

# Modellizzazione termofluidodinamica numerica dei processi di fusione al SAF di rocce basaltiche e dolomitiche a supporto di design industriale e scalabilità

A. Dell'Uomo, M. De Santis, D. Ressegotti, T. Tripolini

Il ricorso alla fluidodinamica computazionale (Computational Fluid Dynamics) per l'approccio a problematiche industriali si basa su tecniche di modellizzazione e di simulazioni validate, sia per investigare processi complessi all'interno di unità operative, sia per definire layout più efficaci ed efficienti. Un esempio è la necessità di descrivere in maniera integrata fenomeni di trasporto (massa, calore), poiché la complessità dei fenomeni influenza significativamente i parametri di processo influenzando variabili quali qualità e resa. I risultati dello studio qui descritto sono tratti da simulazioni dei fenomeni di fusione in forni ad arco sommerso (SAF). Lo scenario applicativo è la linea di forni sviluppati a cura di Gamma Meccanica (GM), che opera in tutto il mondo in quest'ambito tecnologico per la produzione di lana di vetro. Lo studio ha portato a delineare una configurazione base, svolgere un'analisi esaustiva dei fenomeni coinvolti, valutare l'effetto di variazioni delle condizioni operative sui parametri di processo, e definire linee guida per il design e lo scaling-up di forni, con lo sviluppo di un 'catalogo' per le installazioni di SAF, in base alle necessità e agli obiettivi dei clienti.

**PAROLE CHIAVE:** FUSIONE, FORNO SAF, SCALE-UP, PRODUTTIVITÀ, BASALTO, ROCCE DOLOMITICHE, CFD;

## INTRODUZIONE

La modellistica termofluidodinamica rappresenta uno degli approcci più utilizzati per indagare in dettaglio i processi industriali, in cui i fenomeni di trasporto (massa, calore, specie) giocano un ruolo rilevante nel raggiungimento degli obiettivi di qualità e produttività desiderati. Può consentire una comprensione approfondita dell'evoluzione dei processi, oppure ottimizzare le caratteristiche del layout. Ciò è di estrema importanza quando i fenomeni di trasporto alla base del processo coinvolto sono accompagnati da un cambiamento di stato, perché entrano in gioco ulteriori aspetti come la qualità e la resa e, d'altra parte, la descrizione della modellazione deve essere particolarmente accurata e, per tutti i motivi sopra menzionati, richiede ancora lunghi tempi di calcolo anche con gli strumenti più recenti e potenti.

Un esempio rilevante in questo campo è la modellizzazione dei fenomeni di fusione in forni ad arco. Questo lavoro mostra l'applicazione di questa strategia di modellazione per 'problem solving' ad un nuovo forno fusorio elettrico, sviluppato da Gamma Meccanica (GM).

Lo sviluppo sostenibile è oggi la sfida più urgente a cui

**A. Dell'Uomo, M. De Santis, D. Ressegotti**  
Rina Consulting – Centro Sviluppo Materiali

**T. Tripolini**  
Gamma Meccanica

le imprese sono chiamate a rispondere. In quest'ottica, Gamma Meccanica (GM) affianca i propri clienti nello sviluppo di una sostenibilità non solo ambientale ma anche economica, in grado di aprire le porte a investimenti redditizi, e quindi sostenibili, in un mercato in continua evoluzione. Nel caso specifico, elettrificare l'impianto significa abbandonare l'uso del fusore a coke, una fonte di energia vietata in un numero sempre maggiore di paesi per motivi ambientali. La tecnologia qui considerata (forno ad arco sommerso, SAF) consente inoltre l'utilizzo di una miscela più flessibile di materie prime, permette un migliore controllo della temperatura e della viscosità del fuso, garantisce la stabilità del flusso (non richiede aria comburente) e permette anche l'immediato riutilizzo degli scarti nel ciclo produttivo.

Il forte interesse di GM nello sviluppo di tale tecnologia, attraverso l'attività del suo settore di R&S, e nella fornitura di un catalogo di fornì per il cliente, su misura per il proprio obiettivo di produttività, ha portato a primi approcci modellistici riferiti alla descrizione del processo, anche se con alcune approssimazioni [1]. Il passo successivo è consistito nell'approfondimento dei fenomeni che si verificano nel processo SAF con un'adeguata descrizione dettagliata del processo, mettendo a punto una tecnica di simulazione affidabile e, grazie alla definizione di criteri di scala, nell'identificazione di linee guida per una definizione affidabile di un layout compatibile con la produttività richiesta.

