

# Il forno elettrico quale unità produttiva chiave per la produzione di acciaio "*carbon neutral*": aspetti fondamentali, modellizzazione dei fenomeni e strategie di implementazione di digital twin

D. Ressegotti, M. De Santis, A. Dell'Uomo, A. Di Schino

Il raggiungimento dell'obiettivo europeo per il 2050 di una produzione industriale "*carbon neutral*" richiede uno sforzo particolare da parte dei settori più "emissivi" (*hard-to-abate*), fra cui quello siderurgico, responsabile di circa il 20-25% del totale delle emissioni. Ciò richiede impegno sia a livello tecnologico, per raggiungere livelli di maturità industriali, sia economici, per gli alti costi associati e per cui è richiesto un supporto significativo da parte delle istituzioni in termini di programmi di finanziamento. Delle due modalità produttive (da ciclo integrale e da forno elettrico), la seconda presenta le migliori potenzialità di abbattimento di emissioni di CO<sub>2</sub>, e i cicli innovativi più vantaggiosi per il futuro comprendono la riduzione diretta e la produzione al forno elettrico. Questo lavoro vuole fornire elementi utili allo sviluppo e consolidamento tecnologico di processi di produzione di acciaio *carbon neutral* sostenibile, focalizzandosi sulle operazioni fondamentali e complesse al forno fusorio quale via alle operazioni successive verso il prodotto finito.

**PAROLE CHIAVE:** ACCIAIERIA, FORNO ELETTRICO AD ARCO, EAF, INIEZIONE, METALLURGIA, DIGITAL TWIN;

## INTRODUZIONE

Il Green Deal presentato dalla Commissione europea nel dicembre 2019 [1] riafferma anche la visione dell'UE di uno sforzo globale contro il cambiamento climatico. Fra le industrie responsabili di livelli di emissione più elevate quella dell'acciaio è responsabile di circa il 20-25% totale industriale, e quindi i produttori di acciaio sono fortemente spinti e impegnati a ridurre le loro emissioni e ad adeguare le tecnologie di produzione al nuovo paradigma. A livello europeo, per altro, questo aspetto ha dei connotati importanti a livello economico in quanto i produttori di acciaio partecipano a catene di valore più ampie che includono settori cruciali per la competitività dell'UE, come la costruzione, l'automobile, l'ingegneria meccanica, la generazione di energia e le reti, la mobilità e la difesa. L'Italia è il secondo produttore europeo di acciaio e le emissioni dirette e indirette della siderurgia italiana pesano oggi per circa il 4,5% delle emissioni totali italiane [2]. Da qui la necessità di azioni anche a livello nazionale. Il processo di produzione dell'acciaio può essere ampiamente distinto da due percorsi principali: ciclo integrato (via altoforno-forno a ossigeno basico, o BF-OF); e ciclo elettrico (via forno elettrico ad arco, EAF).

**Davide Ressegotti, Michele De Santis,  
Alessandro Dell'Uomo**

Rina Consulting, Centro Sviluppo Materiali S.p.A.,  
Castel Romano, Roma, Italia

**Andrea Di Schino**

Dip. Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italia

In questo contesto la condizione di settore *hard-to-abate*, a cui appartiene il settore siderurgico, impone l'applicazione delle tecnologie più innovative che possono fornire nuove visioni e strategie per l'ottimizzazione termodinamica dei processi siderurgico metallurgici di produzione di ferro e acciaio. In questo contesto, la produzione via forno fusorio, presenta le migliori condizioni in termini di abbattimento potenziale di emissioni di CO<sub>2</sub> [3] e i cicli innovativi più vantaggiosi per il futuro comprendono la riduzione diretta e produzione al forno elettrico.

L'utilizzo dei modelli è estremamente importante, dato che i metodi continui di misura diretta di diverse grandezze non sono disponibili per molti forni [4, 5] e determinate informazioni non possono essere misurate ma solo calcolate. In tempi recenti sono state effettuate lavori di review di modelli di processo (Hay et al. [6]), che sono veloci e affidabili, ma che non possono raccogliere la quantità di informazione invece forniscono i modelli fluidodinamici, raccolti da Odenthal et al. [7].

Il lavoro qui proposto s'inserisce quindi in questo scenario: fornire elementi utili allo sviluppo e consolidamento tecnologico di processi di produzione di acciaio *carbon neutral* sostenibile, focalizzandosi sulle operazioni fondamentali e complesse al forno fusorio. Si propone quindi una breve trattazione, non esaustiva, dei modelli principali per la descrizione dettagliata del forno elettrico, al fine di utilizzarli quali strumenti per ottimizzare il forno stesso a livello di gestione e progettazione.

