

CONTROLLO DELLE EMISSIONI DI UN FORNO ELETTRICO AD ARCO: EFFICIENZA DI CAPTAZIONE DELLE CAPPE DURANTE LA FASE DI CARICA

A. Soldati*, M. Campolo*, G. Velcich**

Sommario – L'obiettivo di questo lavoro è la valutazione accurata dei criteri utilizzati per il dimensionamento delle cappe di aspirazione fumi da siderurgia per il controllo delle emissioni durante la fase di carica del forno elettrico. Innanzitutto, presentiamo la valutazione dell'efficienza entalpica di un impianto di aspirazione fumi esistente. L'impianto è stato dimensionato utilizzando il modello di Kuei-Hung che è adottato nella prassi di progettazione industriale. Per aumentare l'efficienza della cappa, in primo luogo confrontiamo le previsioni del criterio di Kuei-Hung con simulazioni numeriche accurate. In secondo luogo, valutiamo le prestazioni di tre configurazioni alternative del sistema di aspirazione che potrebbero rappresentare dei miglioramenti progettuali.

POLLUTION EMISSION CONTROL FROM ELECTRIC ARC FURNACE: HOODS COLLECTION EFFICIENCY DURING THE CHARGING PHASE

Summary – The object of this work is the accurate evaluation of design criteria used to size canopy hoods for emission control during the charging phase of electric arc furnaces. In the first place, we evaluate the canopy hood of an existing plant, calculating enthalpy collection efficiency. The canopy hood is designed according to the Kuei-Hung model which is used in the industrial practice. In order to increase the efficiency of the canopy hood, first we examine critically the prediction of the Kuei-Hung model against accurate numerical calculations. Second, we examine performances of three proposed configurations for canopy hoods which could increase the overall efficiency of the system.

1. INTRODUZIONE

Controllare le emissioni inquinanti negli impianti di acciaieria è un problema di difficile soluzione [Tammaro, 1987, Buonicore e Davies, 1992]. Per contenere la dispersione dei fumi, il forno elettrico è coperto da una volta ed è incapsulato e isolato dal resto dell'impianto attraverso un sistema a pareti mobili. Da questa zona, fumi e polveri vengono aspirati tramite cappe, poste generalmente subito sopra il forno, e convogliati fino al sistema di separazione finale. I sistemi di captazione funzionanti in condizioni di regime (sistemi di aspirazione primaria) sono in genere diversi da quelli utilizzati durante le fasi a sviluppo discontinuo di emissioni, come le fasi di carica e colata del forno (sistemi secondari) [Hemeon, 1963]. In condizioni di regime il contenimento dei fumi è relativa-

mente semplice: il forno elettrico è isolato dalle pareti mobili e le emissioni sono pressoché costanti nel tempo. Nella fase di carica del forno, l'incapsulamento viene aperto per consentire l'accesso del carro-ponte che carica il rottame; il rottame scaricato nel forno subisce una combustione istantanea e libera una notevole quantità di fumi caldi ed inquinanti che salgono dal forno aperto e vanno ad occupare una vasta area sopra il forno [Nardin et al., 1986]. Durante questa fase, che dura circa un minuto, la dispersione dei fumi nell'acciaieria dipende dall'efficienza di captazione di un'ampia cappa posizionata sopra il forno ad un'altezza tale da non interferire con il carro-ponte. La progettazione di questa cappa risulta particolarmente critica perché funziona a pieno regime solo per brevi periodi, durante i quali devono essere estratte portate di fumi molto elevate [Ghoniem et al., 1993, Pagella e Defaveri, 1993, Swidley et al., 1998].

Lo scopo di questo lavoro è valutare, per via numerica, l'efficienza di captazione di una cappa per l'estrazione di fumi secondari. La cappa è installata in un'acciaieria del nord Italia e si vuole verificare la possibilità di controllare le emissioni se la portata di estrazione dei fumi viene ridotta per contenere i costi di esercizio dell'impianto. Secondo il criterio utilizzato per il dimensionamento, la riduzione della portata non dovrebbe penalizzare troppo l'efficienza di captazione. Il criterio si basa su un modello semplificato del pennacchio termico - modello di Kuei-Hung -, generato in condizioni stazionarie e in atmosfera libera. Queste condizioni sono diverse da quelle in cui opera la cappa, caratterizzate da transitori di emissione legati alle operazioni che avvengono nel forno elettrico. Attraverso il confronto tra i risultati di accurate simulazioni numeriche e le equazioni del modello è stato possibile individuare alcuni punti critici delle procedure per il dimensionamento. Infine, sono state confrontate le efficienze di captazione di tre cappe di aspirazione di forma diversa, per individuare possibili soluzioni progettuali che permettano di migliorare l'efficienza del sistema di aspirazione installato nell'impianto reale [Goodfellow e Bender, 1980]. L'analisi numerica dell'efficienza di captazione dei diversi sistemi di aspirazione permette di valutare a costo contenuto diverse alternative prima di un effettivo investimento sull'impianto.

2. L'IMPIANTO SIDERURGICO

L'ambiente di acciaieria esaminato in questo lavoro è costituito da un capannone largo 40 m, lungo 74 m, e alto 30 m, schematicamente rappresentato in Fig. 1. E' dotato di due forni elettrici ad arco (diametro interno 5 m) ognuno dei quali è incapsulato da un sistema a pareti mobili. Ogni forno è dotato di una presa di aspirazione primaria, subito sopra il

* Dott. ing. Alfredo Soldati, dott.ing. Marina Campolo, Centro Interdipartimentale di Fluidodinamica e Idraulica, Università degli Studi di Udine - 33100 Udine - tel. +39.0432.558864, fax +39.0432.558803

** Ing. Gianfranco Velcich - Alstom Power
e-mail gianfranco.velcich@power.alstom.com

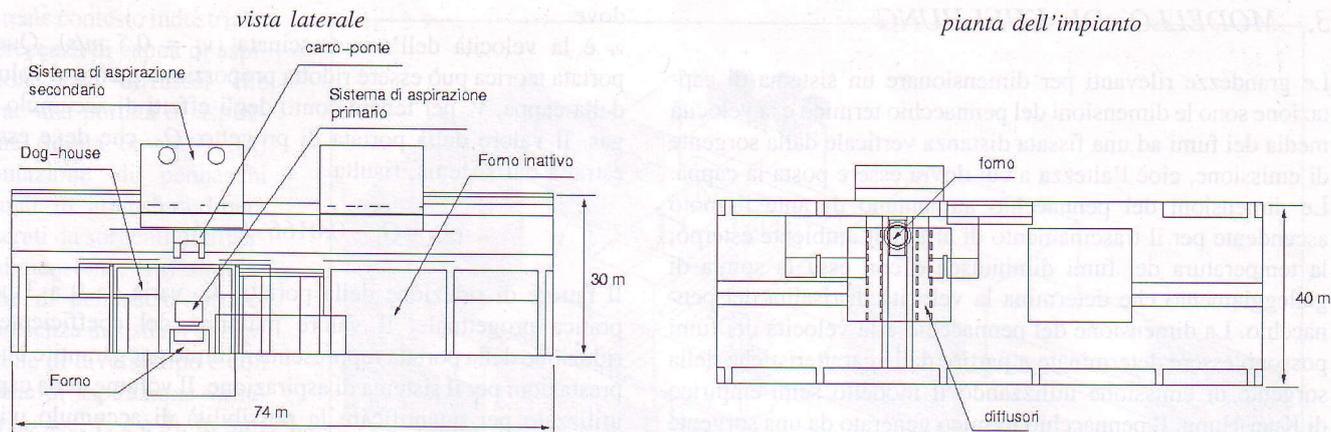


Fig. 1 - Vista frontale e pianta dell'impianto di acciaieria. Nella parte sinistra è visibile il forno attivo, l'incapsulamento ed il sistema di aspirazione con diffusori del flusso