Nel paragrafo che segue si forniscono dettagli sull'approccio di modellizzazione e sulle tecniche utilizzate.

## APPROCCIO MODELLISTICO

La natura multifase dei complessi fenomeni termofluidodinamici che si verificano in un forno ad arco sommerso (SAF), utilizzato per la fusione di lana di basalto/roccia, richiede una solida conoscenza del processo, aspetto alla base di una progettazione del layout d'impianto in funzione della produttività desiderata. Gli approcci basati sulla

modellizzazione rappresenta la soluzione più affidabile per supportare efficacemente lo sviluppo tecnologico. In letteratura si hanno diversi esempi di tali approcci su misura per SAF relativi a problemi di flusso di fluidi e trasferimento di calore [2, 3].

Per approfondire il modello base di GM, RINA-CSM ha sviluppato un modello multifase i cui principali aspetti chimico-fisici del processo, considerati come input o riferimento in termini di equazioni costitutive (ad es., proprietà del materiale, parametri/valori di grandezze attese misurati in zone ben definite), sono stati definiti di concerto con GM.

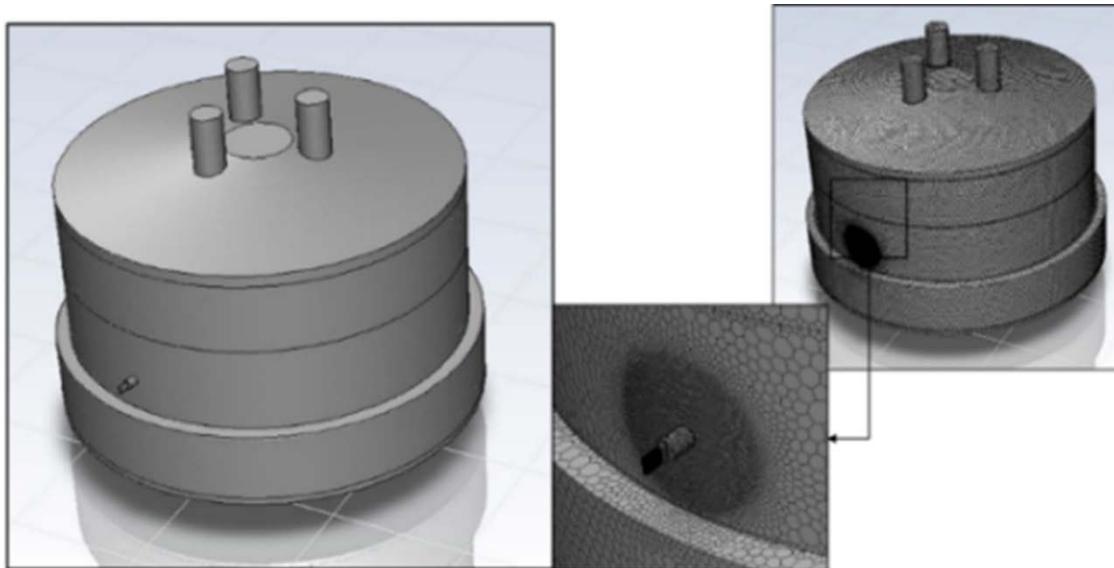
Il sistema è composto da tre elementi. Il primo è il forno, dove il solido colato (basalto) subisce una fusione con entalpia correlata alla sua composizione<sup>1</sup>. Il secondo elemento è il gruppo elettrodi, che forniscono l'energia termica necessaria alla fusione in funzione delle correnti fornite. Infine, il terzo elemento è la zona al di sopra del solido fuso, dove l'aria penetra attraverso i fori di alimentazione e le specie gassose sono aspirate. Le condizioni operative sono state definite da Gamma Meccanica sulla base dell'esperienza di gestione del processo.

Il modello sviluppato da RINA – CSM si basa su un codice termofluidodinamico implementato in Ansys-Fluent, operativo su un server di calcolo per un totale di 36 processori, con due CPU Xeon Gold 6154 3.0GHz da 18 processori ciascuna, RAM 192 GB. Nel modello sono implementati: le Equazioni di Navier-Stokes<sup>2</sup>, modello di turbolenza  $\kappa-\epsilon$  (per le simulazioni in fase gassosa) e modello di flusso laminare (per la fase liquida)<sup>3</sup>, modello per lo scambio di calore per irraggiamento con il Metodo Monte-Carlo, modello per il trasporto delle specie, per l'effetto Joule, e la legge di Darcy per il cambiamento di fase. Uno schema del dominio rappresentato è mostrato nella Fig. 1, con immagine della suddivisione in celle (mesh).

