_l}{K} \mathbf{u}. \quad (4)$$

dove  $K$  è la permeabilità del mezzo poroso considerata isotropa e  $\mu_l$  è la viscosità della fase liquida assunta uniforme e costante. La velocità  $\mathbf{u}$  è la velocità media delle due fasi, che coincide con la velocità superficiale  $g_l \mathbf{u}_l$  a causa dell'uguaglianza delle densità delle due fasi e poiché si considera che la solidificazione dell'acciaio in lingottiera sia stazionaria, cioè che la fase solida sia in quiete ( $\mathbf{u}_s = 0$ ).

Nel secondo modello si tiene conto dell'aumento della resistenza al moto della fase liquida nella regione bifase dovuto alla presenza della fase solida introducendo una viscosità equivalente  $\mu_e$  che nella fase liquida assume il valore della viscosità della fase liquida  $\mu_l$  e nella regione bifase cresce con la frazione di solido. La velocità  $\mathbf{u}$  nelle equazioni di conservazione è la velocità della fase liquida, che è assunta uguale a quella della fase solida, e il termine di sorgente  $\mathbf{S}_{qm}$  è nullo.

In letteratura il comportamento di tutta la regione bifase viene comunemente assimilato a quello di un fluido in moto in una matrice porosa continua e descritto con l'equazione di Darcy. In realtà nella zona ad alta frazione di liquido in cui non esiste una matrice solida continua, il modello di mezzo poroso non sembra coerente con la fenomenologia

della solidificazione e pare preferibile applicare il modello della viscosità equivalente. Per questo motivo in questo lavoro si è introdotto per la regione bifase un modello misto che, per tener conto della diversa struttura delle due zone, utilizza nella zona a bassa frazione di liquido il modello di mezzo poroso e in quella ad alta frazione di liquido il modello della viscosità equivalente.

Per quanto riguarda il modello di mezzo poroso bisogna osservare che la permeabilità  $K$  dipende dalla porosità del mezzo poroso stesso (che in questo caso coincide con la frazione di liquido  $g_l$ ) in quanto dipende dalla dimensione e dalla forma degli interstizi. Nella letteratura relativa alla solidificazione di leghe metalliche la relazione tra permeabilità e porosità più utilizzata è quella di Kozeny-Carman

$$K = C \frac{g_l^3 + \varepsilon}{(1 - g_l)^2} \quad (5)$$

mentre un autore propone la relazione di West [10]: si tratta di una relazione più complessa, che utilizza due diverse espressioni per le zone a bassa e ad alta porosità e che rappresenta quindi un tentativo di tener conto della presenza nella regione bifase delle due zone di struttura diversa, seppur rimanendo all'interno del modello di mezzo poroso. Un confronto eseguito tra le relazioni di Kozeny-Carman e di West sul caso semplice di solidificazione di acciaio in una cavità rettangolare bidimensionale ha mostrato che le uniche differenze che si ottengono riguardano il campo di moto e la forma delle isoterme nella zona vicina all'interfaccia tra liquido e regione bifase e che la relazione di Kozeny-Carman permette dei moti convettivi più intensi rispetto a quella di West [7][9, Cap. 4]. Nel modello misto, il modello di mezzo poroso viene utilizzato solo nella zona a bassa frazione di liquido e appare perciò poco importante la scelta dell'una o dell'altra relazione tra permeabilità e porosità: si utilizza quindi la relazione di Kozeny-Carman, che crea meno problemi di convergenza. Nella Equazione (5) il valore di  $C$  per l'acciaio è scelto pari a  $3.84 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  [7][9, Cap. 4]. La costante  $\varepsilon = 10^{-3}$  è una costante numerica che serve per evitare la divisione per zero in corrispondenza di  $g_l = 0$  quando si sostituisce la (5) nella (4).