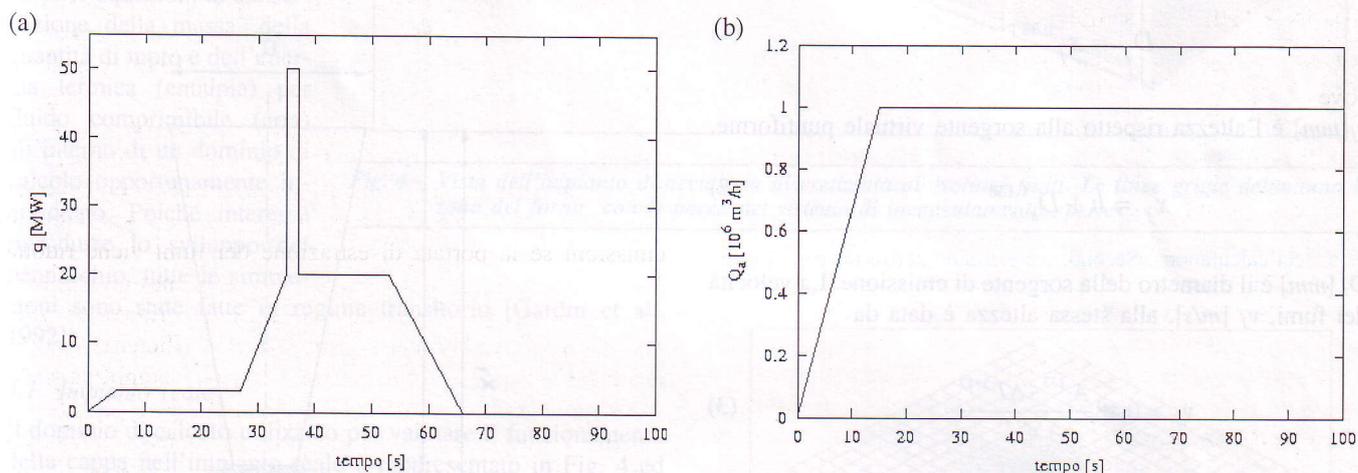


Fig. 2 - Profilo termico del forno elettrico durante la fase di carica secondaria (a), e portata aspirata dalla cappa in funzione del tempo (b) nell'acciaieria

forno, e di una cappa di aspirazione secondaria, posta una decina di metri al di sopra del forno. Per valutare l'efficienza di captazione del sistema di aspirazione secondario, è stata analizzata numericamente la fase di carica di uno dei due forni. In questa fase, la volta del forno viene rimossa e le pareti mobili vengono aperte per permettere l'ingresso del carro-ponte e della cesta che carica il rottame. Il pennacchio di fumi che si sviluppa dal forno elettrico per effetto convettivo è stato tracciato utilizzando la temperatura locale dell'aria che determina la variazione di densità e, di conseguenza, la velocità di salita dei fumi. La dinamica dello sviluppo dei fumi è determinata dall'andamento del flusso termico al forno [Zonato et al., 1993]. Il profilo del flusso termico emesso dal forno durante il transitorio di carica è rappresentato. In Fig. 2 (a). Questo profilo è stato valutato sulla base di considerazioni sul processo e misure sull'impianto [Alstom Power, 1995]. Al tempo $t=0$ viene aperta la volta del forno; a $t=35$ s il materiale viene scaricato e avviene la sua combustione; il

flusso termico verso l'esterno torna a zero quando la volta del forno viene richiusa. Gli inquinanti - fumi e polveri metalliche - emessi dal forno sono raccolti ed estratti dalla cappa sovrastante (larghezza 13.5 m, profondità 12 m, altezza 9 m, altezza sul forno 15.5 m), che è dotata di diffusori per distribuire il flusso in aspirazione (portata teorica $Q_t = 1.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$). Le dimensioni della cappa e la portata che deve essere estratta dal ventilatore sono state calcolate utilizzando il modello di Kuei-Hung. Il modello prevede che il sistema dovrebbe funzionare correttamente anche nel caso di portata di aspirazione ridotta a $Q_a = 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$. La riduzione della portata di aspirazione comporterebbe un'apprezzabile riduzione dei costi di funzionamento dell'impianto. Scopo di questo lavoro è calcolare l'efficienza di aspirazione del sistema in queste condizioni. Come rappresentato in Fig. 2 (b), si assume che la cappa sia in grado di estrarre la portata Q_a dopo un breve transitorio iniziale della durata di 15 secondi, corrispondente alla fase di accensione del ventilatore.

3. MODELLO DI KUEI-HUNG

Le grandezze rilevanti per dimensionare un sistema di captazione sono le dimensioni del pennacchio termico e la velocità media dei fumi ad una fissata distanza verticale dalla sorgente di emissione, cioè l'altezza a cui dovrà essere posta la cappa. Le dimensioni del pennacchio aumentano durante il moto ascendente per il trascinamento di aria dall'ambiente esterno; la temperatura dei fumi diminuisce e con essa la spinta di galleggiamento che determina la velocità di risalita del pennacchio. La dimensione del pennacchio e la velocità dei fumi possono essere determinate a partire dalle caratteristiche della sorgente di emissione utilizzando il modello semi-empirico di Kuei-Hung. Il pennacchio termico generato da una sorgente di dimensioni finite, schematizzato in Fig. 3, ha forma tronco-conica ed ha le stesse caratteristiche di un pennacchio generato da una sorgente puntiforme virtuale posta Z [mm] al di sotto della sorgente reale. Il diametro D_f [mm] del pennacchio ad un'altezza h [mm] sopra la sorgente è dato da:

$$D_f = x_f^{0.88} \quad (1)$$

dove

x_f [mm] è l'altezza rispetto alla sorgente virtuale puntiforme,

$$x_f = h + D_s^{1.138} \quad (2)$$

e

D_s [mm] è il diametro della sorgente di emissione. La velocità dei fumi, v_f [m/s], alla stessa altezza è data da

$$v_f = 0.48 \frac{A_s^{1/3} \cdot \Delta T^{5/12}}{x_f^{1/4}} \quad (3)$$

con

A_s [m²] area della sorgente di calore e ΔT [°C] differenza di temperatura tra la sorgente e l'ambiente. Nella pratica industriale si assume $\Delta T = 1600^\circ\text{C}$. I fumi emessi dalla sorgente raggiungono la cappa con una portata pari a

$$Q_f = v_f \frac{\pi \cdot D_f^2}{4} \quad (4)$$

Tuttavia, la portata che deve essere estratta dalla cappa è molto maggiore. Per tenere conto delle possibili oscillazioni spaziali del pennacchio termico, la larghezza della cappa viene fissata aumentando opportunamente il diametro dei fumi all'altezza di aspirazione h ,

$$D_c = D_f + 0.8 \cdot h \quad (5)$$

La portata teorica che deve essere aspirata dalla cappa risulta data dalla somma della portata dei fumi emessi, Q_f , e della portata di aria trascinata con i fumi attraverso la sezione di aspirazione,

$$Q_t = v_f \frac{\pi \cdot D_f^2}{4} + \left[D_c^2 - \frac{\pi \cdot D_f^2}{4} \right] \cdot v_r \quad (6)$$

dove

v_r è la velocità dell'aria trascinata ($v_r = 0.5$ m/s). Questa portata teorica può essere ridotta proporzionalmente al volume della cappa, V , per tenere conto degli effetti di accumulo del gas. Il valore della portata di progetto, Q_a , che deve essere estratta dal sistema, risulta

$$Q_a = Q_t - 0.0166 \cdot k_r \cdot V \quad (7)$$

Il fattore di riduzione della portata, k_r , varia da 0 a 3 nella pratica progettuale. Il valore massimo del coefficiente di riduzione della portata rappresenta il limite per garantire buone prestazioni per il sistema di aspirazione. Il volume della cappa, utilizzato per quantificare la possibilità di accumulo, viene fissato in base alla portata di progetto da aspirare e al tempo di permanenza in cappa per i fumi. Per i sistemi di aspirazione esaminati in questo lavoro, è stato considerato un tempo di permanenza dei fumi pari a 20 secondi. Note le dimensioni della sezione di aspirazione, D_c , l'altezza della cappa rimane univocamente determinata.

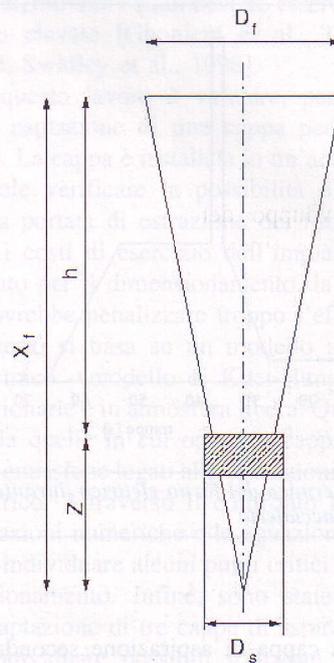


Fig. 3 - Schema teorico dello sviluppo del pennacchio secondo il modello di Kuei-Hung

4. METODOLOGIA

Gli obiettivi di questo lavoro sono: (i) quantificare l'efficienza dell'impianto di aspirazione installato nell'acciaieria quando la portata estratta è ridotta ($k_r = 3$) rispetto alla portata teorica calcolata dal modello di Kuei-Hung; (ii) verificare le relazioni fornite dal criterio di Kuei-Hung, utilizzate per il dimensionamento dell'impianto; (iii) confrontare le prestazioni di cappe alternative, dotate di sistemi per la distribuzione del flusso, che potrebbero rappresentare miglioramenti progettuali della cappa esistente. Per questo, sono state effettuate simulazioni numeriche di tre tipi: (i) simulazione del pennacchio termico

nel reale contesto industriale, in presenza di cappa di aspirazione con diffusori che estrae una portata di aspirazione ridotta ($k_r = 3$); (ii) simulazione di pennacchi termici in atmosfera libera generati da sorgenti di diversa dimensione; (iii) simulazione di pennacchi termici in presenza di sistemi di captazione di diverso tipo e con portata di aspirazione variabile ($k_r = 0, 1, 2$ e 3). In tutti i casi, lo sviluppo del pennacchio termico è stato riprodotto numericamente utilizzando un codice ai volumi finiti (Star-CD). Il codice risolve le equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia termica (entalpia) per fluido comprimibile (aria) all'interno di un dominio di calcolo opportunamente individuato. Poiché interessa riprodurre lo sviluppo del pennacchio, tutte le simulazioni sono state fatte in regime transitorio [Gardin et al., 1992].