<sup>1</sup> A causa delle reazioni chimiche endotermiche che si verificano durante la fusione.

<sup>2</sup> Nella forma RANS = Reynolds-Averaged Navier-Stokes, cioè, mediato nel dominio computazionale. Le grandezze non sono considerate istantanee, ma mediate nel tempo, sufficientemente piccole rispetto ai fenomeni da seguire, sufficientemente grandi rispetto alla scala temporale della turbolenza.

<sup>3</sup> Giustificato dai bassissimi valori di velocità del flusso in gioco, dell'ordine di pochi cm/s.



**Fig.1** - Schema del dominio del forno di riferimento (a sinistra) e primo piano della zona di spillatura con dettagli della mesh. / Diagram of the domain of the reference furnace (left) and close-up of the tapping zone with mesh details.

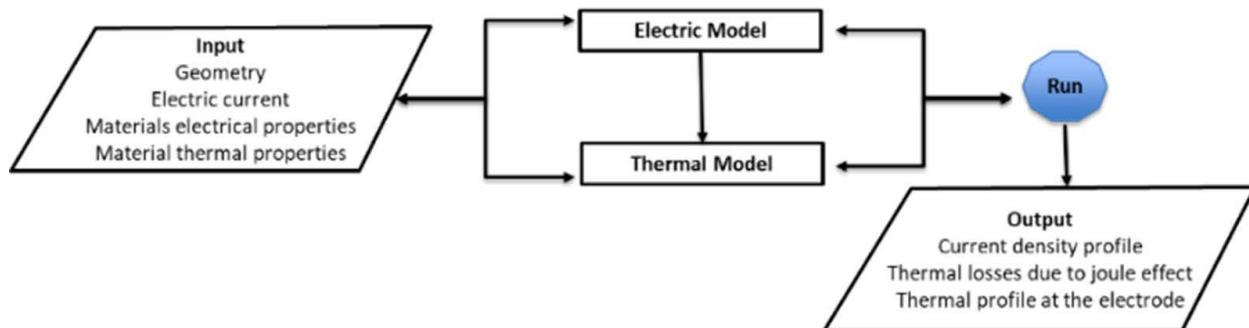
Ulteriori aspetti del modello sono mostrati in Fig. 2. La descrizione include il trasferimento di calore attraverso pareti refrattarie raffreddate ad acqua. Inoltre, sono considerate sia le fasi condensate (bagno liquido e solidi aggiunti) che la fase gassosa (freeboard). Questa è determinata dai gas prodotti dall'evaporazione dell'acqua (umidità del materiale), da quelli prodotti dalla volatilizzazione dei carbonati e delle specie carboniose nei materiali in carica, oltre che dall'aria che può entrare nel forno. A tal fine, sono stati usati dati sulla composizione dei materiali e ipotesi sulla trasformazione dei componenti in specie gassose.

Durante la simulazione del forno intero, la fluidodinamica della fase gassosa viene 'congelata' e viene simulato un gas fermo (approccio pseudo-solido), mentre la fase liquida è simulata in movimento. La fluidodinamica in fase gassosa viene ripristinata durante le simulazioni in sola fase gassosa (approccio disaccoppiato). Per valutare la portata d'aria in ingresso al forno si considera una potenza di aspirazione dei fumi che tende a mantenere una pressione costante nel crogiolo (al di sotto della pressione atmosferica).

Quanto alla chimica del sistema, le cinematiche di reazione tra specie gassose non sono incluse nel modello, così come le reazioni tra gas e specie condensate (come le reazioni tra  $H_2O$  e C solido). Il modello può calcolare la

produzione potenziale di prodotti della combustione dalle reazioni dovute all'aria tra  $CO$  e  $O_2$  e tra  $H_2$  e  $O_2$ . Infine, l'arco alternato è rappresentato come un arco continuo di potenza equivalente.

La principale innovazione nel modello RINA-CSM rispetto al precedente modello di Gamma Meccanica è il disaccoppiamento tra freeboard e bagno fuso del forno. Le condizioni termofluidodinamiche sul pelo libero del bagno fuso vengono prese come input nel freeboard. In questo modo sono stati superati alcuni problemi di calcolo legati all'implementazione basata su codice di un sistema multifase. Inoltre, questo ha permesso di simulare il forno intero in regime stazionario, ma di analizzare il freeboard in regime transitorio.



