

# **L'effetto Coanda in ambiente costiero**

*Dott. Luca De Antoniis*

*Tutor:*  
*Ing. Francesco Lalli*

## Indice

Indice .....	1
Introduzione .....	3
1. Descrizione dell'apparato sperimentale e delle tecniche di misura .....	6
1.1 Il modello sperimentale .....	7
1.1.1 <i>La sezione di prova</i> .....	7
1.1.2 <i>L'impianto idraulico</i> .....	10
1.1.3 <i>Il sistema di acquisizione</i> .....	11
1.2 <i>Le tecniche di misura</i> .....	13
1.2.1 <i>Visualizzazioni</i> .....	14
1.2.2 <i>Misure PIV per i campi di velocità</i> .....	14
2. Descrizione del modello numerico .....	18
2.1 Il modello continuo .....	18
2.2 Il modello discreto .....	20
3. L'effetto Coanda nell'Ingegneria Aeronautica .....	24
3.1 Interazione di un getto con una parete laterale .....	26
3.1.1 $\beta = h = 0$ .....	27
3.1.2 $\beta \neq 0$ e $h=0$ .....	28
3.2 Descrizione del campo fluidodinamico ( $\beta=0$ e $h \neq 0$ ) .....	29
3.2.1 <i>Influenza dell'angolo <math>\beta</math></i> .....	35
3.3 Determinazione della lunghezza di riattacco .....	36
3.4 Applicazioni in campo aeronautico .....	37
3.5 Analogie e differenze con altre configurazioni sperimentali .....	39
3.5.1 <i>BFS</i> .....	39
3.5.2 <i>Twin Jet</i> .....	42
4. L'effetto coanda nell'ingegneria costiera: influenza della superficie libera .....	43
4.1 Visualizzazioni .....	43
4.2 Conclusioni della campagna di visualizzazioni .....	51
4.3 Misure anemometriche: getto con parete laterale .....	51
4.3.1 <i>Determinazione della lunghezza di riattacco</i> .....	60
4.4 Simulazioni numeriche .....	65
4.5 Confronti .....	66
5. L'effetto coanda nell'ingegneria costiera: schema di porto-canale .....	68
5.1 Misure anemometriche .....	69
5.2 Visualizzazioni. Controllo del flusso .....	72
Conclusioni .....	78
Bibliografia .....	79

## **Introduzione**

Gli ambienti di transizione, come le lagune costiere, rappresentano un ecosistema in grado di accumulare temporaneamente o definitivamente molti contaminanti trasportati dai fiumi verso il mare. Le sostanze contaminanti sono trasportate in associazione al particolato sospeso, inorganico e organico, oppure disciolte. La deposizione in ambiente lagunare avviene sia per perdita di competenza della corrente fluviale, che per l'interazione fra acqua dolce e acqua salata. L'interazione fra acqua dolce e salata porta ad un aumento della forza ionica e ad un cambiamento delle condizioni fisico-chimiche.

Lo studio degli ambienti di transizione risulta fondamentale nel comprendere il destino degli elementi in traccia di prevalente origine antropogenica (contaminanti), specialmente se questi ambienti si collocano all'interno di aree fortemente antropizzate. Altrettanto importante è lo studio del particolato fine in grado di associare molti elementi in traccia, in posizioni reticolari facilmente rilasciabili nell'ambiente e di entrare così nel ciclo trofico.

Il presente studio riguarda in particolar modo la dispersione di acque fluviali in ipotesi di acque basse, sotto l'effetto della forzante dell'ambiente marino. Tipicamente lavori di ingegneria civile generano significanti effetti ambientali lungo la costa, a causa della modificazione del campo fluidodinamico. Il problema riguarda come migliorare la dispersione delle acque fluviali, con particolare attenzione alla qualità delle acque lungo la costa. Il problema è complesso, a causa delle interazioni del fiume con strutture marine. Questa configurazione è la combinazione di due campi del flusso note in meccanica dei fluidi come “jet in a cross-flow” e “impact jet on a wall”.

Gli effetti della stratificazione non sono stati considerati: l'interesse si è concentrato su caratteristiche barotropiche. La soluzione numerica è realizzata da un metodo alle differenze finite (Lalli et al, 2002).

Partendo da queste considerazioni, la dispersione di un getto in domini di geometria semplice è stata analizzata sia numericamente (equazioni mediate sulla profondità) che sperimentalmente (Particle Image Velocimetry, PIV).

L'analisi sperimentale è stata portata a termine in un impianto descritto in seguito. Innanzitutto sono stati effettuati esperimenti per l'analisi del caso semplice dell'interazione fra un getto e una parete laterale, noto come effetto Coanda, che genera un campo fluidodinamico apparentemente simile al "backward-facing step flow". Infatti il punto di riattacco misurato lungo la parete laterale, si comporta in maniera simile, come funzione del numero di Reynolds. In seguito è stata analizzata una configurazione semplificata di porto-canale, con frangiflutti e banchina sagomata ad L. Si è notato come i risultati numerici siano in buon accordo con i risultati sperimentali ottenuti.

Nel primo capitolo viene descritto l'apparato sperimentale e vengono introdotti i dettagli relativi alle tecniche di acquisizione delle immagini ed elaborazione delle stesse tramite tecnica Particle Image Velocimetry (PIV).

Nel secondo capitolo viene descritto il metodo numerico utilizzato.

Nel terzo capitolo vengono riportati dati presenti in letteratura, relativi al getto libero e al getto in presenza di parete laterale, noto come effetto Coanda, che verranno confrontati con i dati sperimentali ottenuti

Nel quarto capitolo vengono riportate le visualizzazioni delle varie configurazioni considerate tramite immissione di fluoresceina, ottenendo delle descrizioni qualitative dei campi fluidodinamici, nonché i risultati sperimentali ottenuti tramite tecnica PIV per la configurazione semplice con parete laterale.

Nel quinto capitolo vengono presentati i risultati delle caratteristiche fluidodinamiche delle configurazioni complesse considerate e i confronti dei dati sperimentali con i risultati numerici ottenuti.

Vengono infine riportate considerazioni sui risultati ottenuti e vengono presentati sviluppi futuri della ricerca svolta.

## **1. Descrizione dell'apparato sperimentale e delle tecniche di misura**

L'utilizzo del modello fisico costituisce prassi consolidata nell'ambito delle discipline dell'ingegneria legate alle problematiche dell'idraulica e della meccanica dei fluidi, nella misura in cui la complessità dei fenomeni in gioco non consente di ottenere soluzioni di natura analitica o numerica. Secondo tale prassi, vengono realizzati modelli che rappresentano, in scala ridotta, il caso reale oggetto di studio; in particolare, nel caso dell'Ingegneria del Mare, la progettazione del modello avviene di solito nel rispetto della similitudine di Froude, idonea per la simulazione dei fenomeni ondosi. Le indagini svolte a suo tempo presso l'Estramed, finalizzate principalmente allo studio dell'interazione onde-strutture, sono state impostate su queste basi. Il presente esperimento è stato progettato invece con la finalità di studiare l'interazione getto-strutture, fenomeno tipicamente legato al numero di Reynolds. E' noto che non è possibile realizzare un modello in scala ridotta che rispetti sia la similitudine di Reynolds che quella di Froude e comunque, a prescindere dalla similitudine di Froude, ottenere numeri di Reynolds prossimi al vero richiede modelli di notevoli dimensioni, con costi conseguenti. Queste considerazioni suggeriscono l'adozione della modellistica numerica per la simulazione del flusso; la modellistica numerica, tuttavia, non ha ancora raggiunto livelli di affidabilità tali da poter essere utilizzata senza alcun supporto di natura sperimentale. Pertanto, si è scelto di realizzare un modello fisico allo scopo di effettuare dei test di affidabilità per il modello teorico-numerico; in questo contesto, non si è ritenuto quindi necessario rispettare la geometria del sistema reale (limitando notevolmente i costi), a patto che, come evidenziato in precedenza, il modello schematizzato sia idoneo a rappresentare la fenomenologia idrodinamica in gioco.

A questo scopo, il modello è stato progettato prevedendo l'effettuazione di due differenti geometrie di prova. La prima, destinata ad analizzare il comportamento di un getto a superficie libera in presenza di una parete laterale, riguarda l'approfondimento dell'effetto Coanda in una configurazione ideale e si compone unicamente di un pennello parallelo al getto, di lunghezza sufficiente a garantire il riattacco del getto stesso sulla parete. La seconda prevede la presenza di alcuni elementi di forma semplice, atte a schematizzare le opere presenti in una generica area antistante la foce di un fiume, mirata ad ottenere informazioni di carattere generale in merito alle fenomenologie idrodinamiche in gioco nonché alla validazione del modello numerico.

