

# Getti Gassosi Impattanti Perturbati Mediante Disturbi Acustici

R. Fasanella, E. Nino

Università della Basilicata  
D.I.F.A.  
Via dell'Ateneo Lucano, 10  
85100 POTENZA

## ABSTRACT

I getti gassosi impingenti, essendo in grado di attivare elevati livelli del coefficiente di scambio termico locale, sono comunemente impiegati in applicazioni sia di riscaldamento che di raffreddamento, stimolando la ricerca scientifica allo studio dettagliato del loro comportamento al variare dei parametri di controllo. Recentemente cominciano ad essere studiati getti gassosi impattanti instabilizzati mediante perturbazioni esterne. Nella presente memoria, è stato studiato il comportamento di un getto gassoso di aria, impattante su di una superficie piana, instabilizzato mediante l'immissione di disturbi acustici. Lo studio è stato effettuato impiegando un approccio integrato per la caratterizzazione del campo di moto e della distribuzione del coefficiente di scambio termico locale attivato dal getto prodotto da un ugello convergente con diametro di uscita pari a 10 mm. I rilievi sono stati effettuati per differenti numeri di *Reynolds* ( $Re$ ) intorno al regime di transizione laminare/turbolento.

Il coefficiente di scambio termico locale, espresso in termini del numero di *Nusselt* locale ( $Nu$ ) è stato determinato sfruttando l'analogia tra scambio termico e scambio di massa, mediante l'ablazione di un film di naftalina impattato dal getto in esame.

Il rilievo sperimentale in automatico dello spessore del film di naftalina ablatato, sia nella regione di stagnazione che direttamente al di sotto del getto, ha consentito di correlare lo scambio di massa con quello termico.

Il rilievo del campo di moto nelle vicinanze ed all'interno del getto è stata ottenuta mediante Particle Image Velocimetry (PIV). La portata, quindi il numero di *Reynolds* basato sul diametro di uscita dell'ugello, è stata determinata mediante rilievi accurati della velocità di uscita ottenuti mediante un sistema Laser Döppler Velocimetry (LDV). Il getto è stato perturbato con disturbi acustici generati da un altoparlante, pilotato mediante un generatore di onde sinusoidali a differenti frequenze, posizionato in contatto con il plenum di calma su cui è stato innestato l'ugello.

I rilievi hanno dimostrato la possibilità di incrementare il coefficiente di scambio termico locale mediante l'immissione di disturbi acustici a differenti frequenze.

## INTRODUZIONE

E' risaputo che i getti gassosi impattanti hanno elevate caratteristiche di controllo dello scambio di massa e termico da essi prodotto. Tale tecnica consiste nel dirigere un getto gassoso da un ugello su di una superficie. In una configurazione piana (impatto su di una piastra di dimensioni infinite) la struttura del flusso può essere suddivisa in tre caratteristiche regioni riportate in Figura 1 [1]: la regione di *getto libero* all'uscita dall'ugello con una distribuzione di velocità  $V(r)$ ; la regione di *impatto (stagnazione)* al di sotto del getto e comprendente la zona di impatto ed inizio della deflessione del getto; e la *regione di parete* in cui è presente una re-accelerazione del moto lungo la superficie di impatto. I più elevati coefficienti di trasporto termico sono ottenibili nelle vicinanze della regione di stagnazione, anche se una porzione della regione di parete può in alcuni casi contribuire significativamente allo scambio termico.

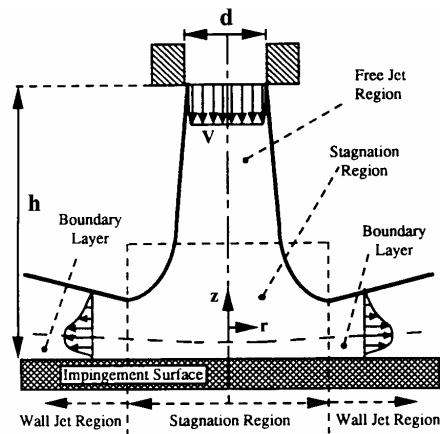


Figura 1. Regioni di moto per un getto libero impattante su lastra piana.

