

Gemello digitale della colata continua: costruzione e calibrazione in ProCAST per la previsione di difetti e l'ottimizzazione di processo

R. Ottini, G. Mori, A. Mario, M. Bognolo, S. Gobbo, M. Marzaro, M. Bianchi, S. Buoro, F. Ricchini, C. Viscardi, L. Valente

La colata continua è un processo chiave nella produzione siderurgica, poiché influisce direttamente sulla qualità del prodotto. Il presente lavoro descrive lo sviluppo di un gemello digitale di una macchina di colata continua dello stabilimento di Padova di Acciaierie Venete. Il modello è stato realizzato da Ecotre Valente con software ProCAST seguendo una metodologia consolidata. Sono stati raccolti e integrati i reali parametri di processo. È stata costruita una modellazione 3D completa dell'impianto dalla lingottiera al taglio billette. Il sistema include diverse sezioni: raffreddamenti, stirrer elettromagnetici e rulli. Il modello ottenuto è stato calibrato confrontando dati simulati con le misure reali e la calibrazione ha mostrato una buona corrispondenza tra il modello e realtà. Nel lavoro sono state analizzate criticità come porosità, segregazioni e distribuzione dell'idrogeno. Il gemello digitale ottenuto consentirà quindi di ottimizzare processo e qualità riducendo scarti e costi.

PAROLE CHIAVE: COLATA CONTINUA; GEMELLO DIGITALE; PROCAST; SOLIDIFICAZIONE; SEGREGAZIONE, POROSITÀ; IDROGENO; STIRRER ELETTRIMAGNETICI.

INTRODUZIONE

La crescente digitalizzazione dei processi siderurgici consente oggi di affiancare alla pratica industriale tradizionale strumenti numerici avanzati in grado di descrivere e prevedere il comportamento termo-metallurgico dei prodotti durante tutte le fasi produttive, tra cui la colata continua. In tale contesto, il concetto di gemello digitale assume un ruolo strategico: non si tratta soltanto di una rappresentazione geometrica dell'impianto, ma di un modello numerico calibrato sui dati reali di processo, capace di riprodurre le condizioni operative e di supportare decisioni tecniche orientate al miglioramento della qualità.

L'attività descritta nel presente lavoro si inserisce in un più ampio progetto di digitalizzazione di una delle macchine di colata continua di Acciaierie Venete S.p.A., condotto con il sostanziale contributo di Ecotre Valente utilizzando il software ProCAST. Il caso studio riguarda il tondo colato con diametro 200 mm in acciaio 42CrMoS4, i cui parametri di colata sono riportati in tabella 1.

L'obiettivo principale è costruire un modello digitale dell'impianto reale, verificarne la coerenza termica trami-

Riccardo Ottini, Giacomo Mori,
Andrea Mario, Marco Bognolo, Sandro
Gobbo, Matteo Marzaro, Marco Bianchi,
Stelvio Buoro

Acciaierie Venete S.p.A.

Flavio Ricchini, Cristian Viscardi,
Lorenzo Valente

Ecotre Valente S.r.l.

te confronto con dati sperimentali e utilizzarlo per prevedere criticità metallurgiche quali solidificazione non uni-

forme, porosità da ritiro, segregazione e concentrazione di idrogeno.

Tab.1 - Principali parametri di processo / *Main process parameters.*

Parametro	Valore
Profilo colato	Tondo 200 mm
Grado acciaio	42CrMoS4
Surriscaldamento tipico	+40°C
Velocità di colata	1.2 m/min

ACCIAIO OGGETTO DELLO STUDIO

Il profilo selezionato per lo studio è un tondo di diametro 200 mm in acciaio 42CrMoS4. Le proprietà termo-fisiche

dell'acciaio sono state calcolate in ProCAST a partire dalla composizione chimica mediante il modulo Computherm.

Tab.2 - Composizione chimica dell'acciaio utilizzato nel modello / *Chemical composition of the steel used for the model.*

Elemento	wt%
C	0.400
Si	0.200
Mn	0.790
P	0.010
S	0.030
Cr	1.030
Mo	0.150
Cu	0.180

MODELLAZIONE DELL'IMPIANTO

La modellazione tridimensionale ha interessato una linea della macchina di colata continua per sezioni piccole dalla lingottiera fino alla zona dell'ossitaglio. Sono state incluse le principali sezioni impiantistiche: lingottiera (cristallizzatore + raffreddamento primario), M-EMS (mould electromagnetic stirrer), Loop 1 del raffreddamento secondario, Loop 2 del raffreddamento secondario, F-EMS (final electromagnetic stirrer), rulli di raddrizzatura, cappe intermedie e cappe finali (figura 1).

La digitalizzazione geometrica dell'impianto è il primo passaggio fondamentale, poiché permette di associare alle diverse zone della linea le corrette condizioni di scambio termico, raffreddamento e forze in gioco (forze elettromagnetiche degli stirrer, forza gravitazionale, forze dei rulli di raddrizzatura, etc.). In questo modo il modello non rappresenta una condizione teorica semplificata, ma una replica numerica dell'impianto industriale reale.