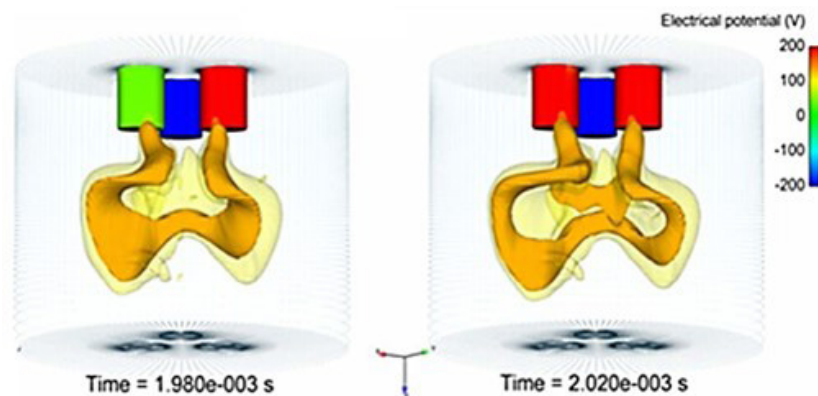
## ARCO ELETTRICO

L'arco elettrico al plasma è la sorgente principale di energia per la fusione del rottame nel forno elettrico, e fornisce circa il 50% di energia al forno [6]. La differenza di potenziale tra gli elettrodi e rottame eccita gli elettroni, che ionizzano l'atmosfera generando un arco al plasma ad

alta temperatura. Il calore viene trasmesso sia per convezione sia per irraggiamento. L'arco può comunque essere controllato agendo su diversi fattori, quali distanza rotame-elettrodo (lunghezza dell'arco), voltaggio e intensità di corrente. Lo studio modellistico in letteratura si è concentrato su due approcci: modello magneto-idrodinamico (MHD model) e Channel Arc Model (CAM).

Il modello MHD, studiato più comunemente negli scenari che coinvolgono un arco a corrente continua (DC), risolve le equazioni del flusso e le equazioni di Maxwell per ogni cella del dominio di calcolo. Questo permette di simulare con buona precisione lo *stirring* indotto dal campo elettromagnetico, che nello scenario DC è molto importante. Al contrario, nello scenario AC lo *stirring* indotto è solo superficiale e limitato alla zona tra gli elettrodi [8]. In generale, lo *stirring* è più intenso con archi più corti e correnti più elevate [9]. Per lo scenario DC, sono stati fatti molti studi su forni a dimensioni di laboratorio (Hsu et al. [10, 11]); alcuni autori hanno sviluppato modelli tridimensionali dell'arco libero (McKelliget et al. [12], Freton et al. [13] e Lago et al. [14, 15]), e altri autori hanno aggiunto la turbolenza alle simulazioni, rendendo possibile la simulazione di archi DC in forni di taglia industriale (Alexis et al. [16], Wang et al. [17], and Wang et al. [18]).

Nel caso di arco a corrente alternata (AC), l'applicazione del modello MHD è stata più tardiva e limitata. Alcuni autori hanno inizialmente simulato un arco monofase a corrente alternata, dimostrando la possibilità di simulare un arco AC anche con il modello MHD, come per l'arco DC (Larsen et al. [19], Bakken et al. [20], e Saevardsdottir et al. [21]). Daszkiewicz et al. [22] and Tarczynski et al. [23] hanno simulato entrambi un arco AC tridimensionale con due elettrodi. Rehmet et al. [24, 25, 26, 27] hanno condotto ulteriori simulazioni con un arco trifase (figura 1) e validato i risultati sperimentalmente.



**Fig.1** -Simulazione CFD di arco trifase a corrente alternata / *CFD modeling of the 3-phase AC arc behavior* [24].

L'altro modello comunemente utilizzato per simulare l'arco elettrico è il Channel Arc Model, CAM. Il modello CAM considera l'arco come una zona cilindrica, di caratteristiche costanti nel tempo e nello spazio (es:  $T=\text{const}$ ,  $D=\text{const}$  e  $L=\text{const}$ ), può derivare le variabili di stato dell'arco AC tramite bilancio energetico stazionario da un arco DC. Questo modello è stato usato da diversi autori, come Saevarsdottir et al. [21] e Sanchez et al. [28], per analizzare i meccanismi di dissipazione del calore. Tuttavia, la frazione di calore dissipato per irraggiamento è calcolata pari al 24%, inferiore a valori riportati in letteratura ([29, 30, 31]). Fathi et al. [32] hanno usato i risultati di simulazioni basate sul modello MHD per ottenere dei valori di temperatura media e pressione media da usare con il modello CAM, ottenendo però dei valori fisicamente poco plausibili, se considerati singolarmente ( $T=16,136$  K e  $P=1200$  kPa).

Anche se il modello CAM se è un modello semplificato, e

non è strettamente CFD, è comunque un modello molto diffuso che offre un buon compromesso tra accuratezza fisica e costo computazionale [8], se non è di interesse lo studio di dettaglio dell'arco. Questi possono essere ottenuti solo con adeguati sotto modelli, al prezzo di un costo computazionale più elevato.