Gli studi attuali sui getti impattanti, sono focalizzati sulle potenzialità offerte nel campo industriale nel controllo termico sia nella produzione che nell'installazione (ad esempio di componenti elettronici). In letteratura è possibile reperire un notevole numero di studi concernenti i getti impattanti in condizioni turbolente (Jambunathan [2] e Viskanta [3]), ma le caratteristiche di scambio termico sono favorite per basse portate volumetriche, inizialmente in condizioni laminari con sviluppo verso regimi di transizione alla turbolenza. Il limite di transizione alla turbolenza, per getti circolari non confinati, è fissabile intorno a  $Re = 1000$  [3] (basato sul diametro dell'ugello). Il presente lavoro, focalizza l'attenzione su getti circolari inizialmente laminari nel regime di  $Re$  1000-2000, realizzando una analogia tra il flusso di massa e quello termico ed una visualizzazione del campo di moto. Dettagliate visualizzazioni del campo di moto per getti circolari confinati sono state realizzate per la prima volta da Yokobori ed altri [4] mediante tecniche a bolle di Idrogeno e da Popiel e Trass [5] con visualizzazioni mediante fumo. Entrambi i lavori menzionati, descrivono solo qualitativamente il campo di moto. Anderson e Longmire [6] hanno caratterizzato il campo di moto prodotto da un getto impattante mediante una illuminazione laser e tecniche PIV ma per  $Re$  maggiori di 20000, Sakakibara ed altri [7] hanno pubblicato rilievi accoppiati di velocità e temperatura per getti di acqua e per  $Re$  minori di 2000. Recentemente alcuni autori hanno cominciato ad occuparsi della stimolazione di getti allo scopo di incrementare i coefficienti di scambio termico locale realizzati, adottando tecniche di perturbazione basate disturbi acustici immessi con altoparlanti. Tra questi occorre citare il lavoro di Travnicek e Tesar [9] che hanno studiato lo scambio termico di un getto anulare, impattante su superficie piana, stimolato direttamente dalle oscillazioni della membrana di un altoparlante costituente la parte superiore del contenitore dell'ugello.

In merito all'analogia tra trasporto di massa e trasporto termico, la sublimazione di film di naftalina è stata a lungo impiegata per una svariata casistica di applicazioni di scambio termico convettivo. Nell'ambito dei getti gassosi impattanti, è necessario fare riferimento a Goldstein e Cho [8] per la tecnica di determinazione degli scambi termici locali e ad Angioletti ed altri [1] per le configurazioni di getto impingente in un range di  $Re$  tra 750 e 1500.

## TECNICHE DI VISUALIZZAZIONE E DI RILIEVO DEL TRASPORTO DI MASSA

Al fine di caratterizzare l'accoppiamento tra il campo di moto ed il trasporto termico, sono state impiegate le seguenti tecniche di rilievo del campo di moto e del trasporto di massa. L'ugello impiegato è TSI con foro calibrato da 10 mm

### Laser Doppler Velocimetry (LDV)

Data la delicatezza dei rilievi effettuati, il controllo del numero di *Reynolds* all'uscita è stato affidato ad un semplice sistema LDV il cui schema è riportato in Fig. 2. Il dispositivo, funzionante in modalità forward, è costituito da un laser He-Ne da 20 mJ, da ottiche di manipolazione del fascio autocostruite, dall'ottica ricevente della Dantec con fotomoltiplicatore Hamamatsu. L'elettronica di acquisizione ed elaborazione è costituita dal processore TSI IFA 655 con relativo software FIND.