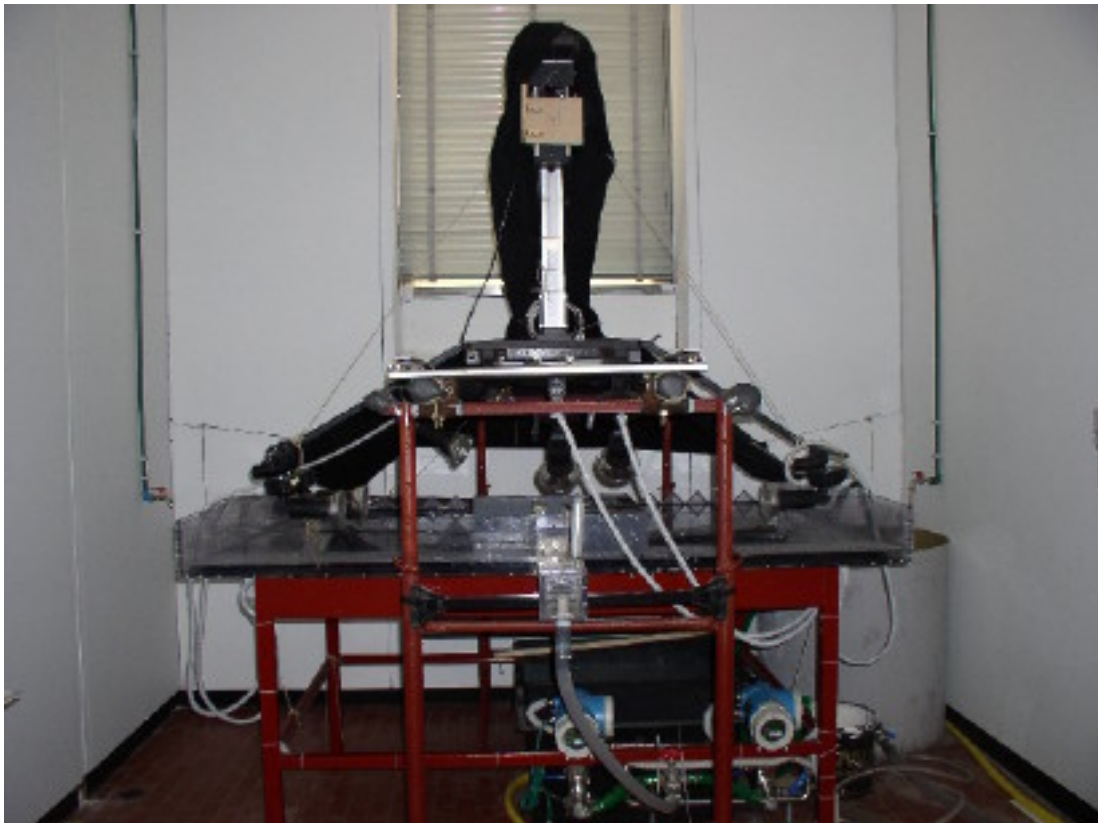
### *1.1 Il modello sperimentale*

#### *1.1.1 La sezione di prova*

L'apparato sperimentale, messo a punto appositamente per il presente lavoro, è stato progettato allo scopo di approfondire la conoscenza dei flussi nel dominio descritto, determinando in particolare la dipendenza del flusso dal numero di Reynolds. E' stato quindi realizzato un modello, rappresentante un generico porto. Questo modello è stato inserito in una vasca rettangolare le cui dimensioni sono riportate in seguito. La vasca viene alimentata attraverso un canale di ingresso che, simulando il comportamento del fiume, si immette nello specchio d'acqua confinato nell'ambito delle opere portuali. Il canale di ingresso è composto da due parti: una parte è in pressione, mentre l'altra, ottenuta fissando sul fondo della vasca tangenzialmente alla sezione di ingresso due elementi in pvc, è a superficie libera. La parte in pressione è in plexiglass, lunga 50 cm, con una sezione di 4 x 5 cm (Figura 1. 3); fissata alla vasca mediante una flangia, essa è dotata di un innesto per alimentazione della vasca stessa. La parte a superficie libera ha anch'essa sezione 4x5cm

(l'altezza è regolata dallo stramazzo) ed è lunga 30 cm. In questo modo il canale di ingresso ha una lunghezza complessiva di 80 cm, pari a 16 volte la larghezza del canale, e una altezza di 4 cm.

La batimetria della vasca è costituita da un piano orizzontale la cui profondità è costante e pari a 0.04 m, pari a quella presente all'interno del canale. Le pareti laterali della vasca sono in plexiglas, ad eccezione della parete di fondo: questa è realizzata in PVC e costituisce lo stramazzo attraverso il quale le acque defluiscono dalla vasca. L'altezza dello stramazzo è regolabile. L'alimentazione della vasca è garantita dall'impianto idraulico ad essa asservito.



**Figura 1. 1: L'apparato sperimentale**



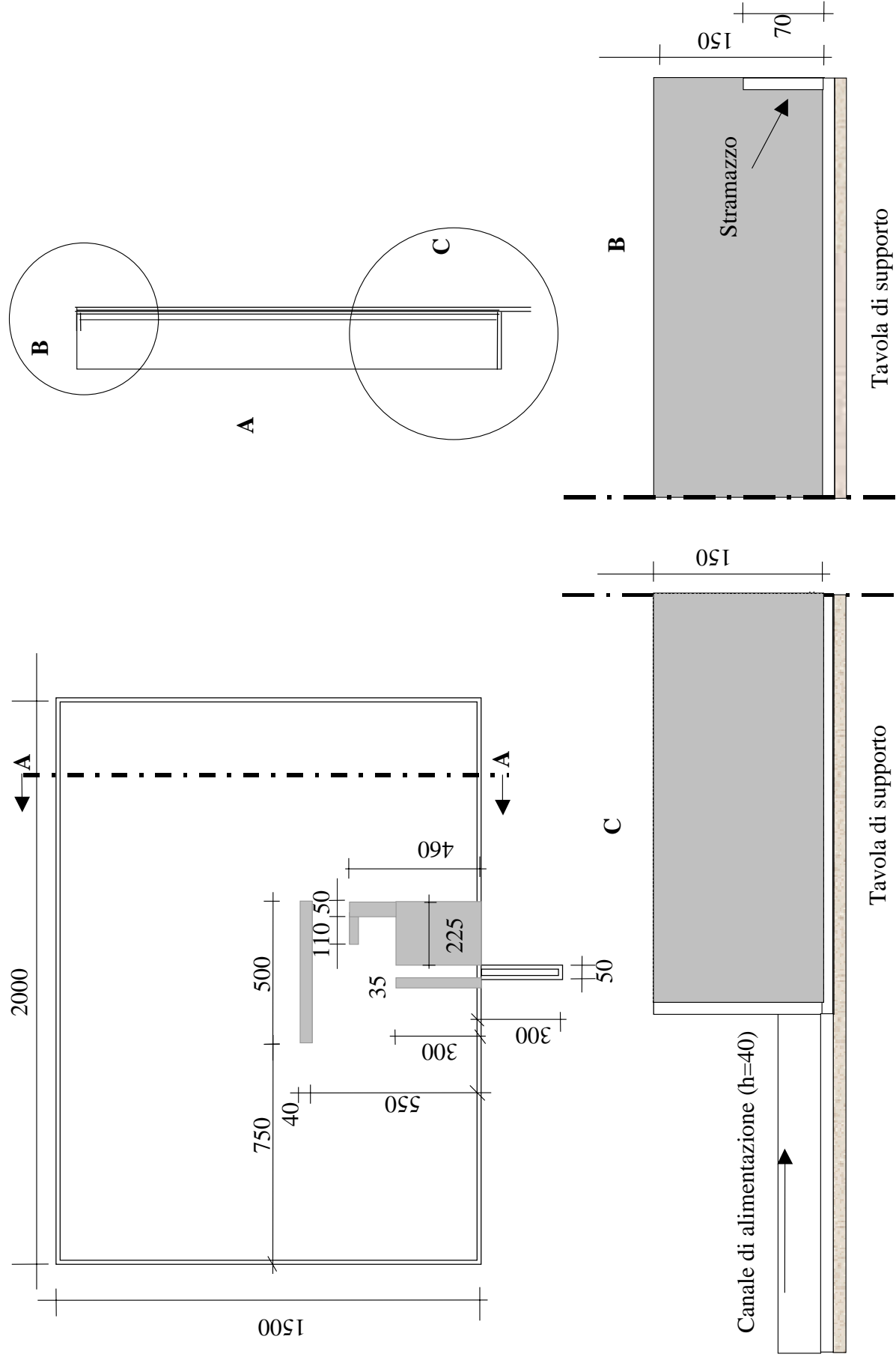
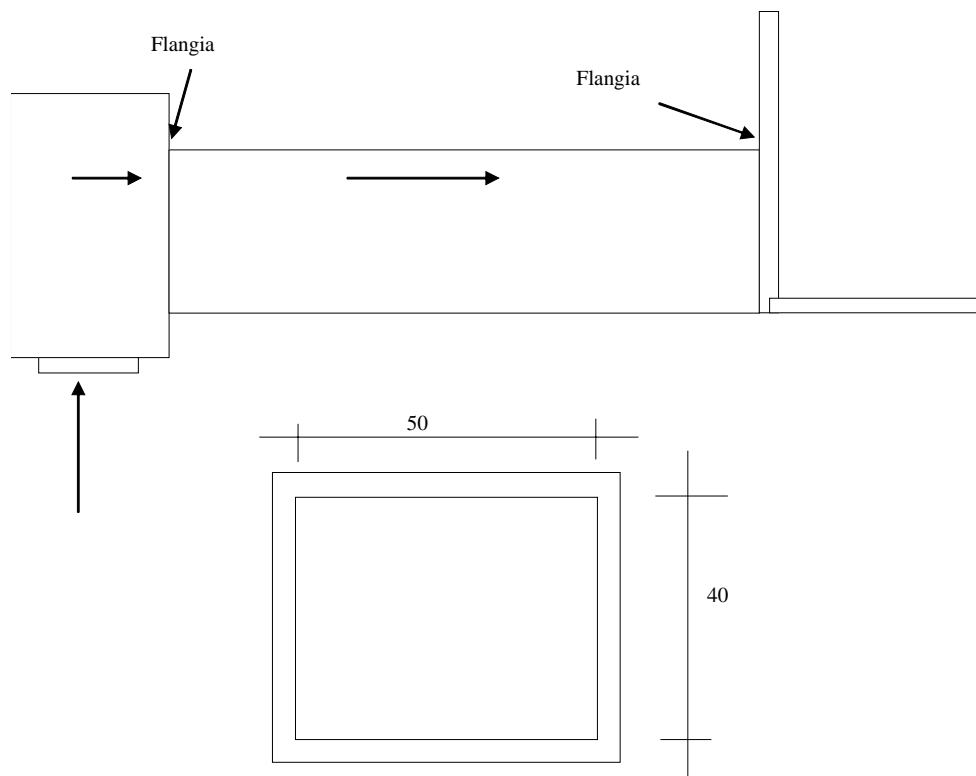


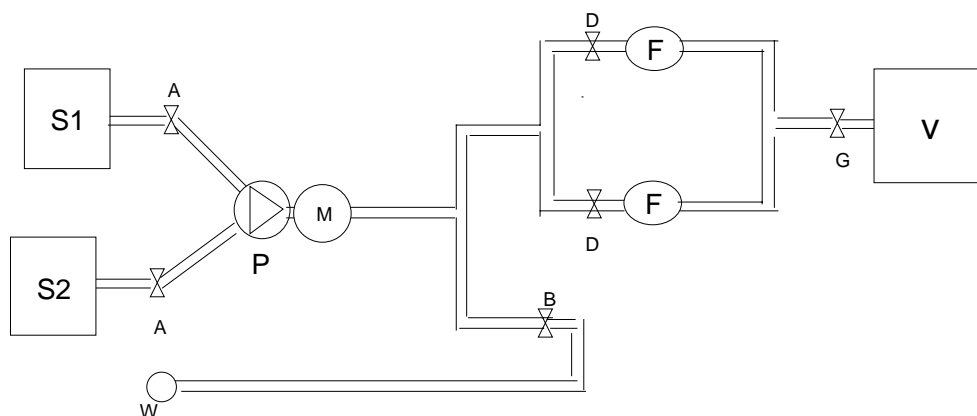
Figura 1. 2: Particolari della sezione di prova



**Figura 1. 3:Particolari della sezione di prova**

#### *1.1.2 L'impianto idraulico*

L'impianto idraulico messo a punto per questo set-up sperimentale è schematizzato in Figura 1.4.