## FUSIONE E PRERISCALDO DEL ROTTAME

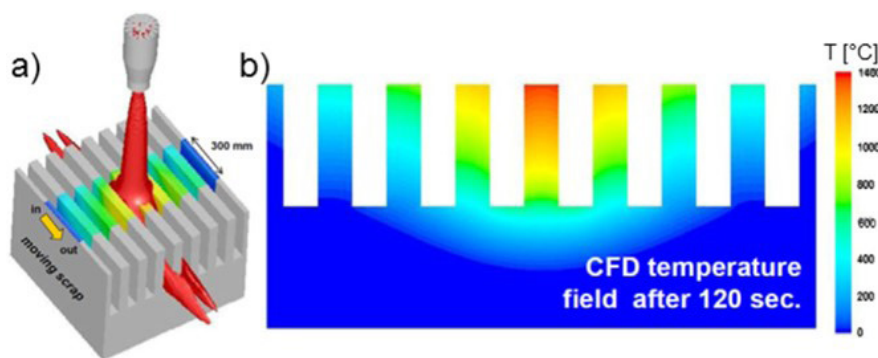
Compito primario del forno ad arco elettrico è la fusione del rottame. Tale processo coinvolge una grande quantità di fenomeni, tra cui scambio di calore (diretto, se ottenuto tramite sorgenti di calore come l'arco elettrico o bruciatori, e indiretto [33], quando il rottame caldo e/o fuso riscalda il rottame freddo adiacente), reazioni chimiche (principalmente ossidazione del carbonio [34]), resistenza elettrica e collasso del rottame semifuso. Inoltre, il rottame può avere una grande variabilità di caratteristiche, anche per rottami dello stesso tipo (tabella 1).

**Tab.1** - Superfici specifiche per tipi di rottame / *Specific surface of individual types of scrap* [8].

| Rottami                  | Densità di mucchio [ $\text{t m}^{-3}$ ] | Superficie specifica [ $\text{m}^2 \text{t}^{-1}$ ] | Superficie specifica [ $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ] |
|--------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Demolizione pesante      | 1-1.2                                    | 10-30                                               | 10-36                                               |
| Cesoiato                 | 0.7-1                                    | 20-80                                               | 14-80                                               |
| Lamierino                | 0.6-0.8                                  | 100-200                                             | 60-160                                              |
| Limatura acciaio e ghisa | 0.7-1.2                                  | 200-400                                             | 140-480                                             |
| Ferro                    | 3-4                                      | 6-8                                                 | 18-32                                               |

Prima della fusione del rottame avviene il preriscaldamento, che è stato studiato a livello modellistico-fluidodinamico rappresentando il rottame come un mezzo poroso. La porosità può essere inserita come parametro numerico, come fatto da Mandal [35], oppure può essere rappresentata

usando un dominio fornito di scanalature, la cui distanza tra loro rappresenta la porosità (Giavani et al. [36]), e permette di osservare anche la penetrazione della fiamma dei bruciatori (figura 2).



**Fig.2** - a) Bruciatore da 600 kW su letto mobile di rottami sminuzzati, b) Risultati delle simulazioni CFD / 600 kW burner on a moving bed of shredded scrap, b) Result of CFD simulation [36].

Per rappresentare la fusione, un approccio molto comune è quello proposto da Voller et al. [37, 38], ovvero il metodo *volume-averaged enthalpy-porosity*. La presenza della fase liquida, della fase solida e della *mushy zone* è verificata osservando la frazione di liquido nella cella di calcolo (0 per il solido, 1 per il liquido, *mushy zone* per i valori compresi da 0 e 1). Questo metodo è usato estensivamente nello studio di molti campi, come saldatura [39, 40], fusione di paraffina [41, 42], fusione alluminio [43] e fusione scoria da forno elettrico [44, 45]. È importante sottolineare, però, che il metodo *volume-averaged enthalpy-porosity* non caratterizza direttamente la porosità del rottame e il flusso di liquido attraverso il cumulo di rottami porosi non può essere simulato. In pratica, il processo di fusione indiretta può essere calcolato tramite CFD, purché si ignori il movimento del rottame. La fusione diretta invece è un processo molto più complesso ed è stato simulato solo per il riscaldamento del rottame [46]. Arco elettrico e movimento del rottame possono essere coinvolti solo con approcci empirici [47].

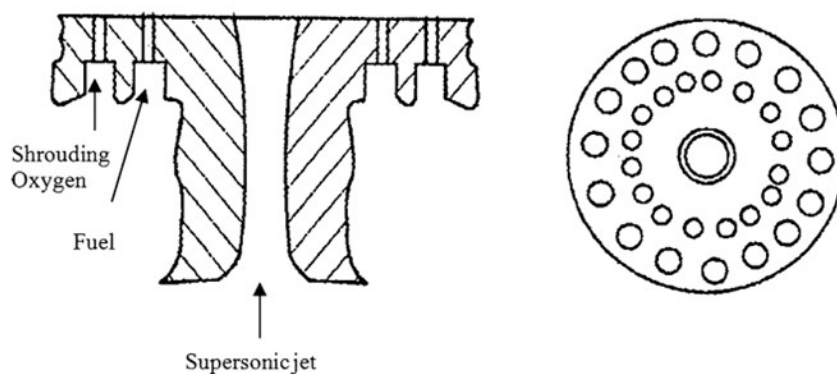
Si aggiungono brevi considerazioni sulla modellazione della fusione di acciaio preridotto, o DRI (*Direct Reduced Iron*). Il DRI è di interesse, dato il suo basso contenuto di eteroatomi, per aumentare la qualità dell'acciaio. Inoltre, se venisse prodotto da processi di riduzione diretta a basse emissioni di CO<sub>2</sub> (per esempio, usando idrogeno "green" come riducente) abbasserebbe notevolmente le emissioni per la produzione di acciaio secondo la via DRP + EAF. La velocità di fusione dei pellets di DRI di fatto controlla il tempo totale di fusione ed è di interesse effettuare test, anche computazionali. Da questo punto di vista, molti autori hanno studiato il comportamento a fusione del DRI [48, 49, 50, 51, 52]. Gonzales et al. [52] ha simulato i pellet di DRI come particelle lagrangiane; Ramirez-Arga-