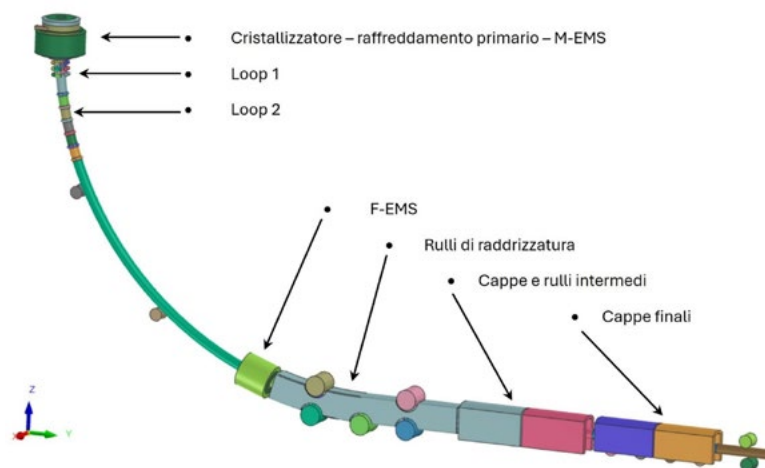


Fig.1 - Layout digitale della linea di colata continua / *Digital layout of the continuous casting strand.*

CRISTALLIZZATORE E RAFFREDDAMENTO PRIMARIO

La lingottiera è costituita da un classico cristallizzatore curvo in rame collocato in un circuito di raffreddamento primario ed è stata modellata considerando il passaggio dell'acqua tra cristallizzatore e convogliatore in con-

troflusso rispetto alla direzione di colata. I parametri di esercizio utilizzati sono: portata ≈ 3000 l/min, ΔT tra temperatura in uscita e in ingresso $\approx 4^\circ\text{C}$ e pressione pari ≈ 8 bar.

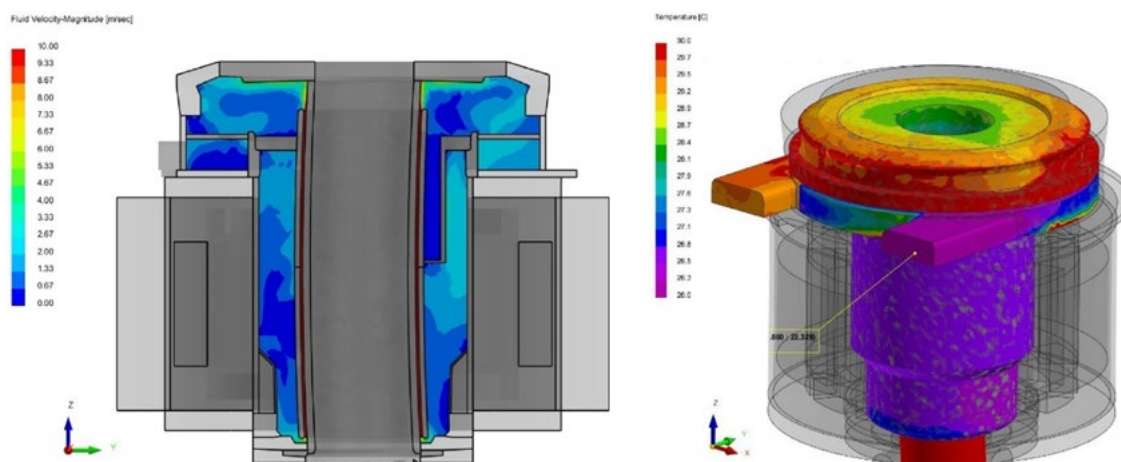


Fig.2 - Velocità dell'acqua del raffreddamento primario (sinistra) e temperatura in ingresso e in uscita (destra) / *Water speed in primary cooling (left) and inlet and outlet water temperature (right).*

Per la descrizione fluidodinamica del circuito è stato utilizzato il modulo ProCAST CFD Cooling Channels, finalizzato alla valutazione della velocità dell'acqua e dello scambio termico nel sistema primario. La velocità dell'acqua tra cristallizzatore e convogliatore calcolata dal modello è di circa 10 m/min (in linea con quanto atteso). Lo scostamento tra la temperatura in uscita misurata e la temperatura in uscita calcolata dal modello si aggira intorno a 0.1°C .

RAFFREDDAMENTO SECONDARIO

Il raffreddamento secondario, costituito da sola acqua, è suddiviso in due loop. Il loop 1 è composto da 24 ugelli con una portata complessiva di 40 l/min, ingresso dell'acqua a temperatura ambiente e pressione di ≈ 2 bar. Il loop 2 consta di 48 ugelli, ha una portata di 30 l/min, acqua in ingresso a temperatura ambiente e pressione di circa 1 bar.

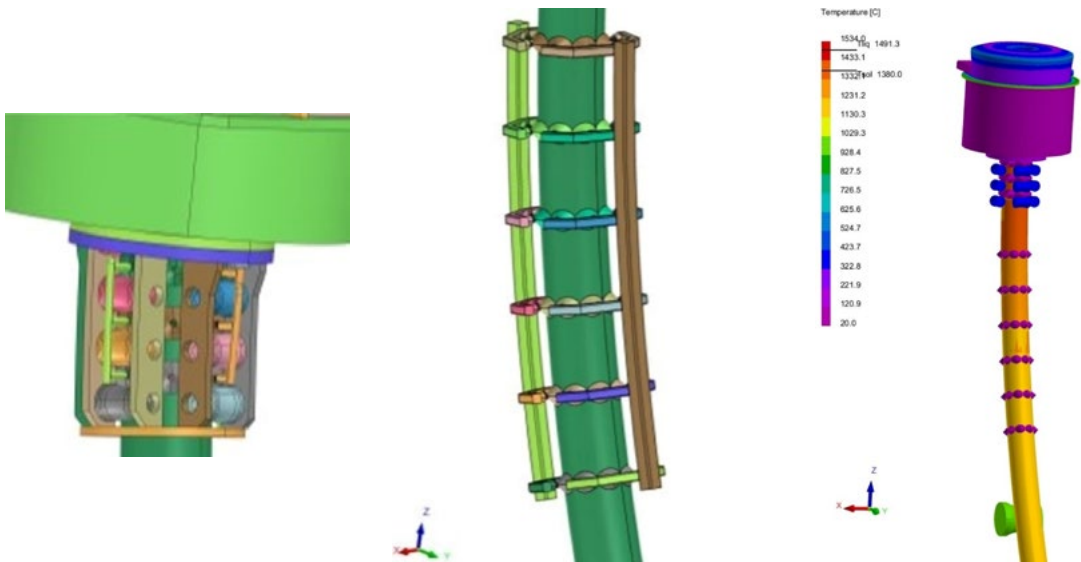


Fig.3 - Dettaglio del raffreddamento secondario. Loop 1 (sinistra), loop 2 (centro) e profilo termico (destra) / *Secondary colling details. Loop 1 (left), loop 2 (centre) and thermal profile (right).*

La figura 3 riporta il dettaglio del raffreddamento secondario e il profilo termico ottenuto dalla simulazione.

