

SIMULAZIONE NUMERICA E ANALISI SPERIMENTALE DEL FLUSSO INTORNO A PROFILI ALARI IMMERSI IN ACQUA

M. Lastella¹, M. Mossa², A.F. Petrillo² & R. Verzicco³

- (1) Dottorando di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari, Via E. Orabona, 4 – 70125 Bari
- (2) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione Ingegneria delle Acque, Politecnico di Bari, Via E. Orabona, 4 – 70125 Bari, e-mail: mossa@poliba.it, petrillo@poliba.it
- (3) Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Gestionale – Sezione Macchine ed Energetica, Politecnico di Bari, Via E. Orabona, 4 – 70125 Bari, e-mail: verzicco@imeapol.poliba.it

SOMMARIO

Il presente lavoro riporta i risultati di un'indagine numerica e sperimentale sul campo di moto generato da un profilo alare NACA 0012 immerso in una corrente. Il codice utilizzato, tramite l'implementazione del metodo dei contorni immersi, l'impiego di griglie strutturate cartesiane e del metodo Runge-Kutta con basso impiego di memoria, ha consentito di svolgere le simulazioni in breve tempo e con basso impiego di risorse. Le velocità e vorticità nel modello fisico sono state misurate con sistemi PIV e LDA. Nel complesso, l'andamento macroscopico delle strutture vorticosi e delle frequenze del flusso rilevate sperimentalmente sono ben interpretate dal modello matematico.

1. INTRODUZIONE

In questo lavoro si presentano i risultati dell'analisi del campo di moto, generato dalla presenza di un profilo alare NACA 0012 in un fluido newtoniano, ottenuti mediante un'indagine sia numerica che sperimentale. L'indagine numerica si è sviluppata attraverso una simulazione bidimensionale del campo di moto generato dal profilo a diversi angoli d'attacco. Si è analizzata, in particolar modo, l'influenza dell'angolo d'attacco sui valori di portanza e resistenza del profilo (*Wadlin et al., 1952*) e sulla frequenza di ciclicità dei fenomeni vorticosi (*Mossa & Petrillo, 2002*). In campo sperimentale, invece, si sono effettuate, in una prima fase, diverse misure al fine di valutare l'influenza di fenomeni presenti nel modello fisico e non rappresentati in quello matematico, che potessero inficiare il corretto confronto tra simulazione numerica e dati di laboratorio. In un secondo momento, valutati questi effetti, si è proceduto alla determinazione delle ottimali condizioni sperimentali da realizzare.

Il confronto numerico-sperimentale si è articolato in tre diverse fasi. In una prima fase, si è proceduto a comparare qualitativamente le curve di isovorticità ottenute numericamente con le linee di fumo rese visibili in canale attraverso l'uso di un tracciante. In una seconda fase, si è attuato un confronto quantitativo tramite le misure ottenute con l'impiego della strumentazione PIV (*Particle Image Velocimetry*). In più regioni del campo di moto, si sono confrontati i valori di vorticità ottenuti dalla simulazione nume-

rica con quelli misurati sperimentalmente. In ultimo, tramite l'impiego di sonde numeriche e misurazioni LDA (*Laser Doppler Anemometry*) si è proceduto al confronto delle frequenze del flusso. Questo studio, oltre a fornire informazioni sul campo di moto generato dal profilo alare con numero di Reynolds uguale a 1000, ha consentito, tramite il confronto numerico-sperimentale, di verificare il codice di calcolo utilizzato e di valutare gli effetti della turbolenza del flusso nel canale sperimentale. Tramite l'applicazione dell'analisi dimensionale, i risultati del presente lavoro possono essere estesi a profili in similitudine di Reynolds con quello esaminato.

2. IL CODICE DI CALCOLO

Il codice di calcolo utilizzato in questo lavoro è stato sviluppato al fine di simulare numericamente il flusso incomprimibile tridimensionale attorno a corpi di qualsiasi geometria e, in particolare, di analizzare il flusso su schiere di profili alari (*Verzicco & Orlandi, 1996*). Ottimi risultati in termini di accuratezza e velocità di calcolo sono stati ottenuti per simulazioni condotte con numeri di Reynolds del profilo limitati a poche migliaia; viceversa, per flussi in regime turbolento, la simulazione diretta effettuata dal codice, tramite l'integrazione spazio-temporale delle equazioni di Navier-Stokes, richiede una griglia molto fitta che aumenta notevolmente i tempi computazionali. Una possibile soluzione a questo tipo di inconveniente, risiede nell'implementazione di opportuni modelli di turbolenza o, più banalmente, nell'utilizzo di processori di prestazioni più elevate.