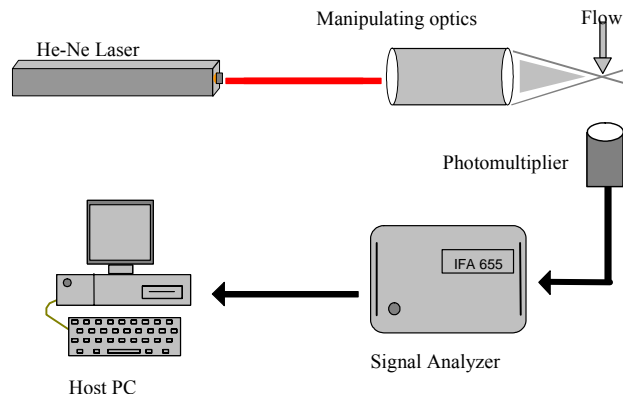


Figura 2. Schema del sistema LDV.

Il volume di misura è posizionato sull'asse dell'ugello a circa 2 mm dal bordo di uscita del getto in maniera da poter misurare con estrema cura la velocità del getto, quindi, il numero di *Reynolds* impostato. Tale soluzione è stata imposta dalla necessità di avere misure il più ripetibili possibili per poter cogliere le differenze tra le diverse condizioni di analizzare.

### Particle Image Velocimetry (PIV)

Lo schema ottico adottato, riportato nella Fig. 3, è basato su due laser ND:YAG Spectra Physics serie Indi da 200 mJ/pulse in seconda armonica, la ricombinazione dei fasci è stata effettuata sulla seconda armonica (532 nm) mediante lo schema classico dei due specchi, della lamina ritardatrice  $\lambda/2$  e del filtro dicroico in polarizzazione. La camera utilizzata per la raccolta delle immagini scattate ortogonalmente alla lamina laser è della TSI con sensore PCO. Mediante una coppia di lenti cilindrica e sferica è stata prodotta la lamina laser, avente spessore pari a circa 0.8 mm e altezza pari a circa 60 mm, utilizzata per illuminare il getto. Sia per i rilievi PIV che per quelli LDV si è adoperata dell'acqua demineralizzata nebulizzata mediante un generatore di aerosol per uso medico. Le immagini digitali omologhe sono state post processate il software TSI INSIGHT con cross-correlazione su celle di 64x64 pixels con una sovrapposizione del 20%.