**Figura 1. 4:L'impianto idraulico.**

Nell'impianto sono presenti due serbatoi, S1 e S2, rispettivamente di capacità 500 l e 200 l, che possono essere usati indipendentemente per alimentare la

pompa P tramite l'apertura alternata delle valvole a saracinesca A. In particolare questa configurazione permette l'uso di uno dei due serbatoi come alimentazione per il colorante utilizzato nelle visualizzazioni: ad esempio riempiendo S1 con acqua e S2 con colorante, si può far pescare la pompa da S1 e, una volta aperta la valvola A di S2, chiudere S1. In questo modo si genera un flusso di colorante che viene utilizzato per le visualizzazioni. Sulla linea di mandata della pompa P è montato un manometro M, con fondo scala di 4 atm, su cui si può leggere il valore della pressione all'interno dell'impianto. Per controllare la pressione è stato predisposto un circuito di by-pass che, tramite la valvola a saracinesca B, permette di ridurre la portata nel circuito deviandone una parte verso lo scarico W o verso uno dei due serbatoi. Prima di confluire nella vasca V, la portata rimanente viene fatta passare attraverso uno dei due flussimetri F, selezionato dall'apertura alternata delle valvole a saracinesca D.

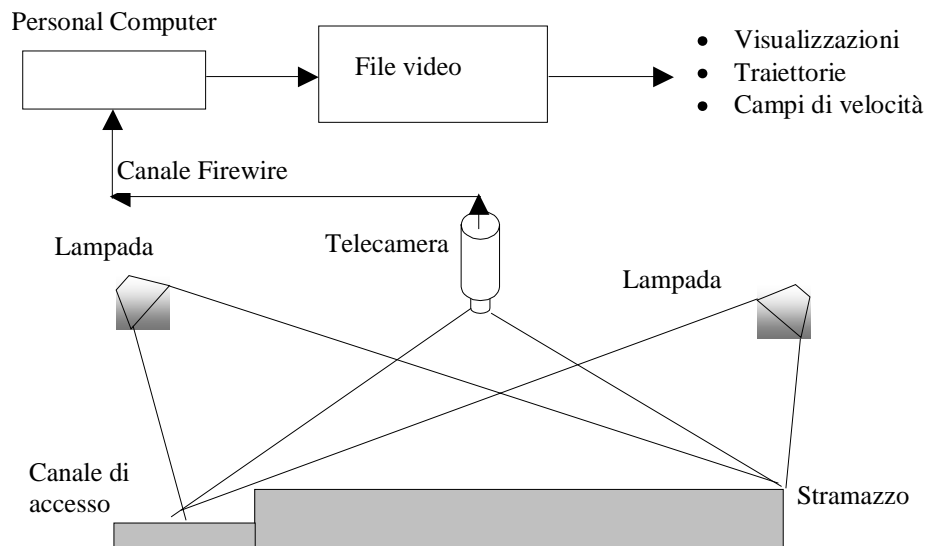
I flussimetri F sono dei dispositivi di misura della portata che si basano sul principio dell'induzione elettromagnetica (legge di Faraday). Secondo tale legge un conduttore in moto in un campo magnetico induce una tensione: nel nostro caso il conduttore in moto è l'acqua e il campo magnetico è generato mediante una corrente continua bipolare. La precisione di questi strumenti è estremamente elevata rispetto ai flussimetri tradizionali.

Il range di misura ottimale dei flussimetri ha determinato la scelta nell'utilizzo di uno dei due, facendo in modo che, per ogni acquisizione, il valore di velocità in esame fosse all'interno di tale range.

### *1.1.3 Il sistema di acquisizione*

Data la tipologia di misure da effettuare, il sistema di acquisizione si compone di un sistema di illuminazione della superficie libera della vasca e di un sistema di ripresa di immagini del campo di moto nella zona di interesse. L'apparato di ripresa (Figura 1. 5) è costituito da un banco ottico dotato di illuminazione, e da una telecamera ad esso collegata.

L'illuminazione è garantita da 6 lampade indipendenti, orientabili, con una potenza massima di 120 Watt ognuna, regolabile indipendentemente, per ciascuna lampada, attraverso un reostato. Le lampade, collegate al banco ottico tramite accoppiamento meccanico, sono inoltre a tenuta stagna, certificate IP67.



**Figura 1. 5:Schema del sistema di acquisizione**

La telecamera viene fissata al banco ottico, il quale ne permette una precisa regolazione della posizione. La telecamera utilizzata, un modello Panasonic commerciale con standard DV-PAL, ha una risoluzione di 720x576 pixel ed una frequenza di acquisizione di 25 frame al secondo, con velocità di apertura dell'otturatore (shutter) regolabile; questo ha consentito di ottenere immagini fisse del campo di moto, pur in presenza di velocità non trascurabili. Date le caratteristiche dello standard DV-PAL, la risoluzione temporale risulta essere di 40 ms, a frequenza 25 Hz. Le immagini ottenute sono essenzialmente delle matrici, in cui ogni elemento (denominato pixel) contiene il valore di intensità luminosa proveniente dalla zona inquadrata corrispondente. La risoluzione spaziale, definita come l'inverso della dimensione minima misurabile dal sistema, è legata alla dimensione della zona inquadrata ed alle dimensioni del ccd della telecamera. Nella configurazione tipica di misura, con un'area inquadrata di 40X50 cm, si ha:

$$d_{\min}=500/720 \text{ mm/pixel}$$

e quindi :

$$\text{ris.spaz.}=1/d_{\min}=1.44$$

Una volta effettuata la ripresa, le immagini sono state trasferite , tramite canale firewire (IEEE1394a), sul computer e in seguito analizzate per ottenere i risultati.

## *1.2 Le tecniche di misura*

Nel presente lavoro sono state utilizzate tecniche anemometriche di tipo ottico, non invasive, che consentono una descrizione accurata del campo fluidodinamico generato nella sezione di prova.

Sono state utilizzate due tipologie di analisi: visualizzazione del flusso mediante immissione di colorante e determinazione dei campi di velocità mediante la tecnica PIV (Particle Image Velocimetry), tecnica che consente di ottenere campi di velocità euleriani dell'intero campo di moto. Tale metodologia si compone di due fasi distinte: una prima fase di acquisizione del dato mediante l'apparato di misura descritto nel precedente paragrafo ed una seconda fase di analisi per ottenere l'informazione quantitativa voluta. Il dato acquisito è costituito da una serie di immagini in formato digitale, caratterizzate dalla risoluzione spaziale e temporale già descritta; tali immagini forniscono una informazione sulla luminosità degli oggetti ripresi sotto forma di una funzione bidimensionale ad un unico valore detta appunto funzione di luminosità  $I(x,y)$ . Su tali funzioni, una per ogni immagine, si vanno ad innestare le analisi successive caratteristiche delle tecniche proposte.

Per quanto concerne le visualizzazioni di flusso l'analisi che viene condotta è di tipo "visivo"; cioè osservando le immagini od i filmati nel loro complesso si ottengono informazioni qualitative sull'andamento del campo fluidodinamico. Per quanto riguarda la PIV un algoritmo appositamente sviluppato consente di

ottenere informazioni quantitative in merito al campo di velocità relativo al dominio in esame.

### *1.2.1 Visualizzazioni*

Le visualizzazioni effettuate permettono di ottenere una visione integrata lungo la profondità del campo fluidodinamico, in quanto il colorante immesso si mescola in tutta la sezione. Il colorante utilizzato viene immesso nella vasca di misura tramite l'apertura alternata dei due serbatoi. Il serbatoio S2 viene riempito con acqua e colorante, mentre S1 contiene solo acqua. Al momento dell'acquisizione, aprendo la valvola a saracinesca di S2 e chiudendo di conseguenza la valvola S1, la pompa immette nel circuito acqua e colorante. Questo procedimento assicura inoltre, nel serbatoio e lungo il circuito idraulico, un perfetto mescolamento tra acqua e colorante. Giunta nella camera di calma e nel canale, la miscela è distribuita in modo omogeneo lungo tutta la sezione verticale del canale stesso.

L'analisi viene effettuata selezionando fotogrammi rappresentativi dello sviluppo temporale del campo fluidodinamico.

### *1.2.2 Misure PIV per i campi di velocità*

La tecnica Piv è una tecnica di Anemometria ottica non intrusiva che consente di misurare le componenti di velocità di un flusso. Il principio di misura si basa sulla determinazione dello spazio percorso da particelle inserite nel campo fluidodinamico, dette traccianti, in un intervallo di tempo noto. In tale modo, secondo le formule seguenti,

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad ; \quad v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (1)$$

è possibile determinare la velocità delle particelle traccianti e quindi del fluido, nell'ipotesi che il moto delle particelle sia strettamente connesso a quello delle particelle fluide; tale ipotesi risulta verificata nella misura in cui il diametro delle particelle è sufficientemente piccolo e la densità relativa del materiale è prossima all'unità.

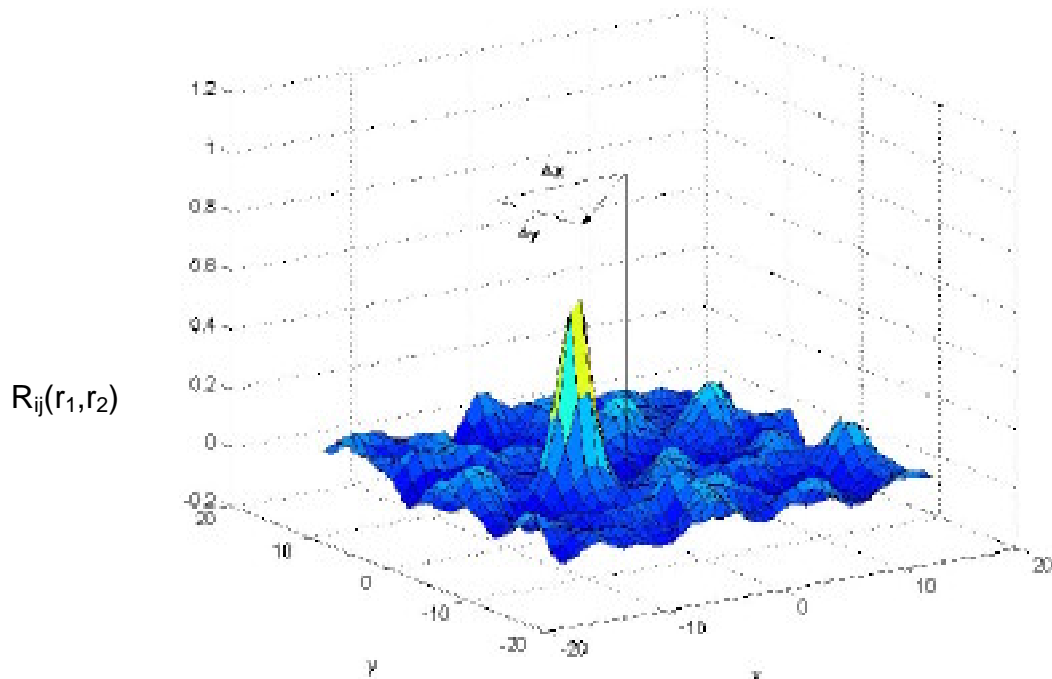
La determinazione delle componenti di velocità è effettuata a partire dalle immagini acquisite cioè dalle funzioni intensità luminosa  $I(x,y)$  che caratterizzano ciascuna immagine; esaminando le immagini a coppie e suddividendo l'immagine in sottodomini di dimensioni variabili a scelta dell'utente, viene calcolato lo spazio medio percorso dalle particelle presenti negli stessi. Tale spostamento è quello per il quale risulta massimizzata la funzione di cross-correlazione