STIRRER ELETTROMAGNETICI

Il modello include i due stirrer elettromagnetici con cui è

attrezzata la linea di colata: M-EMS (mould electromagnetic stirrer) in zona lingottiera e F-EMS (final electromagnetic stirrer) a valle del secondario. Sia M-EMS sia F-EMS sono costituiti da 6 bobine e sfasatura trifase di 120°.

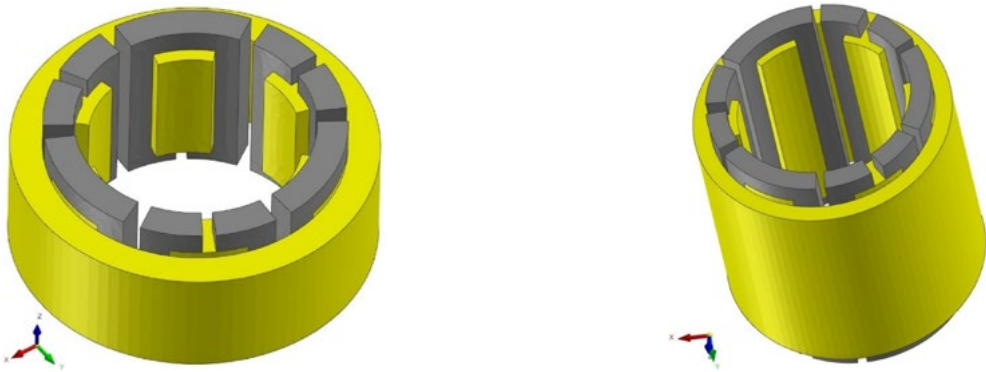


Fig.4 - Dettaglio del M-EMS (sinistra) e del F-EMS (destra) / *EMS details, M-EMS on the left and F-EMS on the right.*

La simulazione degli stirrer è stata realizzata mediante il modulo ProCAST EMX, utilizzato per descrivere l'effetto dello stirring elettromagnetico sul moto del metallo liqui-

do e sulla distribuzione degli elementi durante la solidificazione, utilizzando i parametri di processo riportati nella tabella.

Tab.3 - Parametri indicativi di funzionamento degli stirrer / *Indicative operating parameters of the stirrers.*

Stirrer	Posizione	Corrente [A]	Frequenza [Hz]
M-EMS	Lingottiera	100	2
F-EMS	Dopo secondario	250	15

CALIBRAZIONE TERMICA DEL MODELLO

La calibrazione termica rappresenta una fase chiave nello sviluppo del gemello digitale, poiché consente di verificare la corrispondenza tra il comportamento simulato e quello dell'impianto reale. Sulla base della termica vengono poi infatti modellati tutti gli altri aspetti (segregazione, porosità, etc.).

Nel caso in esame, il primo controllo ha riguardato il delta di temperatura del circuito primario: lo scostamento misurato è riportato nel paragrafo precedente. La calibrazione è stata anche poi verificata confrontando le temperature superficiali della billetta in diversi punti della linea. Per fare questo sono state eseguite varie rilevazioni con pirometro, tipicamente nelle zone più accessibili della macchina di colata continua dove la superficie del blumo risultasse ben

visibile, e tali misure sono state confrontate con quanto restituito dal modello. Inoltre, sono state confrontate anche le temperature delle superfici superiori delle carpenterie delle cappe intermedie e finali.

I risultati finali sono riportati in tabella 4. Nel complesso, la correlazione tra simulazione e misura risulta soddisfacente per l'utilizzo del modello a fini predittivi. Gli scostamenti osservati sono contenuti nelle zone ad alta temperatura, mentre diventano relativamente più rilevanti nelle zone finali a bassa temperatura (soprattutto sulla carpenteria superiore delle cappe finali), dove possono incidere maggiormente aspetti legati all'irraggiamento, alla convezione ambientale, alla precisione della misura pirometrica e alla modellazione più o meno fedele delle cappe isolanti.

Tab.4 - Confronto tra temperature reali misurate e simulate / *Measured and simulated billet surface temperature.*

Posizione	Scostamento %
Blumo – dopo raffreddamento secondario (loop 2)	0.9
Blumo – prima di F-EMS	1.0
Blumo – tra cappe intermedie e finali	2.0
Blumo – post cappe finali	0.8
Carpenteria superiore cappe intermedie	1.6
Carpenteria superiore cappe finali	-19.8