Nell'applicazione del presente lavoro, si è utilizzato il codice per lo studio bidimensionale del flusso attorno ad un profilo alare NACA 0012, la cui geometria è stata assegnata per punti. Si riportano in sintesi alcune caratteristiche del codice:

- la discretizzazione spaziale del dominio di calcolo è stata effettuata tramite il metodo alle differenze finite, con una griglia strutturata cartesiana con locazione sfalsata delle variabili;
- l'assegnazione delle condizioni al contorno è stata condotta tramite il *metodo dei contorni immersi*, definendo i valori della forzante f sui nodi della griglia più vicini al profilo tramite il metodo di *forzamento diretto* e, successivamente, interpolando linearmente le velocità sui punti del profilo;
- la discretizzazione delle equazioni di Navier-Stokes è stata condotta con un metodo *fractional-step*, in combinazione con un metodo misto Runge-Kutta al terzo ordine per il termine convettivo e Crank-Nicolson per il termine viscoso.

Maggiori dettagli sul metodo numerico si possono trovare in *Fadlun et al. (2000)*.

3. L'APPARATO SPERIMENTALE

L'impianto sperimentale è costituito da un canale lungo 24.40 m, di sezione trasversale rettangolare larga 0.40 m e alta 0.50 m, con le pareti in plexiglas (figura 1). Le esperienze sono state condotte con un profilo alare NACA 0012 con corda di 5 cm e con altezza dell'acqua in canale di 36 cm.

Per la determinazione del profilo di velocità all'interno del canale sperimentale e per l'analisi sul modello fisico delle frequenze del flusso è stato utilizzato un sistema di misura LDA. L'intero sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati è noto come FlowTool della Dantec. Il sistema LDA è del tipo a fibre ottiche, in modalità *backscat-*

tering, bidimensionale a quattro raggi, con lunghezze d'onda di 488.0 nm e 514.5 nm. Per la misura delle componenti di velocità in un'area del campo di moto generato del profilo si è utilizzato un sistema PIV della Dantec, costituito da un laser Continuum Minilite pulsato a doppia cavità Nd:YAG, una telecamera *Double Image 700* con CCD di 768x484 pixel con un obiettivo *Nikon 60 mm*, un processore di segnale PIV 2000 basato sulla crosscorrelazione, completo dei controllori di sincronizzazione delle periferiche, calcolatore di processo con scheda di interfaccia National Instruments AT-GPIB/TNT .

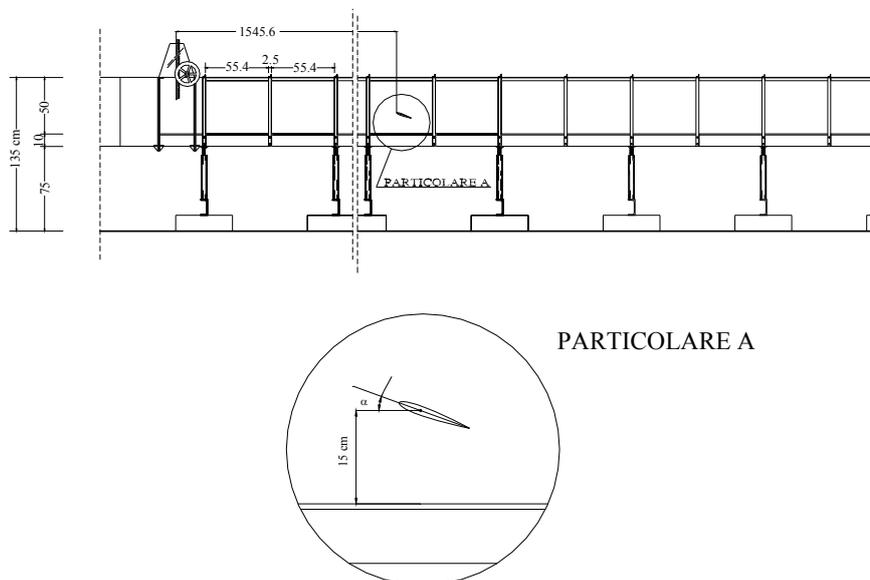


Figura 1. Vista laterale e particolari dell'impianto sperimentale.