Per quanto riguarda il modello della viscosità equivalente si è assimilato il comportamento della zona in cui sono presenti particelle solide trasportate dal liquido a quello di una sospensione omogenea: si è perciò calcolata la viscosità equivalente  $\mu_e$  con la relazione di Leighton proposta da Acrivos, Fan e Mauri [11] per una sospensione a concentrazione uniforme di particelle sferiche non colloidali di raggio uniforme immerse in un fluido incomprimibile:

$$\mu_e(g_l) = \mu_l \left[ 1 + \frac{1.5(1 - g_l)}{1 - ((1 - g_l)/0.58)} \right]^2 \quad (6)$$

La viscosità equivalente  $\mu_e$  assume il valore della viscosità del liquido  $\mu_l$  per  $g_l = 1$  e tende all'infinito per  $g_l \rightarrow 0.42$ .

Il limite tra le due zone si potrebbe determinare confrontando lo stato di sforzo a cui le dendriti sono soggette a causa del movimento della fase liquida e lo sforzo di rottura delle dendriti stesse, che dipende dalla morfologia delle dendriti e dalla temperatura a cui si trovano: se lo sforzo esercitato dalla fase liquida supera la tensione limite sopportata dalla dendrite, essa si rompe e la particella solida che ne deriva viene trasportata via

dal liquido. Sia lo sforzo esercitato dalla fase liquida sia la tensione limite sopportata dalla dendrite sono di difficile determinazione ed in questo lavoro si è perciò scelto di effettuare uno studio preliminare assumendo il confine tra le due zone in corrispondenza di un prefissato valore limite della frazione di liquido  $g_{l \text{ lim}}$  scelto arbitrariamente pari a 0.9. È stato inoltre necessario eliminare le discontinuità che si creano in corrispondenza del valore limite  $g_{l \text{ lim}}$  sia nel termine sorgente sia nella viscosità equivalente per ottenere una buona convergenza del processo numerico [9, Cap. 5].

La relazione tra la frazione di liquido e la temperatura, necessaria per chiudere il problema, viene scelta lineare per semplicità e in analogia con quanto fatto da altri autori [4]

$$g_l = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \quad (7)$$

Il codice Fluent, utilizzato per le simulazioni numeriche, risolve le equazioni di conservazione in una forma che contiene le (1), (2) e (3): il calore specifico equivalente può essere facilmente inserito utilizzando l'opzione *piecewise polynomial*, che permette di fornire il valore di  $c_e$  in corrispondenza di determinati valori di temperatura. Per il termine sorgente, la viscosità equivalente e l'equazione di chiusura (7) è necessario scrivere delle *user defined functions* in C che vengono compilate all'interno del solutore.

## 4.2 Simulazione "conduttiva"

Il dominio considerato in questa simulazione è rappresentato in Figura 2(a) e include il lingotto, la materozza, la lingottiera, il fondello, il basamento, il portamaterozza, l'anello di fibra e l'ambiente esterno alla lingottiera. La griglia è costituita da 8393 celle rettangolari. Nell'acciaio, considerato in quiete, si trascurano i moti convettivi e si risolve la sola equazione di conservazione dell'energia. Per quanto riguarda i moti convettivi naturali che si instaurano nell'aria, è stato utilizzato per la turbolenza il modello  $k - \varepsilon$  *standard* con le *standard wall functions* per il trattamento alla parete. Inoltre si utilizza il modello DTRM per tener conto degli scambi radiativi. Si è simulato il processo di raffreddamento partendo da una condizione iniziale in cui la lingottiera e il portamaterozza sono riempiti d'acciaio in quiete alla temperatura di 1823 K; la lingottiera, il portamaterozza, l'anello di fibra, il fondello, il basamento e l'ambiente esterno sono supposti a una temperatura pari a 300 K. La base di appoggio del basamento (indicata con 1 in Figura 2(a)) è considerata adiabatica; il pavimento e la superficie laterale della fossa e il pavimento del capannone (2) sono ritenute pareti reirraggianti; sui contorni che delimitano l'ambiente esterno incluso nel dominio (3) si impone una pressione uniforme pari a quella atmosferica, si impone che il flusso che entra nel dominio di calcolo attraverso di essi si trovi ad una temperatura pari a 300 K, mentre per i calcoli relativi all'irraggiamento i contorni sono trattati come superfici nere a 300 K; la superficie di separazione tra materozza e ambiente esterno (4) viene considerata adiabatica; sulle superfici esterne dell'anello di fibra (5), del portamaterozza (6 e 7), della lingottiera e del fondello (8) e del basamento (9 e 10) si impone emissività unitaria; all'interfaccia tra lingotto e lingottiera (11) viene imposta una resistenza termica che tiene conto del fatto che lo scambio termico tra lingotto e lingottiera avviene per irraggiamento perché il lingotto, a causa del ritiro dell'acciaio, si distacca dalla lingottiera



