

Modellazione CFD di un forno di riscaldamento per billette

V. Battaglia, E. Malfa, M. Fantuzzi, E. Filippini

Il presente lavoro descrive il modello matematico sviluppato da CSM, nell'ambiente di calcolo AnsysFLUENT (Computation Fluid Dynamics - CFD), per la simulazione di un forno di riscaldamento/trattamento e la validazione condotta attraverso l'applicazione al riscaldamento billette del walking hearth di Feralpi Siderurgica LAM2.

Le simulazioni condotte hanno consentito sia l'analisi di dettaglio della termo-fluidodinamica dei gas all'interno del forno che il calcolo del bilancio energetico complessivo e della curva di riscaldamento della billetta, dimostrando la potenzialità del modello per la valutazioni di possibili modifiche sia geometriche che legate al sistema di combustione. La conoscenza dei campi di temperature, velocità, e concentrazione delle specie chimiche in prossimità della superficie delle billette hanno permesso inoltre di calcolare la formazione della scaglia attraverso l'accoppiamento con un modello già disponibile presso CSM.

Parole chiave:

Simulazione numerica, Trattamenti termici, Energia

INTRODUZIONE

L'obiettivo principale di un forno di riscaldamento è e resta la produzione. Tuttavia altri aspetti stanno diventando sempre più importanti (Figura 1):

- la qualità del riscaldamento;
- il consumo energetico (la minima richiesta energetica per ottenere la produzione desiderata e la miglior qualità possibile);
- l'impatto ambientale (le minori emissioni possibili compatibilmente con i punti precedenti e con i limiti legislativi delle emissioni di NOx).

Tutti questi obiettivi devono essere raggiunti con costi (capitali e operativi) competitivi. Per questo risulta necessaria una grande attenzione all'ottimizzazione del progetto del forno e alla riduzione del consumo energetico. A tal fine sono tradizionalmente utilizzati modelli semplificati per analizzare il riscaldamento della carica basati su un approccio zonale [1-4] che derivano dalla constatazione che il principale meccanismo di riscaldamento della carica nel forno è lo scambio termico per irraggiamento. Solo saltuariamente, e nel caso di revamping, risulta possibile una misura diretta della curva di riscaldamento: la strumentazione con termocoppie della carica (billetta strumentata) può essere effettuata solo in caso di specifici test mentre i pirometri ottici e le termografie danno informazioni solo sulla temperatura superficiale che risente fortemente della presenza di scaglia.

Negli ultimi anni sono state intraprese due strade principali nello sviluppo della modellistica per i forni di riscaldamento:

- modelli 3D di controllo online basati sui metodi zionali estesi alla simulazione dello scambio radiativo non stazionario. Tali modelli richiedono la taratura attraverso billette strumentate [5];
- simulazione termo-fluido-dinamica computazionale (CFD) 3D del forno completo come l'estensione della modellistica usata per il singolo bruciatore [2,7].

Il lavoro in oggetto descrive la messa a punto di un modello CFD

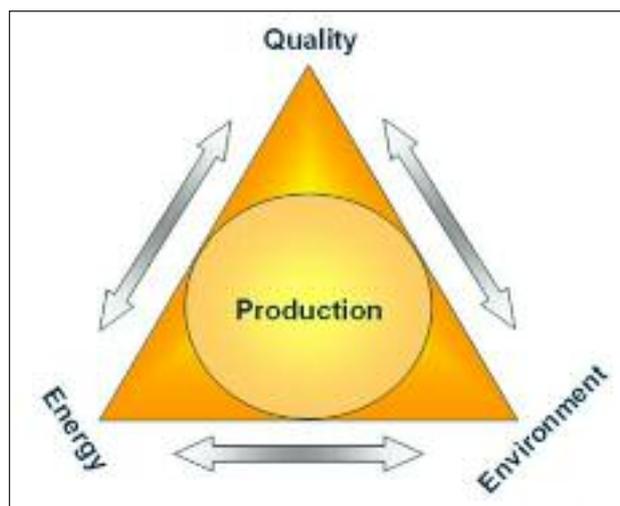


FIG. 1 *Obiettivi prioritari dei forni dell'industria siderurgica.*

Targets priority for furnaces in the steel industry.

per riprodurre in dettaglio il campo fluidodinamico, termico, delle specie chimiche all'interno di un forno di riscaldamento/trattamento completo e la corrispondente curva di riscaldamento della carica.

L'APPROCCIO CFD PER LA SIMULAZIONE TRIDIMENSIONALE DI UN FORNO DI RISCALDO

I modelli fisici e numerici utilizzati per la simulazione di un singolo bruciatore [2,7] sono stati il punto di partenza per l'estensione alla simulazione del forno completo. In questo caso i maggiori problemi da affrontare risultano:

- il numero elevato di celle computazionali necessarie per descrivere le diverse scale geometriche presenti (bruciatori vs. forno vs. carica);
- la modellazione della carica in avanzamento (nel caso specifico billette).