**Fig.2** - Schema dell'approccio modellistico / Outline of the modelling approach.

#### ATTIVITA' SVOLTA: CASO DI RIFERIMENTO

In un primo momento è stato sviluppato il 'nuovo caso di riferimento', in una versione migliorata rispetto al caso semplificato GM. Questo è stato fatto mettendo a punto moduli di simulazioni di fenomeni specifici (ad es. irraggiamento) e le condizioni al contorno, in maniera più affidabile.

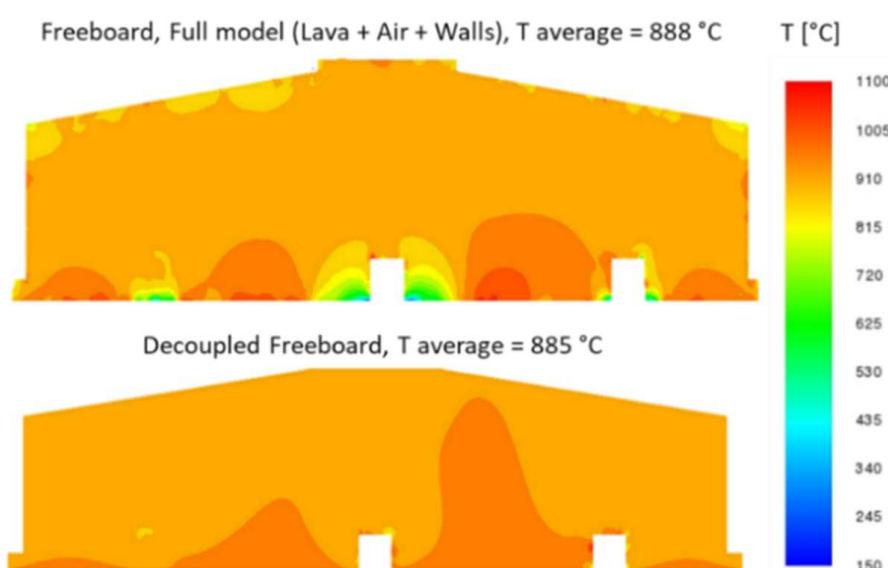
Il modello di riferimento di Gamma Meccanica [1] comprende le pareti refrattarie, gli elettrodi, aria Freeboard/Top (aria al di sopra del basalto fuso), tiene conto delle perdite al fuoco (conversione del basalto in  $\text{CO}_2$  come conseguenza della calcinazione della dolomite, fino al 46% in peso), del bagno liquido di basalto fuso, umidità nel basalto fino al 10%, e ferro liquido accumulato sul fondo, nonché una densità di corrente di riferimento agli elettrodi, tipicamente dell'ordine di grandezza di  $10^4 \text{ A/m}^2$  [4].

L'aspetto rilevante nell'approccio RINA-CSM, come

detto, è il disaccoppiamento tra superficie del bagno e 'freeboard'. Nello schema GM il modello simula l'ambiente libero del forno (sopra il bagno) come 'pseudo-solido', semplificazione che ha permesso di ridurre notevolmente i tempi di calcolo. Nell'approccio CSM, il sistema è invece disaccoppiato: la superficie bagno/freeboard rappresenta un output per il bagno di basalto, e input per la parte sovrastante.

Imponendo tipiche condizioni di processo, con questo schema si sono ottenuti risultati generalmente affidabili, e simulazioni più stabili dal punto di vista numerico. Tra l'altro, questo approccio ha permesso di rimuovere l'ipotesi di aria ferma nell'ambiente sovrastante il bagno liquido.

Un esempio di risultati per il confronto (campo termico in  $^\circ\text{C}$ , in un piano passante per il diametro del forno) è mostrato nella Fig.3:



**Fig.3** - Confronto tra la mappa termica (temperatura in  $^\circ\text{C}$ ) nella sezione centrale del bordo libero con il modello completo (in alto, risultato tratto dal modello GM) e il RINA-CSM disaccoppiato (in basso) / Comparison between heat map (temperature in  $^\circ\text{C}$ ) in central section of freeboard with complete model (top, result taken from GM model) and decoupled RINA-CSM (bottom)

