

Titolo: Simulazioni numeriche di fenomeni termofluidodinamici

Autore: Antonio Dumas e Sante Mazzacane

Abstract: In un precedente lavoro, e` stato affrontato, mediante l'utilizzo di codici numerici, il problema della definizione del campo di moto e di temperatura indotto da una lama d'aria; analizzando lo stesso problema, viene ora effettuato il confronto fra la soluzione numerica di una procedura, che per tempi, costi e livello di approfondimento dei suoi fondamenti teorici e` ottenibile da un progettista, ed una pi` accurata, che necessita pero` di risorse di calcolo oggi non facilmente accessibili.

Simulazioni numeriche di fenomeni termofluidodinamici

di Antonio Dumas e Sante Mazzacane

In un precedente lavoro [1], è stato affrontato, mediante l'utilizzo di codici numerici, il problema della definizione del campo di moto e di temperatura indotto da una lama d'aria; analizzando lo stesso problema, viene ora effettuato il confronto fra la soluzione numerica di una procedura, che per tempi, costi e livello di approfondimento dei suoi fondamenti teorici è ottenibile da un progettista, ed una più accurata, che necessita però di risorse di calcolo oggi allo stesso non facilmente accessibili.

Lo sviluppo di una società industriale è condizionato dal trasferimento della conoscenza dal piano scientifico a quello tecnologico. Tale passaggio, né semplice né indolore, interferisce nello status relativo al mondo della produzione alterando i rapporti sociali ed umani preesistenti. La nuova metodologia incontra così opposizioni al suo uso motivate e supportate dalla solidità delle vecchie utilizzate fino a

Prof. Antonio Dumas, Istituto di Fisica Tecnica dell'Università di Bologna; ing. Sante Mazzacane, Dipartimento di Processi e Metodi della Produzione Edilizia dell'Università di Firenze.

quel momento. Forse l'esempio più illustre è dovuto a Kapitsa (1943), quando descrive la difficoltà nell'introdurre un nuovo metodo di liquefazione dei gas nonostante la dimostrata necessità e convenienza industriale. Prima di qualsiasi altra considerazione però, l'inserimento nel processo produttivo di una qualsiasi nuova procedura è vincolato al soddisfacimento delle condizioni di affidabilità ed accessibilità della stessa e della sua compatibilità con il resto del processo. Riferendoci in particolare alla valutazione dei processi termofluidodinamici che avvengono nei sistemi o apparati termotecnici, si può dire che metodi di calcolo di ampia generalità con elevati livelli di affidabilità

della soluzione siano presenti nella letteratura ormai da circa tre decenni, se per esempio si vuol datare tale risultato con il lavoro di Patankar e Spalding (1972-[4]). In questo lasso di tempo sono state sviluppate altre metodologie, la cui efficacia si estende su uno spettro molto più ampio di situazioni e fenomeni senza alcuna riduzione del loro livello di affidabilità.

La discretizzazione del dominio, passo preliminare alla risoluzione numerica di un'equazione differenziale, diventava enormemente complessa e laboriosa quando veniva effettuata su un dominio tridimensionale, penalizzando, specialmente nei decenni precedenti, lo sviluppo di indagini di tale tipo.