ez et al. [53] hanno investigato un modello bifasico (acciaio fuso e scoria), mentre Martinez et al. [49] si sono concentrati sull'effetto del DRI e non solo, sulle cinetiche di fusione, utilizzando un modello monodimensionale alle differenze finite.

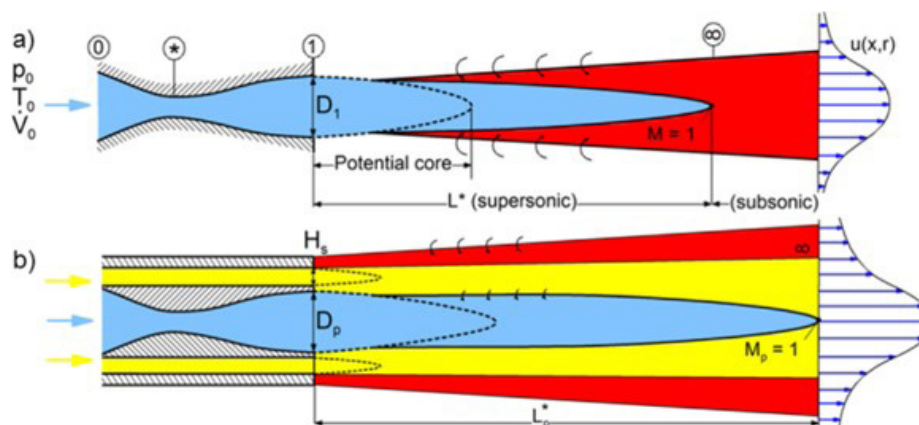
## BRUCIATORI/INIETTORI

Bruciatori a gas, iniettori di ossigeno e iniettori di carbone promuovono e aiutano il preriscaldamento del rottame, la fusione e infine il surriscaldamento del bagno liquido. L'obiettivo è velocizzare i tempi di fusione, fornendo energia aggiuntiva a quella dell'arco elettrico, e raggiungendo i punti freddi del forno. I bruciatori più moderni sono quelli a getto coerente. Sono progettati come bruciatori a getto supersonico, in grado anche di iniettare ossigeno nel bagno, favorendo il rimescolamento del bagno, e riducendo la quantità di carbonio e altre impurità. Per questi bruciatori si parla quindi di modalità "bruciatore" e modalità "lancia" o "iniettore", a seconda del regime di funzionamento.

A differenza dei bruciatori tradizionali, un bruciatore a getto coerente è composto da un ingresso per l'ossigeno primario, un ingresso per il combustibile (tipicamente gas naturale) e un ingresso per l'ossigeno secondario (*shrouding oxygen*) [54, 55]. Gli ingressi possono essere dei condotti anulari, così come degli anelli di condotti circolari (figura 3). Il combustibile e l'ossigeno secondario formano una fiamma in movimento che rallenta la perdita di quantità di moto del getto di ossigeno, che avviene a causa dello stress tangenziale tra il getto, che è in movimento, e l'atmosfera circostante, che normalmente è quasi ferma. Questo permette di allungare il getto coerente (*potential core*) di ossigeno primario, rispetto a un iniettore tradizionale.



**Fig.3** - Sezione centrale e vista frontale di una lancia a getto supersonico coerente / *Cross-sectional and front view of a supersonic coherent jet nozzle* [54, 55].

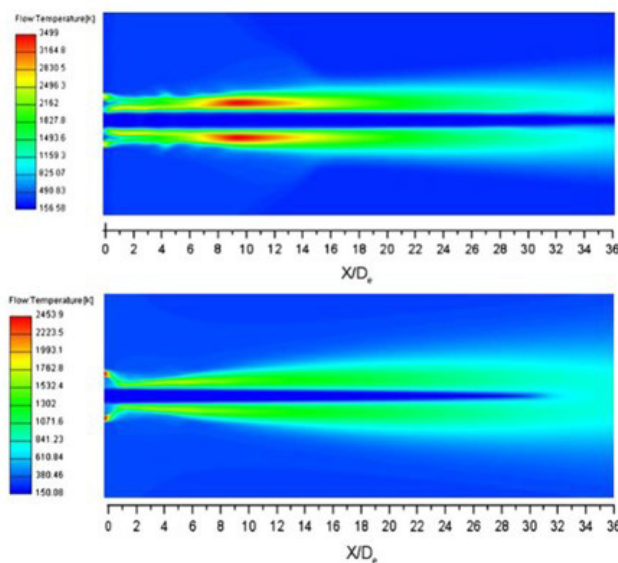


**Fig.4** - a) Iniettore convenzionale. b) Iniettore coassiale con ossigeno primario supersonico e gas secondario subsonico / a) Conventional nozzle. b) Coaxial nozzle with primary supersonic nozzle and secondary subsonic nozzle [8].