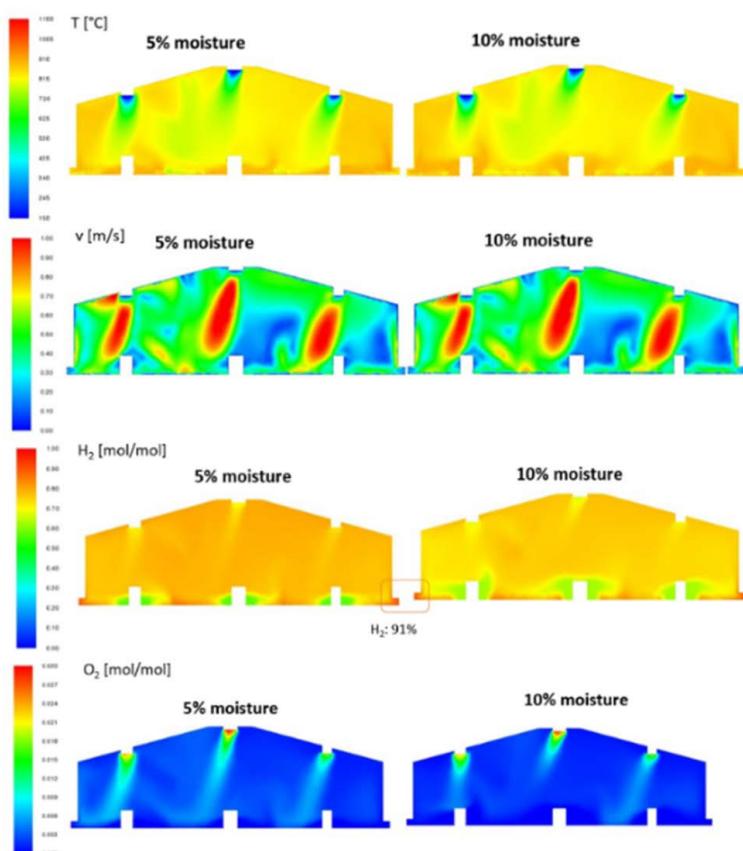
In questa fase, oltre all'obiettivo di definire lo schema di simulazione di base nel modello integrato, sono stati effettuati anche test di sensitività su alcune grandezze, secondo le indicazioni GM e l'esperienza relativa a tale tecnologia.

Ad esempio, il basalto fornito contiene un certo grado di umidità e, a causa della presenza di ferro metallico (Fe), produce idrogeno ( $H_2$ ) sequestrando un atomo di ossigeno dall'acqua per formare ossido di ferro (FeO). La formazione di idrogeno può portare ad accumuli e quindi alla formazione di miscele potenzialmente esplosive. Pertanto, alcune simulazioni riguardanti la fluidodinamica del freeboard sono state dedicate ai possibili effetti dell'accumulo di  $H_2$ , o ingressi di aria o perdite.

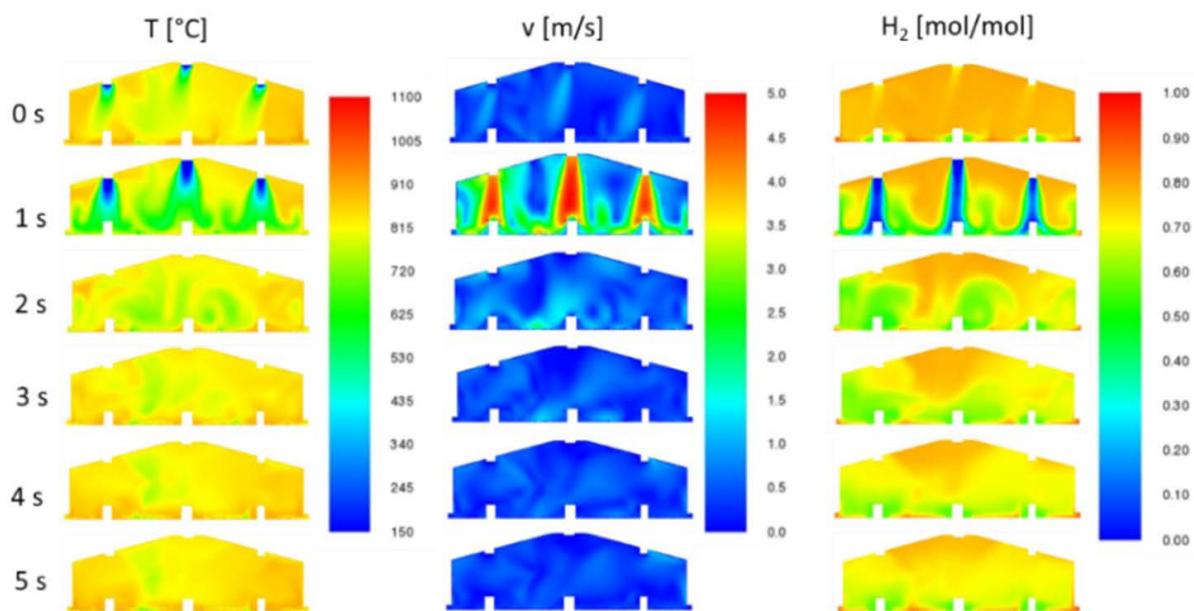
Un esempio è mostrato in fig. 4. Sono state simulate condizioni estreme per l'ingresso dell'aria nel forno: ingressi di alimentazione completamente aperti (ingresso di pressione) e perdita d'aria (ingresso di una portata d'aria