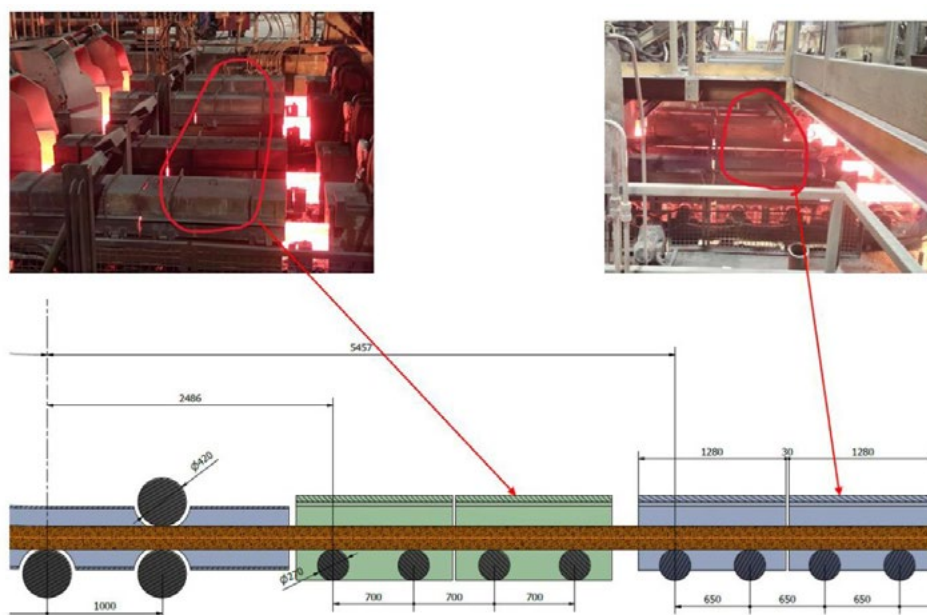


Fig.5 - Carpenteria superiore delle cappe intermedie e finali, zona di esecuzione delle misure di temperatura / *Sections where temperature measurements are taken for upper metalwork of the intermediate and terminal hoods.*

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – EVOLUZIONE TERMICA E FRAZIONE SOLIDA

Una volta calibrato, il modello è stato utilizzato per prima cosa per analizzare la distribuzione della temperatura superficiale (figura 6) e l'evoluzione della frazione solida lungo la billetta. Queste due simulazioni consentono di osservare l'avanzamento del fronte di solidificazione, l'e-

stensione della vena liquida e la condizione metallurgica in corrispondenza delle zone interessate dagli stirrer elettromagnetici, in particolare lo stirrer finale in quanto nella zona interessata dallo stirrer di lingottiera tutto il materiale è ancora in fase liquida (a eccezione del sottile strato di pelle in formazione).

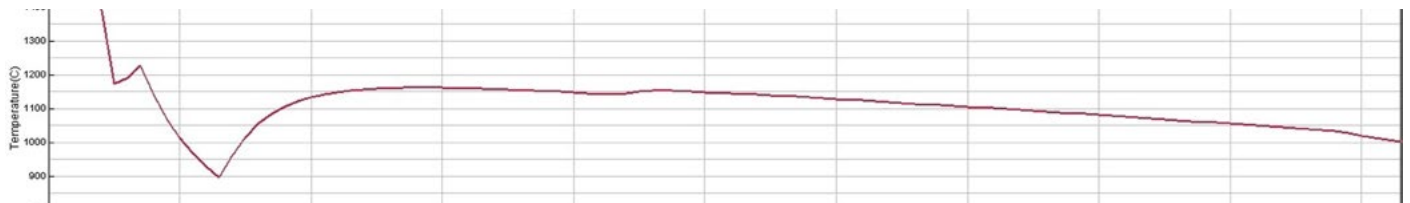


Fig.6 - Profilo di temperatura superficiale del blumo lato intradosso / *Intradox surface temperature profile of the bloom.*

In particolare, l'analisi della frazione solida in corrispondenza del F-EMS evidenzia la presenza di una vena fluida con frazione solida prossima al 70%, equivalente a una frazione liquida di poco superiore al 30%. Tale informa-

zione è rilevante perché permette di valutare l'efficacia dell'agitazione elettromagnetica in una zona in cui il materiale mantiene ancora una significativa componente liquida (figura 7).

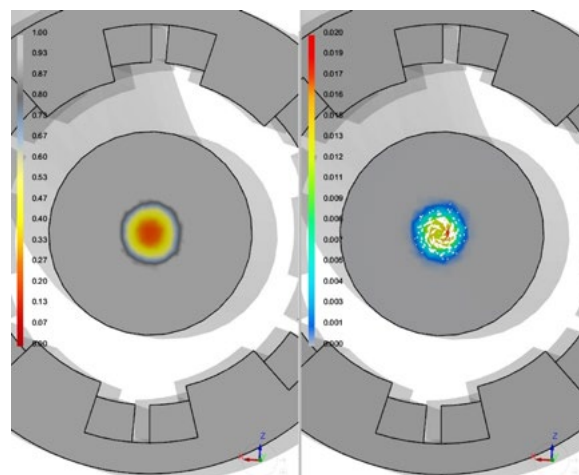


Fig.7 - Frazione solida all'interno del blumo in corrispondenza del F-EMS (sinistra) e velocità del campo di forza generato dallo stirrer finale nella stessa posizione (destra) / *Solid fraction within the bloom at the F-EMS (left) and speed of the force field generated by the final stirrer in the same position (right).*

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – POROSITÀ DA RITIRO

La simulazione ha evidenziato la presenza di porosità da ritiro localizzate lungo l'asse della billetta. Questa tipologia di difetto è coerente con la dinamica di solidificazione

dei prodotti di colata continua, nei quali l'ultima zona a solidificare tende a coincidere con l'area centrale, soggetta a deficit di alimentazione e a concentrazione delle discontinuità volumetriche.