Sono stati inoltre sviluppati iniettori senza fiamma, che fanno uso di gas coassiale (aria o altro), per generare una zona in movimento adiacente al getto di ossigeno supersonico e allungare la zona coerente dell'ossigeno, senza l'utilizzo della combustione (figura 4 [8]).

La modalità bruciatore viene utilizzata, come anticipato, per il preriscaldamento e la fusione del rottame, mentre la modalità iniettore si utilizza più spesso in fase di affinazione. È importante che in questa fase il getto di ossigeno che impatta sul bagno metallico sia coerente, di modo che possa penetrare lo strato di scoria (se presente) e la superficie del bagno, fornendo ossigeno al bagno stesso. Gran parte della ricerca si concentra sulla simulazione della modalità lancia. A ciò può essere aggiunta la simula-

zione della fiamma anulare, rendendo di fatto possibile la simulazione della sola modalità bruciatore (più semplice). Le simulazioni sono principalmente condotte usando il metodo RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) e URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes), usando modelli standard di turbolenza [56, 57, 58]. Alam et al. hanno modificato il calcolo della viscosità turbolenta [54, 59], Liu et al. [60, 61] hanno valutato la lunghezza del getto coerente a diverse temperature ambiente e diverse temperature di preriscaldamento di ossigeno. Tang et al. [62, 63, 64] hanno modificato un modello dell'irraggiamento, il Weighted-Sum of Gray Gases Model (WSGGM), e analizzato la possibilità di rimpiazzare il metano con gas da altoforno (Blast Furnace Gas).



**Fig.5** - Modellizzazione CFD del getto coerente supersonico in aria / CFD modeling of the supersonic coherent jet in air [69].

I modelli sviluppati usando il modello RANS e URANS sono quindi ben studiati e facilmente integrabili ad altri sottomodelli (per esempio, riguardanti la fusione del rottame).

Tuttavia, non è l'unico metodo esplorato. La simulazione diretta (DNS, Direct Numerical Simulation) permette di simulare in modo diretto i vortici, e quindi il miscelamento dovuto alla turbolenza. Non è più necessario selezionare un modello di turbolenza, ma il costo computazionale è ancora molto alto. Alcuni autori hanno comunque usato tale metodo per simulare getti coassiali supersonici (Kliotuchinov et al. [65]).

A metà strada tra DNS e RANS si trova il metodo LES (Large Eddy Simulation), in cui i vortici turbolenti sono simulati direttamente ma quelli di taglia più piccola sono invece descritti da un modello (es: Smagorinsky-Lilly). Odenthal et al. hanno condotto simulazioni usando il metodo LES [7, 66], concludendo che la lunghezza del getto supersonico (la zona dove la velocità è supersonica, figura 4) può essere determinata correttamente solo utilizzando metodi LES o DNS.

## CONCLUSIONI

È stata presentata una breve trattazione dei modelli utilizzabili per la simulazione fluidodinamica dei fenomeni fisici facenti parte del processo del forno elettrico. Questo

processo è stato scelto in ottica di studio di sistemi per ridurre l'inquinamento, dato che la produzione di acciaio da ciclo elettrico produce meno emissioni rispetto al ciclo integrato. Sono stati esposti i modelli dell'arco elettrico, della fusione del rottame e del sistema di bruciatori e iniezione.

Per l'arco elettrico il modello semplice come il CAM è una buona scelta per simulare l'effetto dell'arco nel forno elettrico, se la simulazione di dettaglio della forma dell'arco non è di interesse.

La fusione del rottame può essere simulata tramite approcci consolidati (*volume-averaged enthalpy-porosity*), e i modelli sono utili a descrivere il meccanismo di riscaldamento indiretto, ma non sono affidabili per simulare il riscaldamento diretto (per esempio, dovuto alla fiamma dei bruciatori) o se si vuole simulare il collasso del rottame fuso. È di grande importanza anche la simulazione del DRI.

I bruciatori e gli iniettori supersonici di ossigeno sono stati estensivamente simulati nel corso degli anni, principalmente con metodi URANS, che si sono dimostrati veloci, affidabili e in grado di essere integrati con altri modelli "parziali". Se però è di interesse la precisa valutazione della lunghezza del getto supersonico, è necessario utilizzare metodi più precisi ma più pesanti dal punto di vista computazionale, come LES e DNS.