4.1 Impianto reale

Il dominio di calcolo utilizzato per valutare il funzionamento della cappa nell'impianto reale è rappresentato in Fig. 4 ed è costituito da 270,000 celle. E' stato necessario utilizzare un numero elevato di celle per descrivere con un dettaglio adeguato la struttura dell'intero capannone industriale. Questo ha permesso di calcolare i flussi di circolazione dell'aria all'interno dell'impianto sulla base di condizioni al contorno di immediato significato fisico. Le condizioni al contorno imposte alla frontiera del dominio per il calcolo del campo di moto e di temperatura sono: (i) condizioni di pressione assegnata ($p = p_{atm}$) in corrispondenza delle aperture dell'impianto (superfici laterali grigio chiaro); (ii) condizione di muro sulle pareti solide; (iii) portata di aspirazione fissata in corrispondenza dei collettori di aspirazione della cappa (superfici grigio scuro); (iv) flusso termico variabile nel tempo secondo legge assegnata in corrispondenza del forno, che è l'unica sorgente termica significativa (superficie grigio interna). Si è assunto per la temperatura nell'acciaieria il valore $T=300$ K. Questa temperatura è stata assegnata anche a tutte le superfici solide nell'impianto, poiché la differenza di temperatura tra queste superfici e l'aria ambiente ha effetto trascurabile nella determinazione del campo di moto per il fluido. La legge di variazione adottata per il flusso termico al forno è quella già descritta in Figura 2 (a) e corrisponde ad un tipico transitorio di carica per forno ad arco [Alstom Power, 1995].

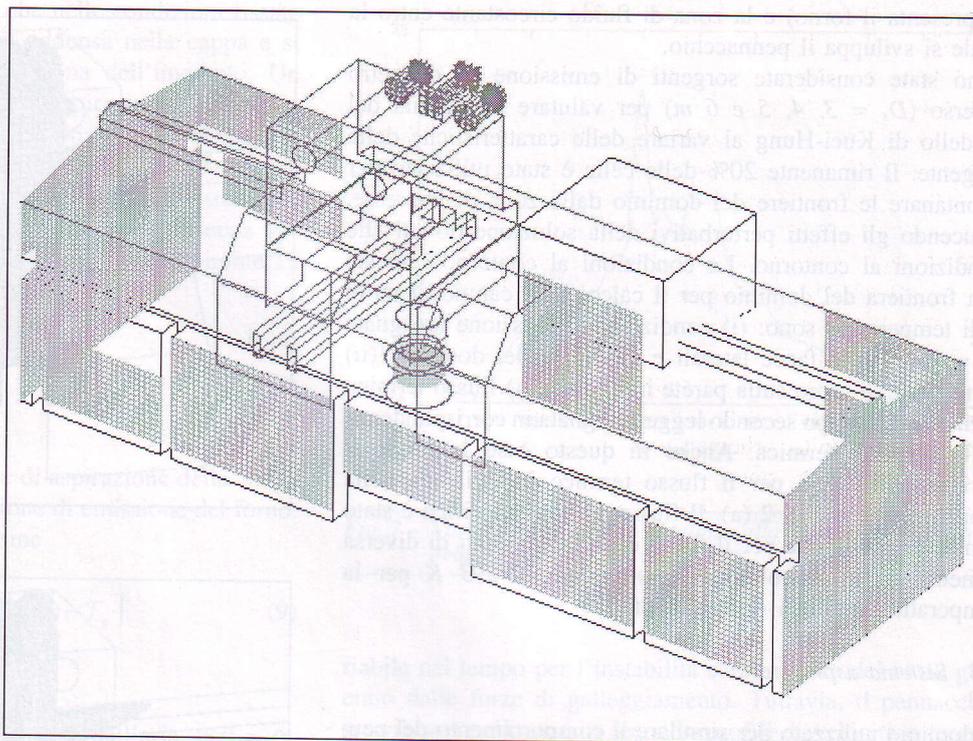


Fig. 4 - Vista dell'impianto di acciaieria discretizzato ai volumi finiti. Le linee grigie delimitano la zona del forno con le pareti del sistema di incapsulamento aperte

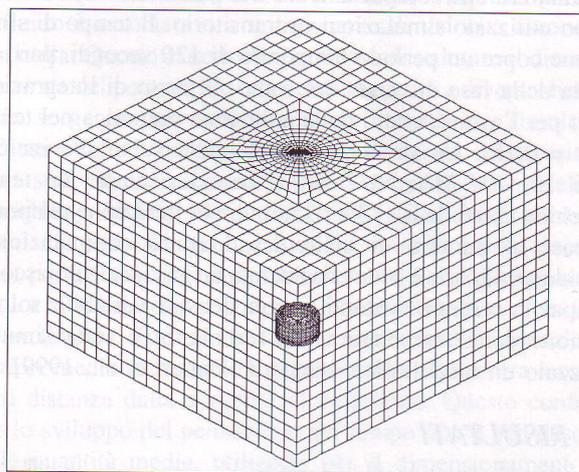


Fig. 5 - Geometria utilizzata per l'analisi del pennacchio in atmosfera libera. La sorgente di emissione è il cilindro al centro del dominio

4.2 Pennacchio libero

Per simulare lo sviluppo del pennacchio in atmosfera libera è stato utilizzato un dominio semplificato, parzialmente rappresentato in Fig. 5. Il dominio è costituito da 43,000 celle, 80% delle quali costituiscono la zona di studio, che comprende la sorgente di emissione termica (il cilindro in grigio, che

rappresenta il forno) e la zona di fluido circostante entro la quale si sviluppa il pennacchio.

Sono state considerate sorgenti di emissione di diametro diverso ($D_s = 3, 4, 5$ e 6 m) per valutare la validità del modello di Kuei-Hung al variare delle caratteristiche della sorgente. Il rimanente 20% delle celle è stato utilizzato per allontanare le frontiere del dominio dalla zona di interesse, riducendo gli effetti perturbativi della soluzione dovuti alle condizioni al contorno. Le condizioni al contorno imposte alla frontiera del dominio per il calcolo del campo di moto e di temperatura sono: (i) condizioni di pressione assegnata ($p = p_{atm}$) sulle facce laterali e superiore del dominio; (ii) condizione di muro sulla parete inferiore; (iii) flusso termico variabile nel tempo secondo legge assegnata in corrispondenza della sorgente termica. Anche in questo caso la legge di variazione adottata per il flusso termico è simile a quella rappresentata in Fig. 2 (a). Il flusso termico specifico è stato considerato costante per il forno e per le sorgenti di diversa dimensione. È stato assunto un valore $T=293$ K per la temperatura dell'aria nell'ambiente.

4.3 Sistema aspirante

Il dominio utilizzato per simulare il comportamento del pennacchio in presenza di diversi sistemi di captazione riproduce in modo semplificato l'impianto reale. Le condizioni al contorno applicate sulla frontiera del dominio sono del tutto simili a quelle dell'impianto reale.

Per analizzare il comportamento del pennacchio termico abbiamo utilizzato simulazioni in transitorio. Il tempo di simulazione copre un periodo temporale di 120 secondi, pari alla durata della fase di carica del forno. Il passo di integrazione usato per l'avanzamento della soluzione numerica nel tempo è $\Delta t = 0.15$ s. Le simulazioni, effettuate su un Server Sun Ultra 10, 400 MHz, 512 RAM, hanno richiesto un tempo macchina variabile tra i 3 e i 5 minuti per iterazione temporale in base al numero di celle del dominio computazionale considerato. L'aria è stata considerata un gas ideale di viscosità e capacità termica costanti e con densità variabile solo in funzione della temperatura. La turbolenza è stata simulata utilizzando un modello k- ϵ standard [Danuti et al., 1999].

5. RISULTATI

5.1 Emissioni in impianto industriale

Per valutare l'efficienza del sistema di aspirazione dell'impianto durante la fase di carica del forno elettrico, abbiamo simulato il transitorio relativo allo sviluppo dei fumi all'interno dell'acciaieria. In Fig. 6 è riportata una sequenza di immagini relativa allo sviluppo del pennacchio ($t=30, 40$ e 50 s). Per individuare il pennacchio è stata utilizzata una iso-superficie a temperatura leggermente maggiore della temperatura ambiente ($T=300.2$ K). Abbiamo ipotizzato che la diffusione del calore e della massa siano dello stesso ordine di grandezza ($Sc=Pr$, con Sc numero di Schmidt e Pr numero di Prandtl) per cui la massa dei fumi emessi dal forno risulta essere contenuta all'interno di questa iso-superficie di riferimento.