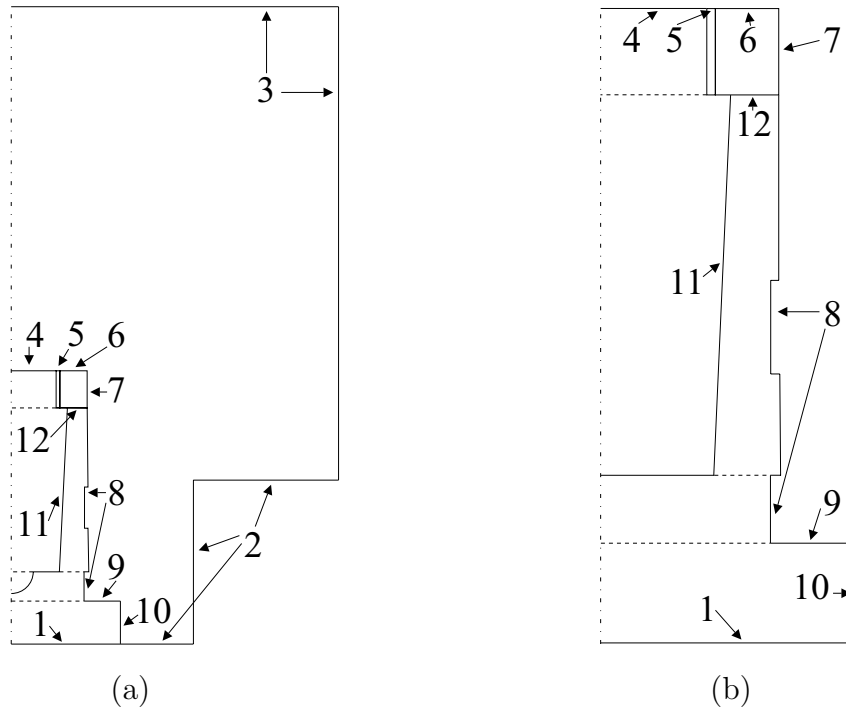


Figura 2: Dominio delle simulazioni "conduttiva" (a) e "convettive" (b).

dopo i primi istanti della solidificazione (è rappresentata come una parete di spessore 0.005 m con conducibilità termica pari a 1.15 W/mK); all'interfaccia tra lingottiera e portamaterozza (12) si impone una resistenza termica dovuta al fatto che il contatto tra le due superfici non è perfetto a causa della rugosità delle superfici stesse (è rappresentata come una parete di spessore 0.005 m con conducibilità termica pari a 0.33 W/mK). Per il calcolo delle resistenze termiche di contatto si veda [12, Cap. 6]. L'acciaio ha temperatura di liquidus  $T_{liq} = 1779 K$  e temperatura di solidus  $T_{sol} = 1704 K$ : per le proprietà utilizzate per i materiali si veda [12, Cap. 2 e Cap. 6]. La simulazione ha coperto la durata del processo di raffreddamento dalla fine del riempimento fino all'estrazione del lingotto, che avviene dopo 14 ore circa, ed ha avuto una durata di circa 10 ore su un PC dotato di processore PentiumII-MMX 400 in ambiente Windows NT 4.0.