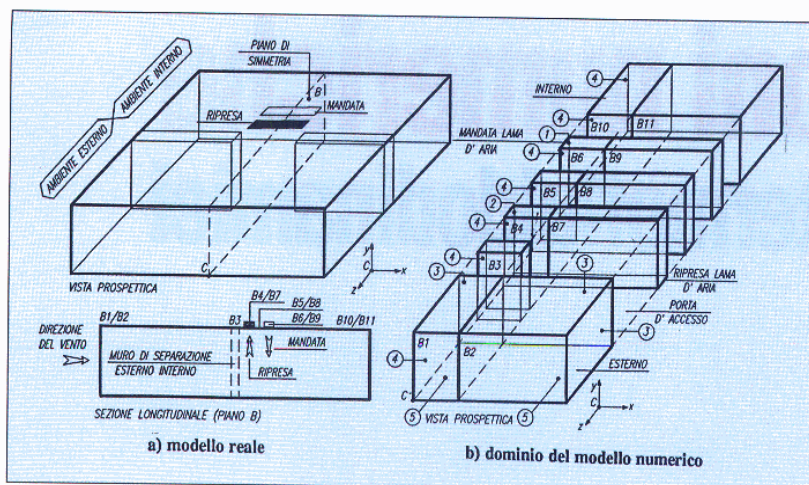


Figura 1 - Rappresentazione del modello reale e del modello numerico

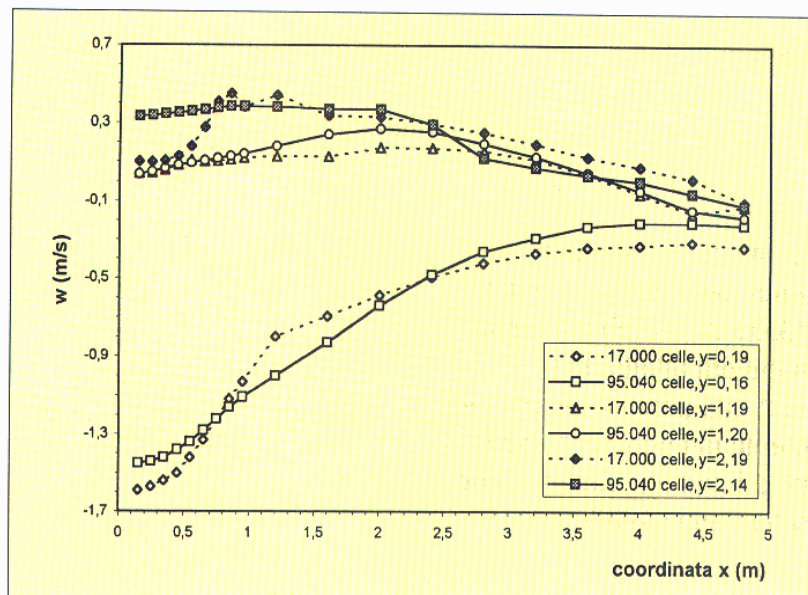


Figura 2 - Andamento della velocità w alle interfacce tra i blocchi 10 e 6 e tra i blocchi 11 e 9

In questi ultimi anni lo sviluppo del software grafico reso possibile dalle nuove potenzialità hardware ha consentito la fattibilità di tale operazione, in modo da ottenere non solo una soluzione in tempi sufficientemente rapidi da essere compatibili con quelli della progettazione in campo civile od industriale, ma anche una restituzione grafica della soluzione di tutto o di parte del dominio di cui si vuol conoscere lo stato o l'andamento, senza aggravio di costi o dilazione di tempo. Tale stato dell'arte è stato messo in rilievo da Dumas e Mazzacane [1993] che hanno mostrato che lo studio del comportamento termofluidodinamico di una lama d'aria non solo è ottenibile utilizzando software grafico tridimensionale

per l'impostazione del problema e per la restituzione dei risultati, ma che è anche proponibile a fini progettuali per il ridotto impegno temporale e finanziario che deve essere sopportato. Infatti la soluzione numerica ottenuta utilizzando le opzioni di default del codice è stata confrontata con i risultati di misure effettuate con precisione di livello industriale ed ha mostrato una discrepanza nella peggiore delle situazioni inferiore al 15%. Tale situazione comporta la modifica del curriculum didattico-formativo di un progettista, ed implica lo sviluppo di procedure e norme che possano accertare e certificare la validità delle soluzioni ottenute attraverso metodi numerici. A tale scopo è necessario in primo luogo avere un quadro di riferimento sulla possibile diversità fra le soluzioni ottenibili a scopo professionale e quelle a scopo scientifico-tecnologico. In questo lavoro, sempre analizzando il comportamento di una lama d'aria, viene effettuato il confronto fra una soluzione che per tempi, costi e livello di approfondimento dei suoi fondamenti teorici è ottenibile da un progettista ed una in cui il livello di discretizzazione del dominio è superiore di circa un ordine di grandezza.