## RIFERIMENTI

- [1] D. 52018DC0773, «Un pianeta pulito per tutti: Visione strategica europea a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra», 2018. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX%3A52018DC0773>.
- [2] Federacciai, «Emissioni di CO<sub>2</sub> e prevenzione dei cambiamenti climatici», [Online]. Available: <https://federacciai.it/emissioni-di-co2-e-prevenzione-dei-cambiamenti-climatici/>.
- [3] Estep, «Green steel for Europe», [Online]. Available: <http://https://www.estep.eu/green-steel-for-europe/>.
- [4] A. Viotto, G. Thomassen, B. Kleimt, S. Barella, S. Mapelli, G. Weides, T. Kordel, R. Pierre, L. Bianco, Determining process conditions for online monitoring of temperature and carbon content in the electric arc furnace to optimize end point control (MELTCON), Bruxelles: European Commission, 2017.
- [5] T. Willms, T. Echterhof, H. Pfeifer, M. Aula, T. Fabritius, N. Andersson, A. Tillander, P. Jönsson, M. Jokinen, E. Puukko, S. Prashko, J.S. Klung, On-line Slag Composition Analysis for Electric Arc Furnaces – State of the Art, Bruxelles: European Commission, 2016.
- [6] T. Hay, V.V. Visuri, M. Aula, T. Echterhof, «A Review of Mathematical Process Models for the Electric Arc Furnace Process», Steel Research International, vol. 92, n. 3, p. 2000395, 2021.
- [7] H. J. Odenthal, J. Bader, R. Nörthemann, M. Reifferscheid, I. Kliotuchnikov, H. Olivier, «The optimized SIS injector for EAF applications», AISTech - Iron and Steel Technology Conference Proceedings, 2014.
- [8] H. J. Odenthal, A. Kemminger, F. Krause, L. Sankowski, N. Uebber, N. Vogl, «Review on Modeling and Simulation of the Electric Arc Furnace (EAF)», Steel Res. Int, vol. 89, n. 1, pp. 17-98, 2018.
- [9] O.J.P. Gonzáles, M.A. Ramírez-Argáez, A.N. Conejo, «Effect of Arc Length on Fluid Flow and Mixing Phenomena in AC Electric Arc Furnaces», ISIJ International, vol. 50, n. 1, pp. 1-8, 2010.
- [10] K.C. Hsu, K. Etemadi, E. Pfender, «Study of the free-burning high-intensity argon», Journal of applied physics, vol. 54, n. 8, pp. 1293-1301, 1983.