La simulazione ha permesso di seguire la posizione delle interfacce tra liquido e regione bifase e tra regione bifase e solido durante il processo di solidificazione e di calcolare l'andamento nel tempo del coefficiente di scambio termico medio sulla parete laterale del portamaterozza (7), della lingottiera e del fondello (8), e sulle pareti superiore e laterale del basamento (9 e 10): questi valori sono stati utilizzati nelle simulazioni "convettive" descritte nel paragrafo seguente.

### 4.3 Simulazioni "convettive"

Le simulazioni descritte in questo paragrafo tengono conto dei moti convettivi naturali nell'acciaio. Il numero di Rayleigh basato sulla differenza tra la temperatura iniziale

dell'acciaio e quella di liquidus  $T_{liq}$  e sull'altezza della lingottiera risulta  $6.04 \times 10^{11}$ : si può pertanto supporre che il flusso sia laminare, sebbene il numero di Rayleigh sia piuttosto elevato.

Sono state eseguite due simulazioni, una con il modello di mezzo poroso (con la relazione di Kozeny-Carman) per tutta la regione bifase e l'altra con il modello misto a due zone. Il dominio di calcolo, rappresentato in Figura 2(b) include lingotto, materozza, lingottiera, fondello, basamento, portamaterozza e anello di fibra. La griglia, costituita da 20554 celle rettangolari, è particolarmente fitta in corrispondenza delle pareti tra lingotto e lingottiera e tra lingotto e fondello, dove negli istanti iniziali si crea un forte gradiente termico dovuto alla differenza di temperatura tra l'acciaio liquido e gli elementi che lo racchiudono (le condizioni iniziali sono le stesse considerate nella simulazione "conduttiva", cioè acciaio a 1823 K, ghisa e fibra a 300 K). La base di appoggio del basamento (indicata con 1 in Figura 2(b)) è considerata adiabatica; le superfici superiori della materozza (4), dell'anello di fibra (5) e del portamaterozza (6) sono considerate adiabatiche; sulle superfici laterali del portamaterozza (7), della lingottiera e del fondello (8) e su quelle superiore e laterale del basamento (9 e 10) si impongono i coefficienti di scambio termico calcolati nella simulazione "conduttiva" mediante la scrittura di *user defined function* in C; alle interfacce tra lingotto e lingottiera (11) e tra lingottiera e portamaterozza (12) si impongono le stesse resistenze termiche utilizzate nella simulazione "conduttiva". Per entrambe le simulazioni si è utilizzata una discretizzazione del primo ordine *upwind*, si è abilitata l'opzione *PRESTO!*, consigliata per la risoluzione di problemi in cui siano presenti moti convettivi naturali e si è abbassato il valore del parametro di rilassamento per le forze di massa al valore 0.5. Per assicurare la convergenza del singolo passo temporale si è imposto un numero di iterazioni fisso tale da permettere ai residui delle quattro equazioni di raggiungere dei valori minimi al di sotto dei quali non scendono più. Le proprietà utilizzate per i materiali sono le stesse già utilizzate per la simulazione "conduttiva": è stato necessario però per l'acciaio fornire in aggiunta la viscosità della fase liquida  $\mu_l$ , il coefficiente di dilatazione termica  $\beta$  e modificare il valore della densità, che deve servire anche come densità di riferimento alla temperatura di riferimento  $T_0$  per l'approssimazione di Boussinesq [9, Cap. 7].