Per rappresentare in dettaglio i diversi componenti del forno ed

V. Battaglia, E. Malfa - Centro Sviluppo Materiali S.p.A.

M. Fantuzzi - Tenova LOI Italimpianti

E. Filippini - Feralpi Siderurgica SpA

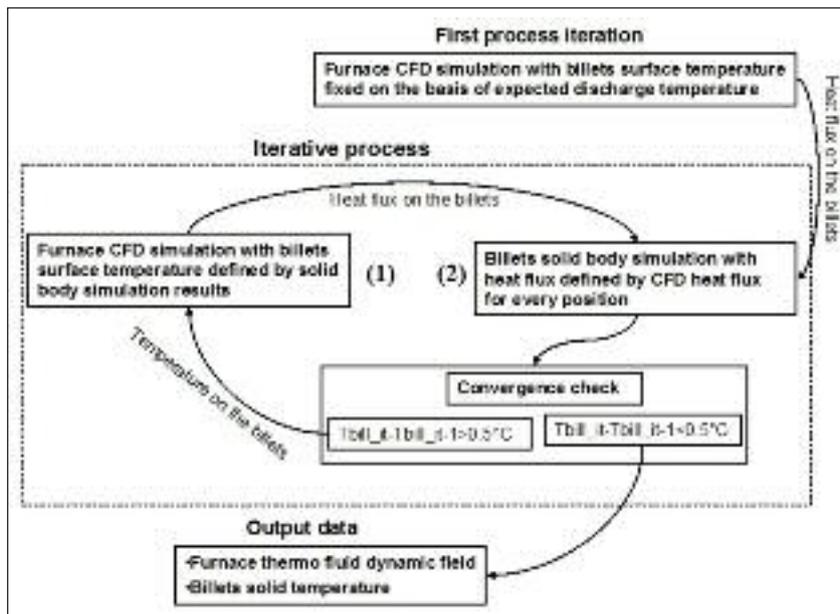


FIG. 2
Schema del modello accoppiato.
Coupled model scheme.

allo stesso tempo avere una descrizione sufficientemente accurata dell'interazione tra le fiamme generata dalla molteplicità di bruciatori presenti è, infatti, necessaria una griglia di calcolo con decine di milioni di celle di calcolo. Considerando che la maggior parte delle celle (più del 50%) è utilizzata per rappresentare il dettaglio della geometria di ogni singolo bruciatore, CSM ha messo a punto una procedura per ridurre drasticamente il numero di celle della griglia completa [8]. Tuttavia il problema degli elevati tempi di calcolo richiesti dalla complessità della griglia è aggravato dal fatto che la rappresentazione dell'avanzamento della carica all'interno del forno richiede una simulazione non stazionaria. È stato possibile superare tale limitazione facendo riferimento alle differenti scale temporali dei due processi: il tempo caratteristico dei fenomeni fluidodinamici è dell'ordine dei decimi di secondo mentre il tempo caratteristico del riscaldamento del solido (carica) è dell'ordine del secondo. Ciò ha consentito di sviluppare un approccio originale (Figura 2) accoppiando, in un procedimento iterativo, la simulazione stazionaria del flusso reattivo all'interno del forno (furnace model) con la simulazione non stazionaria dell'avanzamento della carica nel forno (stock model). In questo processo la superficie delle billette è considerata a temperatura costante durante la simulazione termo-fluido-dinamica del forno mentre il flusso termico risultante sulle billette è applicato come condizione al contorno

per la simulazione del solido in avanzamento. La simulazione in regime non stazionario del riscaldamento del solido fornisce una nuova temperatura superficiale delle billette alla simulazione CFD in un processo iterativo che si interrompe solo quando la differenza tra le temperature superficiali calcolate in due successive iterazioni è minore di una soglia di tolleranza stabilita. Il modello dell'avanzamento della carica nel forno è stato implementato per mezzo di subroutine specifiche per Ansys

IL CASO DI RIFERIMENTO PER LA VALIDAZIONE

FLUENT (User Defined Function-UDF) [9] ed è applicabile a qualsiasi geometria di carica e a qualsiasi sistema di movimentazione.

Per validare il modello CFD è stato scelto il forno di riscaldamento walking hearth denominato LAM2 (Figura 3) in quanto nell'ambito del progetto europeo RFCS CO2RED [10], il forno è stato oggetto di un accurato monitoraggio e sono disponibili le curve di riscaldamento ottenute attraverso billette strumentate con termocoppie per diverse condizioni operative e di produzione. Il forno di Feralpi è costituito da quattro zone di controllo più un tunnel di preriscaldamento separato da un setto. La zona di riscaldamento e preriscaldamento sono equipaggiate con 48 bruciatori di volta (750 kW ciascuno). La zona di equalizzazione è separata in due zone di controllo con 12 bruciatori ciascuna (400 kW ciascuno). La potenza totale massima installata è pari a 43 MW. L'aria comburente è preriscaldata da un recuperatore centralizzato. La produzione nominale del forno è di 80 ton/h ma il forno è spesso utilizzato fino a 125 ton/h. In Tabella 1 sono riportate le condizioni operative rilevate durante il monitoraggio del forno con produzione di 121 ton/h e 126 ton/h per billette di dimensioni 140x140x12000 mm.

La temperatura delle billette è stata acquisita per mezzo di cinque termocoppie K lunghe 30 m (Figura 4). In entrambi i casi la billetta ha ruotato nella zona del setto divisorio (180° e 270° rispettivamente), quindi la termocoppia superiore si è posizionata nella parte inferiore e laterale della billetta. Questo fenomeno è ben noto in Feralpi ed è il risultato dei forti gradienti termici in corrispondenza del setto divisorio come confermato in seguito dalle simulazioni CFD.

Rolling mill no. 2

Reheating furnace: T5 Implant

- > Type: Walking hearth
- > Length: 23.000 mm
- > Width: 12.900 mm
- > Fuel: Natural gas
- > Burners: Roof
- > Control zones: 4
- > Nominal cap.: 80 t/h
- > Charging T.: Ambient
- > Discharging T.: 1.150-1200°C

> Temperature control: thermocouple

> Heat recovery: centralized air preheating

> Input Billets (carbon steel):

140x140x12000 mm - 1 row	140x140x6000 mm - 2 rows
130x130x12000 mm - 1 row	130x130x6000 mm - 2 rows

FIG. 3
Forno di riscaldamento Feralpi LAM2.
Outline of the Feralpi reheating furnace LAM2.

TAB. 1
Condizioni operative del forno Feralpi.

Operative condition of Feralpi furnace.

FR air 35441 Nm ³ /h					FR air 26725 Nm ³ /h				
zone 1	zone 2	zone 3	zone 4		zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	
17207	11000	2577	2577		17493	13741	4150	4282	
FR gas 3552 Nm ³ /h					FR gas 5925 Nm ³ /h				
zone 1	zone 2	zone 3	zone 4		zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	
17472	10284	373	373		1726	1774	426	426	
Air/gas ratio					Air/gas ratio				
0.99	10.39	9.99	9.99		0.89	10.27	9.52	9.52	
Power (kW)					Power (kW)				
zone 1	zone 2	zone 3	zone 4		zone 1	zone 2	zone 3	zone 4	
17328	11623.8	3428.8	3428.8		17490.2	13717.2	4225.2	4274.4	

a) January 2009; combustion air @ 370°C

b) April 2009; combustion air @ 370°C

In Tabella 2 sono riportati i bilanci termici e le relative efficienze nei due periodi di monitoraggio del forno.