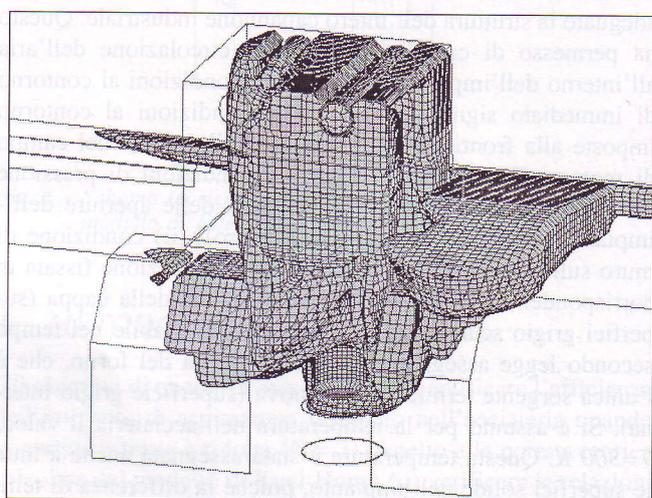
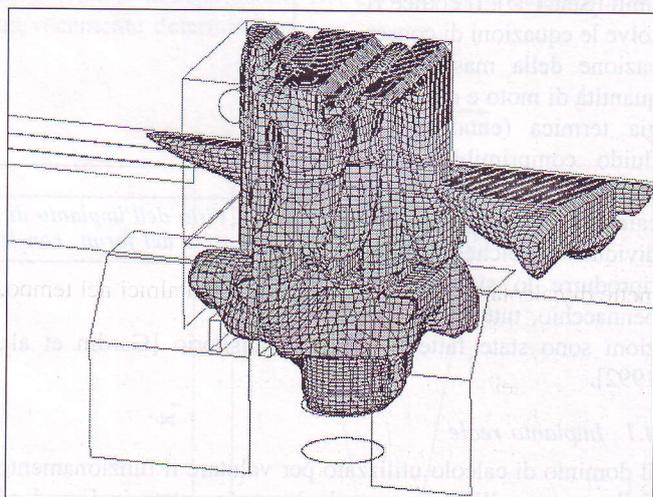
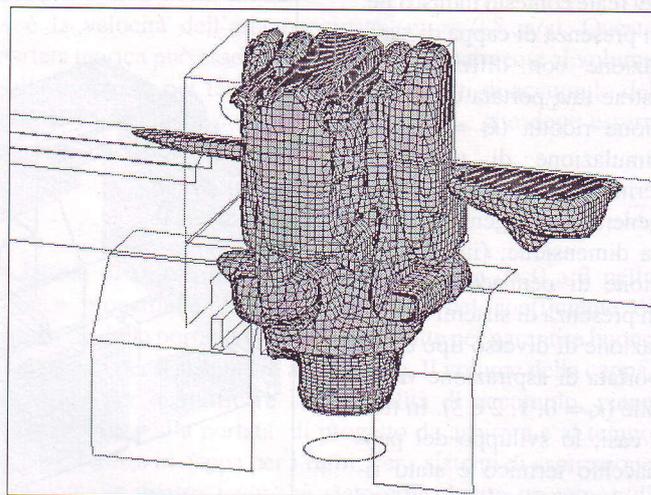


Fig. 6 – Evoluzione del pennacchio termico nell'impianto in esame. Il pennacchio è individuato dalla iso-superficie a temperatura $T=300.2$ K. Le istantanee del pennacchio corrispondono a $t=30, 40$ e 50 s

Dalle immagini in Fig. 6, si nota che nelle condizioni fissate per l'aspirazione, il pennacchio si addensa nella cappa e si allarga disperdendosi in una vasta zona dell'impianto. Un valore ridotto ($k_r = 3$) della portata di aspirazione della cappa non garantisce quindi un buon funzionamento del sistema aspirante durante la fase di carica del forno.

Per quantificare numericamente l'efficienza del sistema di aspirazione dell'impianto, abbiamo calcolato l'efficienza termica, definita come calore estratto dal sistema aspirante su calore emesso dal forno

$$\eta_t = \frac{H_i}{H_e} \quad (8)$$

dove

H_i è il flusso entalpico alla sezione di aspirazione della cappa e H_e è il flusso entalpico nella sezione di emissione del forno. I flussi entalpici sono calcolati come

$$H(t) = \rho(t) \cdot v(t) \cdot S \cdot C_p [T(t) - T_o] \quad (9)$$

dove

t è il tempo, $T(t)$ è la temperatura locale dell'aria, $\rho(t) = \rho_o T_o/T(t)$ è la densità, $v(t)$ è la velocità, S è la sezione attraverso cui avviene il flusso, C_p è la capacità termica e T_o è la temperatura di riferimento. La simulazione in transitorio permette di calcolare la variazione dei flussi entalpici nel tempo. Il flusso dalla sorgente di emissione è rappresentato in Fig. 2 (a) mentre in Fig. 7 è riportato il flusso alla sezione di aspirazione della cappa. Come si può notare dal confronto tra le due figure, esiste un ritardo tra l'emissione dal forno ($t=35$ s) e l'arrivo alla cappa ($t=40$ s), per cui non è possibile calcolare un valore istantaneo dell'efficienza termica dell'impianto. Si è calcolata l'efficienza media sul periodo di durata del transitorio di emissione come:

$$\eta_t = \frac{\int H_i(t) \cdot dt}{\int H_e(t) \cdot dt} \quad (10)$$

ottenendo un valore $\eta_t = 0.78$.

5.2 Pennacchio in atmosfera libera

Per valutare la validità del modello di Kuei-Hung, sono state effettuate quattro simulazioni dell'evoluzione di un pennacchio termico in atmosfera libera. Sono state considerate sorgenti di diversa dimensione (diametro $D_s = 3, 4, 5$ e 6 m) e un flusso termico specifico identico per tutte le sorgenti, variabile nel tempo secondo la legge già usata per il forno elettrico (Fig. 2 (a)). Le simulazioni permettono di ricostruire l'evoluzione nel tempo del campo di moto, di pressione e di temperatura. In Fig. 8 (a) e (b) sono riportati, a titolo di esempio, gli iso-contorni della componente verticale di velocità dell'aria e della temperatura a tre istanti diversi ($t=10, 30$ e 50 s) per la sorgente di diametro $D_s = 3$ m. Si osserva che il pennacchio termico è una struttura estremamente va-

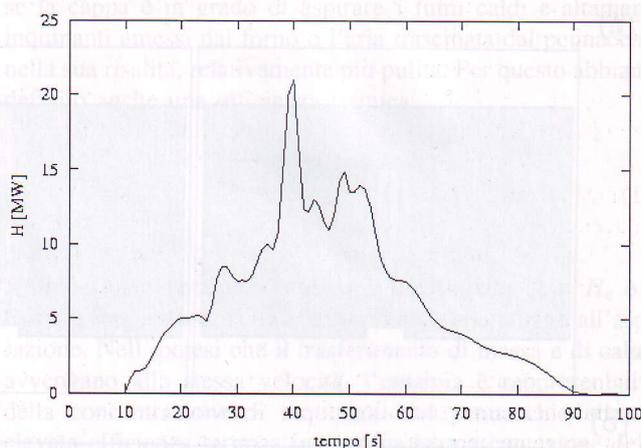


Fig. 7 - Variazione del flusso entalpico alla sezione di aspirazione della cappa

riabile nel tempo per l'instabilità caratteristica del moto generato dalle forze di galleggiamento. Tuttavia, il pennacchio si sviluppa nello spazio secondo profili di velocità e temperatura che risultano simili [Andreussi e Soldati, 1996], come rappresentato in Fig. 9. Il confronto tra i profili di velocità assiale e di temperatura dimostra che il pennacchio può essere efficacemente identificato come la porzione di fluido che si trova ad una temperatura leggermente maggiore di quella ambiente ($T=293.2$ K, nel caso in esame). A questa porzione di fluido è associata una componente di velocità ascendente non nulla. Questo criterio ha permesso di valutare il diametro, la portata del pennacchio e la velocità media a diverse distanze dalla sorgente per ogni istante del transitorio simulato. I risultati ottenuti, mediati nel tempo di durata del transitorio, sono stati confrontati con i valori previsti dal modello di Kuei-Hung. In Fig. 10 sono riportati i valori medi e massimi di (a) diametro del pennacchio, (b) velocità media dei fumi e (c) portata calcolati a diversa distanza h dalla sorgente. Le Figure si riferiscono a sorgenti di diametro $D_s = 3$ m (alto) e 6 m (basso). Si osserva che, per ogni variabile considerata, i valori medio e massimo risultano molto diversi tra loro, per ogni distanza dalla sorgente di emissione. Questo conferma che lo sviluppo del pennacchio nel tempo non è ben descritto dalle quantità medie, utilizzate per il dimensionamento dei sistemi di aspirazione.

