

ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI 3D E CONTROLLO DI UN FORNO ELETTRICO AD ARCO SOMMERSO

Paolo Di Barba¹, Fabrizio Dughiero², Michele Forzan²,
 Maria Evelina Mognaschi¹, Elisabetta Sieni², David Vlasov³

¹ Dipartimento di Ingegneria Elettrica Via Ferrata 1, 27100 Pavia

² Dipartimento di Ingegneria Elettrica Via Gradenigo 6/A, 35131 Padova

³ Department of Automated Electrotechnical Installations Karl Marks Prospekt 20,
 Novosibirsk, Russia

I forni ad arco elettrico sommerso per la produzione di ferroleghe sono dispositivi di potenza [1] in cui un buon equilibrio delle tre fasi è auspicabile per garantire le migliori condizioni di lavoro del forno. Storicamente i forni sono controllati da regolatori meccanici che muovono gli elettrodi in modo da equilibrare il più possibile le correnti sulle tre fasi e consentire una densità uniforme di potenza nel metallo in fusione e al tempo stesso garantire una densità di corrente sufficiente a formare l'elettrodo. Questo tipo di controllo ha molti inconvenienti, in particolare il ritardo dovuto allo spostamento degli elettrodi nella posizione desiderata porta a una risposta di controllo lenta a causa dell'attuatore meccanico e, contemporaneamente, a picchi indesiderati di potenza. Inoltre, il controllore agisce su un solo elettrodo per volta e gli effetti sugli altri due elettrodi non vengono presi in considerazione; in questo modo, si hanno continui aggiustamenti del 'set point' di posizione dell'elettrodo. Per queste ragioni, si è pensato a un nuovo controllo del forno pilotato in tensione, mantenendo gli elettrodi in posizione fissa. Questo regolatore permetterebbe di ottenere correnti equilibrate e densità di potenza uniforme nel carico. La progettazione del controllore si basa su un modello circuitale elettrico costruito a partire dai valori di impedenza equivalente calcolati per mezzo di un modello di campo 3D agli elementi finiti.

Il forno è composto da tre elettrodi, immersi in un bagno di carbone e di materie prime da fondere. Durante tutto il ciclo produttivo del forno, avvengono reazioni che modificano la composizione chimica del carico e di conseguenza il valore dell'impedenza. Quando il forno raggiunge uno stato di equilibrio è possibile evidenziare quattro regioni principali: carbone asciutto, carbone bagnato, scoria e metallo liquido, rispettivamente, [2] e [3]. E' stato costruito un modello 3D del forno [4], che comprende le quattro regioni, il crogiolo e gli elettrodi. Il modello geometrico e le proprietà elettriche dei diversi materiali sono mostrati in Figura 1.

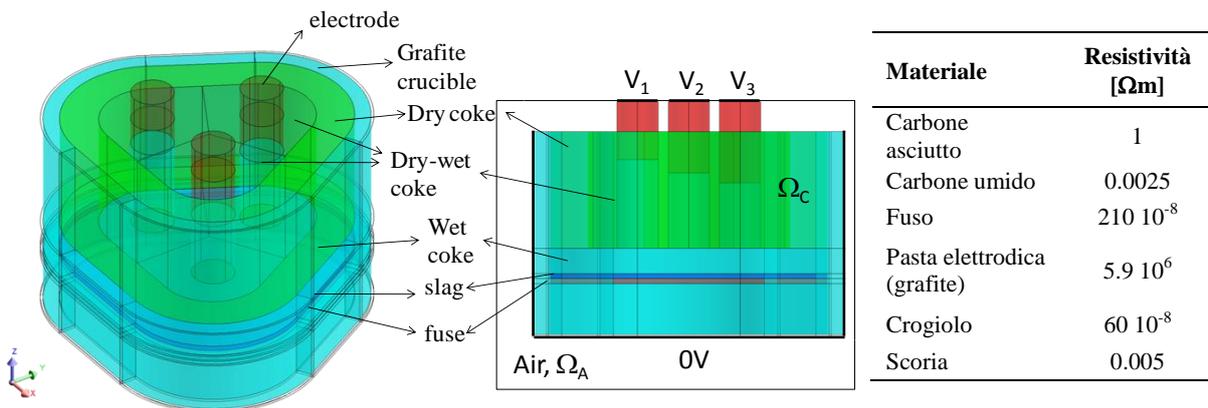


Fig. 1: Modello agli elementi finiti e resistività dei materiali.