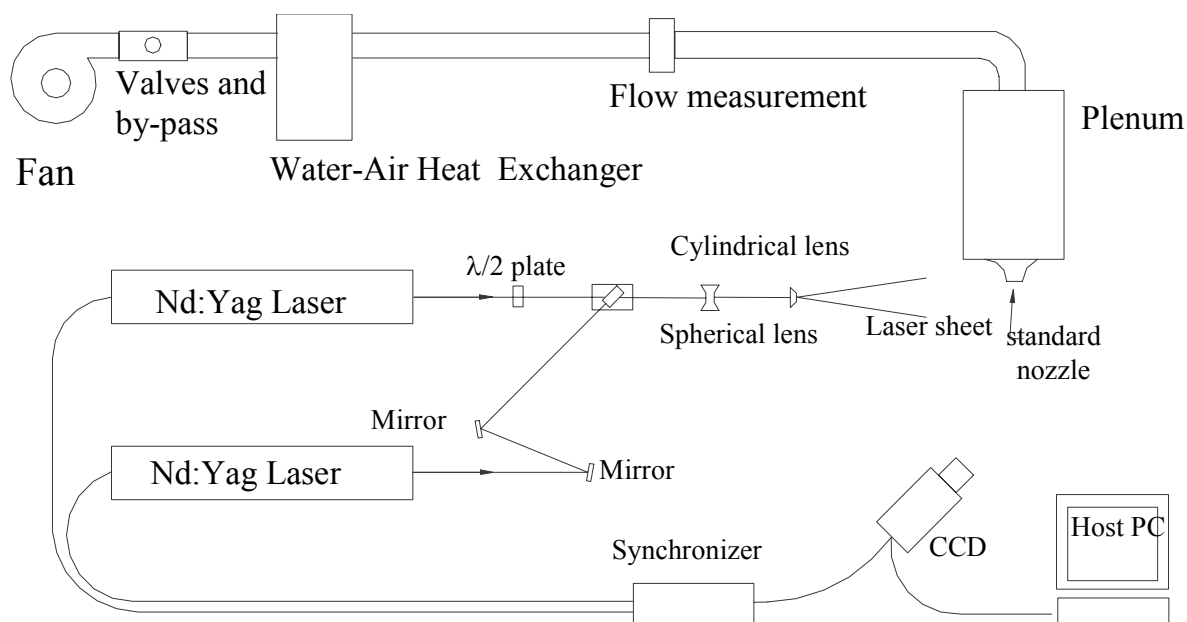


Figura 3. Schematizzazione del sistema PIV impiegato.

### Misura del trasporto di massa e rielaborazione dei dati

La superficie ablante è stata realizzata in naftalina ( $C_{10}H_8$ ) e la misura della spessore sublimato durante l'azione del getto impingente è stata effettuata mediante un tastatore. Un PC di gestione provvede alla

movimentazione del sensore sulla piastra mediante un sistema di posizionamento biassiale ed all'acquisizione dei profili di naftalina ablata dal getto (figura 4). Il tempo di ablazione è stato per ogni rilievo pari a  $8 \cdot 10^4$  s. In merito al trasferimento di massa, i risultati possono essere espressi localmente mediante un coefficiente adimensionale dato dal numero di *Sherwood* ( $Sh$ ):

$$Sh = \frac{h_m d}{D} \quad \text{in cui:}$$

$d$  = diametro dell'ugello

$h_m$  = coefficiente locale di trasporto di massa (proporzionale al rapporto tra la densità della naftalina allo stato solido e di quella dei suoi vapori, proporzionale allo spessore locale della naftalina sublimata ed inversamente proporzionale al tempo di ablazione)

$D$  = coefficiente di diffusione della naftalina in aria, ricavabile dal numero di *Shmidt* ( $Sc$ ) che per sistemi aria-naftalina assume il valore di 2.45:

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad \text{con } \nu \text{ pari alla viscosità cinematica dell'aria.}$$

Lo scambio termico è ottenuto sfruttando l'analogia tra trasporto di massa e di calore. In particolare l'analogia tra il numero di *Sherwood* e quello di *Nusselt*, per un dato valore del numero di *Reynolds*, può essere ricavata nel seguente modo:

