

# RILIEVI DI VELOCITÀ IN REGIME DI CONVEZIONE NATURALE MEDIANTE TECNICA “PULSED DOPPLER ULTRASAUOND” IN UNA CAVITÀ CONTENENTE UNA SORGENTE TERMICA

Giovanni S.Barozzi, Alberto Muscio, Luca Tarozzi\*

Dip. di Ingegneria Meccanica e Civile, Università di Modena e Reggio Emilia  
Via Vignolese 905/B – 41100 Modena, Italia  
\*Tel. 059-2056101, Fax. 059-2056126, e-mail: tarozzi.luca@unimore.it

## SOMMARIO

Oggetto del presente studio è l'analisi sperimentale del campo di moto in regime di convezione naturale all'interno di una cavità parallelepipedica contenente un fluido, in cui è immersa una sorgente termica orizzontale di forma cilindrica. Per la misura della velocità del fluido si utilizza la tecnica “Ultrasound Pulsed Doppler Velocimetry” (UPDV), che permette di effettuare misure non intrusive e, in linea di principio, di ricostruire l'intero campo di moto. L'applicabilità della tecnica non è ancora stata verificata a fondo in regimi di convezione naturale.

Si descrivono in questo lavoro l'apparato sperimentale che è stato realizzato, la procedura di rilevazione della velocità e quella di ricostruzione del campo di moto su una sezione verticale mediana della cavità parallelepipedica. Le principali criticità poste dalla tecnica di misura e dal particolare ambito di applicazione vengono evidenziate attraverso la presentazione dei risultati sperimentali ottenuti. Infine, si confrontano i risultati sperimentali con quelli forniti da simulazioni numeriche CFD.

## INTRODUZIONE

Il campo di moto attorno ad una sorgente termica cilindrica, in regime di convezione naturale, ed i processi di scambio termico ad esso associati sono già stati oggetto di studi estensivi in situazioni in cui la sorgente è immersa in un mezzo infinito. In letteratura sono proposte al riguardo numerose correlazioni empiriche fra il numero di Nusselt medio relativo alla superficie della sorgente termica cilindrica ed i numeri di Grashof, Rayleigh e Prandtl [1,2]. È stata anche indagata sperimentalmente la transizione da regimi di convezione naturale laminare a regimi turbolenti, osservando il meccanismo di sviluppo della turbolenza ed individuando le zone di separazione lungo la sorgente cilindrica [3].

Situazioni in cui la sorgente termica è immersa in un fluido contenuto in una cavità chiusa, oppure confinato da pareti piane parallele, verticali o orizzontali, sono state studiate in maniera molto meno approfondita. Gli studi hanno peraltro evidenziato che la presenza delle pareti di confinamento influenza significativamente lo scambio termico. Ad esempio, si è verificato che esistono configurazioni geometriche in cui lo scambio termico risulta incrementato rispetto al caso di un fluido in campo infinito [4,5]. Nel caso di confinamento tra pareti verticali, è stata anche stabilita una corrispondenza tra la natura del flusso attorno alla sorgente, la distanza fra sorgente e pareti di confinamento ed il numero di Rayleigh associato al problema [6]. I casi finora analizzati in profondità sono tuttavia limitati, ed esiste quindi spazio ed interesse per ulteriori e più approfondite ricerche.

Oggetto di questo studio è l'analisi sperimentale del campo di moto in regime di convezione naturale all'interno di una cavità parallelepipedica contenente un fluido allo stato liquido (acqua), in cui è immersa una sorgente termica orizzontale di forma cilindrica. L'analisi teorica e sperimentale di casi test di questo genere si inserisce in un filone di ricerca avviato da lungo tempo dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Civile dell'Università di Modena e Reggio Emilia, incentrato sullo studio dei fenomeni convettivi e sull'ottimizzazione dei

dispositivi che operano in convezione naturale e mista. L'interesse per la convezione naturale in cavità trova in generale giustificazione nelle problematiche e nei requisiti sempre più stringenti che si pongono nello sviluppo di sistemi di scambio termico e di dissipazione del calore passivi, vale a dire basati sulla convezione naturale. Questi, rispetto ai sistemi a convezione forzata, presentano vantaggi in termini di affidabilità, ingombro ed emissione acustica, oltre che la possibilità di funzionamento in situazioni di emergenza come quella di sospensione dell'alimentazione elettrica.

Tra le varie metodologie di misura della velocità dei fluidi, per questo studio è stata prescelta la tecnica “Ultrasound Pulsed Doppler Velocimetry”. La tecnica, che permette di rilevare molto rapidamente l'intero profilo di velocità secondo l'asse della sonda del velocimetro, appare adatta al problema in esame, anche se, dalla letteratura, si rileva che la sua applicabilità a regimi di convezione naturale non è ancora stata verificata a fondo [7].

## LA TECNICA DI MISURA

Le misure di velocità mediante tecnica “Ultrasound Pulsed Doppler Velocimetry” (UPDV) si basano sull'effetto Doppler, per il quale un'onda acustica intercettata e diffusa da particelle in movimento è soggetta ad una variazione di frequenza proporzionale alla velocità delle particelle. La tecnica permette di rilevare molto rapidamente, quasi in tempo reale, l'intero profilo di velocità lungo una direzione prestabilita, allineata con l'asse della sonda del velocimetro. In particolare, viene rilevata la componente della velocità del fluido parallela all'asse della sonda. La misura è di tipo non intrusivo ed è realizzabile anche in un mezzo non trasparente. Tutto ciò costituisce un notevole vantaggio dal punto di vista dello studio da effettuare, in quanto, utilizzando un apparato a sonde multiple e spostandole lungo le pareti della cavità considerata, è in teoria possibile ricostruire l'intero campo di moto all'interno della cavità stessa.

La tecnica UPDV è già stata applicata con soddisfacenti risultati in diverse applicazioni [7]. In particolare, si è dimostrata adatta a rilevare velocità anche in fluidi in cui altre tecniche quali PIV, LDV, filo caldo o metodi di semplice visualizzazione delle linee di corrente non sono generalmente applicabili [8-10].

Nei velocimetri UPD una sonda immette nel fluido un pacchetto di onde acustiche con frequenza prestabilita  $f_e$ . Immediatamente dopo l'emissione, la sonda passa in modalità ricezione. Ad incrementi di tempo predefiniti  $\Delta t$  le onde acustiche riflesse dalle particelle in moto con il fluido sono ricevute dalla sonda. La sonda rimane in questa modalità di ricezione per un tempo prestabilito prima di ritornare ad emettere un successivo pacchetto di onde acustiche. Il tempo che intercorre fra l'emissione di un pacchetto di onde acustiche e il successivo è costante.