Le simulazioni hanno coperto le prime sei ore del processo di raffreddamento a partire da lingottiera inizialmente piena di acciaio liquido in quiete a 1823 K. Esse sono state eseguite su un PC dotato di processore PentiumII-MMX 400 in ambiente Windows NT 4.0 e i tempi di calcolo sono stati di circa 7 giorni per la simulazione che utilizza il modello di mezzo poroso e di circa 12 giorni per quella che utilizza il modello misto. Negli istanti iniziali, a causa del fortissimo salto di temperatura tra la temperatura iniziale della lingottiera e quella dell'acciaio liquido, è stato necessario operare con passi temporali molto brevi (0.01 s), con valori dei parametri di rilassamento per la pressione e la quantità di moto (0.1) molto inferiori rispetto a quelli di *default* di Fluent e di conseguenza per ottenere la convergenza del singolo passo temporale si è impostato un numero di iterazioni pari a 100. Per la simulazione con il modello di mezzo poroso, dopo i primi 10 s di tempo fisico è stato possibile aumentare gradualmente fino a 0.1 s l'ampiezza del passo temporale, fino a 0.5 i valori dei parametri di rilassamento e ridurre a 60 il numero di iterazioni per passo temporale: in seguito il passo temporale è stato aumentato ancora, fino ad un valore di

10 s dopo circa 4 h di tempo fisico. Per la simulazione con il modello misto dopo i primi 10 s di tempo fisico si è potuto aumentare fino a 0.5 i valori dei parametri di rilassamento, ma l'ampiezza del passo temporale solo fino a 0.05 s, valore che si è dovuto mantenere fino a 300 s di tempo fisico: in questa prima fase del processo di solidificazione si è infatti osservata la formazione e successiva scomparsa di vortici all'interno del lingotto, segno di una tendenza del flusso a diventare turbolento. Questo non si è verificato invece nella simulazione con il modello di mezzo poroso che permette moti convettivi meno intensi (vedi [9, Cap. 5]). Anche nel seguito della simulazione è stato necessario procedere con passi temporali più brevi rispetto a quelli utilizzati in quella con il modello di mezzo poroso, raggiungendo al massimo un'ampiezza di 3 s.

Confrontando l'andamento delle isoterme a vari istanti di tempo per i due modelli utilizzati, si nota che la regione bifase si estende molto più rapidamente con il modello misto, fino ad occupare interamente il lingotto già 15 min dopo l'inizio del processo di solidificazione: a questo istante di tempo infatti la sola materozza è occupata da acciaio liquido. Con il modello di mezzo poroso invece la regione bifase arriva ad occupare completamente il lingotto solo al tempo  $t = 1$  h. Le differenze nella forma e posizione delle isoterme diminuiscono poi nelle ore successive.

## 5 CONFRONTO TRA I RISULTATI NUMERICI E I DATI SPERIMENTALI

Il confronto con le immagini termografiche viene eseguito sulla distribuzione di temperatura sulla superficie esterna del portamaterozza, della lingottiera e del fondello. Questo confronto ha lo scopo di giudicare il miglioramento nella soluzione che si ottiene con una simulazione che considera i moti convettivi che si sviluppano nell'acciaio rispetto ai risultati ottenuti considerando l'acciaio in quiete durante tutto il processo di solidificazione e di analizzare le differenze ottenute utilizzando per la regione bifase il modello di mezzo poroso ed il modello misto.

Si costruisce un grafico che rappresenta la distribuzione di temperatura lungo il profilo esterno del portamaterozza, della lingottiera e del fondello che si ottiene dall'intersezione della superficie del portamaterozza, della lingottiera e del fondello con un piano verticale passante per l'asse della lingottiera stessa. In ordinata è indicata la temperatura, in ascissa una coordinata verticale  $s$ , che ha origine nel punto più alto della materozza e cresce procedendo verso il basso fino al valore di 3.16 m dove il fondello poggia sul basamento. Gli andamenti della temperatura per le due simulazioni "convettive" e per quella "conduttiva" si ottengono rappresentando la temperatura in funzione di  $s$  sulle pareti indicate con i numeri 7 e 8 in Figura 2. Per quanto riguarda i dati sperimentali, si traccia una linea verticale sulle immagini riprese con la termocamera e con il software della telecamera stessa si ottiene l'andamento della temperatura lungo questa linea: esso è fornito in funzione del numero dei pixel in direzione verticale che costituiscono la linea tracciata ed è perciò necessario trasformare i valori espressi in pixel in quelli corrispondenti della coordinata  $s$  per poter rappresentare il profilo di temperatura sperimentale e quelli numerici su uno stesso grafico.