$$Nu = \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0.4} Sh$$

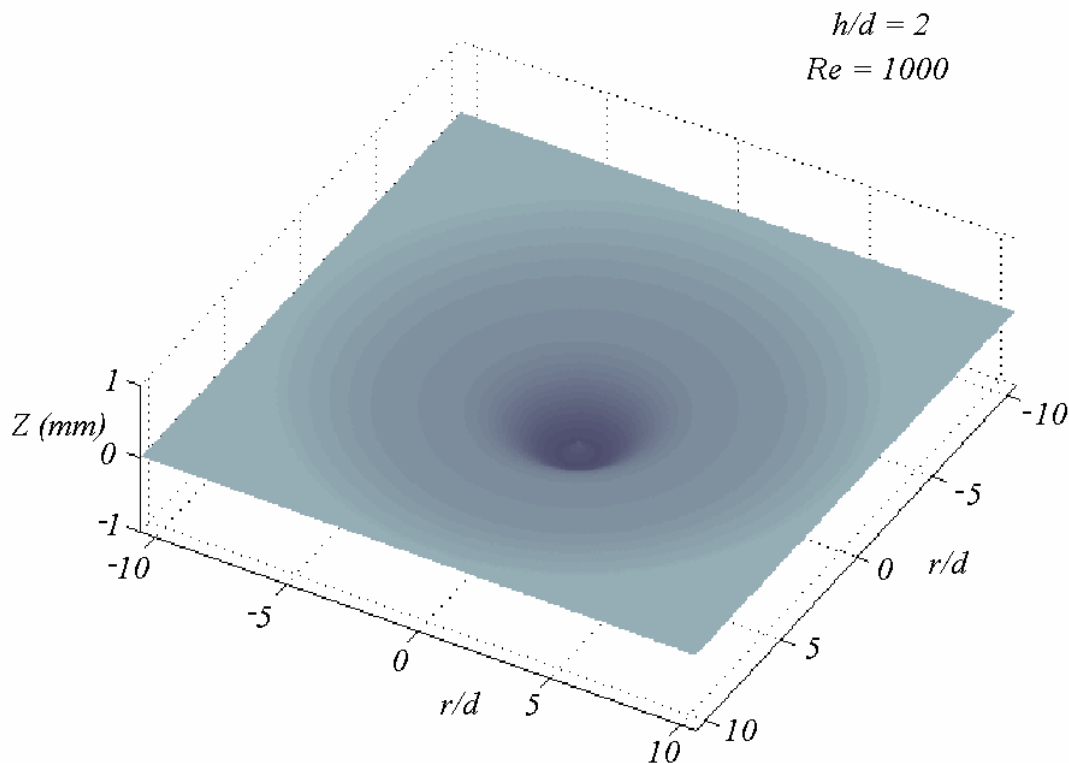


Figura 4. Un tipico profilo rilevato di naftalina ablata.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Dai rilievi PIV è possibile osservare come il getto prodotto presenti una distribuzione iniziale particolarmente uniforme e, specialmente per  $Re$  1000 e 1500 prosegue indisturbato fino all'impatto sulla piastra piana. In effetti piccole perturbazioni possono essere visibili per valori  $h/d$  più elevati. La situazione fluidodinamica diventa più complessa all'immissione del disturbo acustico, infatti, come è visibile nella figura 6, l'attivazione del disturbo acustico instabilizza completamente il getto generando una serie di vortici anulari sulla superficie del getto incrementando l'effetto di entrainment dell'aria circostante. L'effetto è tale da alterare la distribuzione di velocità anche nella zona di impatto, con conseguenze sulle proprietà di trasporto locali del getto impattante.