Il modello si compone di una regione conduttiva, Ω_C , che include il materiale fuso, il carbone, il crogiolo e gli elettrodi, circondato da una regione d'aria, Ω_A . L'intero dominio è discretizzato con circa 3.275.000 tetraedri aventi circa 475.000 nodi in Ω_C e 70.000 nodi in Ω_A . Gli elettrodi sono alimentati

con una tensione trifase a 50 Hz (collegamento a triangolo) di 93 Vrms. La tensione di elettrodo è fornita da un trasformatore monofase per ognuno dei tre elettrodi.

Il crogiolo di grafite è racchiuso in una cassa d'acciaio che è collegata elettricamente a terra.

Nelle regioni conduttive, il problema elettromagnetico è risolto in termini del fasore del potenziale scalare elettrico, V e del potenziale vettore magnetico, A [5]:

$$\nabla^2 A = \sigma \mu (j\omega A + \nabla V) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma (j\omega A + \nabla V) = 0 \quad (2)$$

con $V = V_i$, $i = 1, 3$ agli elettrodi, dove σ è la conducibilità del materiale, μ la permeabilità magnetica e ω la pulsazione.

La corrente elettrica che fluisce attraverso gli elettrodi nel forno è stata misurata per mezzo di un trasformatore di corrente inserito al primario del trasformatore di alimentazione del forno; le correnti al primario sono state ridotte a quelle del secondario mediante un coefficiente idoneo. La tensione è misurata al secondario per mezzo di un voltmetro. In Tabella 1 i valori misurati di corrente di elettrodo vengono confrontati con quelli simulati [6].

Tabella 1 - Correnti di elettrodo misurate I_{mis} , e simulate I_{FEM} .

	I_{mis} [A]	I_{FEM} [A]	Fase $_{FEM}$ [deg]
Elettrodo 1	35780	33542	170.2
Elettrodo 2	36000	36671	-72.1
Elettrodo 3	35770	35898	48.0

Dopo il processo fusorio che avviene nel forno ad arco sommerso, la produzione della ferroleghie richiede che il materiale venga lavorato in modo da ottenere piccoli blocchi di pezzatura uniforme. Attualmente, il processo avviene facendo solidificare il materiale fuso, dopo averlo spillato dal forno di riduzione, su una adeguata superficie di raffreddamento. Il materiale viene poi frantumato e suddiviso in base alla pezzatura ottenuta al frantoio. Questa fase del processo presenta diversi fattori di criticità, ad esempio: la sicurezza dei lavoratori durante la fase di colata, i tempi di produzione legati al trasferimento del prodotto e alla lavorazione con il frantoio, il costo energetico per la frantumazione, l'alta percentuale di materiale scartato.

Il Laboratorio di Elettrotermia dell'Università di Padova ha iniziato alcuni studi per sostituire l'attuale processo con un sistema che permetta di solidificare direttamente il prodotto nella pezzatura desiderata. L'idea, in fase di sviluppo teorico e sperimentale, prevede che il materiale ancora allo stato liquido venga spinto da una pompa elettromagnetica attraverso un canale in modo discontinuo, così da colare gocce di opportune dimensioni in una vasca di raffreddamento.

La ricerca è attualmente finalizzata allo sviluppo e ottimizzazione di un prototipo della pompa elettromagnetica che dovrà dimostrare la fattibilità del processo proposto. Lo studio della pompa elettromagnetica viene sviluppato utilizzando modelli elettromagnetici e fluidodinamici. Per riprodurre il processo in laboratorio, il prototipo farà uso di un metallo caratterizzato da bassa temperatura di fusione (e.g. il metallo di Wood, che ha una temperatura di fusione di 70°C).

REFERENCES

- [1] Sverre Olsen, M. Tangstad, e Tor Lindstad, *Production of manganese ferroalloys*, Trondheim Norway: Tapir Akademisk Forlag, 2007.
- [2] Dhainaut M., "Simulation of the Electric Field in a Submerged Arc Furnace," *Proceedings of the Tenth International Ferroalloys Congress : Cape Town, South Africa, 1 - 4 Februar 2004*, Marshalltown South Africa: South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.
- [3] P. Eidem, M. Runde, M. Tangstad, J. Bakken, Z. Zhou, e A. Yu, "Effect of Contact Resistance on Bulk Resistivity of Dry Coke Beds," *Metallurgical and Materials Trans. B*, vol. 40, 2009, pagg. 388-396.
- [4] FLUX, "(CEDRAT): www.cedrat.com/software/flux/flux.html."
- [5] K.J. Binns, P.J. Lawrenson, e C.W. Trowbridge, *The analytical and numerical solution of electric and magnetic fields*, Chichester: Wiley, 1992.
- [6] P. Di Barba, F. Dughiero, M. Dusi, M. Forzan, M. E. Mognaschi, M. Paioli, E. Sieni, "3D FE analysis and control of a submerged arc electric furnace", ISEM 2011, 7-9 Settembre 2011, Napoli.