ipotizzata). Sono stati ipotizzati diversi gradi di umidità del basalto e quindi sono state rilasciate diverse quantità di idrogeno. La simulazione fluidodinamica del bordo libero disaccoppiato (per diversi gradi di umidità del basalto, e quindi diverse quantità di idrogeno rilasciato) ha portato alla scoperta di una zona di accumulo di idrogeno, ai lati del forno.

È stato anche riscontrato che il contenuto di umidità non modifica i moti convettivi, e quindi la zona di accumulo non è influenzata. La quantità di ossigeno residuo è tuttavia molto bassa ed è improbabile che si verifichi una combustione dannosa. È stata inoltre effettuata una simulazione in stato transitorio, per valutare lo scenario in cui si verifichi un ingresso d'aria temporaneo, dovuto all'apertura dei fori di alimentazione, ma di portata significativa. In questo caso l'ossigeno presente nel forno viene aspirato dal sistema di aspirazione in pochi secondi e quindi non si creano accumuli pericolosi (si veda Fig. 4).



**Fig.4** - Simulazione di base con freeboard disaccoppiato e diversi valori di umidità. Temperatura e velocità, frazione di  $H_2$  e  $O_2$  nella sezione trasversale del freeboard. / Simulation with decoupled freeboard and several humidity values. Temperature and velocity,  $H_2$  and  $O_2$  mole fraction in central section of freeboard.



**Fig.5** -Simulazione transitoria con freeboard disaccoppiato dopo improvvista presenza d'aria dovuta all'apertura dei fori di alimentazione (scenario peggiore) / Transient simulation with decoupled freeboard after sudden air aspiration due to feeding holes opening (worst case scenario).

Tutte queste modifiche, alla luce dei risultati attendibili ottenuti, hanno permesso di impostare il caso di 'riferimento'.

'accettabile' se il caso 'converge' (si ottiene una soluzione numerica) e la temperatura e le grandezze elettriche rientrano negli intervalli di processo contemplati nello schema GM.

#### SCALING-UP

Ottenuta la rappresentazione più affidabile dei fenomeni al SAF per una produttività di riferimento, il modello di base è stato successivamente adattato per l'attività di scale-up sia di lay-out che di produttività.

Il dimensionamento ha riguardato generalmente la combinazione della produttività richiesta con le caratteristiche geometriche del forno (dimensione del forno, diametro degli elettrodi e distanza tra di essi), al fine di poter gestire le condizioni operative che portano alle prestazioni richieste, in termini di grado di omogeneità del bagno liquido, condizioni di fusione, temperature locali ed efficienza energetica. Il risultato di una simulazione è definito

In collaborazione con Gamma Meccanica, la strategia si è focalizzata sulle 'classi dimensionali' per le quali valutare la produttività 'ammissibile'. Questo approccio è in linea con le esigenze industriali/commerciali che sorgono a causa di una richiesta da parte di un cliente che desidera installare un forno di questo tipo.

Le 'classi dimensionali' dei vari forni sono state concordate insieme a Gamma Meccanica e hanno portato alla Tab. 1 relativa alla combinazione di diametro del tino, diametro degli elettrodi, distanza tra gli elettrodi e produttività.

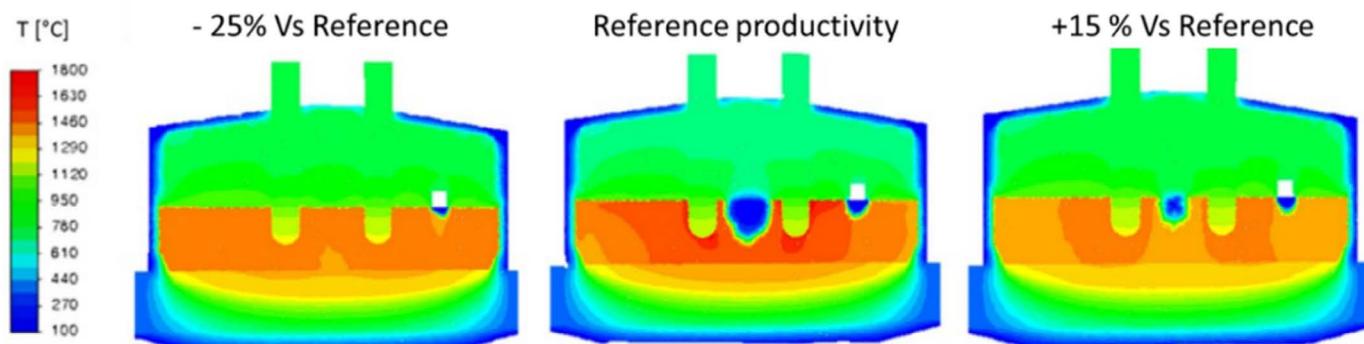
**Tab.1** -Parametri di processo e layout per scaling-up in funzione della produttività / Process and layout parameters for scaling up in function of the productivity range.