$$R_{ij}(r_1, r_2) = \iint I_i(x, y) I_j(x + r_1, y + r_2)$$

in cui  $i$  e  $j$  indicano i sottodomini di interrogazione nella prima e nella seconda immagine ed  $r_1$  e  $r_2$  sono le componenti di spostamento generico; determinando infatti  $r_1$  e  $r_2$  per i quali

$$\max_{(r_1, r_2)} (R_{ij}(r_1, r_2) = \iint I_i(x, y) I_j(x + r_1, y + r_2))$$

si risale attraverso la (1) alle velocità nei sottodomini interrogati.



**Figura 1. 6: Funzione di cross-correlazione  $R_{ij}$ .**

Dato il particolare sistema di acquisizione le immagini in oggetto sono digitali e caratterizzate da una profondità di 8 bit, quindi con una scala di 256 livelli di grigio, con valori da 0, nero, a 255, saturazione luminosa o bianco.

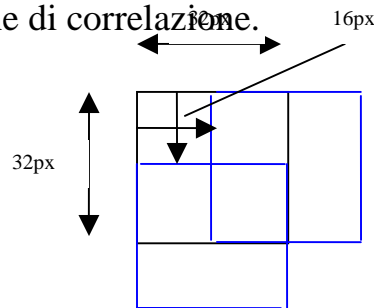
Data la particolare natura dei problemi allo studio le particelle traccianti sono state immesse nel flusso sulla superficie libera del fluido. Si è assunto quindi che il comportamento della superficie libera sia rappresentativo del comportamento del fluido lungo la profondità. Ciò equivale a riproporre l'ipotesi di acque basse (shallow water) anche nell'analisi dei dati sperimentali.

Nel codice di calcolo utilizzato, PIV40, sviluppato da Cotroni, Di Felice, Romano, Elefante (2000) e Di Felice, Di Florio, Romano (2002) si utilizza un offset discreto dalle finestre con applicazione di una funzione peso gaussiana. Il codice utilizzato permette anche una validazione del vettore spostamento calcolato tramite la definizione di un fattore, MMV, che confronta il modulo e la



direzione del vettore spostamento appena calcolato con il vettore ottenuto dalla media degli otto vettori adiacenti. Nello studio effettuato sono stati convalidati i vettori che differiscono del 45% in modulo e di 50 gradi in direzione rispetto al vettore medio calcolato.

Nella parte di analisi della tecnica PIV l'immagine è suddivisa in sottodomini: le dimensioni scelte per tali finestre di interrogazione sono di 32 x 32 pixels, distanziate dalle finestre contigue di 16 pixels sia lungo X che lungo Y (Figura 1. 7). Tali finestre permettono di catturare un numero sufficientemente alto di tracce di particelle (~20), necessarie per una accurata determinazione del massimo della funzione di correlazione.



**Figura 1. 7: Spaziatura e dimensione delle finestre di interrogazione.**

## **2. Descrizione del modello numerico**

In questo capitolo viene descritto il codice di calcolo sviluppato presso l'APAT (Lalli et al, 2002), che consente la soluzione delle equazioni delle acque basse con un metodo numerico alle differenze finite. In ambienti costieri caratterizzati da moderata profondità dei fondali rispetto alla scala orizzontale è possibile utilizzare il modello basato sull'approssimazione di acque basse, trascurando le componenti verticali del flusso e assumendo una distribuzione idrostatica delle pressioni. Questo tipo di approssimazione non è naturalmente idoneo alla simulazione di fenomeni di propagazione ondosa.

Le equazioni, scritte in forma conservativa e in termini di variabili primitive, vengono risolte numericamente con un metodo alle differenze finite, applicando lo schema di Runge-Kutta al 3° ordine nel tempo. La presenza di geometrie complesse viene risolta con un approccio basato sul concetto di “body force”.

Nel presente lavoro questo modello è stato utilizzato anzitutto per la simulazione di flussi in geometrie molto semplici, allo scopo di testarne l'accuratezza (validazione); successivamente è stato applicato al caso del porto di Pescara.

Alcune considerazioni in merito all'utilizzo di un modello di flusso bidimensionale, trascurando in particolare gli effetti del galleggiamento presenti in prossimità di una foce fluviale, verranno sviluppate nel paragrafo 6.3.

### *2.1 Il modello continuo*

Le equazioni che descrivono i flussi in acque basse possono essere scritte, in forma conservativa:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(U^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial y} = \\ -gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu H \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] - FU \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2/H)}{\partial y} = \\ -gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu H \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] - FV \end{aligned} \quad (3)$$

in cui:  $H = h + \eta$ ,  $U = Hu$ ,  $V = Hv$  e  $F = gH^{-\frac{7}{3}} n^2 \sqrt{U^2 + V^2}$ , dove  $h$  è la profondità (positiva verso il basso) e  $\eta$  è l'elevazione della superficie libera (positiva verso l'alto);  $\mu$  è la viscosità,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $n$  è il coefficiente di Manning,  $u$  e  $v$  sono le componenti orizzontali di velocità mediate sulla verticale. Per la viscosità turbolenta viene utilizzato un modello algebrico, nel quale come scala fondamentale della turbolenza viene scelta la profondità locale. Dunque:

$$\mu = \mu_0 + \mu_T \quad \mu_T = C u_\tau H$$

nelle quali  $\mu_0$  è la viscosità cinematica del fluido,  $\mu_T$  la viscosità turbolenta,  $C$  una costante e  $u_\tau$  la cosiddetta “velocità di attrito”.

Infine, nel modello viene utilizzata la seguente approssimazione:

$$H \approx h \quad U \approx hu \quad V \approx hv$$

la superficie libera viene quindi trattata in forma linearizzata. Questa assunzione risulta valida in presenza di modeste elevazioni della superficie libera, ossia nella misura in cui il numero di Froude è basso (flusso ovunque subcritico, come

nei casi esaminati nel presente studio, in cui il massimo valore del numero di Froude e' pari a .32). Nell'ambito di questa approssimazione il problema della delimitazione tra aree asciutte e bagnate nel dominio di calcolo viene notevolmente semplificato, in quanto tale delimitazione viene stabilita una volta per tutte.

## 2.2 Il modello discreto

La soluzione numerica è ottenuta applicando un metodo alle differenze finite che segue le linee generali di quello proposto da Le e Moin (1991): l'avanzamento nel tempo viene trattato mediante uno schema di Runge-Kutta al 3° ordine, mentre la discretizzazione spaziale viene espressa in forma esplicita mediante uno schema centrato accurato al 2° ordine (termini diffusivi). I termini convettivi, per evitare limitazioni nel numero di Reynolds “cella”, vengono invece discretizzati con uno schema “bounded” al 3° ordine (Gaskell & Lau, 1988), al fine di evitare oscillazioni nella soluzione numerica, come generalmente si opera nell'ambito di simulazioni di tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Il termine di frizione al fondo viene considerato in forma implicita, mantenendo la semplicità dello schema esplicito in quanto tale termine compare sulla diagonale principale, ma beneficiando in parte dei vantaggi di uno schema implicito: le simulazioni vengono infatti effettuate con  $CFL \sim 1$ . La forma discreta delle equazioni e' quindi la seguente:

$$\eta^{n+1} = \eta^n + \Delta t [\gamma A_\eta^n + \rho A_\eta^{n-1}] \quad (4)$$

$$U^{n+1} = U^n + \Delta t [\gamma A_U^n + \rho A_U^{n-1}] - \alpha \Delta t \left[ gh^{n+1} \frac{\delta \eta^{n+1}}{\delta x} + FU^{n+1} \right] \quad (5)$$

$$V^{n+1} = V^n + \Delta t [\gamma A_V^n + \rho A_V^{n-1}] - \alpha \Delta t \left[ gh^{n+1} \frac{\delta \eta^{n+1}}{\delta y} + FV^{n+1} \right] \quad (6)$$

in cui:

$$A_\eta^n = -\frac{\delta U^n}{\delta x} - \frac{\delta V^n}{\delta y}$$

$$A_U^n = -\frac{\delta}{\delta x} \left[ \frac{(U^n)^2}{h} \right] - \frac{\delta}{\delta y} \left[ \frac{U^n V^n}{h} \right] + 2 \frac{\delta}{\delta x} \left[ \mu h \frac{\delta u^n}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[ \mu h \left( \frac{\delta v^n}{\delta x} + \frac{\delta u^n}{\delta y} \right) \right]$$

$$A_V^n = -\frac{\delta}{\delta x} \left[ \frac{U^n V^n}{h} \right] - \frac{\delta}{\delta y} \left[ \frac{(V^n)^2}{h} \right] + \frac{\delta}{\delta x} \left[ \mu h \left( \frac{\delta v^n}{\delta x} + \frac{\delta u^n}{\delta y} \right) \right] + 2 \frac{\delta}{\delta y} \left[ \mu h \frac{\delta v^n}{\delta y} \right]$$

e  $\gamma$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$  sono i coefficienti dello schema di Runge-Kutta al 3° ordine (Le e Moin, 1991).