Descrizione del problema

Il problema riguarda lo studio del comportamento di una lama d'aria, con il canale di aspirazione posto sullo stesso lato del getto, al fine di preservare le condizioni termiche di un determinato ambiente dalla presenza di vento e dalla contiguità con altri ambienti a

Tabella 1 - Descrizione delle superfici del dominio di integrazione

N. superficie	Tipologia della superficie	Proprietà caratterizzante	Valori numerici
1	getto lama d'aria	velocità e temperatura note	9,31 m/s; 304 K
2	aspirazione lama d'aria	velocità nota	2,31 m/s
3	superficie libera	pressione nota	0 Pa
4	piano di simmetria	nullo ogni gradiente	-
5	sup. di ingresso del vento	velocità e temperatura note	1,5 m/s; 273 K
sup. esterna	muro solido	velocità e gradiente termico nullo	-
senza numero	adiabatico		

temperatura differente. Il modello fisico-geometrico considerato è raffigurato in Figura 1a. Le condizioni al contorno sono indicate in Tabella 1 per le varie tipologie di superfici che racchiudono il dominio di integrazione, identico a quello presentato da Dumas e Mazzacane in [1]. In Tabella 2 sono indicate le caratteristiche operative della lama d'aria.

Assumendo l'ipotesi di regime stazionario e fluido incompressibile, il sistema di equazioni risultante è costituito da:

- l'equazione di Navier-Stokes;
- l'equazione di conservazione della massa;
- l'equazione di conservazione dell'energia;
- il modello k-ε per il moto turbolento.

Il metodo risolutivo, basandosi sulla esplicitazione nei termini di avvezione-diffusione e sorgente dell'equazione di bilancio di una grandezza scalare, e quindi anche delle componenti del vettore velocità, utilizza la tecnica dei volumi di controllo descritta da Patankar e Spalding (1972 [2]). In particolare gli schemi di differenziazione utilizzati sono quelli di opzione automatica del programma, come indicato dal manuale Cfds (1993) a cui rimandiamo. Analogamente, con l'opzione automatica del risolutore del sistema di equazioni così ottenute viene completato il processo di calcolo.

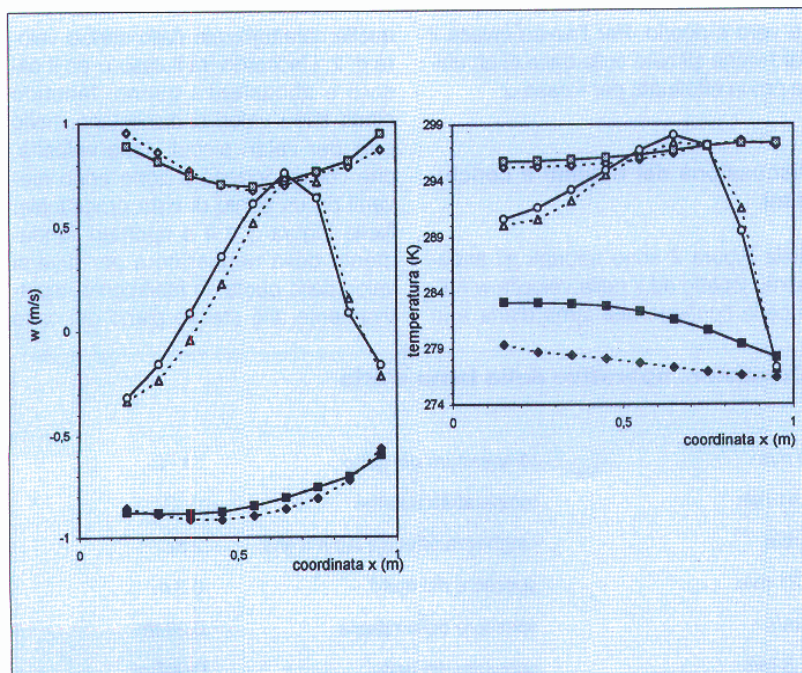


Figura 4 - Andamento della velocità lungo z e della temperatura all'interfaccia tra il blocco 3 e il blocco 1