A causa dell'effetto Doppler, la frequenza  $f_r$  delle onde acustiche riflesse dalle particelle varia di una quantità  $f_d = (f_e - f_r)$  proporzionale alla velocità  $v$  delle particelle stesse (frequenza Doppler). Se  $c_s$  è la velocità del suono nel mezzo e  $\gamma$  è l'angolo formato dall'asse della sonda e dalla traiettoria di una particella, la relazione fra  $f_d$  e la componente della velocità della particella lungo l'asse della sonda,  $u = v \cos(\gamma)$ , è data dalla formula seguente [11]:

$$v \cos(\gamma) = \frac{c_s f_d}{2 f_e} \quad (1)$$

Si risale alla posizione delle particelle sapendo che, se un'onda acustica riflessa (eco) è registrata dalla sonda dopo un lasso di tempo  $\Delta t$  dalla sua emissione, allora la distanza,  $d$ , della particella che ha causato la riflessione dalla sonda è data dalla relazione [11]:

$$d = \frac{c_s \Delta t}{2} \quad (2)$$

Risulta in questo modo possibile misurare, nell'arco di un brevissimo intervallo temporale scandito ad incrementi regolari  $\Delta t$ , la velocità di tutte le particelle che si trovano lungo l'asse della sonda e che sono state investite dal fascio di ultrasuoni.

Dalle relazioni precedenti si può dedurre che esiste una massima profondità di misura, legata alla frequenza  $f_{PRF}$  con cui si ripete l'emissione dei pacchetti di ultrasuoni (*Pulse Repetition Frequency*) dalla seguente relazione [11]:

$$P_{\max} = \frac{c_s}{2 f_{PRF}} \quad (3)$$

Esiste inoltre una massima velocità rilevabile, che può essere determinata sulla base del teorema di Nyquist del campionamento, secondo cui la massima frequenza Doppler  $f_d$  misurabile è la metà della frequenza con cui si ripete l'emissione di pacchetti di ultrasuoni,  $f_{PRF}$ . Se ne desume che, per un dato valore di  $f_{PRF}$ , la massima velocità misurabile risulta pari a [11]:

$$v_{\max} = \frac{c_s f_{PRF}}{4 f_e} \quad (4)$$

Nell'applicare la tecnica UPDV alla misura della velocità di un fluido occorre anche verificare che siano rispettate due

condizioni [12]. Innanzitutto, la misura è possibile solo se sono presenti, disperse nel fluido ed in moto solidale con questo, particelle aventi una impedenza acustica diversa da quella del fluido stesso, ad esempio impurità o bolle, e che quindi riflettano le onde acustiche emesse dalla sonda. Solitamente ciò obbliga ad aggiungere al fluido un opportuno tracciante, tale che le particelle che lo costituiscono si muovano con la stessa velocità del fluido. Tale effetto è tanto più verificato quanto più le particelle sono fini e ben disperse nel fluido. Inoltre, le variazioni spaziali della velocità di propagazione del suono, collegate alle variazioni spaziali della densità del fluido, devono essere inferiori al limite di errore dello strumento.

In ultimo, va considerato che un'importante limitazione all'utilizzo della tecnica è data dall'insorgere di errori significativi nelle misure in prossimità di pareti solide [9,11,13]. In alcuni casi è però possibile applicare specifici algoritmi di correzione [14].

## APPARATO SPERIMENTALE

I principali componenti dell'apparato sperimentale sono schematizzati in fig. 1.

L'apparato comprende innanzitutto la cavità in cui si vogliono innescare e studiare i fenomeni convettivi, nella quale sono contenuti il fluido di lavoro ed un elemento riscaldante cilindrico immerso nel fluido stesso. La cavità ha forma di parallelepipedo con sezione quadrata e dimensioni interne 60 mm x 60 mm x 184 mm. Una dimensione della cavità è quindi nettamente prevalente sulle altre, in modo da ottenere nella sezione mediana un campo di velocità bidimensionale, non influenzato dagli effetti di bordo. A verifica di ciò, sono state svolte analisi preliminari mediante il codice CFD commerciale Fluent di Fluent. Inc., ver. 6.1.

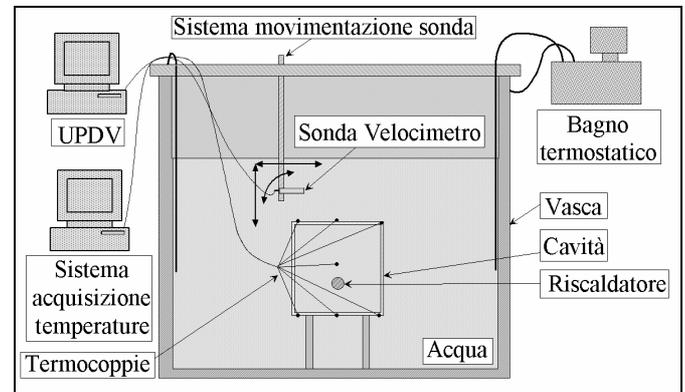


Figura 1. Schema dell'apparato sperimentale.

Le pareti della cavità sono realizzate in PoliVer, un laminato termoplastico estruso in resina stirolica, ed hanno uno spessore di 2 mm. L'utilizzo di un materiale plastico piuttosto che di uno metallico come l'alluminio o l'acciaio è imposto dall'esigenza di minimizzare l'impedenza acustica delle pareti, onde poter posizionare le sonde fuori della cavità ed effettuare le misure attraverso le pareti stesse. La scelta effettuata garantisce infatti che un quantitativo minimo dell'energia sonora sia assorbito dalle pareti della cavità, con benefici in termini di qualità della misura [11].

L'elemento riscaldante è costituito da una elettro-resistenza cilindrica a sezione circolare, con diametro di 8.3 mm e lunghezza della parte riscaldante pari alla lunghezza interna della cavità (184 mm). L'elemento riscaldante è immerso nel

fluido in posizione orizzontale, con asse giacente nel piano di simmetria verticale della cavità, allineato con la dimensione prevalente della cavità stessa e posto ad una distanza di 40 mm dalla faccia interna della parete superiore. L'elemento riscaldante è inoltre collegato ad un alimentatore in corrente continua a controllo elettronico, utilizzato per fornire una potenza termica controllata e costante.

La cavità è riempita con acqua depurata, alla quale è addizionato il tracciante necessario alle misure UPDV. La quantità di liquido contenuta nella cavità è circa pari a 0.66 L. Il tracciante, Lattex della TSI, è costituito da particelle di polistirolo con diametro nominale di  $1 \mu\text{m}$  [15] ed è stato aggiunto con una concentrazione di 10 g/L.

In fig. 2 è riportato il dettaglio della sezione della cavità con le sue dimensioni.