4. RISULTATI

4.1 Confronto qualitativo numerico-sperimentale

Il confronto tra le curve di isovorticità ottenute dal modello numerico e le linee di fumo del modello fisico, effettuato in diversi istanti temporali, ha prodotto informazioni utili per un'analisi qualitativa di un'ampia porzione del campo di moto. In figura 2 le curve di isovorticità derivano dai risultati delle simulazioni numeriche condotte con un angolo d'attacco di 20° , mentre le linee di fumo nel canale sono state ottenute utilizzando come tracciante la rodamina B, resa fluorescente da una lama laser con lunghezza d'onda di 532 nm. E' importante precisare che le linee di fumo non seguono in realtà l'andamento delle linee di isovorticità, ma piuttosto sono legate alle velocità dei filetti fluidi che evidenziano. Le linee di fumo, infatti, tendono a concentrarsi in zone con bassa vorticità e velocità di deformazione (Verzicco, 1996). Si ricorda, inoltre, che nei liquidi la diffusività degli scalari è circa mille volte più piccola della viscosità cinematica e questo comporta che le linee di fumo visualizzano strutture molto sottili, che non hanno alcun corrispettivo in termini di vorticità. E' da notare che nel caso bidimensionale risulta $\omega \cdot \nabla \mathbf{u} = 0$, essendo ω la vorticità e \mathbf{u} la velocità, e quindi le differenze tra vorticità e scalare passivo sono soltanto legate al numero di Schmidt, mentre nel caso tridimensionale il

valore non nullo del *vortex stretching* rende ancor meno marcata la correlazione tra curve di isovorticità e linee di fumo. Pertanto, per l'esperienza condotta, è possibile effettuare il confronto qualitativo tra linee di fumo sperimentali e linee di isovorticità della simulazione numerica (figura 2). Durante la prova, la portata è stata di 3.2 l/s, la velocità media in canale V è stata di 2.2 cm/s, la temperatura dell'acqua 15.4°C, il numero di Reynolds del profilo alare $Re=Vc/\nu$ uguale a 973, essendo c la corda del profilo e ν la viscosità cinematica dell'acqua alla temperatura misurata, il numero di Reynolds del flusso in canale $Re_c=10000$, ossia il flusso in canale era turbolento. Le simulazioni numeriche sono state condotte con un valore di Re del profilo uguale a 1000, trascurando gli effetti della turbolenza, presenti nel modello fisico, del flusso che investiva il profilo.