I risultati medi sono stati confrontati con le previsioni del modello di Kuei-Hung, come si vede in Fig. 11, dove è presentato il confronto tra (a) il diametro e (b) la portata del pennacchio calcolati dal codice e dal modello per i casi $D_s = 3$ m (alto) e $D_s = 6$ m (basso). Per calcolare la portata dei fumi con il modello di Kuei-Hung è necessario disporre di un valore di riferimento per la temperatura dei fumi emessi. Nella simulazione è stato imposto un flusso termico variabile nel tempo alla sorgente, che determina una temperatura variabile per i fumi nella sezione di emissione. Per ricavare un valore di riferimento da utilizzare nell'equazione (3) abbiamo mediato nel tempo il valore della temperatura dei fumi alla sezione di emissione, ottenendo rispettivamente $T=1394$ K e

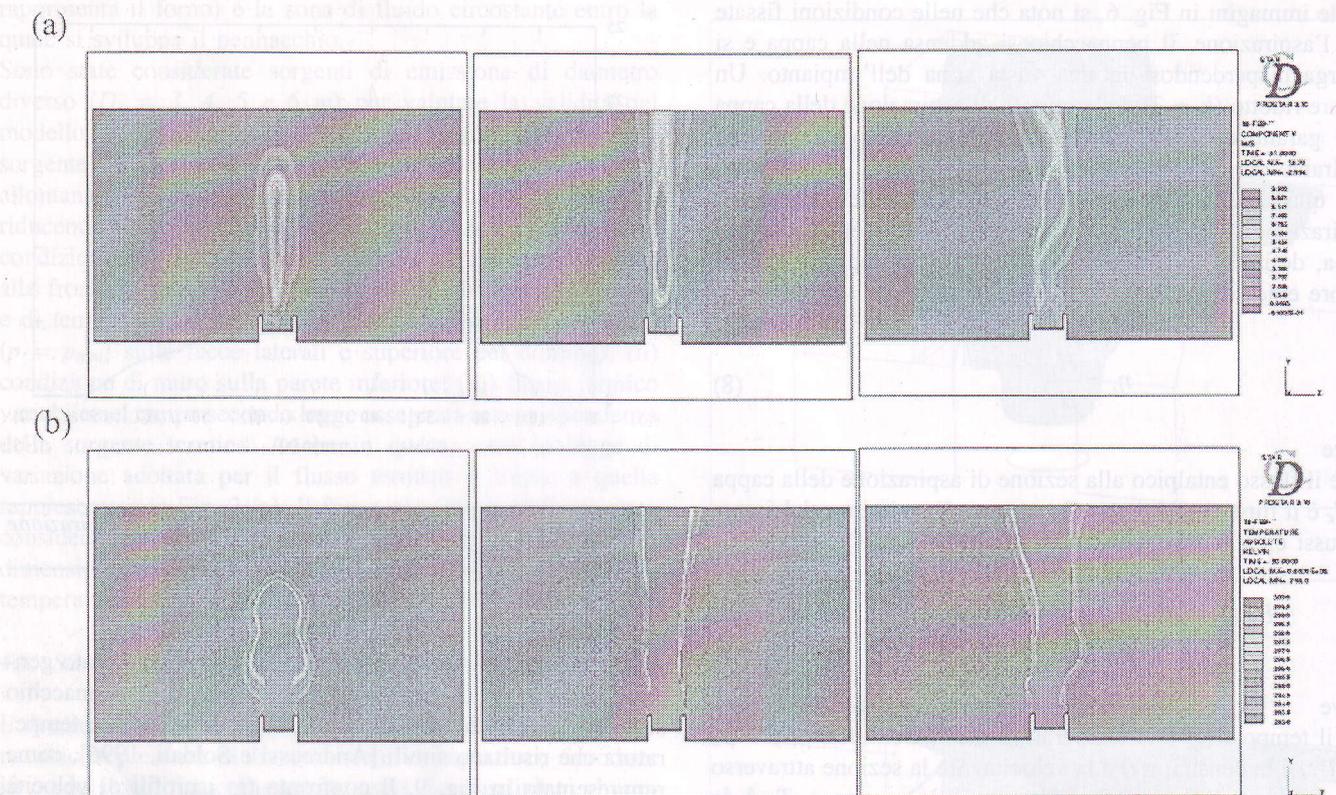


Fig. 8 – Istantanee ($t=10, 30, 50$ s) degli iso-contorni di velocità ascendente (a) e temperatura (b) per il pennacchio termico in atmosfera libera. La struttura è oscillante nel tempo

$T=2500$ K nei due casi presentati. I valori di portata che si ottengono in questo modo (vedi Fig. 11 (b)) risultano abbastanza diversi da quelli calcolati dalla simulazione. In particolare, la portata dei fumi è sottostimata dal modello di Kuei-Hung nel caso $D_s = 3$ m e sovrastimata nel caso $D_s = 6$ m. La differenza tra le portate ricavate dalla simulazione e calcolate dal modello si riduce (vedi Fig. 11 (c)) se si utilizza un valore della differenza di temperatura tra la sorgente e l'ambiente pari a $\Delta T = 1600^\circ\text{C}$, come nella pratica di progettazione.

5.3 Simulazioni con cappa

Nella terza fase del lavoro, abbiamo valutato numericamente l'efficienza di captazione di tre diverse cappe, rappresentate in Fig. 12. Abbiamo considerato (a) una cappa semplice (cappa A), (b) una cappa con tubi diffusori (cappa B) e (c) una cappa con tubi telescopici di aspirazione (cappa C). Le cappe hanno identica dimensione ed estraggono la stessa portata Q_a . Si vuole valutare se la presenza dei diversi sistemi di distribuzione del flusso possa modificare in modo significativo le prestazioni [Cascetta et al., 1991]. Le cappe, dimensionate utilizzando il modello di Kuei-Hung, sono state considerate installate 13 m al di sopra di un forno elettrico di diametro $D_s = 4$ m; anche per queste simulazioni è stato considerato lo sviluppo del pennacchio termico tipico della fase di carica del forno elettrico riportato in Fig. 2 (a). Per ogni geometria di cappa, sono state considerate quattro condizioni di funzionamento, corrispondenti a diversi valori della

portata di aspirazione dei fumi. I valori considerati sono il valore teorico ($Q_t = 220$ m³/s) ed i valori di progetto calcolati assumendo coefficiente di riduzione della portata k_r pari a 1, 2 e 3 ($Q_a=116, 112$ e 58 m³/s, rispettivamente). In Fig. 13 è rappresentata la distribuzione della componente ascendente della velocità dei fumi nella sezione di ingresso della cappa semplice e della cappa con diffusori ($t=5$ s, $Q_a = 58$ m³/s). Qualitativamente, si osserva che la distribuzione del flusso dei fumi aspirati è più omogenea sulla sezione di ingresso della cappa se si adottano sistemi di aspirazione distribuita. In Fig. 14 sono riportate alcune istantanee dell'evoluzione del pennacchio ($t=15, 20, 25, 30, 50$ e 70 s) quando la portata aspirata dalle cappe è pari a $Q_a=58$ m³/s ($k_r=3$). Il pennacchio si sviluppa nel tempo seguendo la dinamica di carica del forno. La portata di fumi che si muove verso la cappa aumenta notevolmente dalla sezione di emissione alla sezione della cappa per effetto del trascinarsi di aria esterna. L'aria trascinata determina la dispersione degli inquinanti, aumentata la portata da estrarre dalla cappa e determina il raffreddamento dei fumi, diminuendo la loro spinta di galleggiamento che ne permette il contenimento in cappa fino ad aspirazione avvenuta. Poiché la portata dei fumi estratta dalla cappa è minore della portata dei fumi entrante, i fumi tendono ad accumularsi nella cappa, a raffreddarsi e disperdersi nell'ambiente esterno. Dalle istantanee si osserva che per $Q_a=58$ m³/s la capacità di smaltire i fumi risulta essere critica per ognuna delle cappe analizzate.

Per valutare numericamente l'efficienza di aspirazione delle cappe, abbiamo schematizzato il processo di aspirazione come

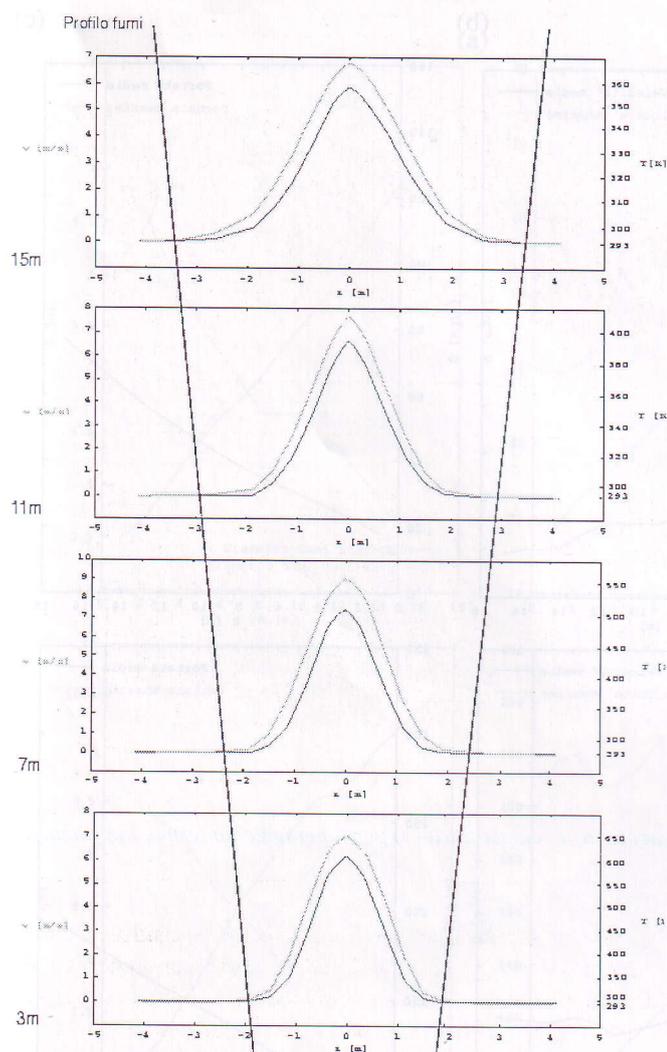


Fig. 9 - Profilo trasversale della velocità ascendente (curva superiore) e della temperatura (curva inferiore) per il pennacchio in atmosfera libera. I profili a diversa distanza dalla sorgente sono simili. Le porzioni di fluido con velocità verticale non nulla sono individuate da una temperatura maggiore della temperatura ambiente. Il pennacchio si allarga quasi linearmente all'aumentare della distanza dalla sorgente