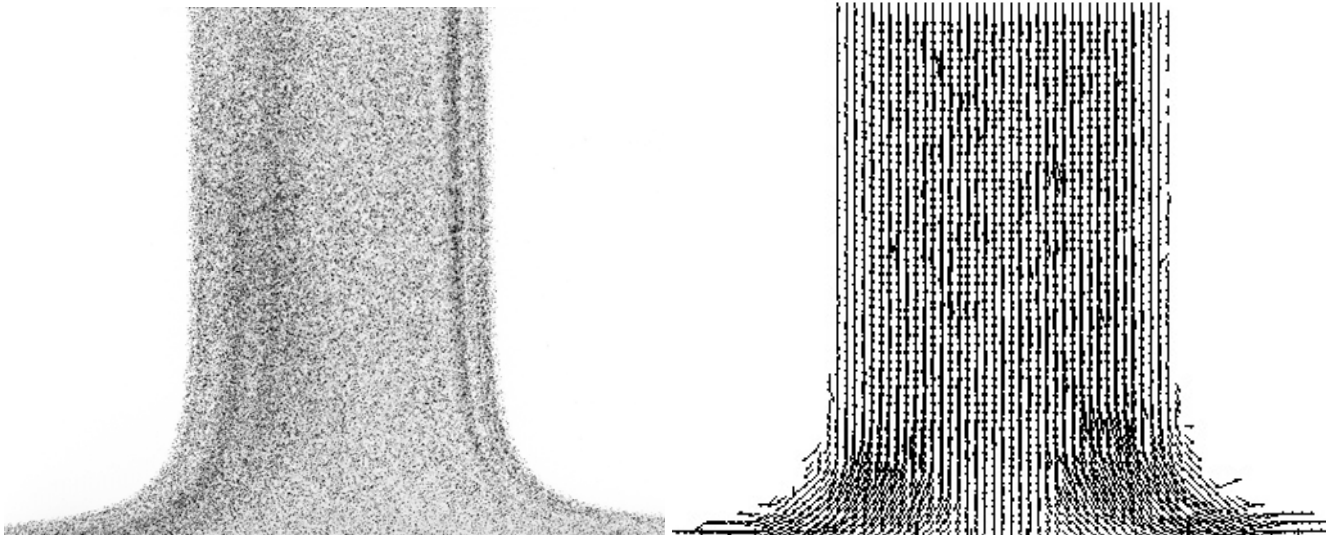


Figura 5. Immagine PIV con relativo campo di moto ottenuta per  $h/d = 2$  a  $Re = 1000$ .

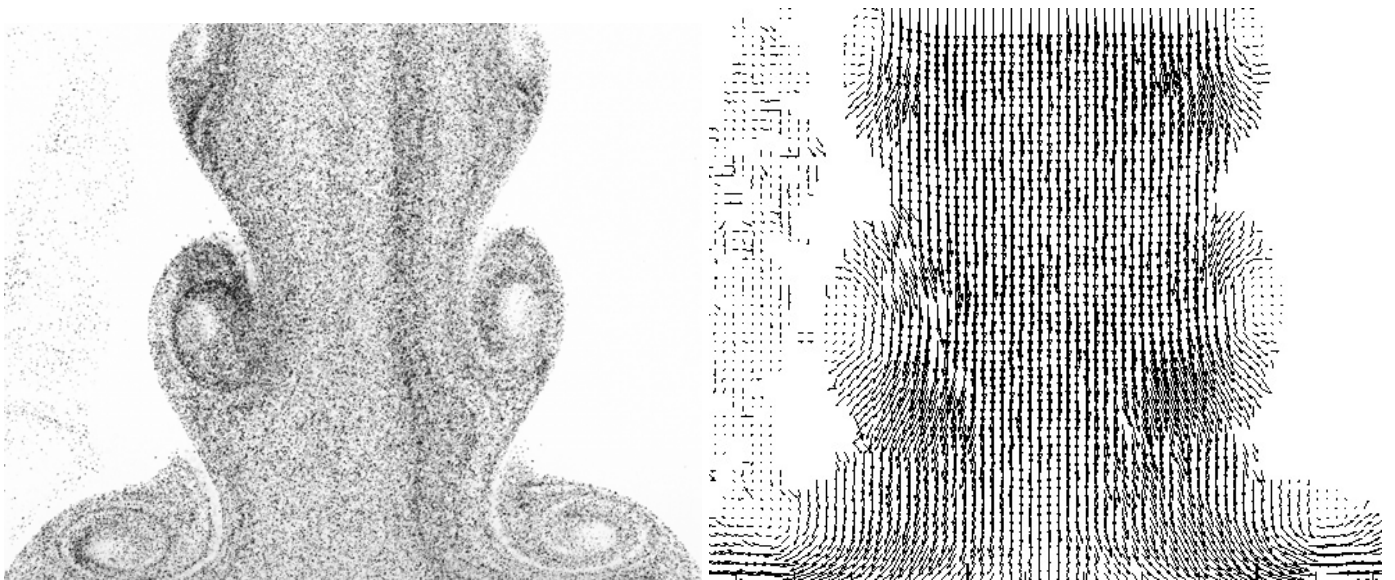


Figura 6. Immagine PIV e relativo campo di moto ottenuta per  $h/d = 2$  a  $Re = 1000$  e con disturbo acustico pari a 266 Hz.