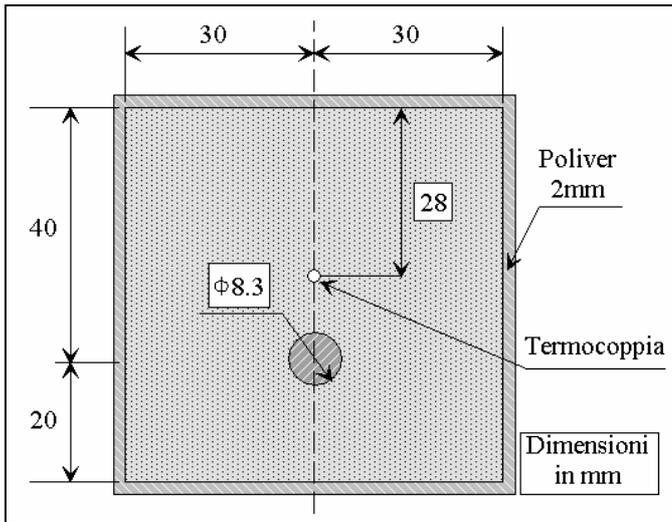


Figura 2. Sezione della cavità.

La cavità è immersa in una vasca di grandi dimensioni, riempita con acqua a temperatura controllata e resa omogenea tramite un bagno termostatico ed un sistema di circolazione (fig. 1). La vasca di condizionamento termico è di forma cubica, con dimensione del lato interno di 600 mm. Il bagno termostatico utilizzato, JULABO mod. F20, consente di ottenere nella vasca e, quindi, sulle superfici della cavità in essa immersa una temperatura uniforme e costante.

Il velocimetro UPD utilizzato è il Signal Processing DOP2000 mod. 2032 [11]. Le sue sonde hanno forma cilindrica con sezione circolare di diametro 8 mm ed emettono ultrasuoni alla frequenza di 4 MHz. Le stesse sonde fungono anche da ricevitori delle onde ultrasoniche riflesse dal tracciante disperso nel fluido.

Per la movimentazione delle sonde si è impiegato un sistema di posizionamento millimetrico passo-passo a controllo numerico, con possibilità di movimento lungo i tre assi ortogonali.

Per misurare le temperature al contorno della cavità e verificare il raggiungimento di condizioni termiche stabilizzate sono state utilizzate termocoppie di tipo T (rame/costantana) e K (chromel/alumel), collegate ad un multimetro National Instruments NI-4351 su scheda PCI. In particolare, per misurare la temperatura sulla faccia esterna delle pareti superiore ed inferiore della cavità sono state utilizzate due termocoppie di tipo K per misure superficiali. Inoltre, 4 termocoppie di tipo T sono state inserite all'interno di ciascuna delle 4 pareti, per verificare l'omogeneità delle condizioni al contorno. Infine, un'ulteriore termocoppia di tipo K è stata collocata all'interno della cavità, in

corrispondenza del piano di simmetria verticale e con l'elemento sensibile posto a distanza di 28 mm dalla parete superiore, come indicato in fig. 2. La termocoppia è stata utilizzata per verificare il raggiungimento di condizioni stazionarie.

## CONDIZIONI AL CONTORNO

Le misure sono state svolte prendendo in considerazione una sola tipologia di condizioni al contorno. In particolare, la temperatura dell'acqua al contorno della cavità, cioè dell'acqua contenuta nella vasca in cui la cavità è immersa, è stata stabilizzata mediante il bagno termostatico e il sistema di circolazione ad un valore di  $14.20 \pm 0.05^\circ\text{C}$ . Il riscaldatore ad elettro-resistenza che costituisce la sorgente termica cilindrica è stato alimentato con una tensione costante di 5 V (a cui corrisponde una corrente continua di 0.23 A). Nell'ipotesi che il calore perso per conduzione attraverso le estremità della parte attiva del riscaldatore sia trascurabile rispetto al totale del calore generato, il flusso termico alla superficie cilindrica,  $q_c$ , è valutabile come il rapporto fra la potenza elettrica totale fornita al riscaldatore, pari alla potenza termica dissipata, e la superficie laterale della parte attiva del riscaldatore stesso. Con i valori di alimentazione elettrica scelti, si ottiene un flusso termico superficiale pari a circa  $240 \text{ W/m}^2$ .

Il bagno termostatico ed il sistema di circolazione si sono dimostrati in grado di mantenere stabilmente le condizioni di temperatura desiderate al contorno della cavità durante tutto il tempo necessario a svolgere le misure, ciò indipendentemente dalle condizioni ambientali del laboratorio (non controllate). Si è rilevata invece una leggera disomogeneità nella distribuzione di temperatura al contorno della cavità, consistente in una differenza di temperatura dell'ordine del decimo di grado fra la parete superiore e la parete inferiore. In fig. 3 si riportano i valori di temperatura misurati al contorno della cavità e dentro la cavità.

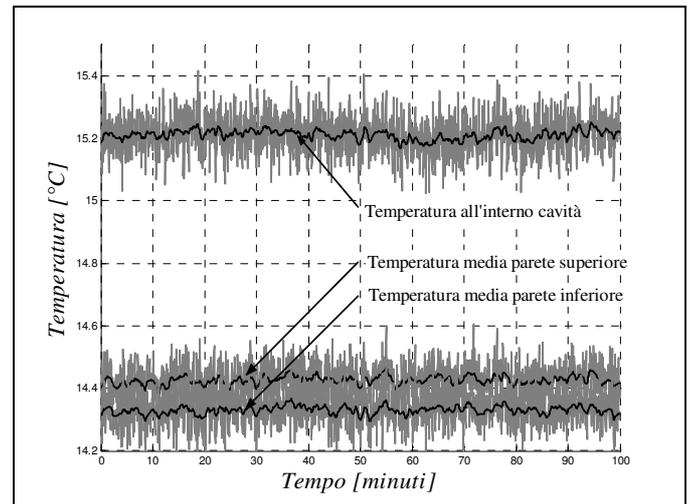


Figura 3. Temperature misurate al contorno e all'interno della cavità.

Il caso di studio è caratterizzato dai seguenti valori dei numeri di Prandtl,  $Pr$ , e di Rayleigh modificato,  $Ra^*$ :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = 8.03 \quad (5)$$

$$Ra^* = \frac{g\beta}{\nu^2} \cdot \frac{q_c D^4}{\lambda} \cdot Pr = 1.74 \cdot 10^4 \quad (6)$$

Le proprietà termofisiche del fluido sono state valutate alla temperatura di film,  $T_f$ , media fra la temperatura alla superficie della sorgente termica e la temperatura media alla parete della cavità. Poiché della sorgente è noto il flusso termico ma non la temperatura, per il calcolo approssimato di  $T_f$ , si è seguita la seguente procedura. Assunto per la temperatura di parete della cavità,  $T_p$ , un valore pari alla media delle temperature rilevate dalle 6 termocoppie a parete, pari a 14.4°C, si è stimata la temperatura di film utilizzando la seguente formula, ove  $C = 0.53$  e  $n = 1/4$ :

$$T_f = T_p + \frac{1}{2} \left[ \frac{q_c''}{\lambda C \left( \frac{g\beta}{v^2} Pr \right)^n D^{3n-1}} \right]^{1/(n+1)} \quad (7)$$

La relazione (7) si ottiene combinando la definizione del numero di Rayleigh,  $Ra$ , e la correlazione empirica di Mc Adams tra il numero di Nusselt ed il numero di Rayleigh per il caso di un cilindro orizzontale immerso in un mezzo infinito [1]:

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} = \frac{q_c'' D}{\Delta T \lambda} = C \cdot Ra^n = C \cdot \left( \frac{g\beta}{v^2} \cdot D^3 \cdot \Delta T \cdot Pr \right)^n \quad (8)$$

Poiché le proprietà del liquido sono calcolate alla temperatura di film,  $T_f$ , il valore di questa è stato calcolato mediante procedura iterativa, con risultato pari a 14.8°C.