rappresentato in Fig. 15. Il flusso di fumi che sale fino alla sezione di raccolta della cappa in parte entra, Q_i , e in parte sfugge, Q_e , alla cappa. Per calcolare questi flussi, abbiamo integrato le componenti ascendenti di velocità all'altezza della cappa per la parte interna ed esterna della sezione. Quindi, abbiamo definito una efficienza volumetrica di aspirazione della cappa come

$$\eta_v = \frac{Q_i}{Q_i + Q_e} \quad (11)$$

L'efficienza volumetrica della cappa è tanto maggiore quanto più piccola è la porzione di fumi Q_e che sfugge alla cappa. Tuttavia, l'efficienza volumetrica non consente di descrivere

se la cappa è in grado di aspirare i fumi caldi e altamente inquinanti emessi dal forno o l'aria trascinata dal pennacchio nella sua risalita, relativamente più pulita. Per questo abbiamo definito anche una efficienza termica,

$$\eta_t = \frac{H_i}{H_i + H_e} \quad (12)$$

dove

H_i è il flusso entalpico associato alla portata Q_i e H_e è il flusso entalpico associato alla portata Q_e che sfugge all'aspirazione. Nell'ipotesi che il trasferimento di massa e di calore avvengano alla stessa velocità, l'entalpia è rappresentativa della concentrazione di inquinanti del pennacchio ed una elevata efficienza termica indica una buona captazione della cappa. Le efficienze volumetriche e termiche, calcolate per le diverse geometrie di cappa analizzate e per diversi valori della portata di aspirazione del ventilatore, sono riportate in Fig. 16 (a) e (b). Dalla Fig. 16 (a) si nota che l'efficienza volumetrica delle cappe è piuttosto bassa quando la portata di estrazione è pari alla minima portata ridotta ($k_r=3$, $Q_a=58 \text{ m}^3/\text{s}$). L'efficienza volumetrica aumenta all'aumentare della portata estratta dal ventilatore. La cappa semplice sembra essere più efficiente delle cappe modificate con sistemi di distribuzione del flusso. Dalla Fig. 16 (b) si vede che, se si considera l'efficienza termica, il valore numerico risulta alto anche per il più basso valore di portata aspirata. L'efficienza termica è infatti del 90% contro una efficienza volumetrica intorno al 50%. La differenza di efficienza termica per i diversi sistemi di aspirazione risulta più contenuta della differenza di efficienza volumetrica.

6. CONCLUSIONI

In questo lavoro abbiamo effettuato simulazioni numeriche per (i) determinare l'efficienza del sistema secondario di aspirazione dei fumi in un impianto di acciaieria; (ii) verificare i criteri di progettazione utilizzati nella pratica industriale per il dimensionamento delle cappe; (iii) confrontare l'efficienza di aspirazione di cappe alternative. I risultati delle simulazioni dimostrano che (i) la simulazione numerica è uno strumento efficace per valutare l'efficienza di aspirazione di sistemi operanti in ambito industriale; (ii) i criteri di progettazione utilizzati, seppure semplificati, forniscono risultati in buon accordo con le simulazioni se si utilizzano opportuni accorgimenti nella scelta delle variabili di progetto. Tuttavia l'efficienza del sistema di aspirazione è soddisfacente solo se la portata di aspirazione non viene ridotta quanto suggerito dalla pratica industriale ($k_r < 3$); (iii) il confronto delle prestazioni di cappe semplici e cappe dotate di sistemi di distribuzione del flusso mostra che le cappe semplici risultano essere più efficienti in una serie di diverse condizioni operative, mentre le cappe con diffusori consentono una più omogenea distribuzione dei campi di flusso.

Si ringrazia l'Alstom Power per la collaborazione tecnica ed il supporto economico per la ricerca, il Dott. Tiziano Danuti e il Dott. Umberto Casagrande per aver realizzato alcune simulazioni.

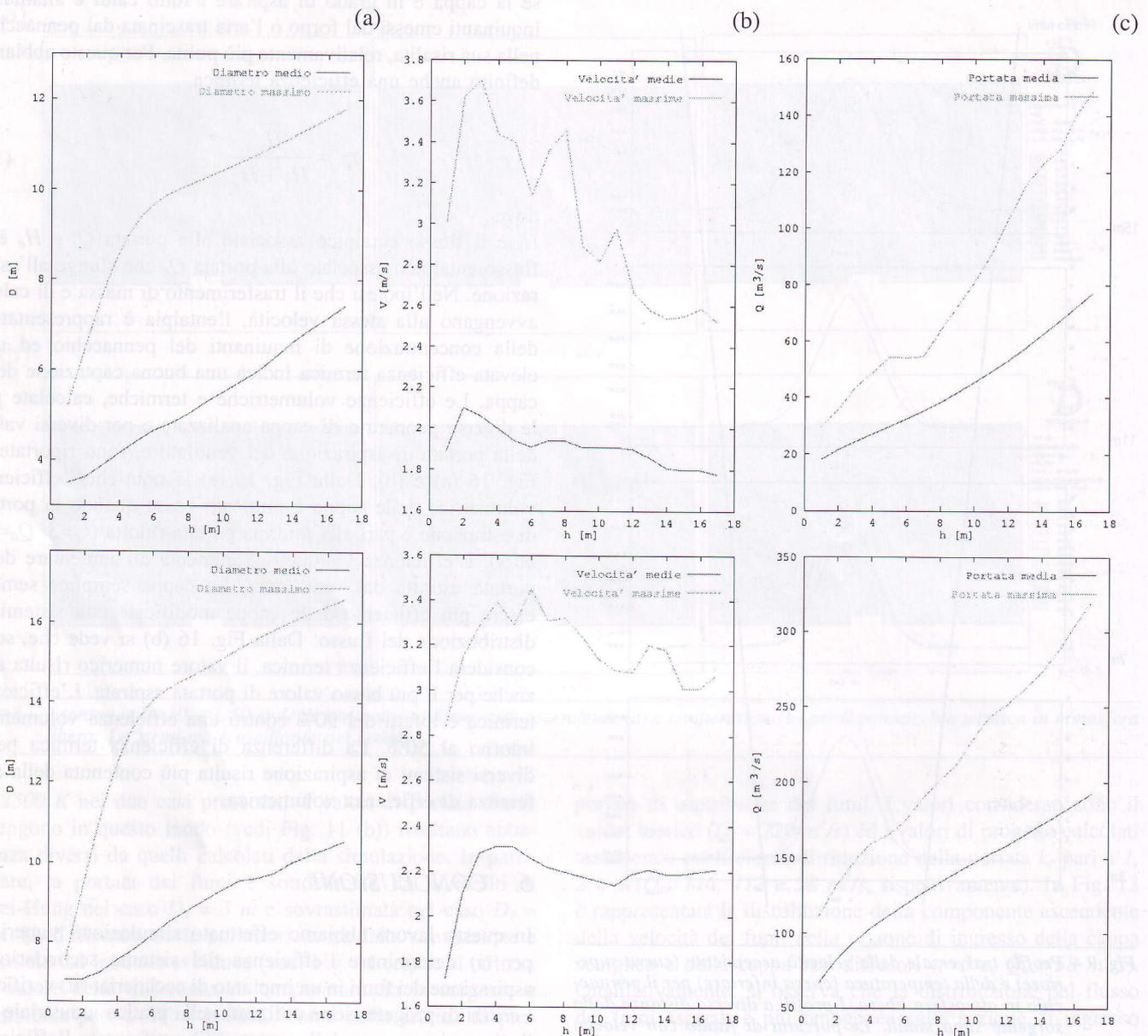


Fig. 10 – Valori medio e massimo (a) del diametro del pennacchio, (b) della velocità media dei fumi e (c) della portata al variare della distanza della sorgente secondo i risultati della simulazione numerica. I risultati in alto e in basso si riferiscono alle sorgenti di diametro $D_s = 3$ m e 6 m, rispettivamente

BIBLIOGRAFIA

Alstom Power (1995), *Technical Report TR V-95.069E*.

Andreussi, P., Soldati, A. (1996), *Fluidodinamica di processo*, ETS
 Buonicore, A., J., Davis, W., T., (1992) *Air pollution Engineering Manual*, Ed. Air & Waste Management Association, New York
 Cascetta, F., Dell'Isola, M., Vigo, P., (1991) *Soluzioni numeriche del campo di moto generato da un sistema aspirante*, La termotecnica, 65-71.

Danuti, T., Casagrande, U., Soldati, A., (1999) *Efficiency evaluation of furnace smoke hoods during charging transient*, Rapporto Tecnico CIFI, CFI-RT 03-99.