Nelle figure 7 ed 8 vengono riportati i profili centrali del  $Nu$  ottenuto a  $Re$  1000 e 1500 per un rapporto  $h/d$  pari a 2 sia in presenza di disturbo acustico che in sua assenza. Dalle immagini è possibile osservare come in entrambi i casi la perturbazione acustica, in grado di instabilizzare il getto è responsabile dell'incremento diffuso del coefficiente di scambio termico rilevato.

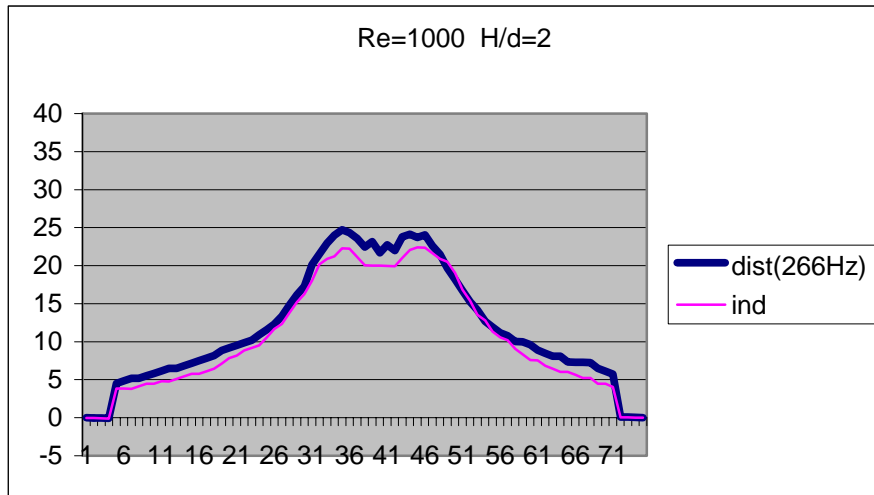


Figura 7.  $Nu$  locale per  $h/d = 2$  a  $Re = 1000$ .

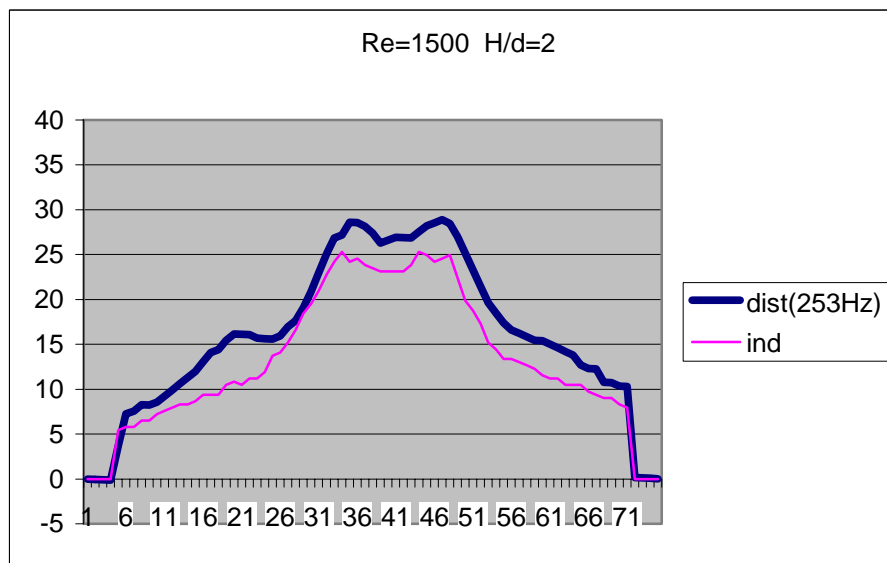


Figura 8.  $Nu$  locale per  $h/d = 2$  a  $Re = 1500$ .