## PROCEDURA SPERIMENTALE

Il velocimetro UPD utilizzato consente la misura della sola componente della velocità allineata con l'asse della sonda. Per ricostruire il campo di velocità su tutta la sezione mediana della cavità, è stato quindi necessario acquisire per ciascun punto di misura due componenti di velocità, orizzontale e verticale, perpendicolari fra di loro e giacenti nel piano della sezione.

Nell'indagine svolta sono stati acquisiti 29 profili di velocità orizzontali e 29 verticali, con separazione di 2 mm fra un profilo e l'altro. In fig. 4 è riportata la griglia di misura, data dall'intersezione dei profili orizzontali e verticali, in cui si evidenzia la collocazione dei profili che, a titolo di esempio, saranno presentati nel successivo paragrafo. Si precisa che per ciascun profilo non si sono acquisite le velocità nei soli 29 punti di griglia rappresentati in fig. 4, ma, al fine di avere una più elevata risoluzione spaziale, è stato utilizzato un numero di punti largamente superiore (114). Solo in seguito sono stati calcolati, mediante interpolazione, i valori delle velocità nei punti di griglia considerati per la ricostruzione del campo di velocità.

Le misure sono state eseguite utilizzando una sonda che produce un campo ultrasonico alla frequenza  $f_e$  di 4 MHz, impostando inoltre l'emissione di 4 cicli consecutivi (*Burst lenght*) ed un'energia massima istantanea emessa (*Emitting Power*) pari a 5 W ("medium"). La frequenza di ripetizione dell'emissione del campo ultrasonico ( $f_{PRF}$ ) è stata fatta variare nell'intervallo 22-66 Hz, utilizzando le frequenze più ridotte per rilevare le componenti di velocità più basse. In fase di ricezione, sono state acquisite le velocità in 114 punti (*Gates*), collocati lungo i profili di misura ad una distanza l'uno

dall'altro (*Resolution*) di 0.56 mm.

Il velocimetro permette di impostare anche il numero di emissioni consecutive che devono essere mediate per determinare il profilo di velocità. Aumentando tale numero si ottiene, se il fenomeno osservato è stazionario, una misura meno affetta da errori aleatori. Per questa ricerca si però è preferito regolare lo strumento in modo da ottenere un profilo di velocità calcolato sulla base del numero di emissioni (*Emissions per profile*) minimo possibile, pari a 8, e registrare invece un numero elevato di profili, compreso tra 70 e 200 a seconda della frequenza  $f_{PRF}$ . La riduzione dei dati ed il filtraggio degli errori aleatori mediante processi di media sono stati eseguiti off-line, in sede di analisi delle misure.

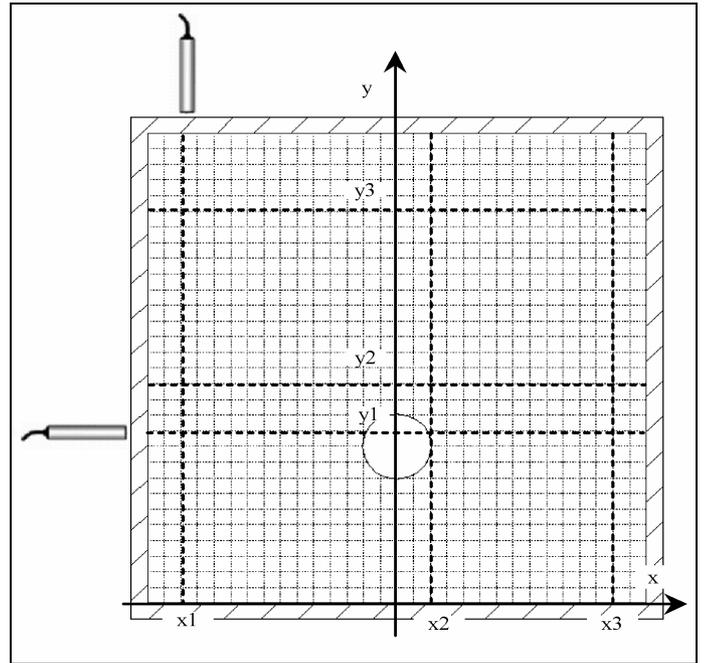


Figura 4: Griglia di acquisizione delle misure e profili di riferimento.

Il tempo necessario a rilevare un profilo di velocità è inversamente proporzionale a  $f_{PRF}$ , quindi, per mantenere costante la velocità media di acquisizione delle misure, si sono rilevati meno profili nelle zone in cui sono stati utilizzati i valori di  $f_{PRF}$  più bassi. La velocità del suono è stata assunta pari a 1480 m/s, valore tipico per l'acqua a 20°C [11]. In tab. 1 sono riportate sinteticamente le impostazioni dello strumento.

Tabella 1. Impostazioni dello strumento DOP2000.

$f_e$ [MHz]	4
<i>Emitting Power</i> [W]	5 (medium)
<i>Burst lenght</i> [n. cicli]	4
<i>PRF</i> [Hz]	22-66
<i>Gates no.</i>	114
<i>Sensitivity</i>	medium
<i>Resolution</i> [mm]	0.56
<i>Emissions per profile</i>	8
<i>Profiles no.</i>	70-200
$c_s$ [m/s]	1480

I profili rilevati sono stati registrati in formato ASCII ed analizzati off-line in ambiente Matlab. Nella prima fase dell'analisi, si sono eliminati i valori di misura nulli. Si è ritenuta lecita tale azione perché lo strumento restituisce un

valore di velocità pari a zero tutte le volte che in un volume di misura è presente un quantitativo inadeguato di particelle di tracciante. In generale, un'elevata percentuale di valori nulli nelle misure è indice della presenza di una quantità di tracciante insufficiente e, come evidenziato anche in letteratura [9], di misure poco affidabili.