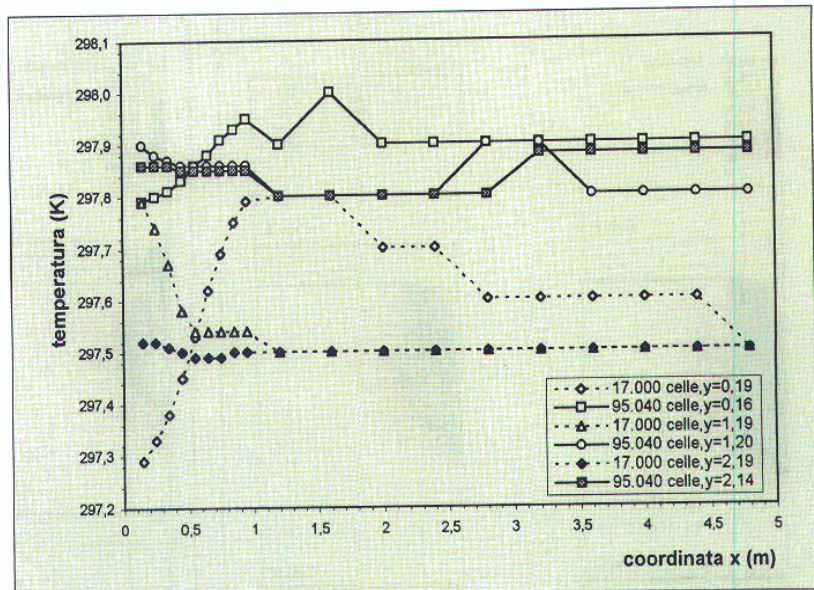


Figura 3 - Andamento della temperatura alle interfacce tra i blocchi 10 e 6 e tra i blocchi 11 e 9