MODELLAZIONE CFD TRIDIMENSIONALE DI UN FORNO DI RISCALDO COMPLETO

Nel seguito viene descritta la metodologia utilizzata per la messa a punto del modello CFD del forno completo con l'obiettivo di riprodurre in dettaglio il campo fluidodinamico, termico, delle specie chimiche nel forno insieme alla curva di riscaldamento della carica con tempi di calcolo compatibili con applicazioni ingegneristiche.

Modello termico bidimensionale

Per lo sviluppo del modello di avanzamento della carica (stock model) è stato svolto un lavoro preliminare utilizzando una rappresentazione bidimensionale del forno (Figura 5). Il modello 2D risolve solo l'equazione dell'energia e dello scambio radiativo (Discrete Ordinates model) in ambiente AnsysFLUENT. La temperatura delle zone è imposta come condizione al contorno sulle pareti in modo analogo ai modelli zonali tradizionali. Le simulazioni sono state eseguite in condizioni di produzione nominale 80 tph, rappresentando sia direttamente le billette in avanzamento e che attraverso il modello semplificato di nastro equivalente i cui criteri di similitudine sono riportati [8]. La curva di riscaldamento ottenuta con i due approcci (billet e strip eq. in Figura 6) dimostrano sia la corretta implementazione dello "stock model" che indirettamente l'applicabilità del concetto di nastro equivalente per la tipologia di movimentazione della carica considerata.

Ottimizzazione del dominio di calcolo

Sulla base di un'analisi di sensibilità effettuata su una singola zona del forno [8], la griglia di calcolo per il forno completo richiederebbe svariate decine di milioni di celle. Il tempo di calcolo, considerando le risorse attualmente disponibili presso CSM (cluster di 4 Dell 2 CPU dual con 32GB di RAM), risulterebbe dell'ordine di diverse settimane e quindi incompatibile con le esigenze del ciclo di progettazione/analisi industriale. Considerando, come detto precedentemente, che la maggior parte delle celle è concentrata nella zona dei bruciatori, è stata sviluppata una procedura per ridurre drasticamente il numero necessario assegnando direttamente come condizioni al contorno al modello CFD del forno completo le grandezze in corri-

TAB. 2
Bilancio termico del forno Feralpi.

Feralpi WHF heat balance.

Legends: PRO=production; TTI= Total Thermal Input (gas+hot air); ST= stock exit temperature; STG=power to stock; FGH= flue gas heat losses; FHL= furnace heat losses							
TEST	PRO [tph]	TTI [kW]	ST [°C]	STG [kW]	FGH [kW]	FHL [kW]	η [%]
01/09	121tph	40102 kW	1170 °C	26366 kW	12001 kW	1735 kW	65
04/09	126tph	42293 kW	1150 °C	27733 kW	12767 kW	1793 kW	65

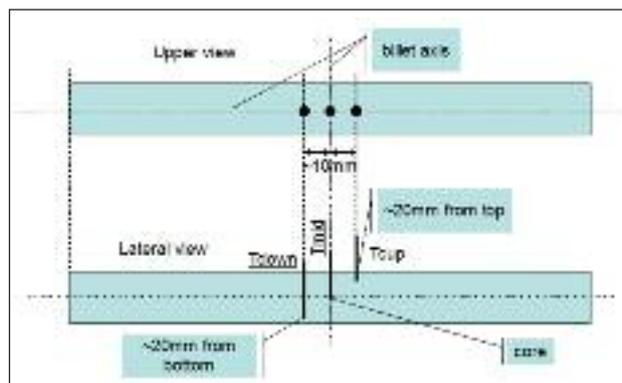


FIG. 4 **Schema delle termocoppie per le billette strumentate.**

Thermocouple scheme for instrumented billet in Feralpi furnace.

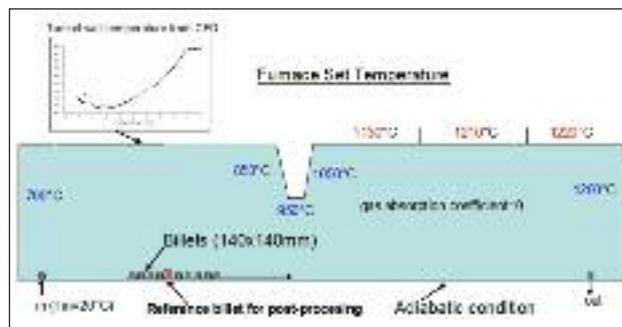


FIG. 5 **Set delle temperature per il modello AnsysFLUENT 2D del forno.**

2D Fluent furnace model set temperature.

spondenza della sezione di uscita del singolo bruciatore (Figura 7). I profili (componenti velocità, energia e dissipazione turbolenta, temperatura, concentrazione specie chimiche) sono ottenuti dalla simulazione del singolo bruciatore. La procedura è stata descritta e validata in [8] ed è stata utilizzata anche per altre applicazioni [4].

Nel caso specifico del forno Feralpi i bruciatori di volta utilizzati, per le due taglie e le diverse condizioni di esercizio, sono

stati simulati singolarmente come installati nel forno di prova CSM. La Figura 8 mostra un esempio dei risultati ottenuti per il bruciatore da 750 kW.

L'applicazione della procedura descritta ha permesso di ridurre la griglia di calcolo a circa 10M di celle per metà forno essendo stato possibile sfruttare la simmetria della configurazione. Una zona non strutturata è presente di fronte a ciascun bruciatore mentre nella rimanente parte del forno è stato possibile costruire una griglia strutturata.