La necessità di introdurre nel dominio di calcolo le opere marittime richiede l'attitudine del modello discreto alla descrizione di geometrie comunque complesse. Questo problema viene in genere risolto adottando sistemi di coordinate curvilinee o griglie che si adattano ai contorni della geometria. Il presente codice, che adotta un sistema di griglie “staggered”, calcola i flussi nelle geometrie complesse mediante l'approccio basato sul concetto di “body forces” (Fadlun et al., 2000) che permette di imporre condizioni al contorno su una data superficie non necessariamente coincidente con la griglia computazionale. In questo modo le equazioni del modello possono essere sviluppate su una griglia cartesiana, con tutti i vantaggi dovuti alla adozione di procedure standard per il calcolo. La procedura descritta da Fadlun et al (2000) è stata implementata in forma semplificata, in quanto nell'ambito dell'ingegneria costiera non sono generalmente richiesti i dettagli del flusso in prossimità degli ostacoli. Tenendo presente la natura “staggered” della griglia di calcolo, l'approccio descritto implica che se la cella  $ij$  appartiene a una zona asciutta nel dominio del flusso, allora valgono le:

$$U_{i,j} = U_{i+1,j} = 0 \qquad V_{i,j} = V_{i,j+1} = 0$$

e l'elevazione può essere ottenuta dalla (4) senza ulteriori condizioni. Lo schema numerico è quindi caratterizzato da una accuratezza spaziale  $O(\Delta^2)$  (in cui  $\Delta$  è il passo della griglia di calcolo), mentre gli ostacoli (corpi rigidi) all'interno del dominio vengono descritti con accuratezza  $O(\Delta)$ . Tenendo conto dell'ordine di precisione dei dati con cui vengono generalmente descritte le geometrie costiere, si può supporre che soluzione sia caratterizzata da accuratezza sufficiente.

Nel presente lavoro, nel caso delle simulazioni nella scala di laboratorio è stata utilizzata una griglia a maglia quadrata con passo  $5\text{ mm}$ , mentre per le simulazioni relative alla foce del fiume Pescara è stata utilizzata una maglia quadrata con passo  $5\text{ m}$ .

Infine, vengono descritte le condizioni al contorno utilizzate; per quanto concerne le simulazioni nella scala di laboratorio, non c'è alcuna difficoltà nella riproduzione delle condizioni dell'esperimento (getto "confinato"). Indicando con S il contorno relativo alla foce e con N quello relativo allo stramazzo, si ha infatti:

1. lato S: condizione di inflow nella sezione del getto e condizione di impermeabilità e non scorrimento sulla rimanente parte del contorno;
2. lati E, W: condizione di impermeabilità e non scorrimento;
3. lato N: condizione di deflusso distribuito lungo tutto il contorno (con portata pari a quella del getto).

Il metodo delle "body forces", utilizzato nel presente modello numerico per simulare la presenza di ostacoli all'interno del dominio di calcolo, corrisponde alle condizioni al contorno di impermeabilità e non scorrimento lungo la superficie degli ostacoli.

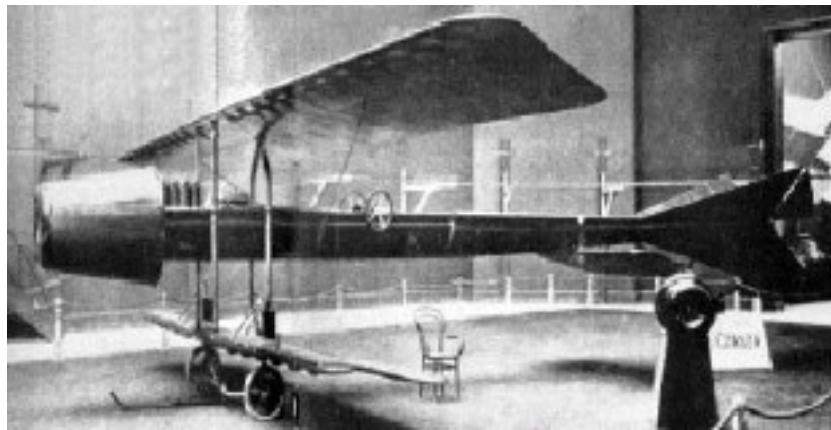
Per quanto concerne invece le simulazioni del flusso alla foce:

1. lato S: condizione di inflow nella sezione del getto e condizione di impermeabilità e non scorrimento sulla rimanente parte del contorno;
2. lati E, W: condizione di impermeabilità;
3. lato N: condizione di radiazione di Sommerfeld (con superficie libera indisturbata).

In questo caso le condizioni sui lati E,W creano notevole disturbo alla soluzione numerica. Pertanto il dominio computazionale, per eliminare ogni dubbio riguardo agli effetti di bordo, e' stato realizzato molto ampio, ma con griglia a passo variabile per non appesantire troppo il calcolo.

### 3. L'effetto Coanda nell'Ingegneria Aeronautica

Nel 1910 l'aerodinamico rumeno Henrie Marie Coanda ideò e costruì il prototipo di un aereo mosso da un motore a getto: la propulsione era assicurata non da eliche, ma dalla spinta prodotta da un compressore azionato da un normale motore a scoppio da 50 cavalli (Figura 3. 1).



**Figura 3. 1: Coanda Flyer (Agenzia Spaziale Rumena).**

Il prototipo incontrò non pochi problemi, dovuti soprattutto al fatto che l'aereo era costruito in legno e il getto caldo prodotto dal motore danneggiava la fusoliera; con l'intenzione di proteggerla, Coanda posizionò dei pannelli a ridosso dell'ugello, sperando di provocare una deviazione del getto stesso. L'effetto ottenuto fu disastroso in quanto il getto caldo seguiva il profilo dei pannelli, restandovi aderente, e deviando proprio sulla fusoliera. Solo nel 1930 comprese perfettamente il fenomeno, che ancora oggi porta il nome di effetto Coanda.

L'effetto Coanda è una delle principali peculiarità dell'interazione tra un getto ed una parete laterale e può essere descritto come la tendenza di un getto fluido a seguire il contorno di una superficie solida posizionata lateralmente al getto stesso. In particolare tale effetto si manifesta quando la parete solida è



posizionata ad una certa distanza  $h$  dall'uscita del getto (offset-jet), o se disposta tangenzialmente all'uscita del getto ed inclinata di un angolo  $\beta$  rispetto alla direzione del getto. Nel caso in cui si abbia  $\beta=h=0$  si ha la configurazione nota in letteratura come wall-jet.

Numerosi studi sono stati svolti per capire i parametri fondamentali da cui dipende lo sviluppo del campo fluidodinamico. Von Glahn (1958), posizionando una parete tangenzialmente ad un ugello e inclinata di un angolo  $\beta$ , configurazione nota proprio come Coanda Nozzle, ha verificato tramite misure di pressione l'aumento di portanza che tale configurazione comporta, utile nel progetto di propulsori per velivoli con una distanza di decollo ridotta. Nelle stesse condizioni Borque e Newman (1960), tramite misure di pressione sulla superficie solida, hanno evidenziato come aumentando l'angolo  $\beta$  cresca la lunghezza di riattacco. I risultati ottenuti sono stati confermati da Lai e Lu (2000) tramite misure con anemometria LASER-Doppler (LDA) e a filo caldo (Hot Wire) per un angolo  $\beta$  compreso tra 0 e 50°. In questo studio il numero di Reynolds (definito come  $Re = U_0 w / \nu$ , con  $U_0$  velocità media,  $w$  ampiezza del getto e  $\nu$  viscosità cinematica del fluido) variabile tra 6500 e 14000: in questo ambito il campo fluidodinamico risulta indipendente dal numero di Reynolds all'uscita del getto.

Nel caso dell'offset-jet, la distanza della parete  $h$  diventa uno dei parametri fondamentali nel campo fluidodinamico. Sawyer (1963) ha ricavato, proprio in funzione di  $h$ , l'andamento della pressione lungo la parete e la lunghezza di riattacco, calcolata come la distanza dalla sezione di uscita del punto di massimo di pressione statica. Nozaki et al (1979,1983) hanno individuato il punto di riattacco come il punto vicino alla parete in cui la velocità, calcolata con misure hot-wire, assume entità minima in valore assoluto. In entrambi gli esperimenti è stata ricavata una dipendenza lineare della lunghezza di riattacco dalla distanza  $h$ , relazione confermata anche da Hoch (1981) e Lund (1986).

Nasr e Lai (1998) hanno utilizzato misure LDA per evidenziare le caratteristiche del campo fluidodinamico, vista anche l'importanza che l'offset-jet ha assunto negli ultimi anni nella calibrazione dei modelli di turbolenza. Nel 2000 gli stessi autori hanno poi studiato la dipendenza, sempre nel caso di offset-jet, dell'inclinazione  $\beta$  della parete, che influenza l'estensione della zona di ricircolo, confinata tra l'uscita del getto e la lunghezza di riattacco.

### 3.1. *Interazione di un getto con una parete laterale*

Un getto è formato da un fluido uscente da un ugello in un ambiente fluido che può essere in quiete (getto libero), o a velocità non nulla (coflowing jet): a causa di questa differenza di velocità si crea, nella zona  $x/w < 5 \div 10$ , con  $w$  larghezza dell'ugello, un sottile strato, shear layer, altamente instabile che porta alla nascita di strutture vorticosi di grande scala, responsabili del mescolamento del getto con l'ambiente circostante (Figura 3. 2). La loro interazione porta poi alla nascita di fluttuazioni di velocità nelle piccole scale, che accelerano il mescolamento a livello molecolare (Alvi 2003).



**Figura 3. 2: Struttura del getto (Alvi 2003).**

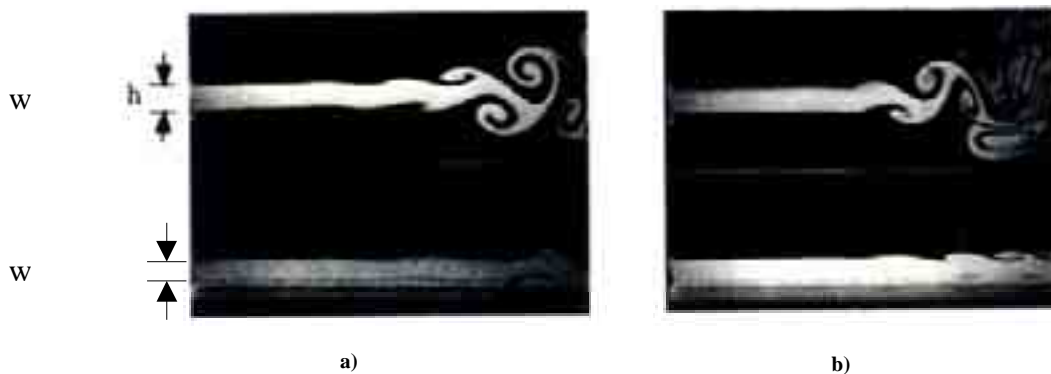
Posizionando una parete lateralmente al getto stesso, si crea una significativa asimmetria nelle condizioni al contorno che ha differenti conseguenze a seconda

che la parete sia posizionata tangenzialmente all'uscita del getto,  $h = 0$ , o ad una distanza  $h$  diversa da zero.