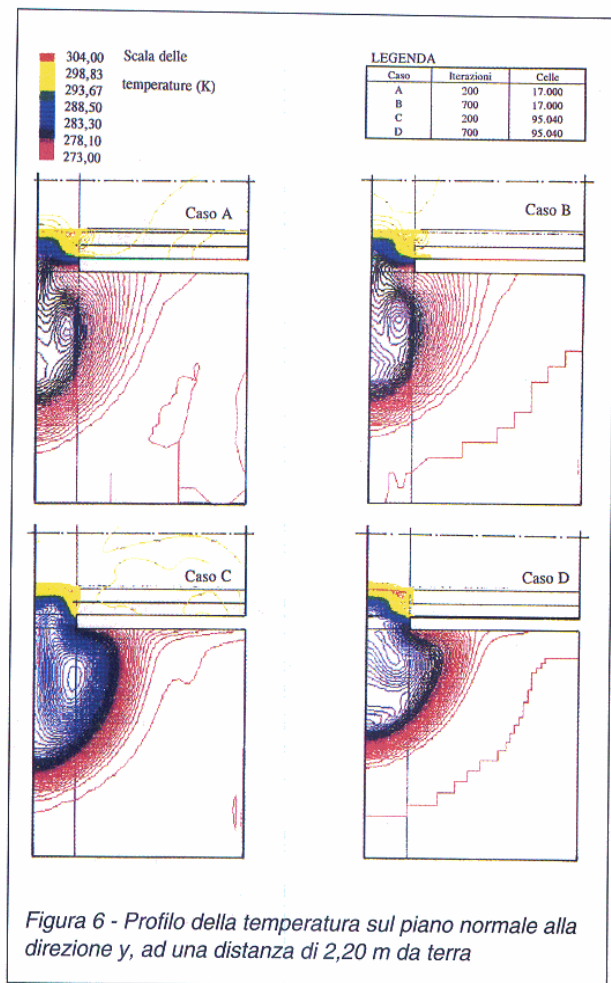
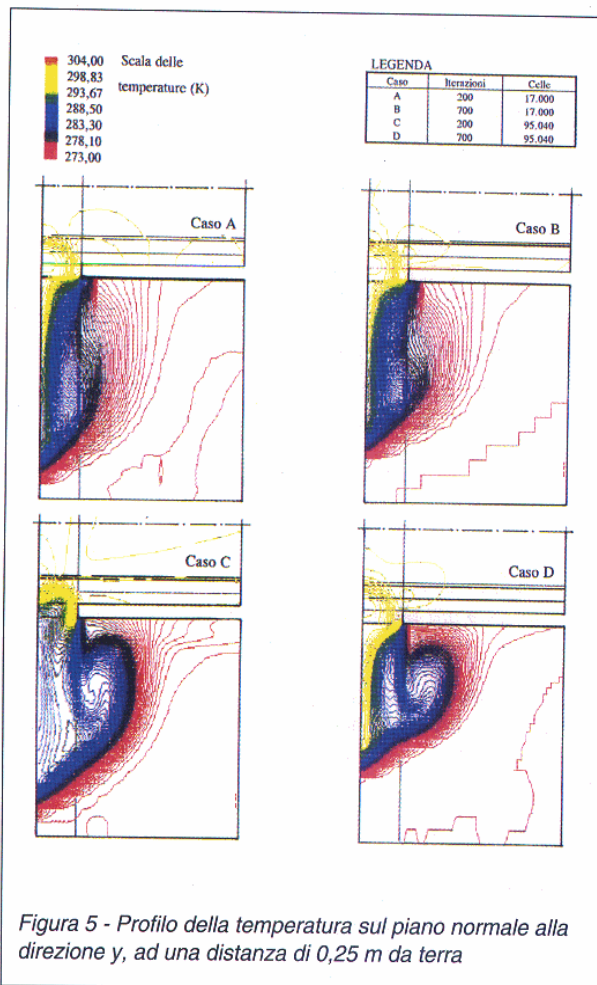
Sia il programma grafico di definizione del dominio di integrazione e delle caratteristiche del reticolo di suddivisione dello stesso (detto Sophia), che quello di restituzione grafica dei risultati (detto Jasper) sono stati installati insieme a FLOW-3D su una workstation INDIGO della Silicon Graphics con 60 Mbytes di Ram. Per la risoluzione del sistema di equazioni risultante ci si è avvalsi anche dell'elaboratore CRAY T3D.

In questo lavoro, utilizzando le potenzialità dell'ultima versione del codice FLOW-3D, Cfds(1993), il dominio è stato suddiviso in blocchi costituiti da 11 parallelepipedi come mostrato in Figura 1b. Per ciascuna delle superfici è indicato in Tabella 1, con un numero, il tipo di condizione al contorno. È da tenere presente che le facce contigue fra un blocco e l'altro sono immateriali e non fanno parte del contorno in quanto parte integrante del dominio. Ciascun blocco può essere discretizzato in modo indipendente dagli altri cosicché la rete può essere resa più fitta nelle zone di maggior variazione delle grandezze, ovvero di maggior interesse progettuale. Tale nuova possibilità non mostra eccessive complicazioni rispetto alla discretizzazione del dominio in un unico blocco.

I due casi presi in esame ed indicati con α e β si diversificano solo per le caratteristiche del dominio numerico e per le dimensioni delle celle elementari in cui sono divisi i blocchi.

In entrambi i due casi la scelta di infittimento della rete è stata influenzata da valutazioni a priori che hanno tenuto conto delle zone di maggiore variazione delle proprietà termofisiche (per esempio il blocco B6) e di quelle di maggior interesse sotto il profilo professionale.