Modello termo-fluido-dinamico tridimensionale

Il modello messo a punto per la simulazione di un singolo bruciatore [2,7], tabella 3, è stato utilizzato anche per la simulazione del forno Feralpi LAM2. In particolare è stato utilizzato il meccanismo di reazione a 2 passi con le costanti cinetiche di Westbrook&Dryer [11] essendo il miglior compromesso tra l'accuratezza dei risultati ed il tempo [12].

Le condizioni al contorno utilizzate sono riportate in Figura 9:

- pareti forno (laterali, volta, soles, tunnel): spessore e conducibilità dei materiali delle pareti e condizione con scambio termico radiativo e convettivo verso l'ambiente a 25°;
- bruciatori: profili di velocità, turbolenza, temperature e concentrazioni delle specie (ogni coppia di bruciatori ha swirl controrotante);
- uscita forno: condizione di pressione atmosferica;
- porta di infornamento e aperture laterali forno: superficie trasparente allo scambio radiativo con l'ambiente circostante a 25°;
- sistema di sfornamento raffreddato: temperatura assegnata.

Simulazione con modello di nastro equivalente (Equivalent Strip Reheating Furnace)

Un primo passo nella messa a punto della simulazione 3D del forno completo Feralpi è stata effettuato rappresento la carica attraverso l'approssimazione di nastro equivalente (ESRF) nell'ambito del progetto RFSC CO2RED per la condizione di esercizio del forno corrisponde a quella denominata "January 2009" in Tabella1. In questo paragrafo sono riportati i principali risultati mentre maggiori dettagli si possono trovare in [8].

In generale la simulazione permette di evidenziare i principali fenomeni che avvengono nel forno:

- il setto divisorio produce due macro zone nel forno sia in termini di velocità (bassa velocità con ampio ricircolo orizzontale nel tunnel, alta velocità con ricircolo verticale dovuto ai bruciatori con swirl nella zona calda) che di temperatura e concentrazione specie (Figura 10);
- le zone 3 e 4 sono sotto stechiometriche in accordo con i rapporti aria/gas adottati (Tabella1) mentre la concentrazione di O₂ nei fumi è del 0.8% (O₂ in Figura 10);
- la differenza di temperatura tra la superficie e il cuore della billetta allo sfornamento (Figura 11) indica che la temperatura della carica non è ben equalizzata. Questo è dovuto alla produzione (121-126 tph) molto alta rispetto alla produzione nominale del forno (80 tph).

TAB. 3
Set up modellistica CFD.
CFD Modeling set-up.

CFD model set-up	
Fluid	Ideal gas
Turbulence	k- ω with shear stress correction (Wilcox)
Chemistry	2 steps reduced mechanism: $CH_4 + 1.5O_2 = CO + 2H_2O$ $CO + O_2 = CO_2$ Rate of reaction: Eddy Dissipation/ Arrhenius ^A A=4 & B=0.5
Material properties	For each species - Specific heat for each species taking into account dissociation (K. Peller) - Thermal conductivity and viscosity by kinetic theory Mixture - Density ideal gas - Specific heat, viscosity and thermal conductivity by ideal gas mixing law - Mass Diffusivity by kinetic theory
Radiation	DCM (Discrete Ordinate Model – Domain based) Absorption coefficient: WSGGM
Numerical approach	
Mesh type	Hybrid
Solver	Segregated
Discretization	Implicit/finite volume
Non linear term	Second order scheme

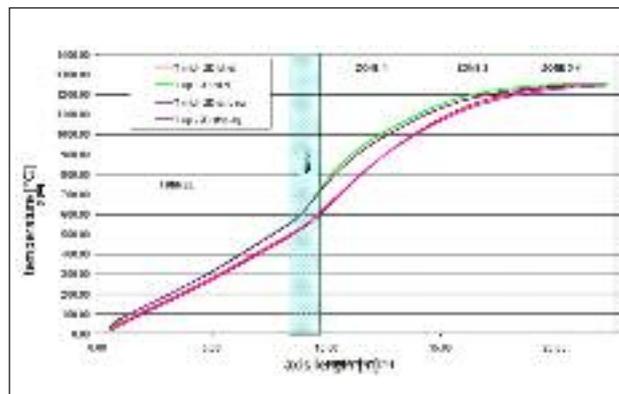


FIG. 6 Curva di riscaldamento ottenuta con il modello 2D: billette vs. nastro equivalente.

Two dimensional model: charge model vs. equivalent strip.

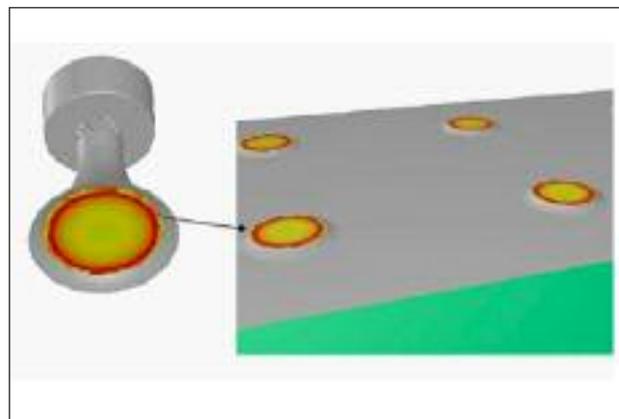


FIG. 7 Schematizzazione dei bruciatori per l'ottimizzazione del dominio di calcolo.

Burners schematization for domain optimization.

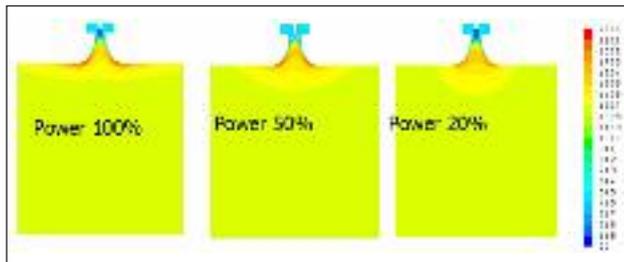


FIG. 8 Campi di temperatura per il bruciatore da 750 kW.
 $T_{air}=450^{\circ}\text{C}-2\%\text{O}_2$
 Temperature field of the roof burner for different power load. $T_{air}=450^{\circ}\text{C}-2\%\text{O}_2$.