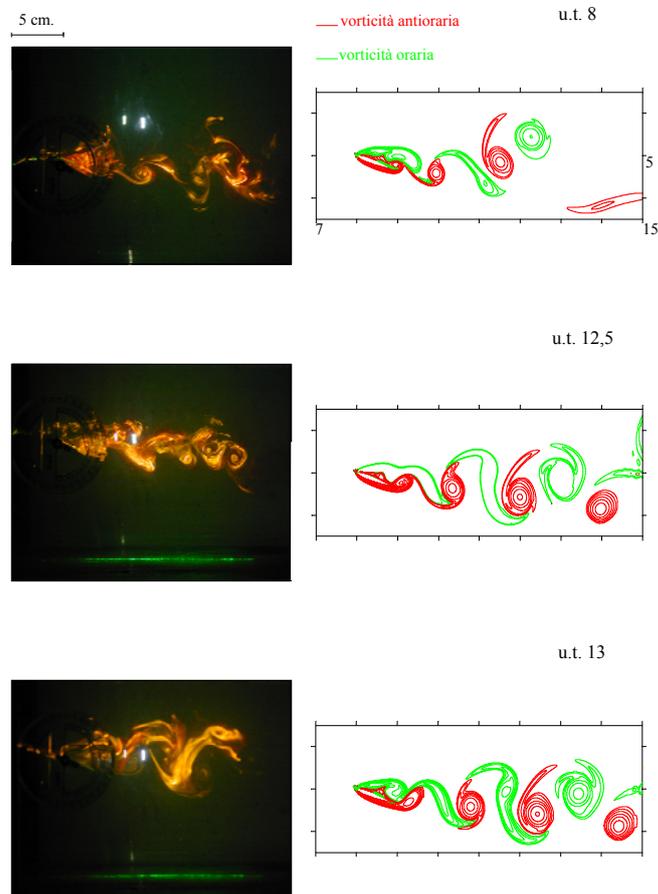


Figura 2. Confronto tra linee di fumo (sperimentali) e linee di isovorticità (numeriche).

4.2 Confronto quantitativo numerico-sperimentale

Nel seguito si esaminerà una porzione del campo di moto, effettuando il confronto tra le curve di isovorticità ottenute sperimentalmente tramite l'impiego della strumentazione PIV e quelle ottenute tramite la simulazione numerica (figura 3).