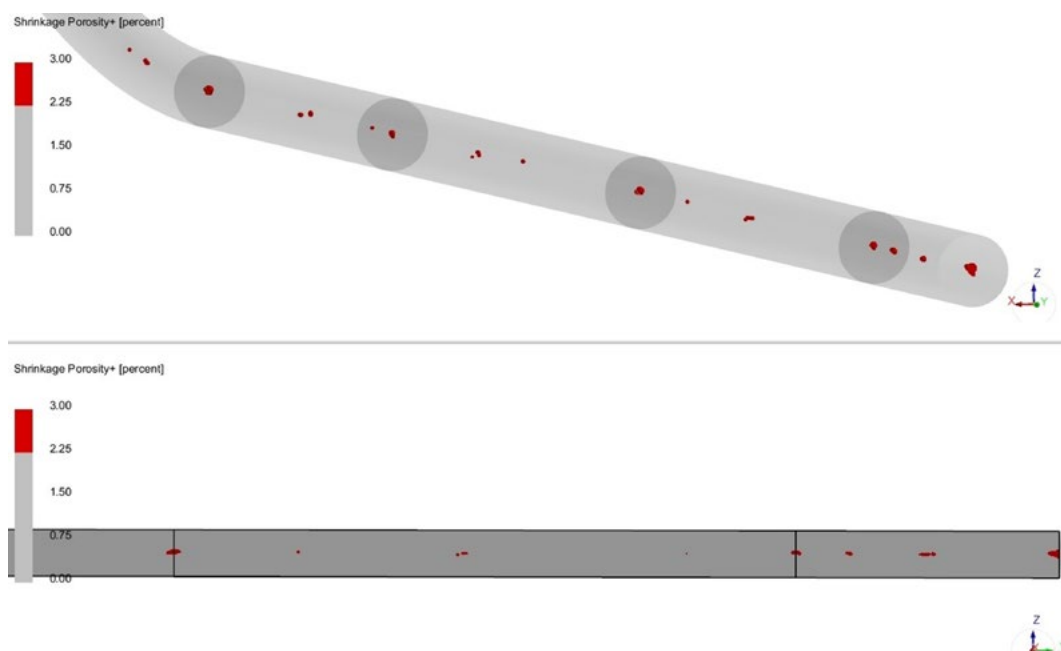


Fig.8 - Porosità da ritiro / *Shrinkage porosity*.

La possibilità di conoscere presenza e probabile entità delle porosità assiali consente di collegare il difetto alle condizioni locali di solidificazione e di valutare possibili interventi su raffreddamento secondario, velocità di colata o configurazione dello stirring. Il fatto che il model-

lo indichi che le porosità non siano continue (figura 8) è conforme alla reale struttura di solidificazione come osservata attraverso macrografie con persolfato d'ammonio (figura 9) ed è frutto dei fenomeni di solidificazione.

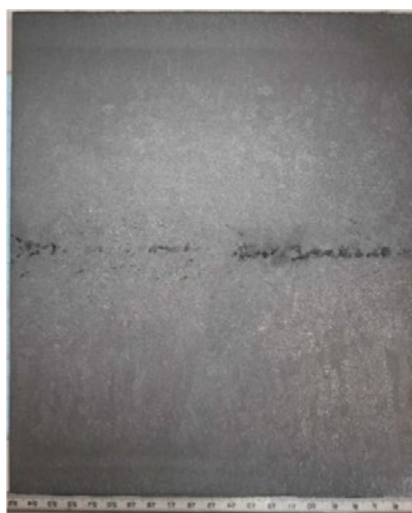


Fig.9 - Macrografia longitudinale di un acciaio 42CrMoS4 grezzo di colata prodotto dalla macchina di colata continua oggetto dello studio / *Longitudinal macroetching of an as-cast 42CrMoS4 bloom produced by the continuous casting machine under investigation.*

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – CONCENTRAZIONE DI IDROGENO

Il modello ha permesso di analizzare la distribuzione della concentrazione di idrogeno nel blumo, tale analisi è stata effettuata in una zona completamente solida (dopo i ruli

li di raddrizzatura). I risultati mostrano, come atteso, una concentrazione maggiore al centro del prodotto ma anche una presenza in superficie, attribuita al raffreddamento repentino della "pelle" che limita la diffusione dell'idrogeno. Tuttavia, il fatto che il blumo sia ancora caldo al

termine della colata continua promuove un certo grado di diffusione dalla superficie verso l'atmosfera esterna di quell'idrogeno intrappolato negli strati corticali, se presente. Mentre l'aspetto più deleterio per la formazione di cricche da idrogeno è il concentramento di idrogeno

al centro del blumo, non è però dimostrato quale possa essere la soglia di attenzione per l'innesco di tali cricche, considerando anche la presenza delle segregazioni e delle porosità da ritiro che possono fungere da ulteriori trappole per l'idrogeno che va accumulandosi al centro.