- [11] K.C. Hsu, E. Pfender, «Two- temperature modeling of the free- burning, high- intensity arc», Journal of applied physics, vol. 54, n. 8, pp. 4359-4366, 1983.
- [12] J. McKelliget, J. Szekely, «Heat transfer and fluid flow in the welding arc», Metallurgical Transactions A 17, n. 7, pp. 1139-1148, 1986.
- [13] P. Freton, J.J. Gonzalez, A. Gleizes, «Comparison between a two- and a three-dimensional arc plasma configuration», Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 33, n. 19, p. 2442, 2000.
- [14] P. Freton, J.J. Gonzalez, A. Gleizes, «A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model», Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 37, n. 6, p. 883, 2004.
- [15] J. J. Gonzalez, F. Lago, P. Freton, M. Masquere, X. Franceries, «Numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: part II. The three-dimensional model - Influence of external forces on the arc column», Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38, n. 2, p. 306, 2005.
- [16] J. Alexis, M. Ramirez, G. Trapaga, P. Jönsson, «Modeling of a DC electric arc furnace-heat transfer from the arc», ISIJ international, vol. 40, n. 11, pp. 1089-1097, 2000.
- [17] F. Wang, Z. Jin, Z. Zhu, «Numerical study of DC arc plasma and molten bath in DC electric arc furnace», Ironmaking & steelmaking, vol. 33, n. 1, pp. 39-44, 2006.
- [18] Z. Wang, N. Wang, T. Li, Y. Cao, «3D numerical analysis of the arc plasma behavior in a submerged DC electric arc furnace for the production of fused MgO», Plasma Science and Technology, vol. 14, n. 2, p. 321, 2012.
- [19] H. L. Larsen, A. Hildal, V.G. Sevastyanenkon, J. A. Bakken, «A numerical model for the AC arc in the silicon metal furnace», In Proc. INFACON, pp. 517-527, 1995.
- [20] J. A. Bakken, G. Liping, H. L. Larsen, V.G. Sevastyanenkon, «Numerical modeling of electric arcs», Journal of engineering physics and thermophysics, vol. 70, n. 4, pp. 530-543, 1997.
- [21] G. A. Saevarsdottir, H. L. Larsen, J. A. Bakken, «Modelling of industrial AC arcs», High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes, vol. 3, n. 1, pp. 1-15, 1999.
- [22] T. Daszkiewicz, W. Tarczyński, «Discharge channel displacement simulation in AC arc» Archives of Electrical Engineering, vol. 59, n. 1-2, pp. 35-49, 2010.
- [23] T. Daszkiewicz, W. Tarczyński, «Switching arc simulation», Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, n. 7b, pp. 60-64, 2012.
- [24] C. Rehmet, F. Fabry, V. Rohani, F. Cauneau, L. Fulcheri, «High speed video camera and electrical signal analyses of arcs behavior in a 3-Phase AC arc plasma torch», Plasma Chemistry and Plasma processing, vol. 33, n. 4, pp. 779-796, 2013.
- [25] C. Rehmet, F. Fabry, V. Rohani, F. Cauneau, L. Fulcheri, «3D unsteady state MHD modeling of a 3-phase AC hot graphite electrodes plasma torch», Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 33, n. 2, pp. 491-515, 2013.
- [26] C. Rehmet, F. Fabry, V. Rohani, F. Cauneau, L. Fulcheri, «A comparison between MHD modeling and experimental results in a 3-phase AC arc plasma torch: influence of the electrode tip geometry», Plasma Chemistry and Plasma Processing, vol. 34, n. 4, pp. 975-996, 2014.
- [27] C. Rehmet, F. Fabry, V. Rohani, F. Cauneau, L. Fulcheri, «Unsteady state analysis of free-burning arcs in a 3-Phase AC plasma torch: comparison between parallel and coplanar electrode configurations», Plasma Sources Science and Technology, vol. 23, n. 6, p. 065011, 2014.
- [28] J. L. Sanchez, M. A. Ramírez- Argaez, A. N. Conejo, «Power delivery from the arc in AC electric arc furnaces with different gas atmospheres», steel research international, vol. 80, n. 2, pp. 113-120, 2009.
- [29] R. D. M. MacRosty, C. L. E. Swartz, «Dynamic Modeling of an Industrial Electric Arc Furnace», Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 44, n. 21, pp. 0888-5885, 2005.
- [30] V. Logar, D. Dovžan, I. Škrjanc, «Modeling and validation of an electric arc furnace: Part 1, heat and mass transfer», ISIJ international, vol. 52, n. 3, pp. 402-412, 52.
- [31] G. Guo, G. A. Irons, «Modeling of radiation intensity in an EAF», In Third, pp. 223-228, 2003.
- [32] A. Fathi, Y. Saboohi, I. Škrjanc, V. Logar, «Low computational-complexity model of EAF arc-heat distribution», ISIJ international, vol. 55, n. 7, pp. 1353-1360, 2015.
- [33] J. Szekely, Y. K. Chuang, J. K. Hlinka, «The melting and dissolution of low-carbon steels in iron-carbon melts», Metallurgical Transactions, vol. 3, n. 11, pp. 2825-2833, 1972.
- [34] R. D. Morales, A. N. Conejo, H. H. Rodríguez, «Process dynamics of electric arc furnace during direct reduced iron melting», Metallurgical and Materials Transactions, vol. 33B, n. 2, p. 187, 2002.
- [35] K. Mandal, «Modeling of scrap heating by burners», PhD dissertation, 2010.
- [36] C. Giavani, E. Malfa, V. Battaglia, «The Evolution of Consteel EAF», EEC 2012 - Electric Steelmaking Conference Proceedings, 2012.
- [37] V. R. Voller, C. Prakash, «A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems», International journal of, vol. 30, n. 8, pp. 1709-1719, 1987.
- [38] A.D. Brent, R. V. Voller, K. T. J. Reid, «Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal, Numerical Heat Transfer, Part A Applications», Numerical Heat Transfer, Part A Applications, vol. 13, n. 3, pp. 297-318, 1988.
- [39] Y. Li, Y. Feng, X. Zhang, C. Wu, «Energy propagation in plasma arc welding with keyhole tracking», Energy, vol. 64, pp. 1044-1056, 2014.
- [40] T. Q. Li, C. S. Wu, «Numerical simulation of plasma arc welding with keyhole-dependent heat source and arc pressure distribution», The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 78, n. 1-4, pp. 593-602, 2015.
- [41] A. Yadav, S. Samir, «Experimental and numerical investigation of spatiotemporal characteristics of thermal energy storage system in a rectangular enclosure», Journal of Energy Storage, vol. 21, pp. 405-417, 2019.