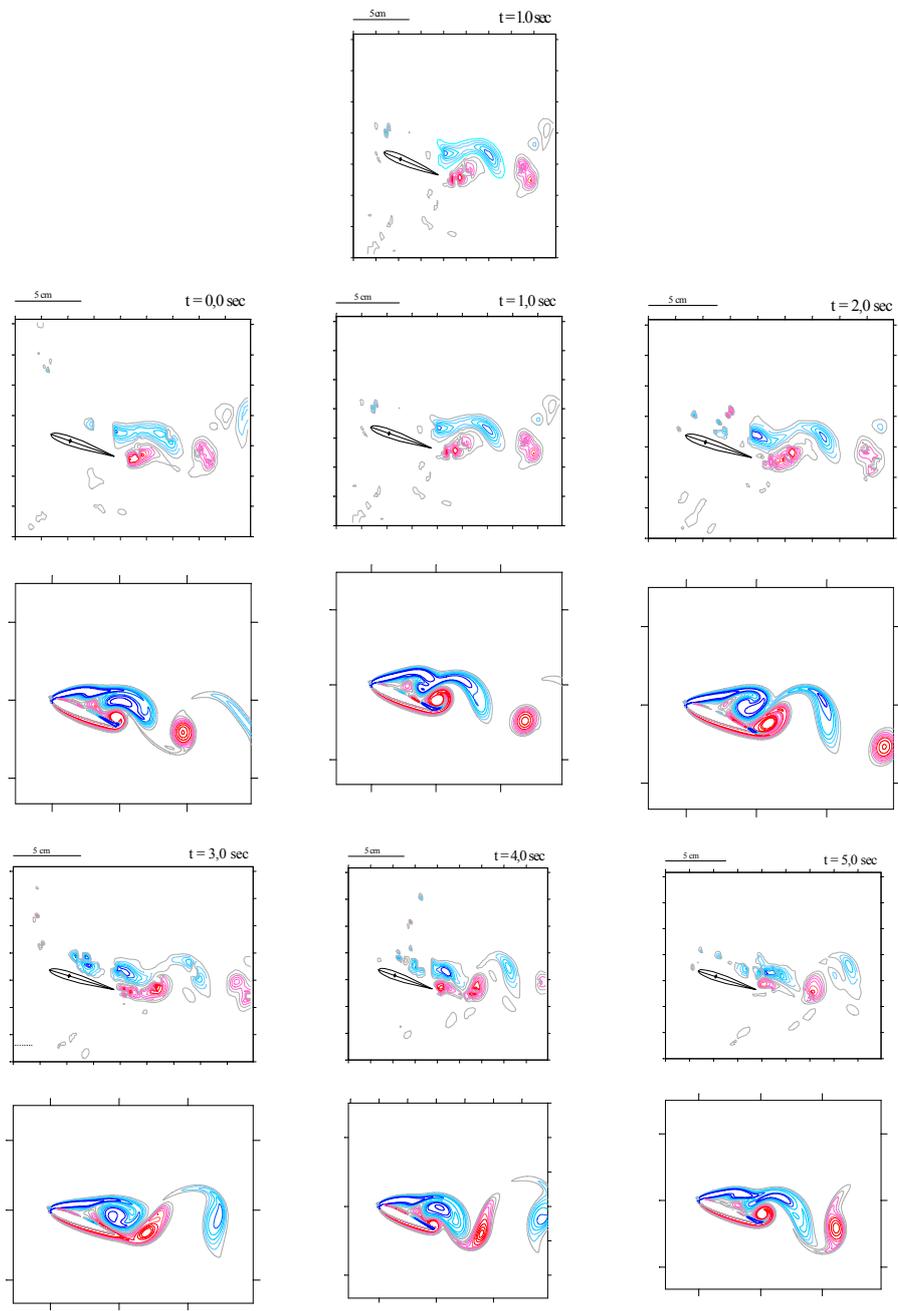


Figura 3. Tipica immagine elaborata dal sistema PIV e confronto tra le curve di isovorticità sperimentali (sopra) e quelle della simulazione numerica (sotto).

Nell'analisi sperimentale l'aumento dell'estensione del campo di moto indagato comporta una riduzione del potere risolutivo della strumentazione PIV. Ciò determina una mancata rilevazione delle più minute strutture vorticose dovute alla turbolenza nel canale.

Le strutture della figura 3 ottenute sperimentalmente hanno evidenziato andamenti molto simili a quelli ottenuti numericamente. In questo studio, i campi di moto indagati hanno sempre conservato un'estensione tale da fornire misure accurate. Le misure sperimentali non hanno consentito la determinazione delle curve di isovorticità immediatamente prossime al profilo, a causa degli effetti di rifrazione e riflessione della lama laser, dovuti alla presenza del profilo stesso (si veda la foto di figura 3). Il confronto dell'evoluzione temporale delle strutture vorticose è stata ottenuta convertendo i risultati adimensionali della simulazione numerica in unità di misura coerenti con l'analisi sperimentale. Per approfondire più dettagliatamente l'aspetto dell'evoluzione temporale del fenomeno sono state analizzate le frequenze del flusso generato dal profilo.

4.3 Confronto numerico-sperimentale delle frequenze del flusso

Un confronto completo fra risultati numerici e sperimentali ha richiesto lo studio in frequenza dei fenomeni non stazionari. Immediatamente a valle del profilo si sono scelti tre punti del campo di moto, nei quali si è proceduto all'analisi locale, numerica e sperimentale, delle frequenze del flusso (si veda la figura 4 per la loro posizione rispetto al profilo alare).