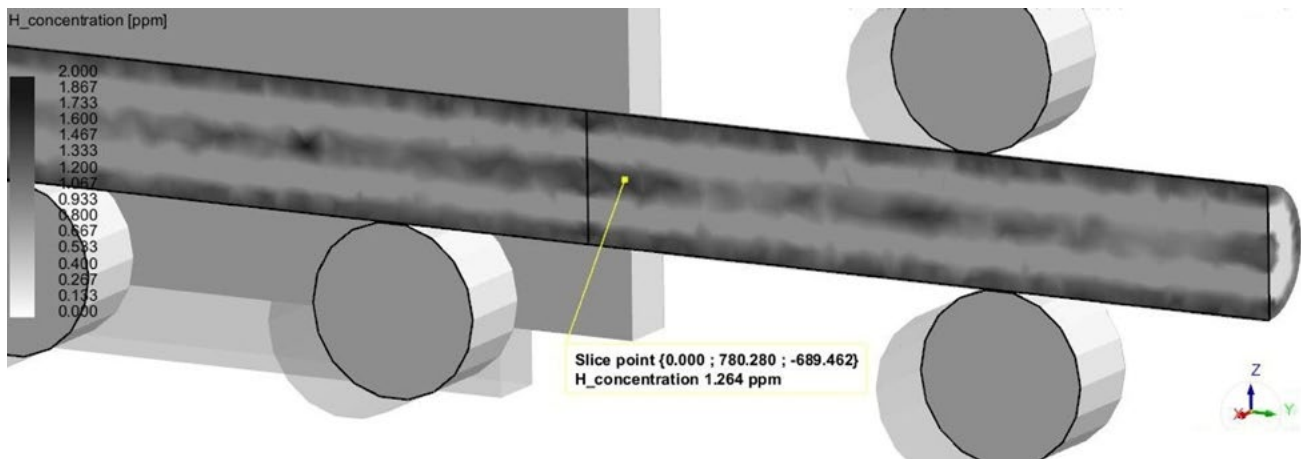


Fig.10 - Distribuzione dell'idrogeno nel blumo nel caso standard / *Hydrogen distribution in the bloom in standard condition.*

Nel modello sono state simulate due condizioni. Nella prima condizione è stato impostato un valore di idrogeno nel liquido di partenza (in paniera) tipico per gli acciai colati su questa macchina di colata, valore che non genera allarmi e che non fa scattare contromisure a valle della colata continua (figura 10). In tale situazione si raggiungono concentrazioni a cuore di circa 1.3 ppm.

Per la seconda condizione (figura 11) il valore di parten-

za in paniera è stato aumentato del 45% fino a un livello ritenuto non conforme e che, sulla base dei dati storici e sull'esperienza di Acciaierie Venete, richiede contromisure per il rischio cricche (tipicamente ricottura dei grezzi di colata per favorire la diffusione dell'idrogeno). In questo secondo contesto il valore raggiunto al centro del blumo si attesta intorno a 1.8 ppm.

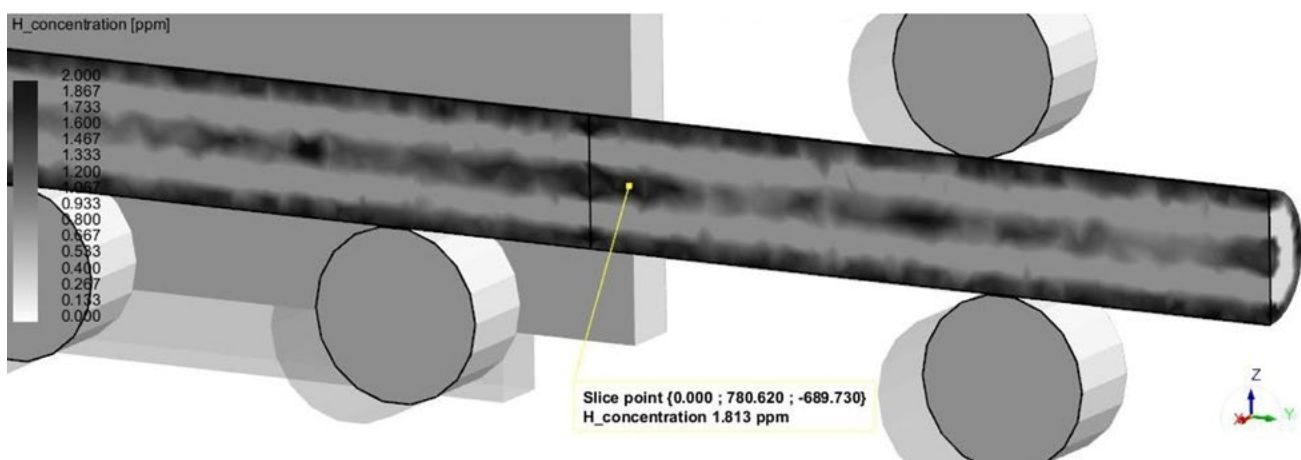


Fig.11 - Distribuzione dell'idrogeno nel blumo nel caso standard / *Hydrogen distribution in the bloom in standard condition.*

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – SEGREGAZIONE DEGLI ELEMENTI

La simulazione ha considerato la segregazione del carbo-

nio (figura 12) e di altri elementi chimici (Cr, Mn, Mo, Ni e Si).

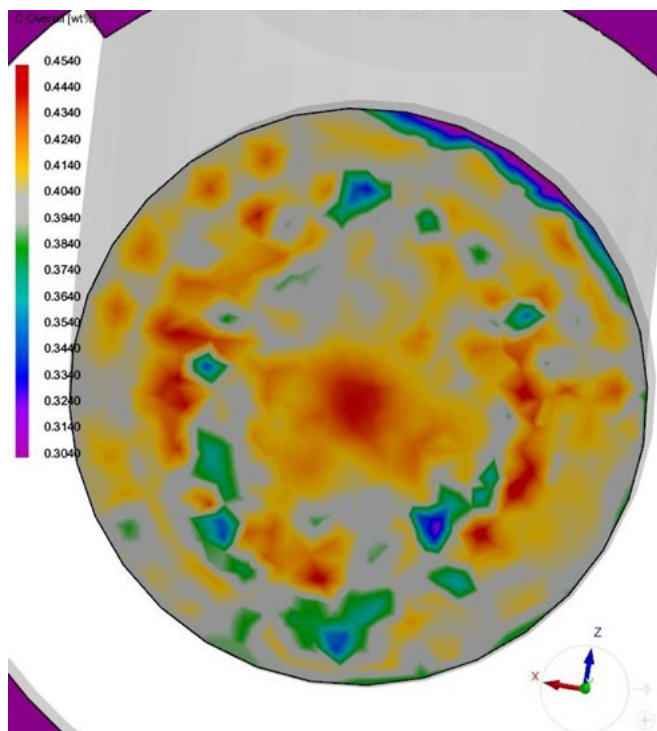


Fig.12 - Profilo di distribuzione del carbonio dopo il F-EMS / *Carbon profile after the F-EMS.*

Per il carbonio è stata ottenuta una forma del profilo qualitativamente simile a quella sperimentale (figura 13): un picco centrale di segregazione positiva, seguito da un calo e da un ulteriore picco positivo di minore entità in-

torno a metà raggio. L'analisi sul campione reale (figura 13, destra) è stata effettuata con metodo IR per combustione (analizzatore LECO CS744, ASTM E1019-18).