DIAMETRO DEL FORNO	DIAMETRO ELETTRODI	INTERASSE FRA ELETTRODI	PRODUTTIVITÀ
-25% vs riferimento	- 25% vs riferimento	-30% vs riferimento	- 50% vs riferimento
riferimento	riferimento	riferimento	riferimento
+ 15% vs riferimento	+ 30% vs riferimento	+25% vs riferimento	+50% vs riferimento

**Esempio di risultati.**

La Fig.6 mostra i campi termici in una sezione centrale longitudinale del forno, per le tre classi di produttività di riferimento. I risultati ottenuti mostrano generalmente una distribuzione termica considerata accettabile, per cui

alla fine un indice di valutazione essenziale nella valutazione del processo è stato il suo rendimento per quella configurazione (resa energetica, energia utile per la fusione e riscaldamento/energia fornita).



**Fig.6** -Confronto dei campi termici in un piano passante per il diametro del forno al variare della produttività nel layout di riferimento / Comparison of thermal fields in a plane passing through the furnace diameter when varying productivity in the reference layout.

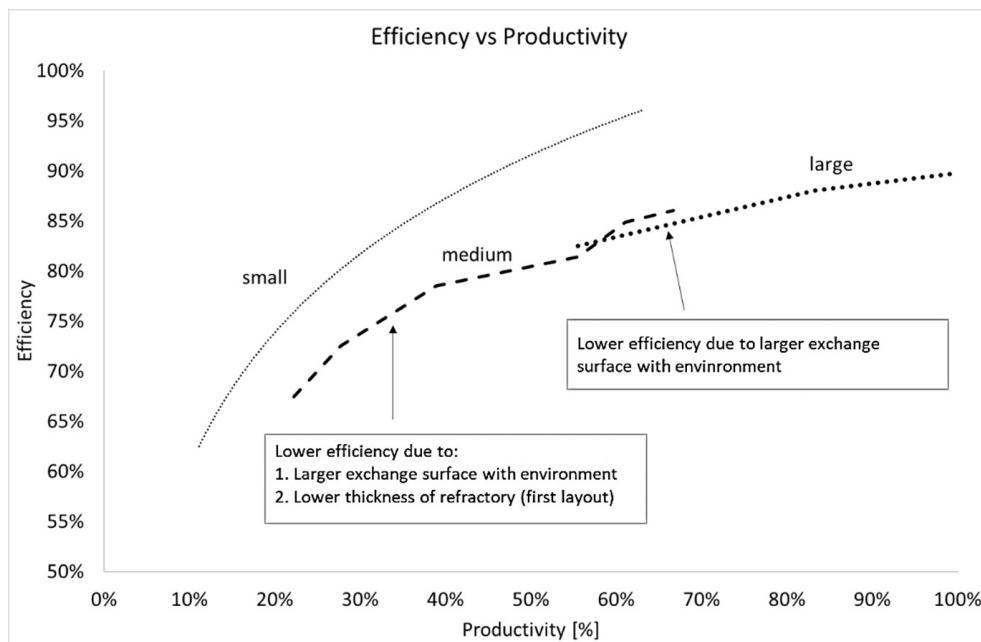
Queste simulazioni sono state utili per avere una visione delle condizioni di processo attese e della loro fattibilità su scala industriale o meno. Ad esempio, sulla base dei risultati, è stato riscontrato che all'aumento della produttività può corrispondere un aumento della tensione a valori non compatibili per le condizioni industriali, rappresentando questo un vincolo per la produttività.

Il lavoro di modellizzazione relativo a ciascuna classe di produttività ha permesso di supportare la valutazione delle configurazioni simulate, sulla base dei criteri di 'performance' ed 'efficienza'. Per 'performance' si intende l'efficacia nel soddisfare i requisiti dei parametri operativi (ad esempio, temperatura, tensione); per 'efficienza' l'energia disponibile per il bagno liquido/energia fornita al reattore.