Infatti, l'efficienza di una lama d'aria può essere anche verificata analizzando i valori di temperatura e della componente di velocità lungo l'asse z alle



varie altezze (direzione y) all'interno della zona protetta (blocchi B7÷B11). In Tabella 4 sono esposte per i due casi α e β la loro caratterizzazione (il numero di celle), il numero di iterazioni effettuate, i tempi impiegati dal CRAY T3D e quello di elaborazione SU INDIGO. In entrambi i casi i tempi sono sempre da considerarsi indicativi, in quanto risulta difficoltoso scorporare i tempi di lettura dei dati da quello di elaborazio-

ne vero e proprio. Per l'INDIGO invece il dato viene stimato sulla base di un'unica prova effettuata per il caso α .

Discussione dei risultati e conclusioni

Nella Figura 2 sono riportati gli andamenti rispetto ad x della velocità w nelle celle contigue alla lama d'aria e in

quelle caratterizzate dallo stesso valore di z. L'accordo fra il caso α ed il caso β è abbastanza buono, tenendo conto che i valori si discostano molto solo per valori piccoli della velocità, che corrispondono a zone poco rilevanti da un punto di vista progettuale. Nelle Figure 3 e 4 è riportato l'andamento della temperatura per diversi valori della quota, in riferimento rispettivamente allo stesso piano del caso

Tabella 2 - Condizioni operative della lama d'aria

Velocità del getto (componente y)	-9 m/s	temperatura del getto	31 °C
Velocità del getto (componente z)	2,41 m/s	temperatura esterna	0 °C
Velocità del getto (componente x)	0 m/s	lunghezza effettiva lama d'aria	2 m
Velocità della ripresa (componente y)	2,31 m/s	spessore del muro	0,3 m
Velocità della ripresa (componente x e z)	0 m/s	spessore della ripresa	0,23 m
Velocità del vento (componente z)	-1,5 m/s	spessore del getto	0,067 m
Velocità del vento (componente x e y)	0 m/s	distanza ripresa getto	0,27 m

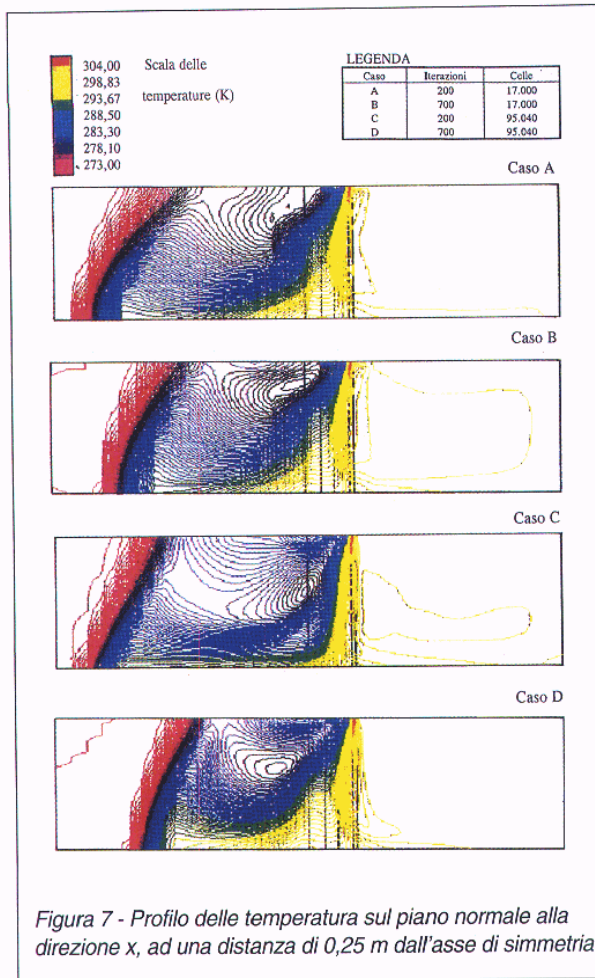


Figura 7 - Profilo delle temperatura sul piano normale alla direzione x, ad una distanza di 0,25 m dall'asse di simmetria