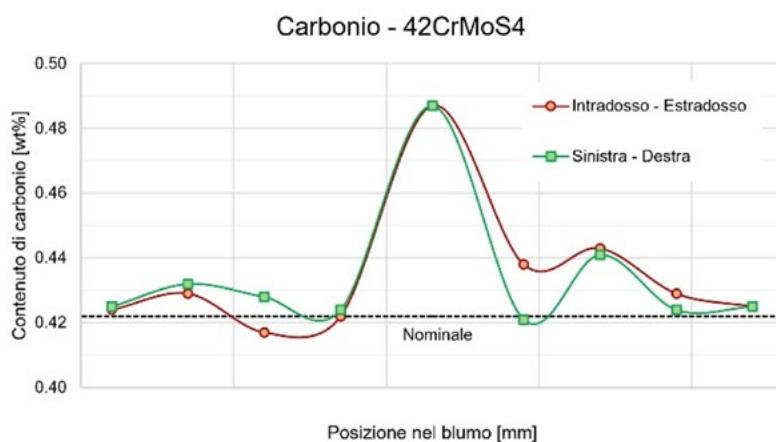


Fig.13 - Confronto tra profilo di carbonio calcolato con ProCAST (sinistra) e profilo misurato (destra) / *Comparison between the carbon profile calculated using ProCAST (left) and the measured one (right).*

Il confronto con i dati sperimentali deve essere interpretato in modo qualitativo data la differenza di contenuto nominale; tuttavia, il comportamento riscontrato è coerente (differenza percentuale tra nominale e massimo per calcolato $\approx 10\%$; per misurato $\approx 14\%$). La presenza del picco a metà raggio è dovuta all'azione degli stirrer elettromagnetici, un'azione troppo pronunciata può infatti dare luogo alla cosiddetta banda bianca, localizzata solitamente a metà raggio.

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE – EFFETTO DEGLI STIRRER SULLA SEGREGAZIONE

Una applicazione del gemello digitale, che ben dimostra

le potenzialità di ProCAST, riguarda la valutazione dell'effetto degli stirrer elettromagnetici. Il confronto tra configurazioni con entrambi gli stirrer spenti ed entrambi gli stirrer accesi (figura 14) mostra che, in assenza di stirring, la segregazione positiva al centro risulta grandemente accentuata, mentre l'utilizzo degli stirrer modifica il campo di moto del metallo liquido e conseguentemente la distribuzione del carbonio.

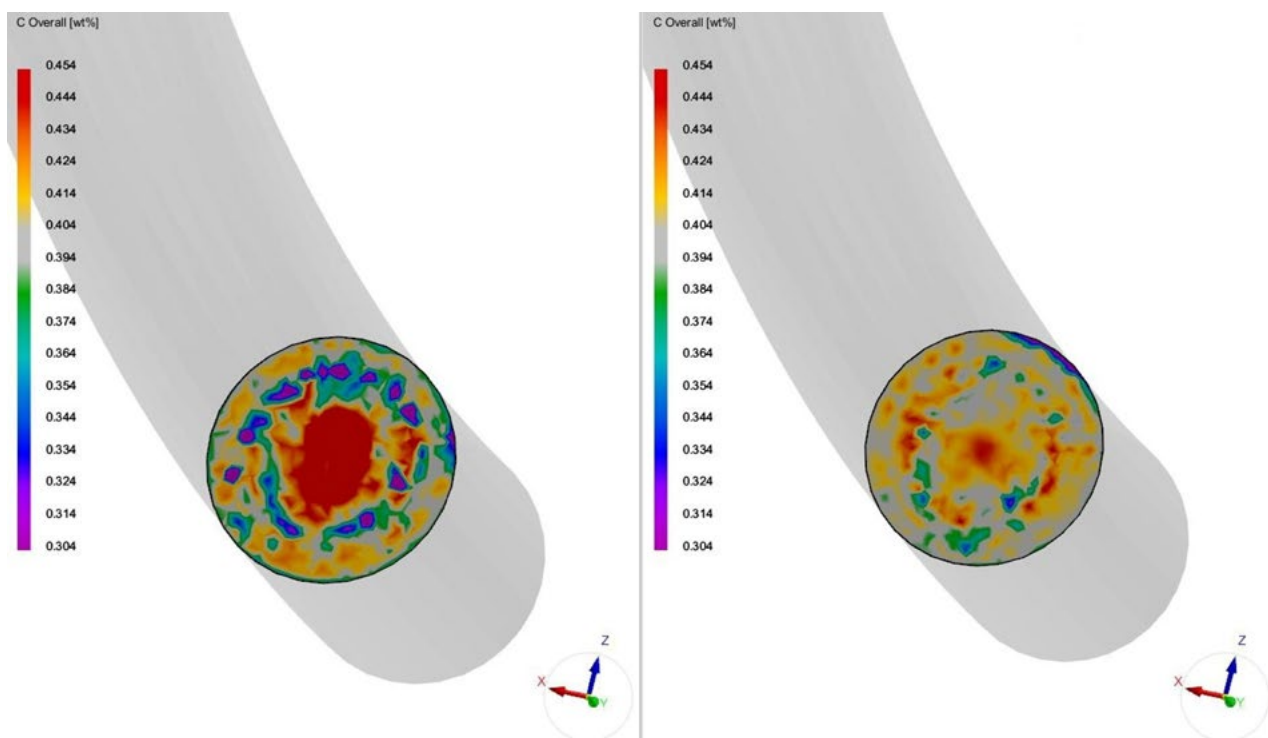


Fig.14 - Profilo di distribuzione del carbonio a stirrer spenti (sinistra) e accesi (destra) / *Carbon profile without EMS (left) and with EMS (right).*