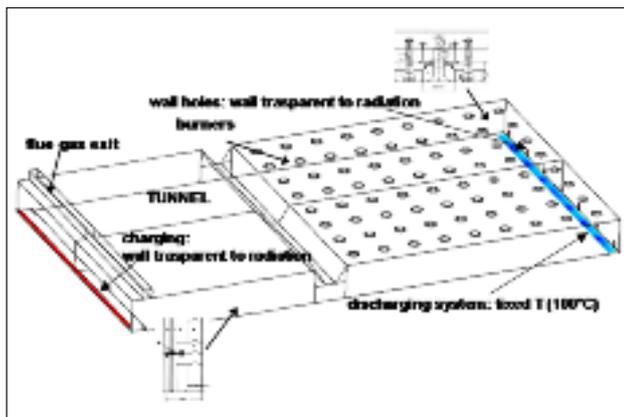


FIG. 9 Condizioni al contorno del modello CFD del forno di riscaldamento.
 Complete furnace boundary conditions.

TAB. 4 Bilancio termico del forno Feralpi dai dati CFD.

Feralpi furnace thermal balance from CFD data.

PRO [tph]	TTP1 [kW]	ST [°C]	STG [kW]	FGH [kW]	FHL [kW]	η [%]
121 t/h	40102 kW	1172 °C	26378 kW	11801kW	1923 kW (4.7%)	65%

Il bilancio termico che deriva dalla simulazione CFD (tabella 4) risulta in accordo con quanto misurato (Tabella 1 - January 2009). Attraverso la simulazione è stato anche possibile stimare i diversi contributi alle perdite termiche del forno (Tabella 5). In Figura 11 è riportata la curva di riscaldamento calcolata. Le differenze rispetto ai dati sperimentali nella zona del setto è dovuta alla rotazione della billetta causata dai forti gradienti termici e osservata durante i rilievi sperimentali.

Simulazione con modello di carica in movimento (Charge Movement Reheating Furnace)

L'approccio di "nastro equivalente" ha permesso di sviluppare il modello CFD per la simulazione 3D del forno di riscaldamento completo e di evidenziarne i limiti intrinseci nel caso di sistemi di movimentazione che prevedono la rotazione della carica. Per mezzo di macro e User-Defined-Function (UDF) del codice Ansys FLUENT è stato quindi sviluppato il modello di movimentazione della carica (stock model) e il processo iterativo schematizzato in Figura 2 effettuando la simulazione stazionaria della fluidodinamica all'interno del forno e la simulazione dipendente dal tempo del solido (billetta nel caso Feralpi) in avanzamento nel forno (CMRF). I dettagli dell'implementazione sono riportati in [13]. Il modello è stato applicato per il forno Feralpi per le condizioni operative denominate "April 2009" in Tabella 1. Le condizioni al

contorno sono le stesse utilizzate per la simulazione con il nastro equivalente descritte nel paragrafo precedente. I risultati delle simulazioni in termini di temperatura della carica sono qualitativamente simili a quelli ottenuti con l'approssimazione di nastro equivalente (Figura 12-14).

Il flusso in prossimità della carica è anch'esso molto simile (Figura 15) a conferma della bontà dei criteri di similitudine utilizzati nell'schematizzazione della carica come nastro equivalente. Attraverso il modello di dettaglio della carica è tuttavia possibile mettere in evidenza la non uniformità del flusso tra la superficie superiore e laterale della billetta (Figura 16). La curva di riscaldamento ottenuta è riportata in Figura 17 e confrontata con la curva sperimentale.

L'utilizzo del modello accoppiato consente di migliorare la pre-

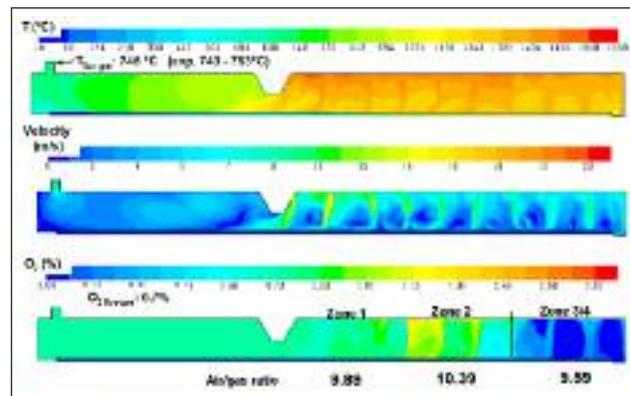


FIG. 10 Campo di temperatura, velocità e concentrazione O_2 nella sezione di mezzeria del forno.
 Temperature, velocity and O_2 molar concentration in the middle section.

visione rispetto al nastro equivalente nella zona del tunnel e nella zona di equalizzazione, tuttavia permane la differenza tra la curva di riscaldamento sperimentale e simulata nella zona del setto dove i dati sperimentali sono influenzati dalla rotazione della billetta per la forte non uniformità del flusso termico.

Dato che il modello accoppiato permette la rotazione della billetta in qualsiasi posizione del forno, è stato possibile riprodurre la rotazione osservata durante i rilievi sperimentali come una somma di due rotazioni della billetta (rotazione di 180° a 8.9m e di 90° a 9.7m). Risulta evidente l'effetto sulle temperature superficiali delle billette (Figura 18) e conseguentemente sulla curva di riscaldamento (figura 19) che riproduce la discontinuità nella

Test 31/01/09	Heat losses
Furnace wall	351.4 kW
Discharging roll way	1177.0 kW
Charging port	219.5 kW
Wall holes	107.4 kW

TAB. 5 Contributi alle perdite termiche del forno.
 Furnace thermal losses.