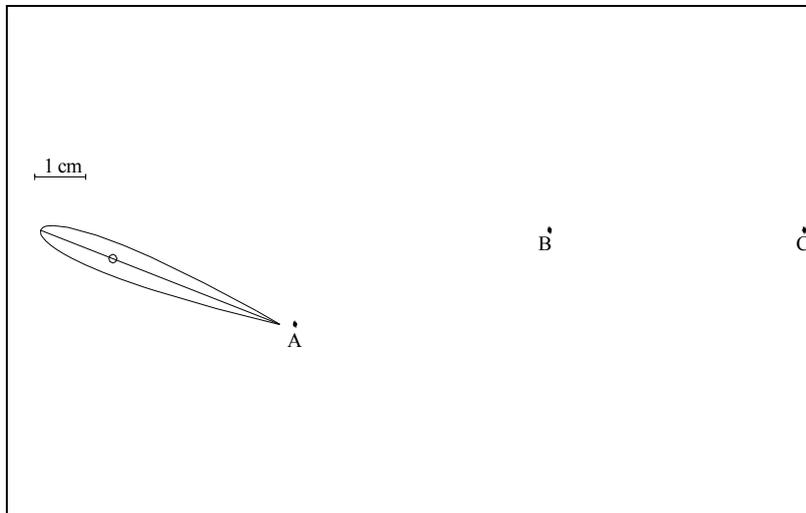
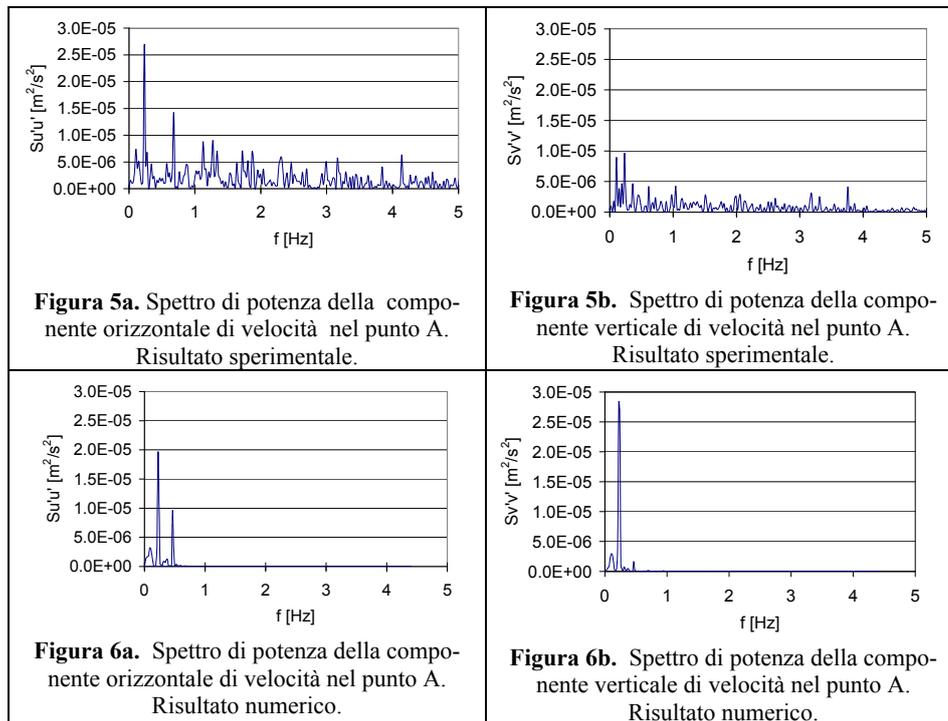


Figura 4. Posizione delle sonde numeriche e dei punti di misura.

L'analisi sperimentale si è avvalsa, per lo studio in frequenza, della strumentazione LDA che ha permesso di rilevare, nei punti del campo di moto corrispondenti a quelli in cui sono state introdotte le sonde numeriche, i valori delle componenti locali di velocità. La presenza di turbolenza nel canale è causa, soprattutto alle più alte frequenze, delle differenze tra gli spettri di potenza delle componenti di velocità della simulazione numerica e quelli del modello fisico. Gli spettri di figura 5a, 5b, 6a, 6b, 7a, 7b, 8a e 8b (gli altri spettri non sono riportati per ragioni di brevità) evidenziano una periodicità del

flusso sia nel modello matematico che in quello fisico. La piccola differenza tra la periodicità ricavata dall'analisi numerica e quella sperimentale risiede nelle differenti condizioni al contorno nello studio del campo di moto generato dal profilo. Dallo spettro sperimentale si osserva che l'energia associata al fenomeno è più elevata rispetto al caso numerico; questo è dovuto alla presenza delle componenti turbolente del flusso che investe il profilo, le quali causano un contributo aggiuntivo in termini di potenza.