- [42] A. Saraswat, A. Verma, S. Khandekar, M. K. Das, «Latent Heat Thermal Energy Storage In A Heated Semi-Cylindrical Cavity: Experimental Results And Numerical Validation,» *changes*, vol. 5, p. 7, 2015.
- [43] M. Carmona, C. Cortés, «Numerical simulation of a secondary aluminum melting furnace heated by a plasma torch,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, n. 2, pp. 334-346, 2014.
- [44] K. Karalis, N. Karkalos, G. S. E. Antipas, A. Xenidis, «Pragmatic analysis of the electric submerged arc furnace continuum,» *Royal Society open science*, vol. 4, n. 9, p. 170313, 2017.
- [45] K. Karalis, N. Karalis, N. Karkalos, G. S. E. Antipas, A. Xenidis, N. Ntallis, «Three-dimensional computational fluid dynamics analysis of an electric submerged arc furnace,» *Scientific Reports*, vol. 11, n. 1, pp. 2045-2322, 2021.
- [46] G. Guo, G. A. Irons, in *133rd TMS Annual Meeting & Exhibition*, Charlotte, USA, 2004.
- [47] D. Guo, G. A. Irons, in *AISTech, Iron and Steel Technology Conf.*, Cleveland, USA, 2006.
- [48] O. J. P. González, M. A. Ramírez-Argáez, A. N. Conejo, «Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the Electric Arc Furnace,» *ISIJ International*, vol. 50, n. 1, pp. 9-16, 2010.
- [49] E. Pineda-Martínez, C. A. Hernández-Bocanegra, A. N. Conejo, M. A. Ramírez-Argáez, «Mathematical Modeling of the Melting of Sponge Iron in a Bath of Non-reactive Molten Slag,» *ISIJ International*, vol. 55, n. 9, pp. 1906-1915, 2015.
- [50] R. D. Morales, H. Rodríguez-Hernández, A. N. Conejo, «A Mathematical Simulator for the EAF Steelmaking Process Using Direct Reduced Iron,» *ISIJ International*, vol. 41, n. 5, pp. 426-436, 2001.
- [51] R. D. Morales, H. Rodríguez-Hernández, A. N. Conejo, «Process dynamics of electric arc furnace during direct reduced iron melting,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 33, pp. 187-199, 2002.
- [52] O. J. P. González, Y. I. C. Guzmán, M. A. Ramírez-Argáez, A. N. Conejo, «Melting behavior of simulated DRI in liquid steel,» *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 53, p. 359, 2008.
- [53] M. A. Ramírez-Argáez, A. N. Conejo, M. S. Lopez-Cornejo, «Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the EAF under Multiphase Flow,» *ISIJ International*, vol. 55, n. 1, pp. 117-125, 2015.
- [54] M. Alam, J. Naser, G. Brooks, A. Fontana, «Computational Fluid Dynamics Modeling of Supersonic Coherent Jets for Electric Arc Furnace Steelmaking Process,» *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 41, pp. 1354-1367, 2010.
- [55] J. E. Anderson, N. Y. Somers, D. R. Farrenkopf, C. Bethal, US Patent 5 823 762, USA, 1998.
- [56] M. B. Ferri, F. Memoli, E. Malfa, «Industrial application of supersonic lance-The KT system-numeric simulation, operating practice, results and perspectives,» *AISTech, Iron and Steel Technology Conference*, pp. 483-490, 2006.
- [57] C. Candusso, «Electric Arc Furnace sidewall fixed injectors developments and operational results,» In *AISTech 2006: Iron & Steel Technology Conference Proceedings(I & II)*, 2005.
- [58] M. Jeong, V. Kumar, H. D. Kim, T. Setoguchi, S. Matsuo, «A computational characterization of the supersonic coherent jet,» In *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, p. 3525, 2004.
- [59] M. Alam, G. Brooks, «Computational Fluid Dynamics Simulation of Supersonic Oxygen Jet Behavior at Steelmaking Temperature,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 41, pp. 636-645, 2010.
- [60] F. Liu, R. Zhu, K. Dong, S. Hu, L. Yang, T. Tang, X. Wu, «Effect of main gas composition on flow field characteristics of supersonic coherent jets with CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> mixed injection (COMI) at steelmaking temperature,» *ISIJ International*, vol. 58, n. 5, pp. 842-851, 2018.
- [61] F. Liu, R. Zhu, K. Dong, S. Hu, «Flow field characteristics of coherent jet with preheating oxygen under various ambient temperatures,» *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 47, 2015.
- [62] G. Tang, Y. Chen, A. K. Silaen, Y. Krotov, F. M. Riley, C. Q. Zhou, «Effects of fuel input on coherent jet length at various ambient,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 153, pp. 513-523, 2019.
- [63] G. Tang, Y. Chen, A. K. Silaen, Y. Krotov, F. M. Riley, C. Q. Zhou, «Investigation on coherent jet potential core length in an electric arc furnace,» *teel research international*, vol. 90, n. 4, p. 1800381, 2019.
- [64] G. Tang, Y. Chen, A. K. Silaen, C. Q. Zhou, «Investigation of supersonic oxygen jet potential core length at various ambient temperatures,» *JOM*, vol. 71, n. 2, pp. 633-643, 2018.
- [65] I. Klioutchnikov, H. Olivier, H. J. Odenthal, «Numerical investigation of coaxial jets entering a hot environment,» *Computers & Fluids*, vol. 86, pp. 490-499, 2013.
- [66] H. J. Odenthal, S. Buess, P. Starke, R. Nörthemann, M. Lohmeier, «The new generation of SIS injector for improved EAF processes,» *Conference: METEC & 2nd ESTAD – European Steel Technology and Application Days At: Düsseldorf*, 2015.

# Electric Arc Furnace as a key production unit for "carbon-neutral" steel production: fundamental aspects, phenomenon modeling, and digital twin implementation strategies

The European goal of achieving carbon-neutral industrial production by 2050 requires a special effort from the most "emissive" ("hard-to-abate") sectors, including the steel sector, which is responsible for about 20% - 25% of the total. This requires both technological, to reach industrial maturity levels, and economic commitment, due to the high associated costs, for which significant support from institutions is required in terms of financing programs. Of the two production methods (integrated cycle and electric furnace), the latter has the best potential for reducing CO<sub>2</sub> emissions, and the most advantageous innovative cycles for the future include direct reduction and electric furnace production. This work aims to provide useful elements for the development and consolidation of sustainable "carbon-neutral" steel production processes, focusing on the fundamental and complex operations at the melting furnace as a gateway to subsequent operations towards the finished product.

**KEYWORDS:** STEELMAKING, ELECTRIC ARC FURNACE, EAF, INJECTION, METALLURGY, DIGITAL TWIN;

[TORNA ALL'INDICE >](#)