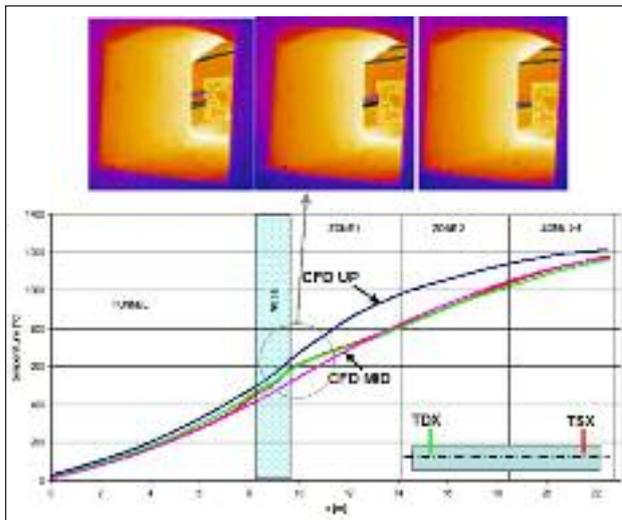


FIG. 11 Curva di riscaldamento del forno Feralpi, dati sperimentali vs. risultati simulazione e visualizzazione della rotazione billettera nella zona setto.

Feralpi furnace heating curve, experimental data vs. simulated results. Visualization of the billet rotation in the baffle zone.

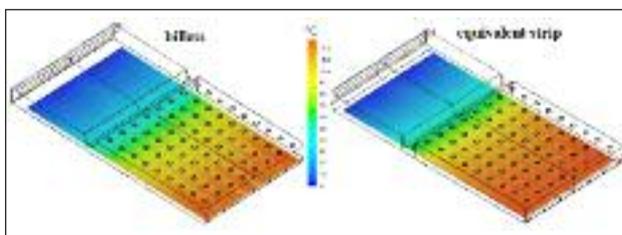


FIG. 12 Confronto campi di temperatura superficiali della carica per billette (sx) e nastro equivalente (dx).

Comparison of the surface temperature. Billet (left) vs. equivalent strip (right).

temperatura provocata dalla rotazione nella zona del setto. La riduzione di temperatura nella zona 2 del forno è peculiare di questo set di dati sperimentali e non è riprodotta dal modello. Una possibile spiegazione è l'apertura delle porte laterali per un periodo di tempo prolungato per permettere la ripresa video della rotazione della billettera.

Modellazione della crescita scaglia

I campi di temperature, velocità, e concentrazione delle specie chimiche in prossimità della superficie delle billette ottenuti con la simulazione CFD permettono di calcolare la formazione della scaglia sulla superficie delle billette. A tal fine il modello sviluppato da CSM [14], che considera la crescita della scaglia in termini di trasporto di massa delle specie ossidanti dall'atmosfera gassosa alla superficie dell'acciaio e la diffusione delle specie reagenti attraverso lo strato di scaglia già presente (Figura 20), è stato implementato come analisi a posteriori (post-processing) in Ansys-FLUENT per mezzo di UDF.

In Figura 21 è mostrato lo spessore di scaglia calcolato sulla superficie della billettera in corrispondenza di due diverse posizioni. In Figura 22 è riportato lo spessore di scaglia nel punto centrale della superficie superiore della billettera.

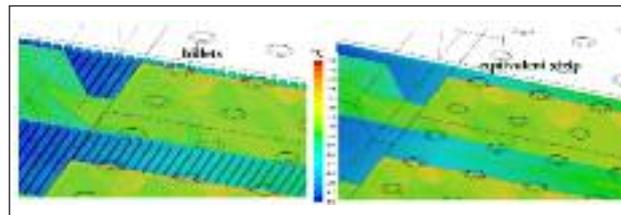


FIG. 13 Campo di temperatura in prossimità del setto interno al forno.

Temperature field in the baffle zone.

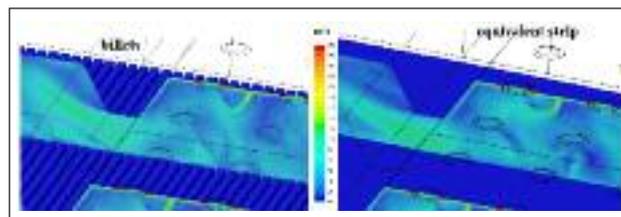


FIG. 14 Campo di velocità in prossimità del setto interno al forno.

Velocity field in the baffle zone.

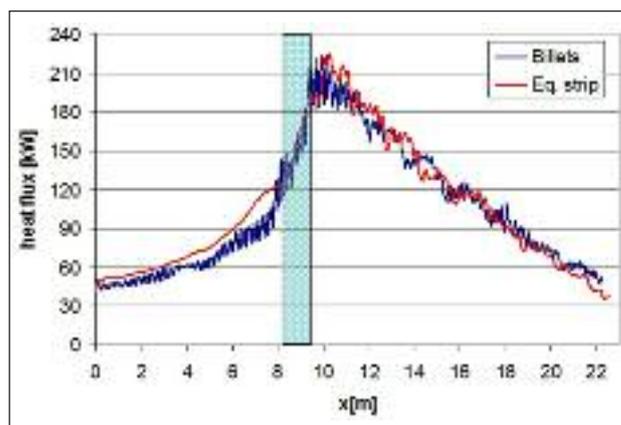


FIG. 15 Flusso termico sulla superficie della carica (billette vs. nastro equivalente).

Heat flux on the charge surface (billets vs. eq. strip).

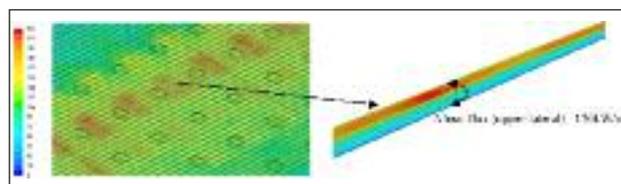


FIG. 16 Flusso termico nella zona del setto divisorio.

Heat flux in the baffle zone.