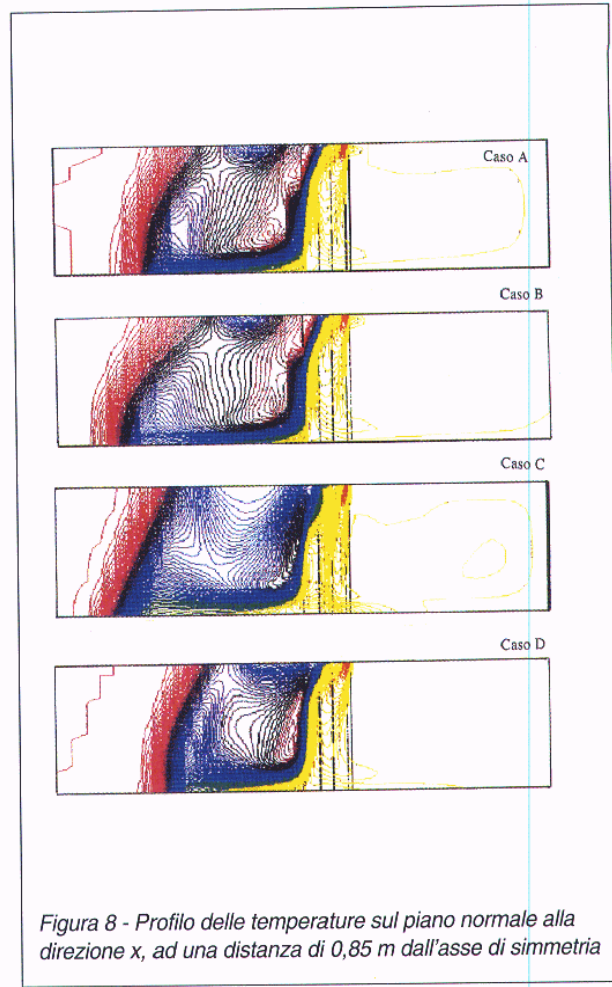


Figura 8 - Profilo delle temperature sul piano normale alla direzione x, ad una distanza di 0,85 m dall'asse di simmetria

Tabella 3 - Caratteristiche del dominio numerico

Blocco	Dimensione dei blocchi			Discretizzazione del dominio						Dimensioni delle celle					
				17.000 celle			95.040 celle			17.000 celle			95.040 celle		
				x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
B1	1	2,5	5	10	20	15	10	24	30	0,10	0,13	0,33	0,10	0,10	0,17
B2	4	2,5	5	10	20	15	40	24	30	0,40	0,13	0,33	0,10	0,10	0,17
B3	1	2,5	0,30	10	20	5	10	24	6	0,10	0,13	0,06	0,10	0,10	0,05
B4	1	2,5	0,23	10	20	5	10	24	6	0,10	0,13	0,05	0,10	0,10	0,04
B5	1	2,5	0,27	10	20	5	10	24	6	0,10	0,13	0,05	0,10	0,10	0,05
B6	1	2,5	0,07	10	20	5	10	24	6	0,10	0,13	0,01	0,10	0,10	0,01
B7	4	2,5	0,30	10	20	5	40	24	6	0,40	0,13	0,06	0,10	0,10	0,05
B8	4	2,5	0,30	10	20	5	40	24	6	0,40	0,13	0,06	0,10	0,10	0,05
B9	4	2,5	0,07	10	20	5	40	24	6	0,40	0,13	0,01	0,10	0,10	0,01
B10	1	2,5	4,40	10	20	5	10	24	30	0,10	0,13	0,88	0,10	0,10	0,15
B11	4	2,5	4,36	10	20	5	40	24	30	0,40	0,13	0,87	0,10	0,10	0,15

Tabella 4 - Prestazioni delle risorse hardware

Caso	N. celle	Iterazioni	Tempo CRAY T3D (s)	Tempo INDIGO (s)
Caso A	17.000	200	300 s	10.500 s
Caso B	17.000	700	800 s	28.000 s
Caso C	95.000	200	1.200 s	42.000 s
Caso D	95.000	700	2.500 s	87.500 s

precedente e all'interfaccia dei blocchi 3 ed 1, che corrisponde alla zona in cui è ubicata la porta di accesso all'ambiente interno. Il confronto mostra un notevole accordo, eccetto che nel profilo di temperatura nella zona più vicina alla ripresa.