Scartati i valori nulli, la tipica distribuzione delle misure che si osserva è quella rappresentata in fig. 5, ove si riporta, a titolo esemplificativo la distribuzione ottenuta per la componente orizzontale della velocità in un punto di coordinate  $(x,y)=(15.36 \text{ mm}, 50.00 \text{ mm})$ . La distribuzione è simmetrica, anche se non esattamente normale.

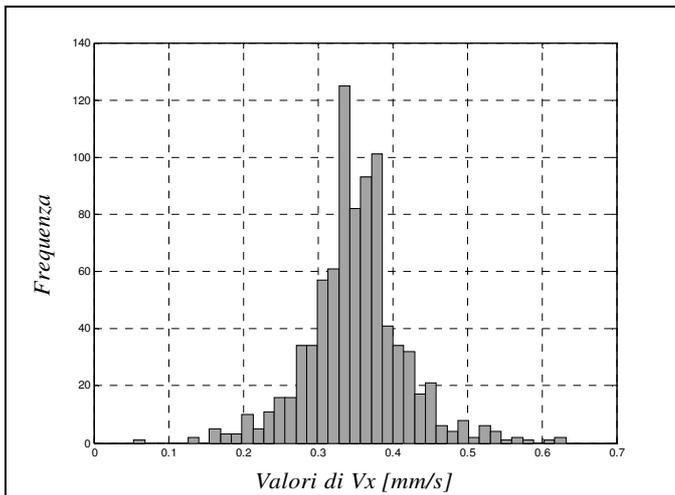


Figura 5. Distribuzione della componente orizzontale della velocità rilevata in  $(x,y)=(15.36 \text{ mm}, 50.00 \text{ mm})$ .

Per tutti i punti (*Gates*) di ciascun profilo e per tutti i profili misurati (29 orizzontali e 29 verticali) è stata eseguita una media delle misure. Si sono quindi ottenuti per interpolazione i valori delle componenti di velocità nei punti di griglia.

Per ricostruire la distribuzione della velocità si sono infine interpolate le misure nei nodi di griglia mediante spline cubica, arrivando così a generare rappresentazioni grafiche del campo vettoriale di velocità e delle linee di corrente sulla sezione mediana.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Si presentano in questo paragrafo alcuni esempi significativi dei risultati sperimentali ottenuti, utili per la comprensione dei vantaggi e dei problemi connessi all'utilizzo della tecnica UPDV nel particolare contesto applicativo.

Non essendo disponibile per il caso allo studio una soluzione analitica del campo di velocità, i risultati sperimentali sono stati confrontati con soluzioni numeriche ottenute tramite il codice di calcolo DNSNATU, un codice DNS sviluppato appositamente per analisi in regime di convezione naturale in cavità chiuse. Tale codice risolve le equazioni di Navier-Stokes e di trasporto dell'energia termica in maniera diretta nello spazio e nel tempo e, allo stato attuale, può essere applicato a geometrie bidimensionali. Essendo il problema in linea di principio tridimensionale, sono state svolte simulazioni numeriche preliminari anche mediante il codice industriale ai volumi finiti Fluent, al fine di verificare se la cavità adottata, caratterizzata da elevato allungamento, consente di rendere il problema bidimensionale sui piani

ortogonali alla dimensione maggiore. Come già accennato, le simulazioni svolte hanno mostrato che l'ipotesi di bidimensionalità è effettivamente verificata, quantomeno in corrispondenza della sezione mediana. Inoltre, i risultati bidimensionali di Fluent e di DNSNATU sono risultati tra loro in ottimo accordo.

In figg. 6, 7 e 8 si rappresentano i profili della componente orizzontale della velocità,  $V_x$ , a distanze dal fondo della cavità rispettivamente pari a 50 mm ( $y_3$  in fig. 4), 28 mm ( $y_2$ ) e 22 mm ( $y_1$ ). Per questa serie di misure, l'elemento sensibile della sonda acustica è posizionato in  $x = -32 \text{ mm}$  (distanza dall'asse di simmetria della sezione, vedi fig. 4).

In figg. 9, 10 e 11 si rappresentano invece i profili della componente verticale della velocità,  $V_y$ , a distanze dal piano di simmetria verticale della cavità rispettivamente pari a 26 mm ( $x_1$  in fig. 4), 4 mm ( $x_2$ ) e -26 mm ( $x_3$ ). Per questa serie di misure, l'elemento sensibile della sonda è posizionato in  $y = 62 \text{ mm}$  (distanza dal fondo della cavità, vedi fig. 4).

Il confronto tra i profili misurati in laboratorio e quelli calcolati numericamente mostra che lo strumento riesce a cogliere in maniera soddisfacente i moti convettivi presenti all'interno della cavità, nonostante questi siano caratterizzati da velocità molto basse (sempre inferiori a 1 mm/s). In perfetta coerenza con le previsioni numeriche, il campo di velocità presenta una simmetria rispetto al piano verticale passante per l'asse della sorgente termica. È però evidente una certa dispersione delle misure attorno al valore medio, maggiore nelle misure della componente verticale piuttosto che in quelle della componente orizzontale. A ciò si aggiunge il fatto che le misure della componente verticale di velocità presentano anche una maggiore percentuale di casi in cui lo strumento ha restituito un valore nullo. Si ritiene che la causa di tali effetti sia l'insufficiente presenza di tracciante. Infatti, nelle prove sperimentali svolte non è stato possibile acquisire contemporaneamente tutti i 58 profili delle componenti orizzontali e verticali di velocità nel corso di una stessa sessione di misura, e fra le diverse sessioni sono spesso intercorse alcune ore. Una tale separazione temporale, combinata con la tendenza nel tempo del tracciante (Lattex) ad accumularsi nelle zone adiacenti alla parete superiore della cavità, può spiegare le disomogeneità nella dispersione delle misure.

La minore presenza di tracciante nelle zone più basse della cavità potrebbe giustificare anche l'impossibilità di rilevare la velocità del fluido in prossimità della parete inferiore, evidente in figg. 9 e 11, ove il velocimetro restituisce valori di velocità nulli nella maggioranza dei casi.

Si sottolinea che le misure immediatamente adiacenti alla parete della cavità ove è collocata la sonda acustica risentono di un "effetto di parete" evidenziato anche in letteratura [9]. Analizzando il profilo del segnale d'eco ricevuto dal trasduttore si osserva che in queste zone tale segnale è massimo e, quindi, si raggiunge un livello di saturazione. Come riportato nel manuale del velocimetro [11], l'affidabilità delle misure cala drasticamente al raggiungimento di tale situazione.

Per quanto riguarda il confronto dei dati sperimentali con i profili di velocità calcolati numericamente mediante il codice DNSNATU, si osserva che l'accordo è in generale soddisfacente e, per la componente orizzontale, decisamente buono. Le maggiori discrepanze si osservano nelle zone della cavità dove il quantitativo di tracciante tende ad essere inadeguato o dove la prossimità delle superfici solide perturba la riflessione del campo ultrasonico.