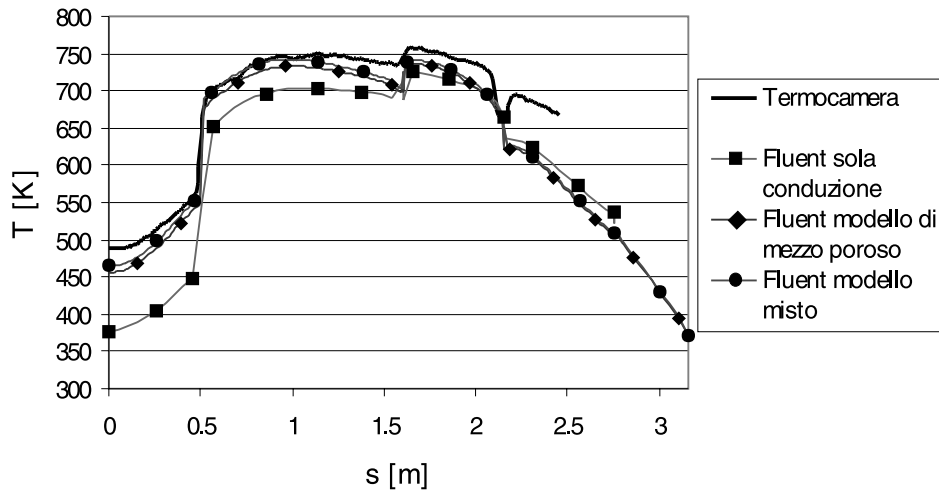


Figura 3: Profilo di temperatura sulla superficie esterna del portamaterozza, della lingottiera e del fondello al tempo  $t = 3$  h: confronto tra i dati sperimentali, i risultati della simulazione "conduttiva" e delle due simulazioni "convettive" con i modelli di mezzo poroso e misto.

Nelle prime due ore del processo di solidificazione le curve relative alle simulazioni che tengono conto dei moti convettivi, pur avvicinandosi più di quella della soluzione solo conduttiva ai dati sperimentali, restano comunque lontane da essi: riteniamo che ciò sia da imputarsi al fatto che le condizioni iniziali utilizzate non considerano il processo di riempimento, durante il quale la lingottiera inizia a scaldarsi. Nelle due ore successive i risultati ottenuti dalle simulazioni "convettive" si avvicinano molto di più ai dati sperimentali rispetto a quelli della soluzione solo conduttiva. Nelle ore successive i risultati del confronto sono più ambigui, con zone (portamaterozza e parte alta del lingotto) in cui le simulazioni con i moti convettivi seguono meglio i dati sperimentali rispetto alla soluzione solo conduttiva e zone in cui avviene il contrario. I grafici costruiti per le prime tre ore sembrano inoltre indicare che il modello misto fornisce risultati leggermente migliori di quello di mezzo poroso, ma questo risultato è in parte contraddetto dagli andamenti relativi alle ore successive e andrà perciò sottoposto ad ulteriori verifiche.

In Figura 3 sono mostrati i profili di temperatura sulla superficie esterna del portamaterozza, della lingottiera e del fondello al tempo  $t = 3$  h.

## 6 CONCLUSIONI

Si è simulata con il codice Fluent una parte del processo di produzione di un lingotto da trentadue tonnellate: sono state eseguite tre simulazioni, la prima trascurando i moti convettivi all'interno dell'acciaio, la seconda e la terza tenendone conto e utilizzando per la regione bifase due diversi modelli, quello di mezzo poroso e quello misto da noi intro-