Gardin, P., Soide, C., Dez, A., Guillaume, I., (1992), *Use of physical and numerical simulation methods to characterize gas flow in tri-electrode electric arc furnace*, J.Ironmaking & Steelmaking, 19, 306-309

Ghoniem, A., F., Zhang, X., M., Knio, O., Baum, H., R., (1993) *Dispersion and deposition of smoke plumes generated in massive fire*, Journal of hazardous materials, 73, 275-293

Goodfellow, H., D., Bender, M., (1980), *Design consideration for fume hoods for process plants*, American Industrial Hygiene Association Journal, 41, 473-484

Hemeon, W.C. L. (1963) *Plant and process ventilation*, Industrial Press Inc.

Nardin, G., Pozzetto, D., Tommasi, S., (1986) *Indagine teorica sulle emissioni termoconvettive provenienti dal forno elettrico ad arco nelle fasi a forno scoperto*, La termotecnica, 31-36

Pagella, C., Defaveri, D., M., (1993) *Fire in industrial buildings - Simulation of fire growth, smoke production and venting*, Process safety and environmental protection, 71, 180-186

Swidley, S.P., Charles, J., Shillaker, D., Williams, K., (1998), *Control of effluent in steel production*, J. Ironm. & Steelm., 25, 29-32

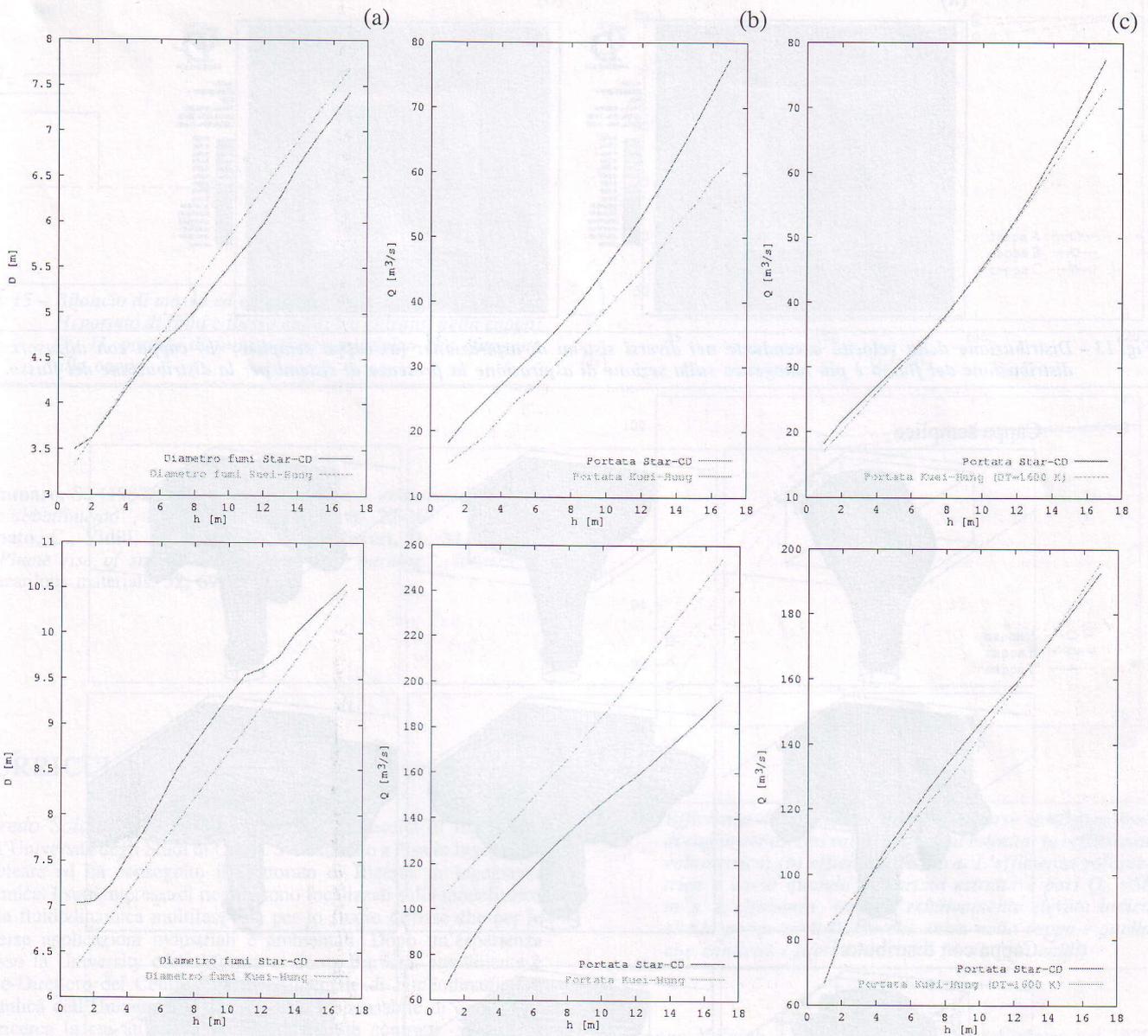


Fig. 11 – Confronto tra le simulazioni e il modello di Kuei-Hung: (a) diametro del pennacchio, (b) portata calcolata con ΔT medio ricavato dalla simulazione, (c) portata calcolata con $\Delta T = 1600^\circ\text{C}$. I risultati in alto e in basso si riferiscono alle sorgenti di diametro $D_s = 3\text{ m}$ e 6 m , rispettivamente

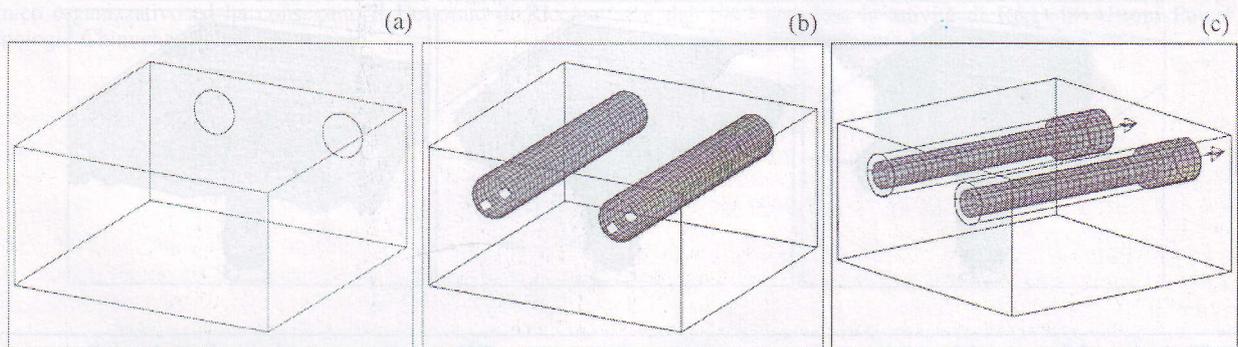


Fig. 12 – Soluzioni alternative per le cappe di aspirazione: (a) cappa semplice (cappa A), (b) cappa con diffusori (cappa B), (c) cappa con tubi telescopici (cappa C).

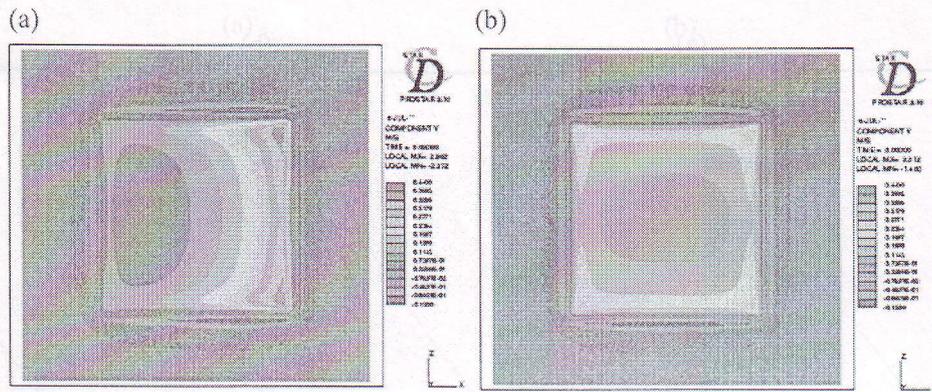
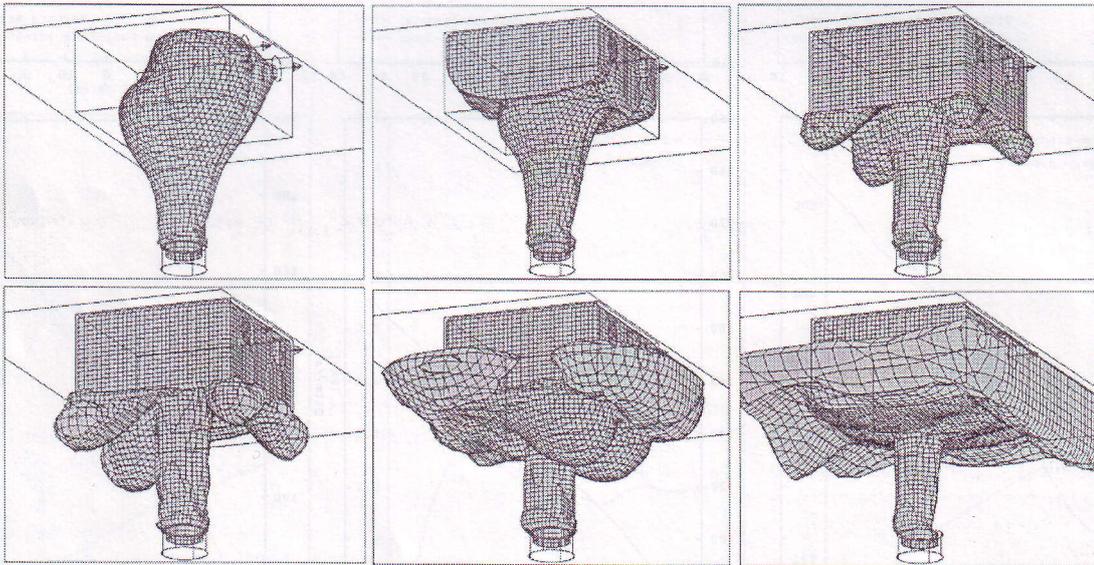


Fig. 13 – Distribuzione della velocità ascendente nei diversi sistemi di aspirazione: (a) cappa semplice; (b) cappa con diffusori. La distribuzione del flusso è più omogenea sulla sezione di aspirazione in presenza di sistemi per la distribuzione del flusso.