### 3.1.1. $\beta = h = 0$

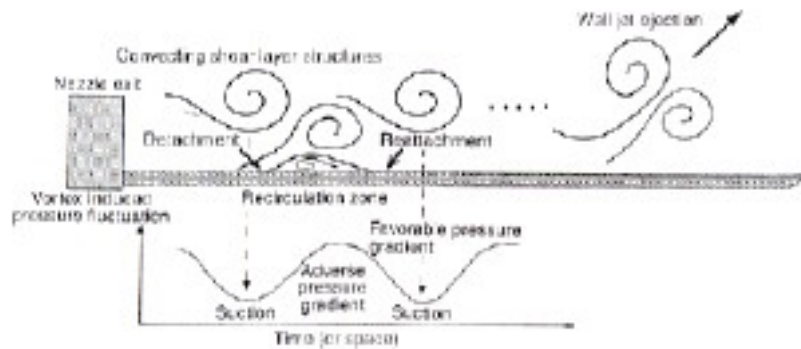
Nel caso in cui la parete sia adiacente all'uscita del getto e disposta parallelamente alla direzione del getto stesso si ha la configurazione del wall-jet (Glauert 1956, Bayura e Catalano 1975, Gogineni et al 1997).

La presenza della parete tende a stabilizzare il getto, soprattutto a bassi Reynolds (Figura 3. 3) , a causa della mancanza di interazione che si ha invece tra le strutture vorticosi dei due lati del getto in assenza di parete (Gogineni et al 1997).



**Figura 3. 3: Confronto tra il getto libero (parte superiore) ed il Wall-jet (parte inferiore). a)  $Re=1000$  ; b)  $Re=1500$  (Gogineni et al 1997).**

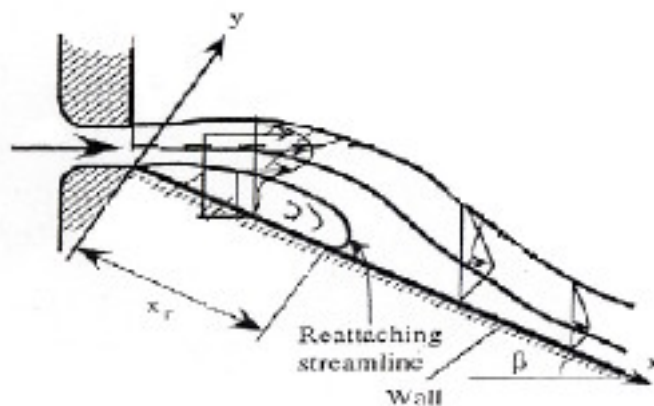
A ridosso della parete si ha l'interazione tra la corrente esterna e lo strato limite sviluppatosi sulla parete, in cui vengono a formarsi zone di ricircolo, a valle delle quali si ha il riattacco del getto (Figura 3. 4). La distanza dalla sezione di ingresso in corrispondenza della quale si generano tali strutture dipende dalle condizioni iniziali del getto (Gogineni et al 1997); all'interno di tali zone si generano vortici controrotanti rispetto a quelli della zona esterna.



**Figura 3. 4: Interazione strato limite corrente esterna in un Wall-jet:viene riportato anche l'andamento della pressione.(Gogineni et al 1997).**

### 3.1.2. $\beta \neq 0$ e $h=0$

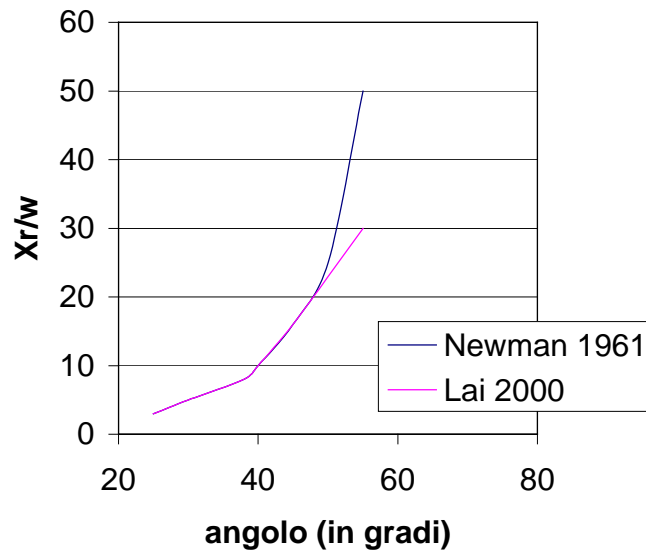
Inclinando la parete di angolo  $\beta$  diverso da zero , si hanno importanti modifiche nel campo fluidodinamico, rispetto al caso precedente (Figura 3. 5).



**Figura 3. 5: Parete inclinata di un angolo  $\beta$  (Lai 2000).**

In questa configurazione si nota l'insorgere di una zona di separazione, localizzata in corrispondenza della sezione di uscita, a valle della quale si ha , se la parete è sufficientemente lunga, il riattacco del getto sulla parete stessa (Borque e Newman (1961), Lai e Lu (1997, 2000)). La lunghezza di riattacco dipende in maniera non lineare dall'angolo di inclinazione  $\beta$  (Figura 3. 6). La zona di ricircolo si genera a causa della differenza di velocità che si instaura tra i due lati del getto : l'espansione del getto stesso è infatti limitata dal lato della

parete e risulta quindi accelerato rispetto al lato libero di espandersi (Lai et al 1992).

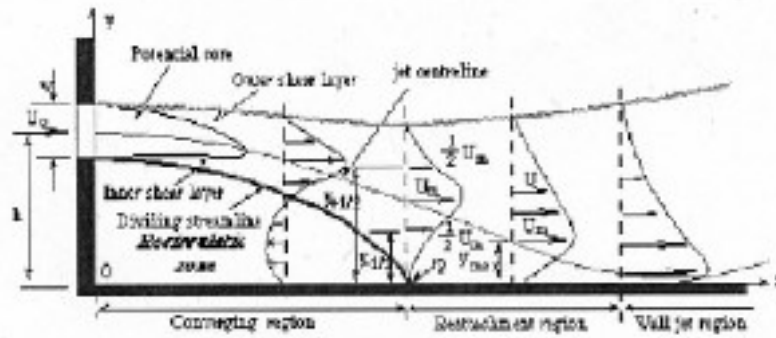


**Figura 3. 6: Lunghezza di riattacco  $x_r$  in funzione dell'angolo  $\beta$ .**

La configurazione esaminata nel presente studio è quella con  $h \neq 0$ ; tale caso viene quindi trattato in modo più completo nel paragrafo seguente.

### 3.2. *Descrizione del campo fluidodinamico ( $\beta=0$ e $h \neq 0$ )*

Posizionando la parete ad una distanza  $h$  si ottiene la configurazione rappresentata in Figura 3. 7 in cui si possono distinguere tre regioni caratteristiche (Sawyer (1963), Nozaki (1983), Lund (1986)):

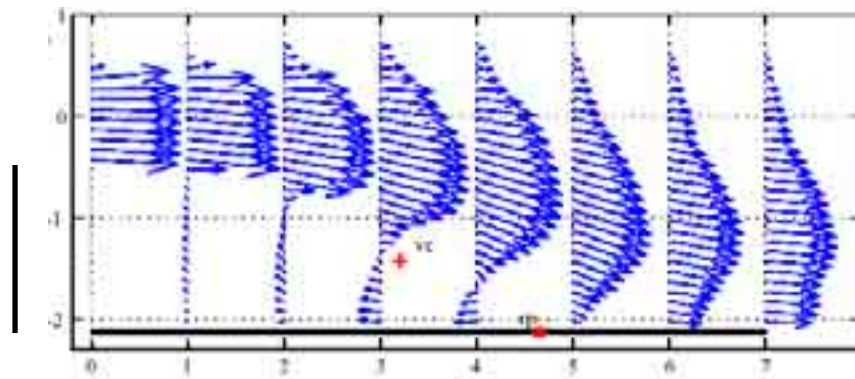


**Figura 3. 7: Campo fluidodinamico nell'offset jet (Nars & Lai 1997).**

- una zona di ricircolo, confinata tra l'uscita del getto e la distanza di riattacco  $x_r$ , misurata dall'uscita del getto, in corrispondenza della quale si ha l'attacco del getto sulla parete stessa;
- una regione di attacco, detta così in quanto il punto di attacco oscilla intorno ad una posizione media;
- una zona in cui il flusso si comporta come un wall-jet, presente se la parete è sufficientemente lunga .

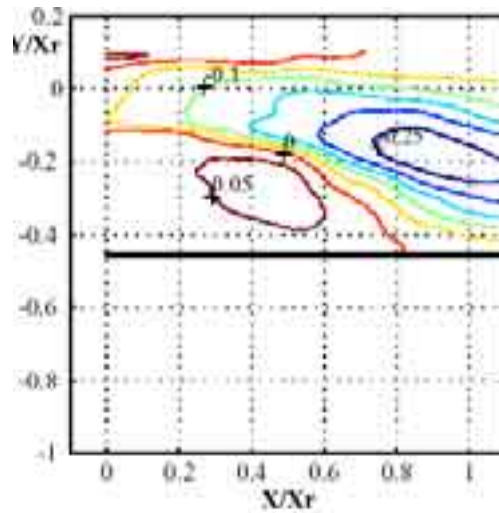
La caratteristica principale nel campo fluidodinamico descritto è la presenza della zona di ricircolo, generata dalla deviazione verso la parete del getto principale la cui nascita può essere spiegata partendo dalle considerazioni fatte sul getto libero. Nel getto libero, infatti, nascono delle strutture vorticosi, responsabili del mescolamento con il fluido circostante, che, in assenza di parete, diffondono nell'ambiente fluido. In presenza di una parete laterale posta a distanza  $h$  l'espansione delle strutture vorticosi che si formano dal lato della parete risulta limitata dalla parete stessa e, di conseguenza, le strutture tendono ad accelerare e si deformano. Si origina così una zona in cui la velocità del flusso risulta maggiore rispetto a quella posseduta dal fluido libero di espandersi: tale differenza di velocità comporta un gradiente di pressione, nella direzione ortogonale alla parete, che porta alla deviazione del getto verso la

parete stessa (Newmann (1961), Sawyer (1967), Nozaki (1987)). Se la parete è sufficientemente lunga il getto incide sulla parete con un angolo che dipende dalla distanza  $h$  e si divide: una parte prosegue lungo la parete, dando origine ad un wall-jet, e l'altra prosegue anch'essa lungo la parete, ma in verso opposto, generando così la zona di ricircolazione, che risulta confinata tra la parete orizzontale, la parete verticale ed il getto (Figura 3. 8).