I risultati complessivi sono mostrati in forma normalizzata nella Fig. 7. Con un forno di diametro 'piccolo', si ottengono generalmente efficienze più elevate rispetto agli

altri casi. Questo perché la superficie disponibile per la perdita di calore è minore, mentre la temperatura di fusione del basalto è sempre di circa 1500 °C, quindi le perdite diminuiscono (valore assoluto). Ciò si osserva anche estrapolando l'efficienza del diametro dell'unità SAF fino a quello 'maggiore'. Peraltro, le configurazioni di 'piccolo diametro' hanno altri vincoli, ad esempio il diametro massimo degli elettrodi installabili, e quindi la massima densità di corrente e la massima potenza elettrica possibile.

In generale, un layout SAF 'piccolo' è più efficiente, con minori perdite in termini di potenza assoluta a causa della minore superficie di scambio, e maggiore produttività rispetto al volume del forno, ma è anche limitato dalla potenza elettrica coinvolta.



**Fig.1** -- Riepilogo dell'efficienza rispetto alla produttività per diversi diametri del forno / Summary of Efficiency vs. Productivity for Different Furnace Diameters.

## CONCLUSIONI

È stato sviluppato un modello dei processi di fusione di basalto in un forno ad arco sommerso (SAF). RINA-CSM, partendo da un modello di base semplificato di Gamma Meccanica, lo ha approfondito sia per quanto riguarda la descrizione chimico-fisica che per le tecniche di simulazione, più snelle in termini di tempi di calcolo richiesti. L'attività è stata svolta in continuo contatto con GM per verifiche e discussioni sugli aspetti di processo e layout a supporto del lavoro, condividendo strategie di impostazione e dati tecnici (configurazioni, dimensioni, condizioni al contorno) verso soluzioni tecnologiche fattibili e

affidabili.

Lo studio ha portato alla definizione della configurazione di riferimento con un nuovo approccio di descrizione della zona sovrastante la superficie del bagno, e alla definizione del 'modello flessibile', (set completo di condizioni al contorno/set di parametri da utilizzare per simulare casi diversi), con alcune applicazioni di scale-up. Ciò ha permesso l'identificazione di classi di produttività associate a classi dimensionali di layout del forno per la necessaria flessibilità in base alle esigenze dei clienti.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Tripolini T.; <https://www.enginsoft.com/expertise/a-cfd-simulation-of-melting-furnace-for-the-production-of-stone-wool.html>, CFD simulation of melting furnace for the production of stone wool, Newsletter EnginSoft, 2019, Yr 16 n°4.
- [2] Kremnev V, Basok B, Davydenko B, Timoshenko A. Flow and Heat Transfer of Basalt Melt in the Feeder of the Smelter Furnace, Journ. of Appl. Math. and Phys., 2019, 7, 2555-2563, <https://www.scirp.org/journal/jamp>
- [3] Esfahani B R, Hirata S B, Berti S, Calzavarini E. Basalt melting driven by turbulent thermal convection, 2018, Phys. Rev. Fl., [https://www.researchgate.net/publication/322418923\\_Basal\\_melting\\_driven\\_by\\_turbulent\\_thermal\\_convection](https://www.researchgate.net/publication/322418923_Basal_melting_driven_by_turbulent_thermal_convection)
- [4] Proc. Of the ICCS 2018 – Int. Conf. on Comput. Sci., Wuxi, China | 11-13 june, 2018, <https://www.iccs-meeting.org/archive/iccs2018/>

# Modelling of basalt and dolomite rocks SAF melting units to support industrial design and scale-up

Computational Fluid Dynamics (CFD) is used as a consolidated approach through suitable validated modeling simulations, allowing to investigate processes occurring in industrial vessels, find ways to layout improvement and define how to manage the industrial production. In this work, the activity performed with such an approach is described involving a Submerged Arc Furnace (SAF) used for basalt/stone wool melting. The modelling activity allowed to define a basic configuration, a deeper analysis of the phenomena involved while acting on the process and layout parameters, and finally to allow guidelines for furnace scale-up depending on the targeted productivity. The work was performed involving the Gamma Meccanica scenario and has brought about the definition of a 'catalogue' for SAF customer-tailored installation.

**KEYWORDS:** MELTING, SAF, SCALE-UP, PRODUCTIVITY, BASALT, DOLOMITE ROCKS, CFD;

[TORNA ALL'INDICE >](#)