CONCLUSIONI

Il modello matematico messo a punto da CSM, nell'ambiente di simulazione termofluidodinamica (Computation Fluid Dynamics - CFD) AnsysFLUENT, per la simulazione di un singolo bruciatore è stato esteso alla rappresentazione di forno di riscaldamento/trattamento completi tenendo in considerazione il movimento della carica nel forno. A tal fine è stata messa a punto una specifica procedura per ridurre i tempi di calcolo senza perdere accuratezza nei risultati.

La prima versione del modello denominata Equivalent Strip Re-

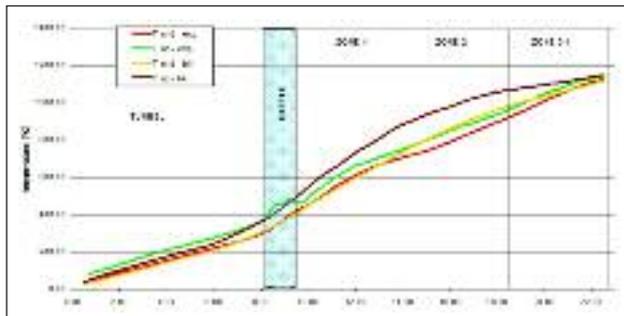


FIG. 17 *Curve di riscaldamento, dati sperimentali vs. simulazione.*
Heating curve, experimental data vs. simulation results.

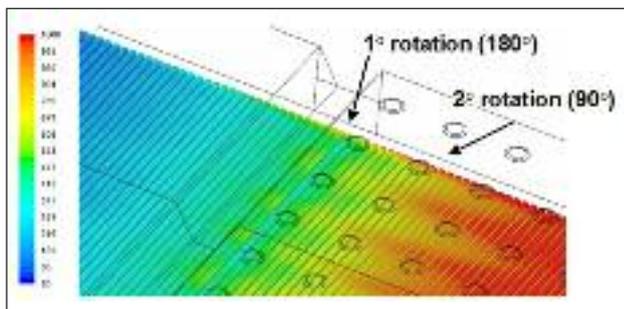


FIG. 18 *Temperatura superficiale delle billette nella zona della rotazione.*
Billet surface temperature in the baffle zone.

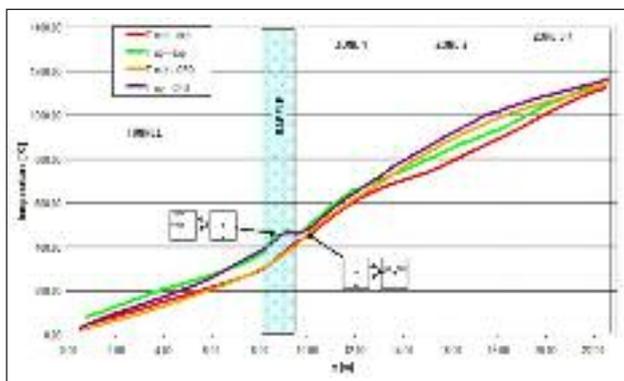


FIG. 19 *Curva di riscaldamento sperimentale vs. simulata con la rotazione della billetta.*
Billet heating curve. Experimental data vs. simulation results with modeling of billet rotation.

heating Furnace è stata implementata nell'ambito del progetto RFCS CO2RED rappresentando la carica come un nastro equivalente. Questo modello è stato la base per l'implementazione del modello accoppiato (Charge Movement Reheating Furnace) che permette la simulazione di qualsiasi tipo di geometria di carica e sistema di movimentazione.

Entrambi i modelli sono stati validati attraverso la simulazione del forno di riscaldamento walking hearth (LAM2) di Ferali Siderurgica. Il confronto tra i risultati del modello ESRF e CMRF ha permesso di verificare i criteri di similitudine del modello nastro equivalente dimostrando la sua applicabilità per sistemi di movimentazione che non prevedono rotazione della carica.

Attraverso il modello CMRF è stata riprodotta la rotazione della billetta localizzata nella zona del setto divisorio, osservata durante il monitoraggio del forno, consentendo di ottenere i detta-

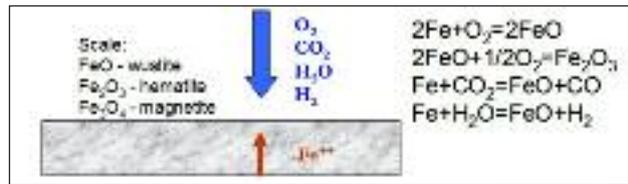


FIG. 20 *Fenomeni di controllo della crescita scaglia.*
Scale growth controlling phenomena.

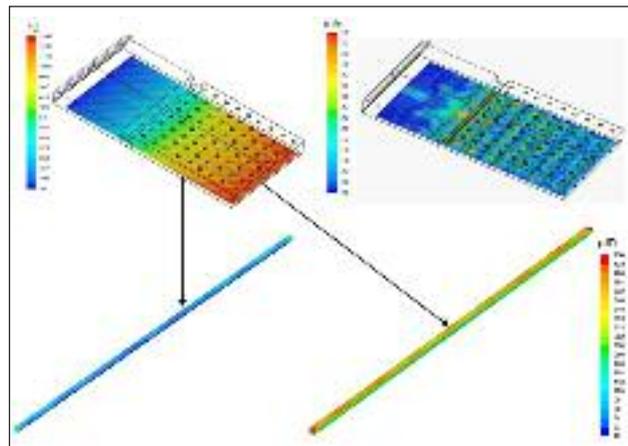


FIG. 21 *Spessore della scaglia sulla billetta #73 e #110.*
Scale thickness on billets #73 e #110.

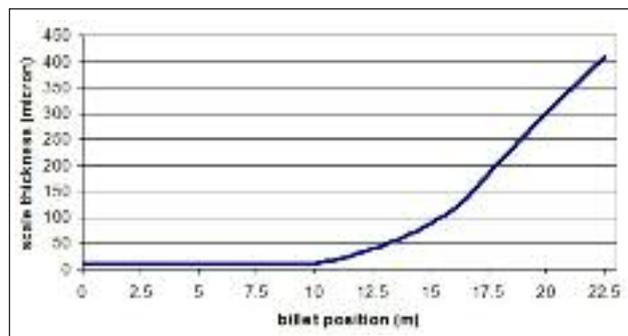


FIG. 22 *Curva di crescita scaglia nel punto centrale della superficie della billetta.*
Scale growth curve on the billet upper center point.

gli della curva di riscaldamento misurata sperimentalmente con un buon grado di accuratezza.