La differenza può essere però considerata rilevante solo se inficia una valutazione progettuale. Per individuarne la causa, sono stati riportati nelle Figure 5, 6, 7 ed 8 i campi di velocità e temperatura per i due casi e per due piani orizzontali e due piani verticali paralleli al piano di simmetria e per 200 e 700 iterazioni.

Da un punto di vista progettuale, due sono gli elementi importanti. Il primo, di tipo qualitativo, riguarda la presenza o meno di infiltrazioni di correnti di aria fredda nel volume interno e da tale punto di vista entrambe le soluzioni sono concordi. In nessun caso in questo si riscontra un valore di temperatura più basso di quello ambiente, al contrario di quanto avveniva nella simulazione effettuata da Dumas e Mazzacane in [1], in cui però si rappresentava la parete divisoria fra ambiente interno ed esterno con spessore nullo e non con spessore finito. Ed a tale diversità, che introduce quindi un effetto di bordo, è da addebitare la più elevata efficienza della lama d'aria mostrata in questo caso. Il secondo elemento è di tipo quantitativo ed è collegato alla necessità di definire la potenza entalpica che fuoriesce e non viene recuperata dalla corrente di ripresa e che rappresenta la potenza della batteria termica a servizio della lama d'aria. Nei due casi si riscontra che la portata entalpica attraverso la metà sezione definita dalla porta è per il caso α pari a 12.500 W e per il caso β 8.000 W, il che significa che la soluzione più accurata è del 30% circa inferiore alla prima. Si noti tuttavia che le apparecchiature tecnologiche di questo tipo in commercio sono dimensionate per una

potenza termica di valore circa triplo rispetto a quelli citati, e pertanto la differenza in esame tra i casi in esame appare irrilevante, per lo meno dal punto di vista progettuale. Comunque, tale differenza è addebitabile alla più lenta convergenza della soluzione termica rispetto alla convergenza dinamica. L'esperienza però non è stata condotta solo per verificare l'accordo fra due procedure più o meno raffinate, che si è visto essere buono da un punto di vista progettuale, ma ha anche l'obiettivo di mettere in luce il fatto che oggi l'accessibilità a strumenti di analisi finora riservati a ricercatori si è estesa anche alla fascia di utenza progettista, senza però che vi sia un livello di affidabilità altrettanto elevato. Né attualmente esistono criteri per una definizione normativa della qualità del prodotto, né esiste una struttura, più o meno istituzionale, in grado di fornire una preparazione culturale e non solo tecnica adeguata all'utilizzo di tali strumenti.

Bibliografia

- [1] A. Dumas, S. Mazzacane, *Analisi di fenomeni di ventilazione per ambienti a diversa geometria mediante l'utilizzo di tecniche numeriche*, Atti del 48° Congresso Ati, pp. 51-60 Vol. I, (1993).
- [2] Cfds, *Flow-3D user manual, Rel. 3.2*, Aea Technology, Harwell Laboratory, Oxfordshire, 1993.
- [3] P. Kspitsa, *L'istituto dei problemi fisici*, in *Vestnik Akademii nauk Ssr*, 1943, n.6, p. 75 ripreso in *L'Avvenire della Scienza*, pp. 35-42, Editori Riuniti 1971.
- [4] S.V. Patankar, D.B. Spalding, *A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in threedimensional parabolic flows*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 1787-1792, 1972.

RICHMAC

Bimestrale di Chimica - Processo Chimico e Chimico-Farmaceutico, Impiantistica, Analitica, Biotecnologie e Ambiente.

Organo ufficiale della RICH - Rassegna Internazionale della Chimica e Mac

Editrice Bias - Viale Premuda, 2 - 20129 Milano - Italy
Tel. (+39) 02-55181842 (r.a.) - Fax (+39) 02-55184161