**Figura 3. 8: Campo di velocità tra l'uscita del getto e  $x_r$ .  $Re=6000$  (Nasr 1999).**

La presenza della zona di ricircolo è testimoniata dall'andamento della componente verticale di velocità  $v$ , riportata in Figura 3. 9, adimensionalizzata rispetto alla velocità media  $U_0$  nella sezione di ingresso. Si nota come tale componente assuma valori negativi in tutto il campo, denotando l'effetto di attrazione (effetto Coanda) esercitato sul getto dalla parete, mentre sia positiva e diretta quindi verso l'alto in prossimità della parete verticale della la sezione di ingresso, indicando la presenza della zona di ricircolo.

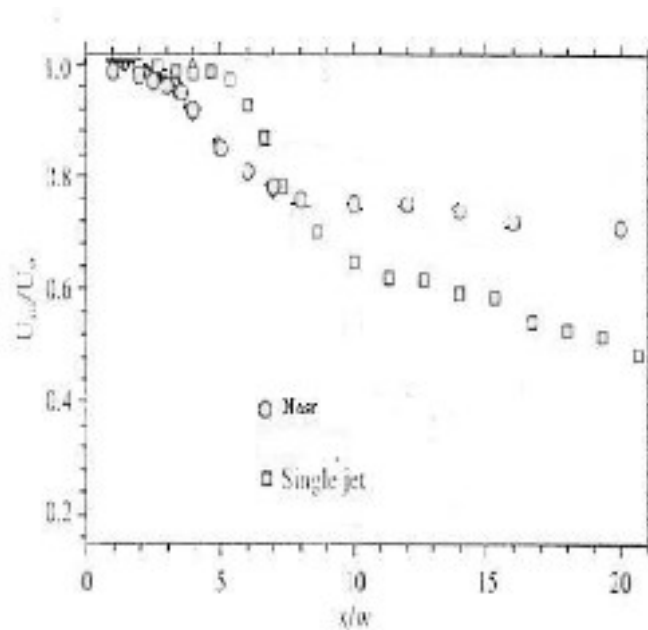


**Figura 3. 9: Curve di livello della componente verticale di velocità  $v/U_0$  (Nars e Lai 1999).**

All'interno della zona di ricircolo si crea un vortice stazionario che provvede a far circolare il fluido tra il punto di riattacco e lo strato di mescolamento del getto (Lund 1986). Tale configurazione è stabile poiché la presenza del vortice fa sì che la pressione all'interno della zona di ricircolo sia inferiore a quella dell'ambiente esterno (Lund 1986). È importante notare che la zona di ricircolo si crea solo se è impedito il flusso di fluido laterale in direzione ortogonale alla parete: nel caso fosse presente, ad esempio con parete forata, tale flusso garantirebbe il bilancio della pressione tra la zona di ricircolo e l'ambiente esterno, impedendo così la nascita della zona di ricircolo e la conseguente deviazione del getto (Tsitouras 1986).

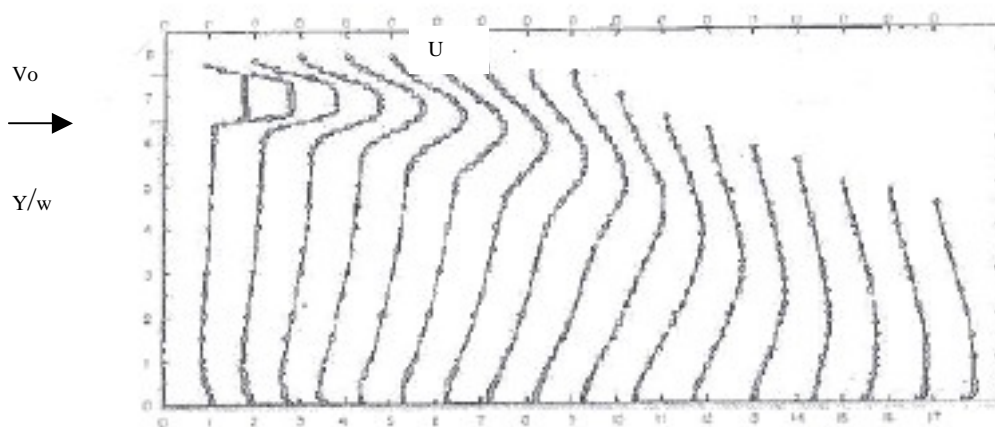
Nella Figura 3. 10 è riportato l'andamento della componente assiale media di velocità  $U/U_0$ , sia per il getto libero che per il getto con parete laterale (Nasr e Lay, 1998). Si nota come nel caso di getto con parete laterale si ha una minore attenuazione di velocità, lungo l'asse del getto stesso, rispetto al getto libero. Tale comportamento è dovuto al restringimento della sezione del getto, a causa della presenza della parete e alla conversione della pressione statica, che si osserva in corrispondenza del punto di attacco, in quantità di moto (Pelfrey et al 1986, Nasr et al 1998).





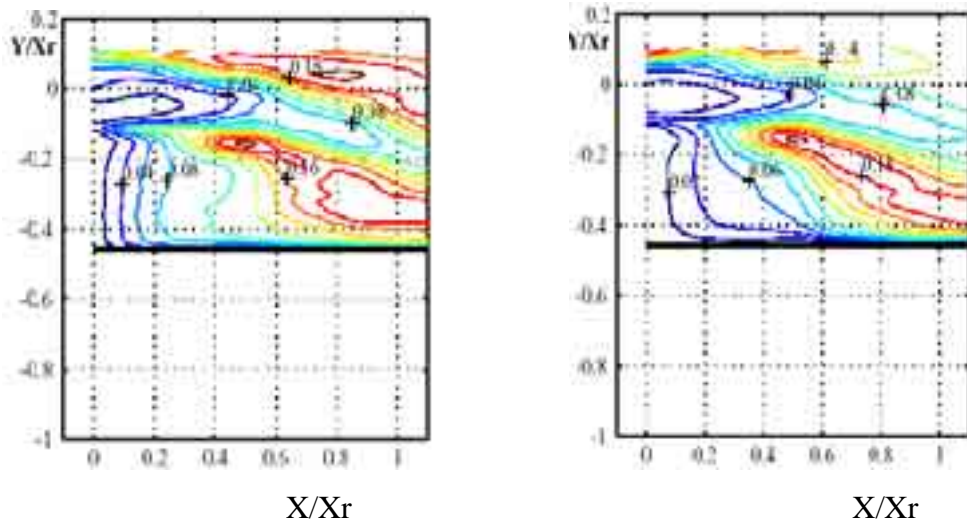
**Figura 3. 10: Confronto della componente assiale media di velocità  $U/U_0$  nel caso di getto libero e getto con parete laterale (Nars e Lai 1999).**

E' opportuno notare come si generi anche una zona di ricircolo secondaria (Pelfrey et 1986), evidenziata dai profili di velocità assiale riportati nella Figura 3. 11.



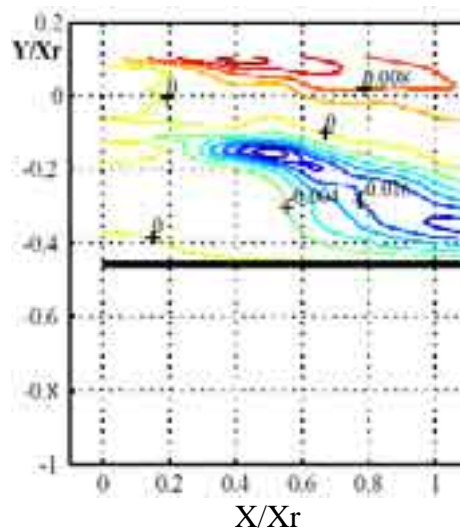
**Figura 3. 11: Profili della componente assiale U di velocità (Pelfrey e Liburdy 1986).**

Il campo fluidodinamico descritto presenta una forte analogia con un'altra configurazione sperimentale, nota in letteratura come backward facing step (BFS). Tale analogia verrà analizzata in seguito.



**Figura 3. 12: Curve di livello delle componenti di fluttuazione  $u'/U_0$  e  $v'/U_0$  (Nars e Lai 1999).**

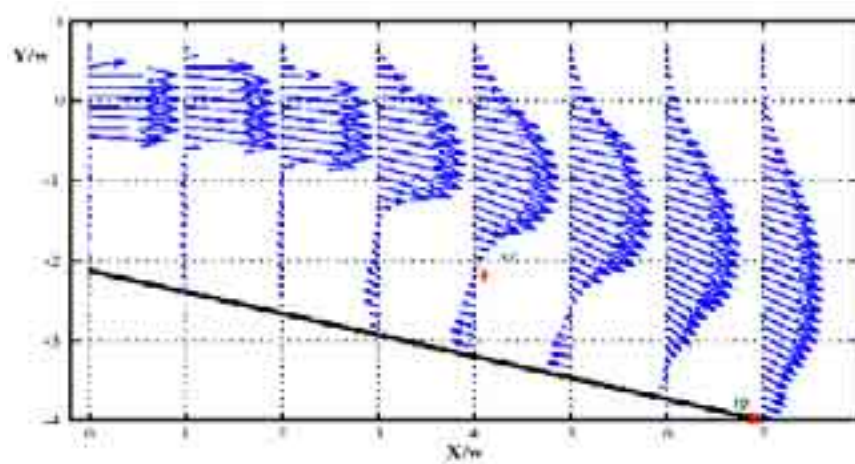
La presenza della parete influenza anche il comportamento delle variabili turbolente del getto, come evidenziato dalle figure seguenti. In particolare sono riportati gli andamenti delle variabili turbolente  $u'/U_0$ ,  $v'/U_0$  (Figura 3. 12) nonché degli stress di Reynolds  $\overline{u'v'}/U_0^2$  (Figura 3. 13). I valori più elevati degli sforzi di Reynolds individuano l' interfaccia tra la zona esterna ed il getto e tra la zona di ricircolo ed il getto. In questa regione gli sforzi di Reynolds assumono valore molto alto in vicinanza della linea di divisione tra il getto e la zona di ricircolo, a monte del punto di riattacco, indicando un elevato trasferimento di quantità di moto dovuto al getto che incide sulla parete.