Questa evidenza conferma il potenziale del modello come strumento di analisi causale: variando virtualmente il set-up di M-EMS e F-EMS è possibile studiare l'effetto dei parametri elettromagnetici sulla solidificazione e sulla qualità interna del prodotto, senza dover effettuare prove onerose direttamente sull'impianto industriale.

DISCUSSIONE, CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

I risultati ottenuti evidenziano come la costruzione di un gemello digitale calibrato possa rappresentare un ausilio determinante per la comprensione del processo di colata continua. La buona corrispondenza tra dati reali e simulati nella calibrazione termica costituisce il presupposto per utilizzare il modello non solo in modalità descrittiva,

ma anche in modalità predittiva. Dal punto di vista metallurgico, l'asse del blumo si conferma una zona critica per la formazione di porosità da ritiro, concentrazione di idrogeno e segregazione positiva del carbonio. La simulazione permette di visualizzare tali fenomeni in modo integrato, collegandoli all'evoluzione della frazione solida, al profilo termico e all'azione degli stirrer elettromagnetici. L'analisi della segregazione evidenzia inoltre il valore del modello come strumento di confronto tra condizioni operative alternative. Anche quando il confronto con i dati sperimentali è limitato a una valutazione qualitativa, come per la segregazione di carbonio (figura 13), la coerenza della forma del profilo consente di ottenere indicazioni utili sull'evoluzione del fenomeno.

Un ulteriore aspetto rilevante riguarda la possibilità di condurre analisi di sensitività, come mostrato per la concentrazione iniziale di idrogeno in paniera. Questo approccio permette di stimare in anticipo l'impatto di variazioni metallurgiche o operative, riducendo tempi, costi e rischi associati alla sperimentazione diretta in impianto.

Riassumendo, il lavoro ha permesso di sviluppare un gemello digitale della macchina di colata continua per sezioni piccole di Acciaierie Venete S.p.A. per il tondo 200 mm in acciaio 42CrMoS4, utilizzando ProCAST, la metodologia e le competenze di Ecotre Valente. Il modello include le principali sezioni dell'impianto, dalla lingottiera alla zona di taglio, e integra raffreddamento primario, raffreddamenti secondari, stirrer elettromagnetici, rulli e cappe isolanti. Le simulazioni hanno consentito di prevedere criticità metallurgiche quali porosità da ritiro assiale, concentrazione di idrogeno al centro, segregazione del carbonio e influenza degli stirrer sulla distribuzione degli elementi. Il gemello digitale si configura quindi come una piattaforma efficace per l'ottimizzazione di prodotto

e processo, utile per valutare scenari alternativi di raffreddamento, velocità di colata e set-up degli stirrer, con l'obiettivo di ridurre gli scarti, aumentare la resa e migliorare l'efficienza complessiva della macchina di colata continua.

Considerando i risultati ottenuti i prossimi sviluppi, parzialmente già in corso, riguarderanno:

- modifica di alcuni aspetti operativi, fra cui la posizione e i parametri di gestione dello stirrer finale;
- ottimizzazione dei parametri finalizzata all'ulteriore miglioramento della qualità interna del prodotto;
- verifica della possibilità di estensione della gamma dimensionale colabile dalla macchina di colata.

RINGRAZIAMENTI

Acciaierie Venete S.p.A. desidera ringraziare il personale di Ecotre Valente per la preziosa collaborazione e inoltre ringraziare Auril & Gond S.r.l. per l'assistenza nella modellazione degli stirrer elettromagnetici.

BIBLIOGRAFIA

- [1] © Keysight Technologies, ProCAST 2026.0 User's Guide, Revision A, November 2025.
- [2] O. Ludwig, M. Aloe, P. Thevoz, State of the art in modelling continuous casting, Lausanne, 2009.
- [3] O. Koeser, M. Aloe, L. Valente, «Simulazione di Colata Continua», Pressocolate & Tecniche Fusorie, pp. 64-66, Dicembre 2006.
- [4] G. Couturier, J.-L. Desbiolles, M. Rappaz, «Effect of volatile elements on porosity formation in solidifying alloys», Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, vol. 14, n. 2, pp. 253-271, 2006.

Digital twin of continuous casting: ProCAST model development and calibration for defect prediction and process optimization

Continuous casting is a key process in steel production, as it directly affects product quality. This paper describes the development of a digital twin of a continuous casting machine at Acciaierie Venete's Padua plant. The model was created using ProCAST software and the Ecotre Valente methodology. Actual industrial process parameters were collected and integrated into the model. A complete 3D model of the plant was constructed, from the mold to the cutting section. The system includes several sections: cooling systems, electromagnetic stirrers, and rollers. The model was calibrated by comparing simulated data with actual measurements and the calibration showed good agreement between the model and reality. Critical issues such as porosity, segregation, and hydrogen distribution were analyzed in this work. The digital twin will therefore enable the optimization of the process and quality, reducing scrap and costs.

KEYWORDS: CONTINUOUS CASTING; DIGITAL TWIN; PROCAST; SOLIDIFICATION; SEGREGATION; POROSITY; HYDROGEN; ELECTROMAGNETIC STIRRERS.

[TORNA ALL'INDICE >](#)