Come già osservato nei lavori precedentemente citati, la struttura del coefficiente di scambio termico medio locale è abbastanza caratteristica mostrando, nella parte centrale, una zona di minimo relativo del  $Nu$  seguito da due massimi. Questa struttura è causata dall'effetto di ristagno che si ha immediatamente a valle del getto, perlomeno per i  $Re$  ed i rapporti  $h/d$  esaminati. L'effetto dell'insatbilizzazione acustica del getto non altera questa situazione ma certamente la modifica dato l'evidente incremento del  $Nu$  locale medio ottenuto.

## CONCLUSIONI

Nella presente memoria l'effetto della instabilizzazione di un getto di aria a moderato numero di *Reynolds*, impattante su lastra piana, è stato analizzato sia dal punto di vista fluidodinamico, tramite rilievi PIV, che per mezzo dell'analogia tra trasporto di massa e trasporto di calore, per mezzo della tecnica di ablazione di strati di naftalina ( $C_{10}H_8$ ). I rilievi hanno dimostrato che la presenza di vortici toroidali, generati da una perturbazione acustica, indice dell'instabilità del getto, alterano la zona di ristagno con conseguente modifica, incremento, del coefficiente di scambio termico medio locale. L'effetto è presente in tutte e tre i livelli del numero di *Reynolds* investigati. Le indagini proseguono con il tentativo di ottenere correlazioni tra la presenza del vortici toroidali, il loro impatto sulla superficie e il coefficiente di scambio termico istantaneo.

## NOMENCLATURA

- $d$  diametro dell'ugello, m
- $h$  distanza tra l'ugello e piastra di impatto, m
- $r$  coordinata radiale, m

<i>Re</i>	numero di <i>Reynolds</i> basato sul diametro dell'ugello
<i>Nu</i>	numero di <i>Nusselt</i> basato sul diametro dell'ugello
<i>Sh</i>	numero di <i>Sherwood</i> basato sul diametro dell'ugello
<i>Sc</i>	numero di <i>Shmidt</i>
<i>V</i>	velocità dell'aria, m/s
<i>z</i>	profondità di ablazione (coordinata verticale), m

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Angioletti M., Di Tommaso R.M., Nino E. and Ruocco G. "Simultaneous Visualization of Flow Field and Evaluation of Local Heat Transfer by Transitional Impinging Jets", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 46 pp. 1703–1713, 2003.
2. K. Jambunathan, E. Lai, M.A. Moss and B.L. and Button, A review of heat transfer data for single circular jet impingement, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 13, pp. 106-115, 1992.
3. R. Viskanta, Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets, *Experimental Thermal Fluid Sci.*, vol. 6, pp. 111-134, 1993.
4. S. Yokobori, N. Kasagi, M. Hirata, M. Nakamura and Y. Haramura, Characteristic behavior of turbulence and transport phenomena at the stagnation region of an axisymmetrical impinging jet, Proc. 2nd Int. Symp. on Turbulent Shear Flows, vol. 4, pp 12-18, 1979.
5. C.O. Popiel and O. Trass, Visualization of a free and impinging round jet, *Experimental Thermal Fluid Sci.*, vol. 4, pp. 106-115, 1992.
6. S.L. Anderson and E.K. Longmire, Particle motion in the stagnation zone of an impinging air jet, *J. Fluid Mech.*, vol. 299, pp. 333-366, 1995.
7. J. Sakakibara, K. Hishida and M. Maeda, Vortex structure and heat transfer in the stagnation region of an impinging plane jet (simultaneous measurements of velocity and temperature fields by digital particle image velocimetry and laser-induced fluorescence), *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 40, pp. 3163-3176, 1997.
8. R.J. Goldstein and H.H. Cho, A review of mass transfer measurement using naphthalene sublimation, *Experimental Thermal Fluid Sci*, vol. 10, pp. 416-434, 1995.
9. Z. Trávnicek, V. Tesar, Annular impinging jet with recirculation zone expanded by acoustic excitation, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47, pp. 2329-2341, 2004