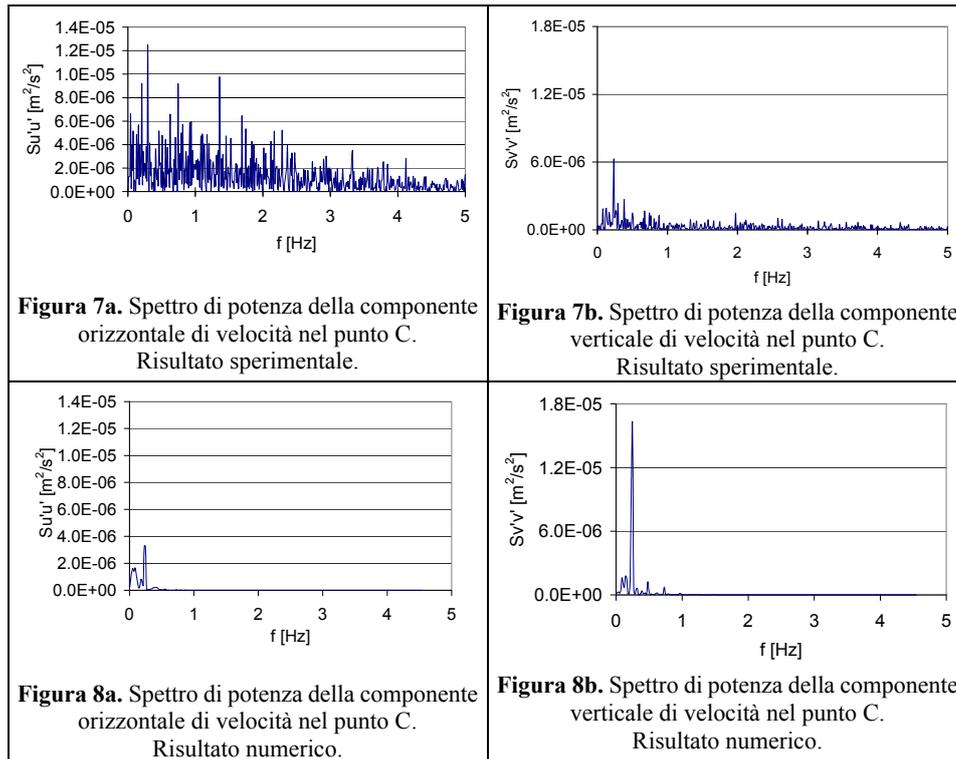


5. CONCLUSIONI

Il codice utilizzato, tramite l'implementazione del metodo dei contorni immersi, l'impiego di griglie strutturate cartesiane e del metodo Runge-Kutta con basso impiego di memoria, ha consentito di svolgere le simulazioni in breve tempo e con basso impiego di risorse, raggiungendo risultati altrimenti non ottenibili a meno di pesanti complicazioni. Le informazioni ricavate dal confronto qualitativo tra curve di isovorticità e linee di fumo, rese visibili con uso della rodamina B e una lama laser, hanno confermato la corretta simulazione dell'intero campo di moto.

Le differenze maggiori tra risultati numerici e sperimentali sono da ricercarsi nella turbolenza del flusso all'interno del canale. Nel complesso, però, considerando l'andamento macroscopico delle strutture vorticosi rilevate sperimentalmente con un sistema PIV, si nota una corrispondenza tra i risultati del modello matematico e quelli del modello fisico, mascherata essenzialmente, come già detto, dalla turbolenza presente nel flusso in canale, che rende differenti i risultati numerici e sperimentali su piccola scala. Per quanto riguarda le frequenze del flusso, i valori determinati con l'impiego di sonde

numeriche e quelli con la strumentazione LDA, hanno dato risultati praticamente sovrapponibili a meno delle interferenze generate dalla turbolenza.



I valori di frequenza dei picchi nello spettro di potenza delle componenti di velocità numeriche e sperimentali sono comparabili soprattutto nei punti più prossimi al profilo. Nei punti più a valle le differenze di frequenza dei picchi sono da imputare alla turbolenza del flusso in canale non simulata dal codice.

BIBLIOGRAFIA

- Fadlun, E.A., Verzicco, R., Orlandi, P. & Mohd-Yusof, J. Combined immersed-boundary finite-difference methods for three-dimensional complex flow simulation, *J. of Comp. Phys.*, 161, 35, 2000.
- Mossa, M. & Petrillo, A.F. Studio sperimentale del frangimento spilling stazionario, *XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche*, Potenza, 16-19 settembre, 2002.
- Verzicco, R. & Orlandi, P. A finite-difference scheme for three dimensional incompressible flows in cylindrical coordinates, *J. of Comp. Phys.*, 123, 403-412, 1996.
- Wadlin, K.L., Shuford, C.L. & McGeheejohn, R. A theoretical and experimental investigation of the lift and drag characteristics of hydrofoils at subcritical and supercritical speeds, National Advisory Committee for Aeronautics, 1232, 661-682, 1952.
- Verzicco, R. Dinamica dei vortici ad anello, *Bibl. Naz. Roma* 96/1528 e *Bibl. Naz. Firenze TDR* 1996 001597, 1996.