dotto per considerare la diversa struttura della regione bifase nelle zone a bassa e ad alta frazione di liquido. La prima simulazione è stata eseguita su un dominio che comprende anche l'ambiente esterno alla lingottiera e non ha presentato particolari difficoltà: essa ha permesso di calcolare l'andamento del coefficiente di scambio termico sulla superficie esterna della lingottiera, che è stato poi utilizzato nella seconda e nella terza simulazione, nelle quali il dominio di soluzione non include invece l'ambiente esterno. Queste ultime due simulazioni, che hanno riguardato le prime sei ore del processo, sono state molto lunghe (circa 7 giorni e circa 12 giorni rispettivamente) e hanno mostrato difficoltà di convergenza. I risultati ottenuti mostrano che con il modello misto, che permette moti convettivi molto più intensi di quello di mezzo poroso, già dopo un quarto d'ora dall'inizio del processo, il lingotto è occupato interamente dalla regione bifase e la regione liquida sopravvive solo nella materozza; con il modello di mezzo poroso questo si verifica invece un'ora dopo l'inizio del processo. Si sono poi confrontati i risultati numerici con i dati sperimentali ottenuti con una telecamera a raggi infrarossi in acciaieria durante il processo di produzione del lingotto. Il confronto è stato eseguito sulla distribuzione di temperatura sulla superficie esterna del portamaterozza, della lingottiera e del fondello e ha mostrato un buon accordo: in particolare le due simulazioni "convettive" forniscono risultati che si avvicinano di più a quelli sperimentali rispetto ai quelli ottenuti con la simulazione "conduttiva". Il modello misto inoltre sembra approssimare meglio il comportamento della regione bifase rispetto a quello di mezzo poroso, almeno nelle prime ore, nelle quali è maggiore l'influenza dei moti convettivi.

## **RINGRAZIAMENTI**

Lavoro svolto nell'ambito del progetto "Termofluidodinamica mono e bifase" cofinanziato da MURST e Università di Brescia nell'anno 1997. Si ringrazia la ASO siderurgica s.r.l. di Ospitaletto (BS), in particolare i P.I. Paderni e Ravelli, per la disponibilità dimostrata durante lo svolgimento delle misure termografiche.

## **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- [1] Bennon, W.D., Incropera, F.P., A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems—I. Model formulation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 2161–2170 (1987).
- [2] Prescott, P.J., Incropera, F.P., Bennon, W.D., Modeling of dendritic solidification systems: Reassessment of the continuum momentum equation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 2351–2359 (1991).
- [3] Ganesan, S., Poirier, D.R., Conservation of mass and momentum for the flow of interdendritic liquid during solidification, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 21B, pp. 173–181 (1990).

- [4] Voller, V.R., Prakash, C., A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1709–1719 (1987).
- [5] Bennon, W.D., Incropera, F.P., A continuum model for momentum, heat and species transport in binary solid-liquid phase change systems—II. Application to solidification in a rectangular cavity, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 2171–2187 (1987).
- [6] Amberg, G., Computation of macrosegregation in an iron-carbon cast, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 217–227 (1991).
- [7] Pilotelli, M., Lezzi, A.M., Beretta, G.P., Influenza della relazione tra permeabilità e porosità sulla simulazione numerica della solidificazione di un lingotto, in *XVII Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore*, Ferrara (1999).
- [8] Kurz, W., Fisher, D.J., *Fundamentals of Solidification*, 3rd ed., Trans Tech Publications, Aedermansdorf, Switzerland (1992).
- [9] Pilotelli, M., Studio numerico su modelli termofluidodinamici della regione bifase nella solidificazione di acciaio in cavità chiuse, Tesi di Dottorato, Università degli Studi di Brescia (1999-2000).
- [10] West, R., On the permeability of the two-phase zone during solidification of alloys, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 16A, p. 693 (1985).
- [11] Acrivos, A., Fan, X., Mauri, R., On the measurement of the relative viscosity of suspensions, *J. Rheol.*, Vol. 38, pp. 1285–1296 (1994).
- [12] Santulli, R., Solidificazione di acciaio in una lingottiera di grandi dimensioni. Confronto fra modello numerico semplificato e rilevazioni termografiche in acciaieria, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Brescia (1998-99).