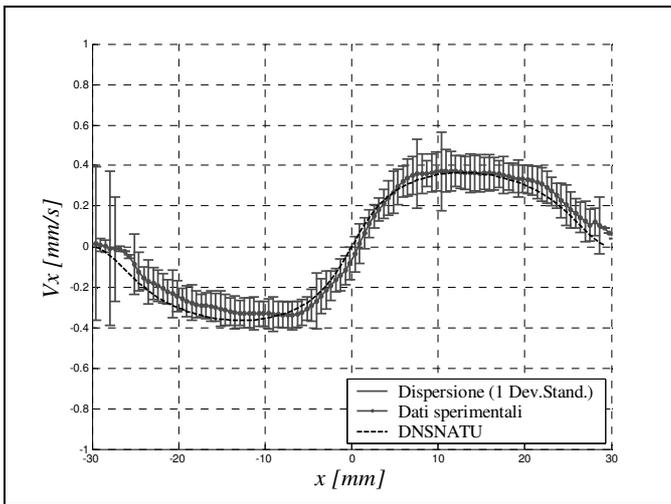


Figura 6. Profilo della componente orizzontale della velocità a distanza  $y_3 = +50$  mm dal fondo della cavità.

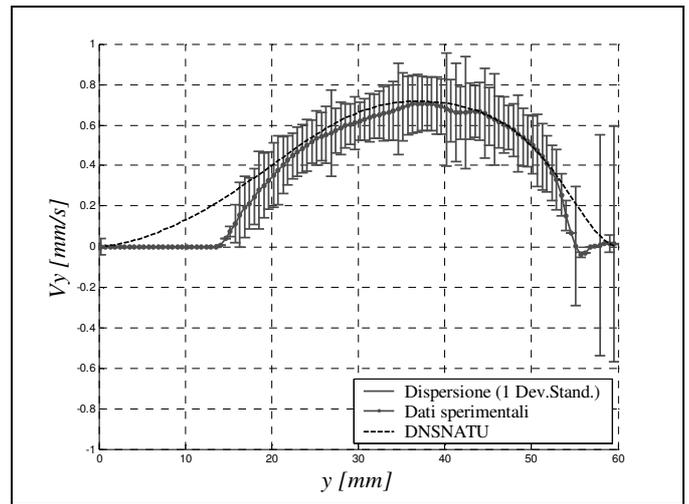


Figura 9. Profilo della componente verticale della velocità a distanza  $x_3 = +26$  mm dal piano di simmetria verticale della cavità.

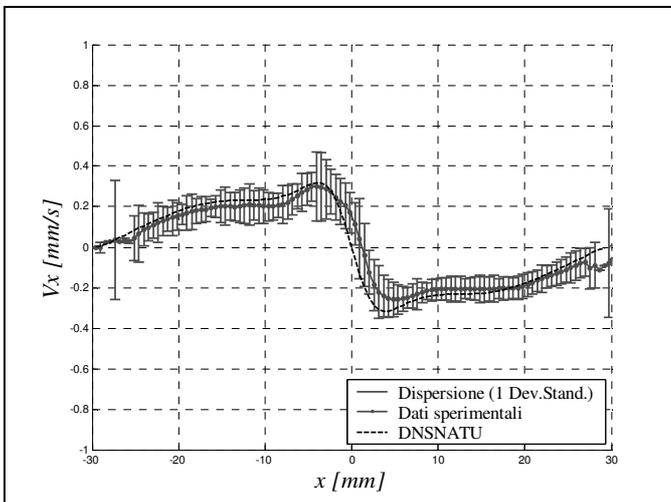


Figura 7. Profilo della componente orizzontale della velocità a distanza  $y_2 = +28$  mm dal fondo della cavità.

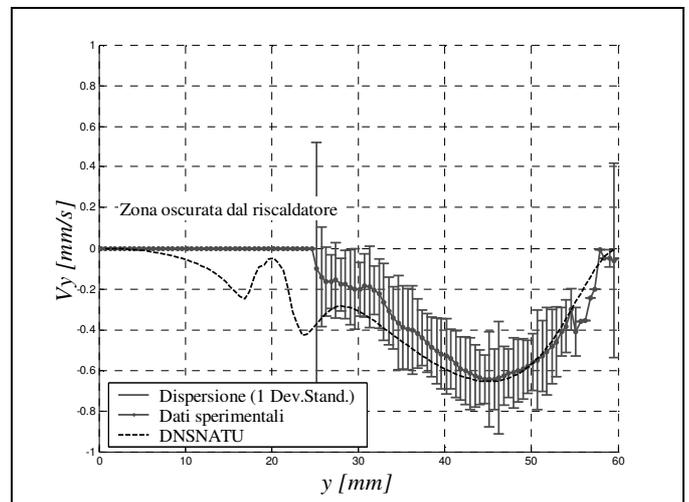


Figura 10. Profilo della componente verticale della velocità a distanza  $x_2 = +4$  mm dal piano di simmetria verticale della cavità.

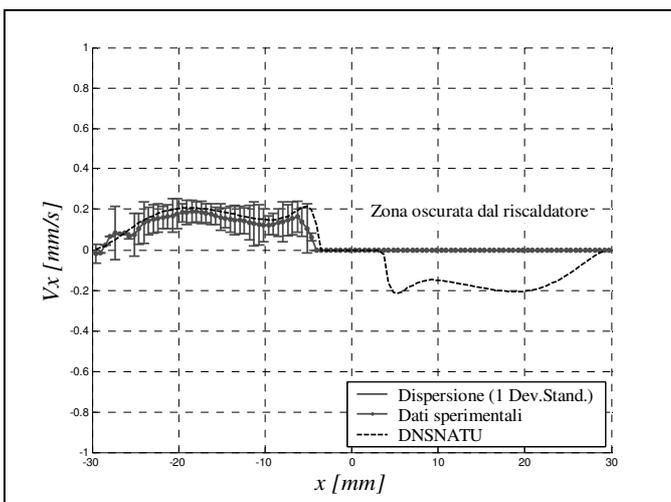


Figura 8. Profilo della componente orizzontale della velocità a distanza  $y_1 = +22$  mm dal fondo della cavità.