Inoltre essendo noto dalla simulazione CFD il campo tridimensionale di temperatura e concentrazione delle specie sulla superficie della carica è stato possibile, accoppiando il codice Ansys-FLUENT con il modello CSM di crescita scaglia, valutare lo spessore della scaglia sulla superficie della billetta durante l'avanzamento nel forno.

I buoni risultati ottenuti nella rappresentazione del processo di riscaldamento unitamente ai tempi di calcolo ridotti (con l'attuale potenza di calcolo del CSM e sfruttando le possibilità di calcolo parallelo di AnsysFLUENT, il tempo di calcolo necessario per simulazione completa è di circa 120 ore) consentono di concludere che il modello CMRF ha raggiunto un grado di sviluppo tale da poter essere applicato per la simulazione di forni di riscaldamento e trattamento dove sia necessario analizzare in dettaglio la fluidodinamica dei gas, l'interazione delle fiamme, la distribuzione termica sulle pareti e la temperatura ed il flusso termico sulla carica.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano i colleghi di CSM (A.Didonato, A.Landi, P.Panzella e U.Zanusso), di Feralpi Siderurgica (F.Magni, E.Colombo) e di Tenova (M.Ageno) per la disponibilità ed il contributo data sia attraverso la discussione dei risultati delle simulazioni che durante la fase di raccolta ed elaborazione dati durante le prove presso Feralpi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R.J. Tucker end al.: British-Franch Flame Day, Lille 9/10 March 2009
- [2] L.Ballarino et al: 7th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gassification, Phuket, Thailand, January, 2008
- [3] Sang Heon Han et al: International Journal of Heat and Mass Transfer 52 (2009) 1005-1011
- [4] P. Pronk: AiSTech 2006 Proceedings - Volume I
- [5] A. Jaclic et al: Materiali in Tehnologije 39 (2005), ISSN 1580-2949
- [6] Bin Wu end al, AiSTech 2009 Proceedings - Volume II
- [7] M. Daneri et al. 60° Convegno AIM , Milano 2006
- [8] Battaglia et al: 16th IFRF Members' Conference, Boston, USA, June 08-10, 2009.
- [9] ANSYS FLUENT USER'S MANUAL. Fluent Inc. 2009
- [10] E.Malfa et al. - 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gassification, Poznan, Poland, June, 2010
- [11] C. Westbrook and F. Dryer..Progress Energy Combustion Science. 10:1-57, 1984
- [12] M. Mancini: Ph.D. Thesis. Clausthal University of Technology
- [13] V.Battaglia et al. - 8th International Symposium on High Temperature Air Combustion and Gassification, Poznan, Poland, June, 2010
- [14] C. Borgianni et al.. ECSC agreement nr.7210-EA-407 (1980)

Abstract

CFD modeling of complete walking hearth reheating furnaces

Keywords: steelmaking, numerical simulation, heat treatments, energy

The CFD modelling approach developed by CSM in the frame of FlexyTech Tenova project for the simulation of single burner has been extended to complete reheating furnaces to take into account the presence of several burners and their interaction with the furnace and steel charge.

The paper describes the modelling approach and application to the simulation of complete furnace (Feralpi reheating furnace LAM2) including case set up and validation by comparison between calculated and measured heating curves.

The main problems approached to set up the comprehensive furnace model have been:

- The dimension of the computational domain. To represent the furnace elements with sufficient details and to have, at the same time, sufficient resolution of flame interaction computational mesh with tens of million cells is required. Taking into account that the main part of the grid cells (70%) are concentrated in the burners region where very high temperature, velocity and species concentration gradients request high grid resolution, a procedure has been developed to drastically reduce the number of cells. The approach consists in the schematization of the burners by their outlet sections, as shown in Figure 1: the outlet burner profiles, extracted from single burner simulation, are applied as boundary condition to the complete furnace model. The procedure has been long term validated.
- Modelling of the steel charge. In principle the heating of charge (billet, bloom, tubes) requires unsteady calculation due to the advancement of the product inside the furnace and this requires very high computation time. The model implemented by CSM iteratively performs the stationary simulation of the fluid dynamic inside the furnace and the non stationary simulation of the charge during its advancement in the furnace. The separate simulations, fluid-stationary and solid-non stationary, are possible due to the different characteristic time scales of the two processes: the fluid dynamic time is of the order of 0.1sec, the solid thermal time is of the order of 1sec. Hence the billets surface temperature can be assumed time constant in the fluid-dynamic simulation and the resulting heat flux on the billets can be used as boundary condition in simulation of charge advancement inside the furnace. The solid simulation returns updated billets surface temperature to the fluid simulation in an iterative process that ends when the difference of the billets surface temperature in two successive iterations is less than a tolerance value. The charge model has been developed in the FLUENT UDF to be applicable for all types of steel charge geometry and handling system.

The developed model has been applied to the simulation of the Feralpi reheating furnace for billets (Lonato LAM2). The furnace has 4 control zones, equipped with 72 roof burners, and a preheating tunnel separated by a baffle. The handling system is walking heart type. The boundary condition setting takes into account real wall thickness and materials and localised heat losses (charging port and roll way).

The furnace simulation results allow to analysis the fluid dynamic of the flue gas, flames interaction, control zones wall temperature distribution, tunnel wall temperature, heat flux on the steel charge and to evaluate furnace heat balance. In particular the heat flux in the baffle region gives reason to billet 270° rotation due to strong deformation observed during furnace operation. The rotation has been reproduced by the steel charge model and the resulting billet heating curve shows high accuracy in prediction of the experimental heating curve.

With proposed approach the CPU time required for the simulation of complete furnace has been strongly reduced: the simulation presented has required one week of run time using two quad core machines connected in cluster (8 processors).