Cappa semplice



Cappa con diffusori

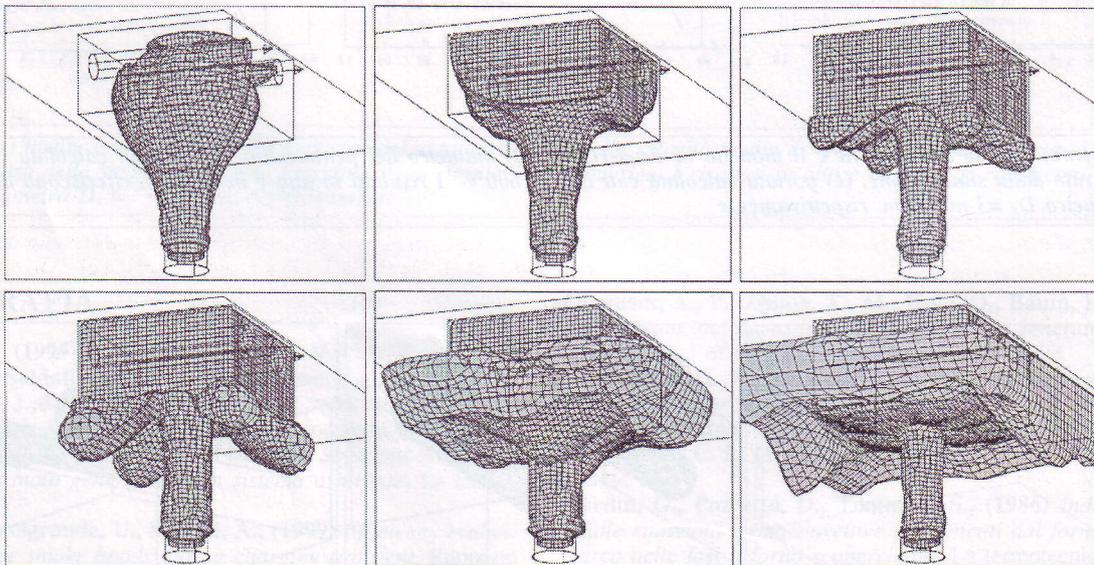


Fig. 14 – Evoluzione del pennacchio termico per la cappa semplice e la cappa con diffusori. Il pennacchio è individuato dalla iso-superficie a temperatura $T=293.2\text{ K}$. Le istantanee del pennacchio corrispondono a $t=15, 20, 25, 30, 50$ e 70 s . La portata di aspirazione della cappa è $Q_a=58\text{ m}^3/\text{s}$.

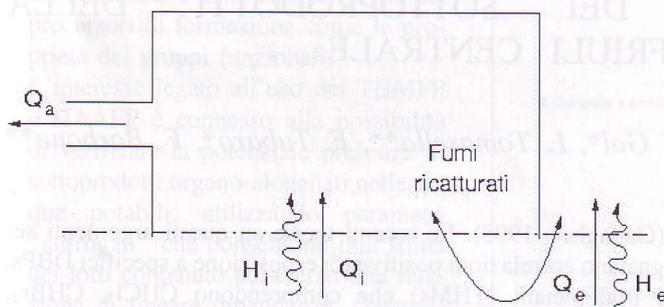


Fig. 15 – Bilancio di massa ed entalpia all'altezza della cappa: Q_a , H_i portata di fumi e flusso entalpico entranti nella cappa; Q_e , H_e portata di fumi e flusso entalpico che sfuggono alla cappa

Tammaro, S., (1987) "Forni elettrici ad arco: emissioni-captazione-abbattimento", Rivista dell'inquinamento, 22-26
 Zonato, C., Vidili, A., Pastorino, R., Defaveri, D., M., (1993), "Plume rise of smoke coming from free burning", Journal of hazardous materials, 32, 69-79

CURRICULA

Alfredo Soldati – E' ricercatore presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Udine. Si è laureato a Pisa in Ingegneria Nucleare ed ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Chimica. I suoi interessi di ricerca sono focalizzati sulla modellistica della fluidodinamica multifase, sia per lo studio di base che per le diverse applicazioni industriali e ambientali. Dopo un'esperienza presso la University of California at Santa Barbara, attualmente è Vice-Direttore del Centro Interdipartimentale di Fluidodinamica e Idraulica dell'Università di Udine, ed è responsabile di un gruppo di ricerca la cui attività è finanziata tramite contratti di ricerca provenienti da fonti istituzionali (MURST, CNR, Regione FVG, ESA) e da fonti private (Robbins & Myers, Alstom Power, Electrolux, ...).

Marina Campolo – E' Postdoc presso il Centro Interdipartimentale di Fluidodinamica e Idraulica dell'Università di Udine. Si è laureata a Udine in Ingegneria delle Tecnologie Industriali ad indirizzo economico organizzativo ed ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Tecnologie Chimiche e Nuovi Materiali.

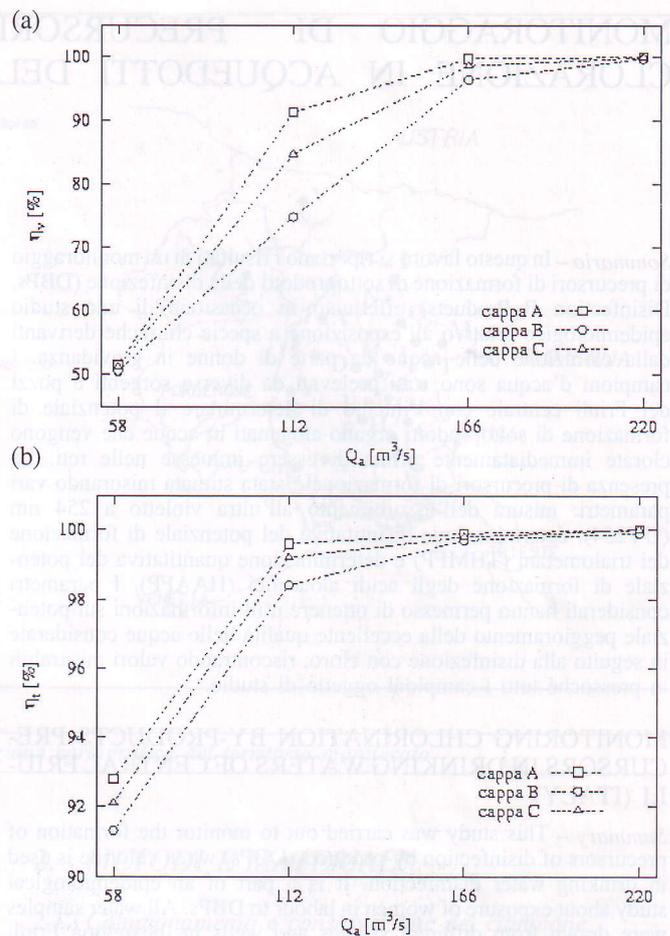


Fig. 16 – Efficienza di captazione delle tre diverse configurazioni di cappa per diversi valori di portata estratta: (a) efficienza volumetrica; (b) efficienza termica. L'efficienza volumetrica è bassa quando la portata estratta è pari $Q_a = 58 m^3/s$. L'efficienza termica relativamente elevata indica che la porzione di fluido che entra nella cappa è quella che contiene i fumi emessi dal forno (più caldi)

Gianfranco Velcich – Laureato in Ingegneria Chimica nel 1972 presso l'Università di Padova, dal 1974 al 1985 ha ricoperto l'incarico di Process Engineer presso la SNIA Engineering, partecipando alla progettazione di impianti chimici ed ausiliari. Dal 1985 è passato in Daneco (ora Alstom Power Italia Daneco Unit), dove si è occupato della progettazione di processo di impianti di trattamento RSU e RSI, degli impianti di depolverazione in ambiente siderurgico e delle attività di R&D. Dal 1994 è responsabile del Gruppo Engineering e dal 1997 coordina le attività di R&D in Alstom Power per la depurazione dell'ambiente in ambito siderurgico.