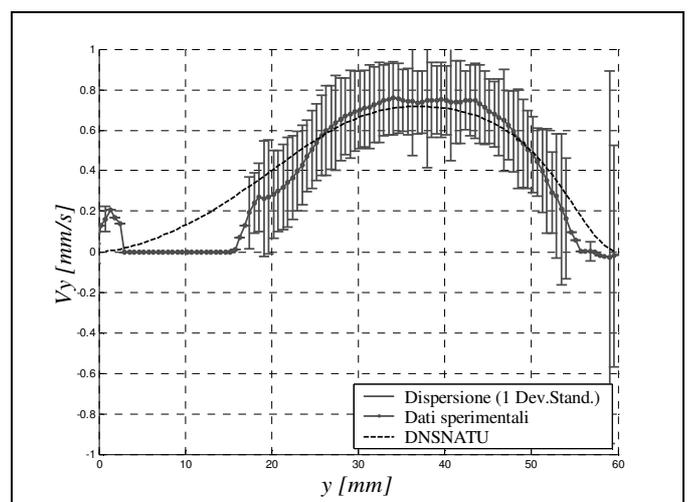


Figura 11. Profilo della componente verticale della velocità a distanza  $x_1 = -26$  mm dal piano di simmetria verticale della cavità.

Combinando le misure delle componenti orizzontali e verticali, è stato ricostruito il campo di velocità sulla sezione mediana della cavità, rappresentato graficamente in figg. 12, 13, 14 e 15, ove si riporta anche il confronto con i risultati ottenuti numericamente tramite DNSNATU. Si noti che, nelle zone adiacenti alla parete inferiore della cavità, in cui le simulazioni numeriche prevedono una componente di velocità verticale molto ridotta e, nelle prove sperimentali, si viene a creare una insufficiente presenza di tracciante, non è stato generalmente possibile ottenere la rappresentazione del campo di velocità, che quindi è stata localmente omessa.

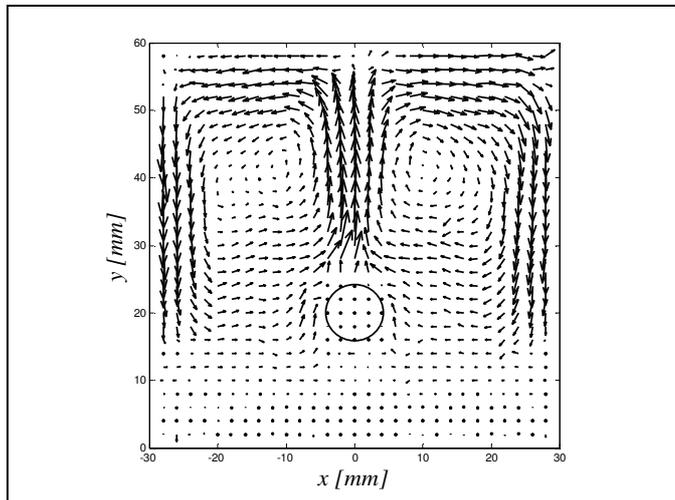


Figura 12. Campo di velocità misurato sulla sezione mediana della cavità.

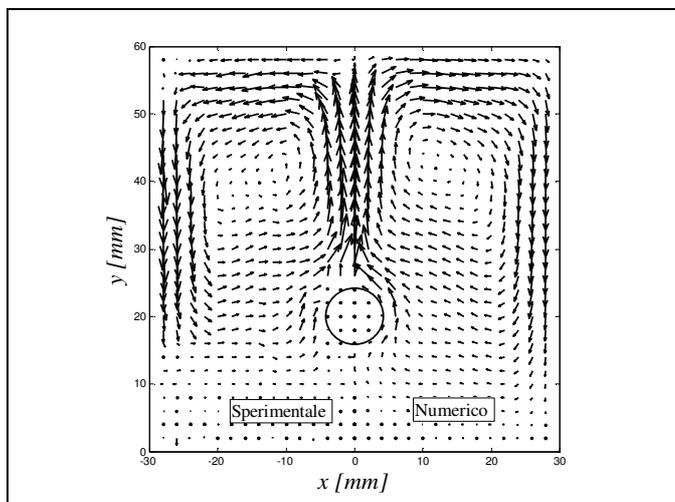


Figura 13. Confronto dei campi di velocità misurato (a sinistra) e calcolato mediante DNSNATU (a destra).

Da un punto di vista qualitativo, i moti convettivi vengono colti in modo soddisfacente. Tuttavia, la notevole dispersione delle misure e, in alcune zone, le discrepanze evidenti dalle previsioni numeriche ancora non permettono di ritenere la tecnica di misura completamente affidabile per gli scopi generali di questo studio. Sono necessari affinamenti sia dell'apparato che delle procedure sperimentali. In particolare, si confida di ottenere progressi sostanziali attraverso l'utilizzo di sonde acustiche a maggiore frequenza di emissione e di un tracciante distribuibile più omogeneamente nel fluido, nonché attraverso un migliore controllo delle condizioni termiche al contorno della cavità e più raffinati metodi di riduzione ed analisi dei dati sperimentali.

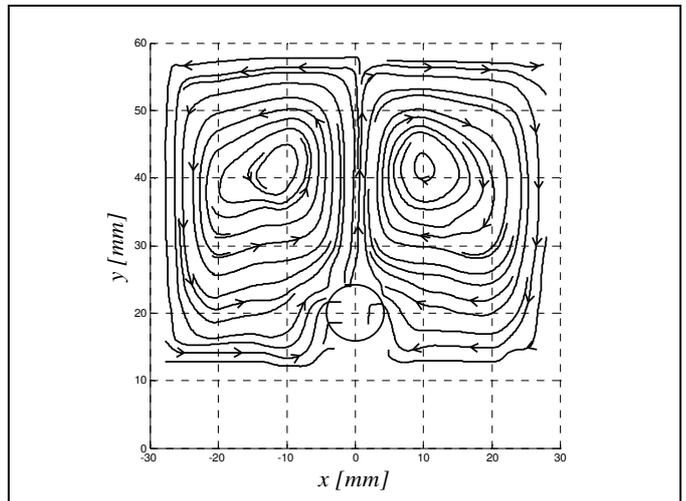


Figura 14. Linee di corrente sperimentali sulla sezione mediana della cavità.

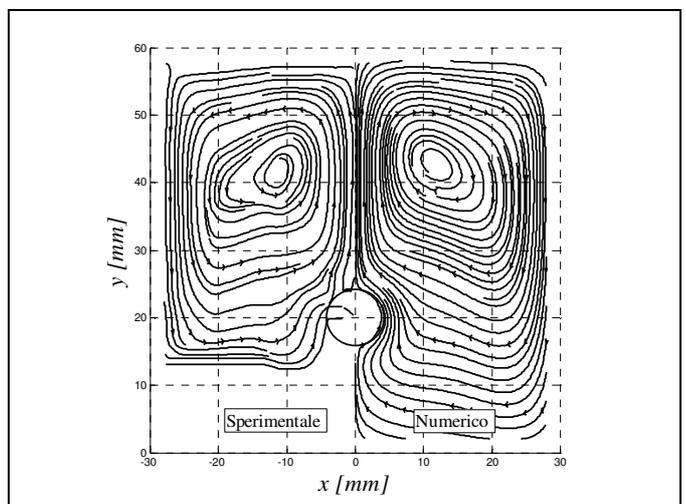


Figura 15. Confronto delle linee di corrente sperimentali (a sinistra) e calcolate mediante DNSNATU (a destra).

## CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Le misure di velocità svolte hanno confermato le potenzialità della tecnica "Ultrasound Pulsed Doppler Velocimetry" per lo studio del campo di moto di un fluido confinato in una cavità, in regime di convezione naturale. In particolare, la tecnica, nonostante le basse velocità caratterizzanti i fenomeni di convezione studiati, riesce a cogliere qualitativamente i moti convettivi. A conferma di ciò, il campo di velocità misurato presenta un accordo soddisfacente con i risultati di simulazioni CFD eseguite con codici di calcolo sia commerciali che autocostituiti.

Si sono tuttavia evidenziate una notevole dispersione dei valori di velocità misurati e, soprattutto, l'impossibilità pratica di effettuare misure ove la velocità del fluido è molto bassa o la prossimità delle superfici solide perturba la riflessione del campo ultrasonico. Alcuni dei problemi sono probabilmente ascrivibili al tracciante utilizzato, che tende a concentrarsi nelle zone della cavità più vicine alla parete superiore e a trovarsi quindi in concentrazione inadeguata in prossimità della parete inferiore. Inoltre, le sonde utilizzate, caratterizzate da una frequenza di emissione ( $f_e$ ) di 4 MHz, potrebbero non essere le più adatte alle ridotte velocità che si intende misurare.

Nell'immediato futuro, si intende perfezionare il controllo delle condizioni di lavoro nella cavità, con particolare riferimento al controllo delle condizioni al contorno. Verranno inoltre sperimentati diversi tipi di tracciante e sonde ad alta frequenza (8 MHz), affinando le procedure di riduzione ed analisi dei dati. Una volta messi a punto l'apparato e le procedure sperimentali, si intende utilizzare la tecnica UPDV per lo studio dei fenomeni di convezione naturale anche in regimi transizionali.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Dr. Jean-Cl. Willemetz, Presidente della Signal Processing SA, il Prof. M.A. Corticelli dell'Università di Modena e Reggio Emilia e i Dott. D. Angeli e P. Levoni per il prezioso e paziente supporto tecnico-scientifico.

Questo lavoro è stato finanziato dal M.I.U.R. – P.R.I.N.

## NOMENCLATURA

Simbolo	Grandezza	Unità SI
$c_s$	Velocità del suono	m/s
$C$	Costante	
$d$	Distanza	m
$D$	Diametro riscaldatore	m
$f_e$	Frequenza emessa	Hz
$f_d$	Frequenza Doppler	Hz
$f_{PRF}$	Frequenza di ripetizione dell'emissione del campo ultrasonico	Hz
$f_r$	Frequenza riflessa	Hz
$h$	Coefficiente di scambio termico convettivo	W/(m <sup>2</sup> ·K)
$n$	Costante	
$P_{max}$	Massima profondità misurabile	m
$q_c''$	Flusso termico superficiale	W/m <sup>2</sup>
$T_f$	Temperatura di film	K
$T_p$	Temperatura di parete	K
$u$	Componente di velocità	m/s
$v$	Velocità	m/s
$v_{max}$	Massima velocità misurabile	m/s
$V_x$	Componente orizzontale di velocità	m/s
$V_y$	Componente verticale di velocità	m/s
$\alpha$	Diffusività termica	m <sup>2</sup> /s
$\beta$	Coefficiente di dilatazione volumica	1/K
$\gamma$	Angolo	rad
$\Delta t$	Incremento di tempo	s
$\Delta T$	Differenza di temperatura	K
$\lambda$	Conducibilità termica	W/(m·K)
$\nu$	Viscosità cinematica	m <sup>2</sup> /s

$Nu$	Numero di Nusselt
$Ra$	Numero di Rayleigh
$Ra^*$	Numero di Rayleigh modificato
$Pr$	Numero di Prandtl

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] S. Kakac, R.K. Shah e W. Aung, Handbook of single-phase convective heat transfer, John Wiley & Sons, New York, 1987.
- [2] M. Necati Özişik, Heat transfer, a basic approach, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [3] K. Kitamura, F. Kami-iwa e T. Misumi, Heat transfer and fluid flow of natural convection around large horizontal cylinder, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, n. 22, pp. 4093-4106, 1999.
- [4] G. Cesini, M. Paroncini, G. Cortella e M. Manzan, Natural convection from horizontal cylinder in a rectangular cavity, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, n. 10, pp. 1801-1811, 1999.
- [5] M.A. Atmane, V.S.S. Chan e D.B. Murray, Natural convection around a horizontal heated cylinder: the effects of vertical confinement, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, n. 19, pp. 3661-3672, 2003.
- [6] H. Koizumi e I. Hosokawa, Chaotic behaviour and heat transfer performance of the natural convection around a hot horizontal cylinder affected by a flat ceiling, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 39, n. 5, pp. 1081-1091, 1995.
- [7] Y. Takeda, Velocity Profile Measurement by Ultrasonic Doppler Method, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 10, n. 4, pp. 444-453, 1995.
- [8] H. Kikura, Y. Takeda e T. Sawada, Velocity profile measurements of magnetic fluid flow using Doppler method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 201, n.1-3, pp. 276-280, 1999.
- [9] T. Wang, J. Wang, F. Ren e Y. Jin, Application of Doppler ultrasound velocimetry in multiphase flow, *Chemical Engineering Journal*, vol. 92, n. 1-3, pp. 111-122, 2003.
- [10] A. Cramer, C. Zhang e S. Eckert, Local flow structures in liquid metals measured by ultrasonic Doppler velocimetry, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 15, n. 3, pp. 145-153, 2004.
- [11] Signal Processing Switzerland, DOP2000 Model 2032 – User Manual, [www.signal-processing.com](http://www.signal-processing.com).
- [12] J. Best, Principles of Ultrasonic Doppler Velocity Profiling (UDVP), [earth.leeds.ac.uk/research/seddies/best/principles.htm](http://earth.leeds.ac.uk/research/seddies/best/principles.htm), 2005.
- [13] A. Berni, B. Brunone e M. Ferrante, Rilievi di velocità in una corrente turbolenta mediante tecnica UDV, *XI Convegno nazionale A.I.V.E.L.A.*, Ancona, 2-3 Dicembre 2003, [www.aivela.org/attiXI.html](http://www.aivela.org/attiXI.html).
- [14] Th. Wunderlich e P.O. Brunn, A wall layer correction for ultrasound measurement in tube flow: comparison between theory and experiment, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 11, n. 2, pp. 63-69, 2000.
- [15] TSI, LDV Flow Seeding (Seed Particles: Polystyrene Latex), [www.tsi.com/fluid/products/ldv/seeding.htm](http://www.tsi.com/fluid/products/ldv/seeding.htm), 2005.