**Figura 3. 13: Andamento di  $-\overline{u'v'}/U_0^2$  (Nars e Lai 1999).**

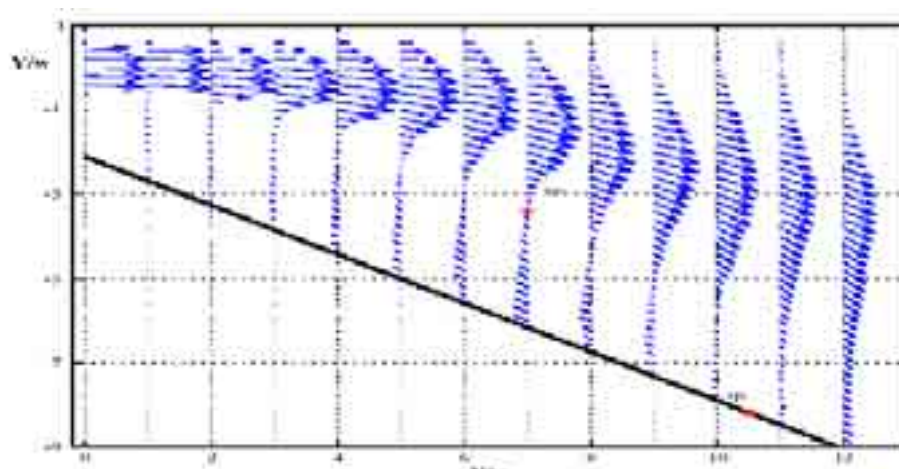
### 3.2.1. *Influenza dell'angolo $\beta$*

Nel caso in cui la parete sia inclinata di un angolo  $\beta$  (Figura 3. 14 e Figura 3. 15), la situazione descritta rimane sostanzialmente invariata ma si nota una maggiore estensione della zona di ricircolo posizionata più a valle dell'uscita del getto e di conseguenza una lunghezza di riattacco maggiore.

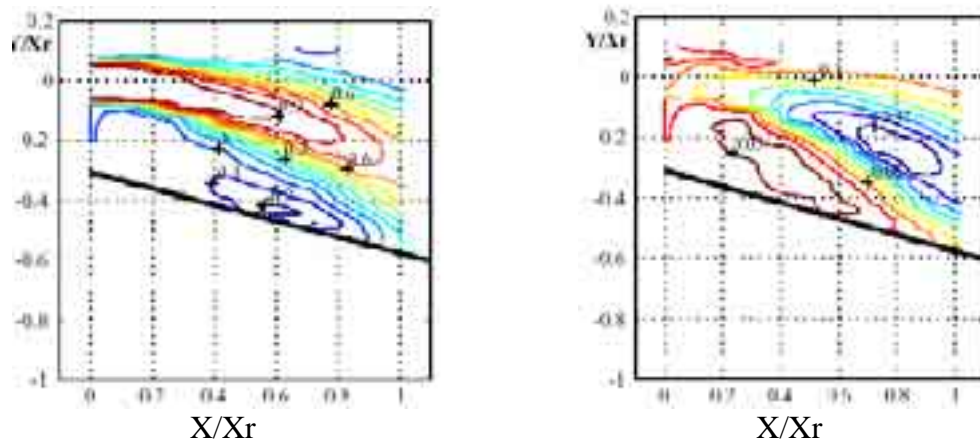


**Figura 3. 14: Campo di velocità per un angolo  $\beta=15^\circ$  (Nars e Lai 1999).**

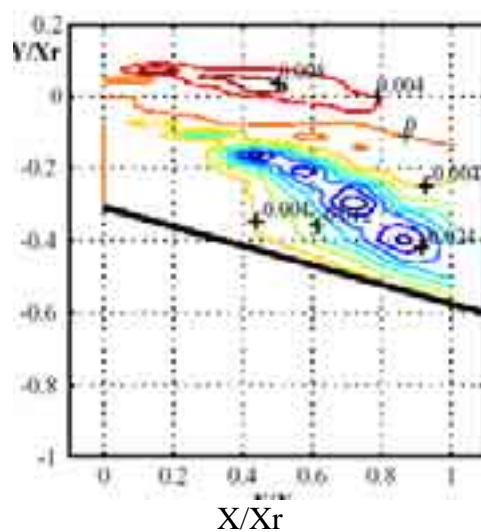
Come si può notare dalle Figura 3. 16 e Figura 3. 17, anche l'andamento delle variabili turbolente e degli sforzi di Reynolds è analogo al caso in cui  $\beta=0$ .



**Figura 3. 15: Campo di velocità ( $\beta=30^\circ$ ) (Nars e Lai 1999).**



**Figura 3. 16:** Curve di livello di  $u'/U0$  e  $v'/U0$  con  $\beta=15^\circ$  (Nars e Lai 1999).



**Figura 3. 17:** Sforzi di Reynolds con  $\beta=15^\circ$  (Nars e Lai 1999).

### 3.3. *Determinazione della lunghezza di riattacco*

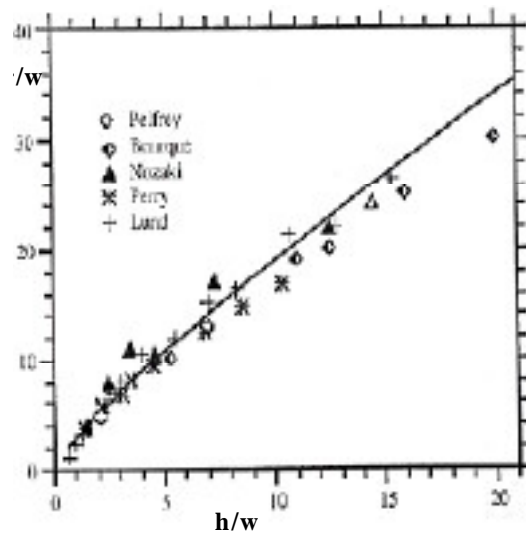
La lunghezza di riattacco del getto sulla parete è uno dei parametri fondamentali di questo campo fluidodinamico. Sawyer (1960), Nozaki et al (1979,1981), Lund (1986) hanno individuato tale distanza come la distanza misurata dalla sezione di ingresso del punto in corrispondenza del quale si ha il massimo di pressione statica sulla parete laterale. L'andamento della pressione è stato ricavato posizionando delle prese di pressione sulla parete. Pelfrey (1986), Nasr (1998) hanno utilizzato misure LDA per calcolare i profili della componente di

velocità assiale, individuando così il punto di riattacco in corrispondenza del profilo verticale per il quale è  $\partial u / \partial y = 0$  alla parete.

I risultati ottenuti dai vari autori citati sono riportati nella Figura 3. 18 dove sia la lunghezza  $x_r$  che l'altezza  $h$  a cui è posizionata la parete sono adimensionalizzate rispetto alla larghezza dell'ugello  $w$ . La dipendenza di  $x_r$  da  $h$  può essere espressa come:

$$\frac{x_r}{w} = 2.6 \left( \frac{h}{w} \right)^{.851}$$

Tale relazione è rappresentata dalla linea continua nella Figura 3. 18. E' interessante notare come tale lunghezza di riattacco risulti, nei vari studi citati, indipendente dal numero di Reynolds calcolato in base alla larghezza della sezione di ingresso e della velocità media nella stessa sezione.

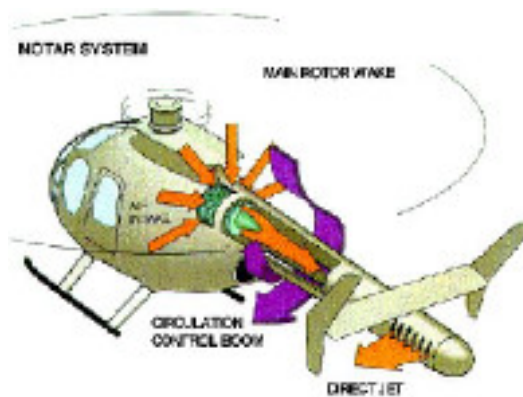


**Figura 3. 18: Variazione della lunghezza di riattacco con  $h/w$ , nel caso  $\beta=0$  (Nars e Lai 1998).**

#### 3.4. Applicazioni in campo aeronautico

L'effetto Coanda trova molteplici applicazioni in campo aeronautico. Lo stesso H. M. Coanda una volta compreso il fenomeno utilizzò tale effetto per aumentare la spinta al decollo dei suoi velivoli, ottenendo un aumento di portanza e quindi una riduzione della distanza di decollo (Falessi 1998).

Negli ultimi anni la deviazione causata da tale effetto è stata usata per una particolare configurazione di elicotteri, Notar (Figura 3. 19), in cui il rotore di coda è sostituito da un piano di coda orizzontale.

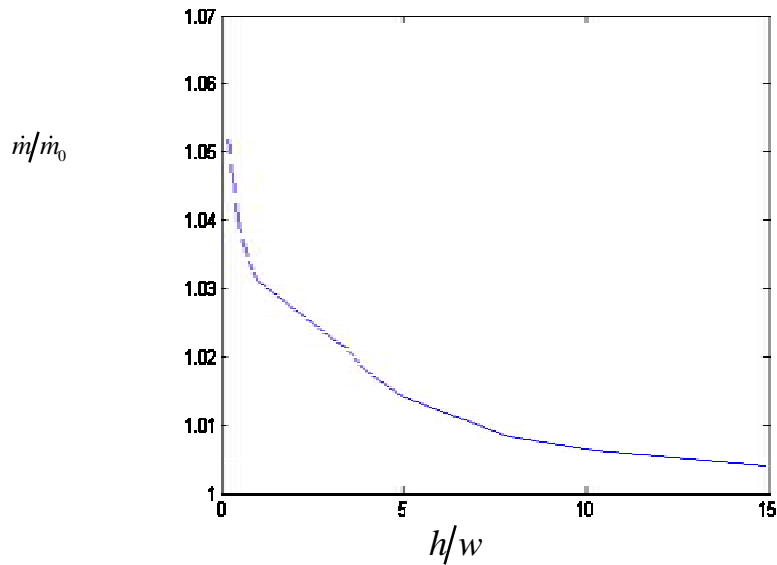


**Figura 3. 19: Configurazione Notar (McDonnell Douglas).**

Il bilancio del momento dovuto al rotore principale è assicurato da una forza laterale generata dall'effetto Coanda, secondo lo schema della figura.

La configurazione con  $h \neq 0$  trova notevoli applicazioni, ad esempio nelle camere di combustione. Tale configurazione consente infatti un incremento della portata, rispetto ad un getto libero di espandersi, come dimostrato da Lund (1986) per un getto bidimensionale, stazionario, incompressibile e turbolento. Indicando con  $\dot{m}$  la portata per unità di lunghezza in presenza di una parete laterale e  $\dot{m}_0$  la portata nel caso di getto libero, Lund ha ricavato un'espressione del rapporto  $\dot{m}/\dot{m}_0$  in funzione di  $h/w$ , con  $h$  distanza della parete e  $w$  larghezza della sezione di ingresso (Figura 3. 20).





**Figura 3. 20: Influenza dell'effetto Coanda sulla portata.**

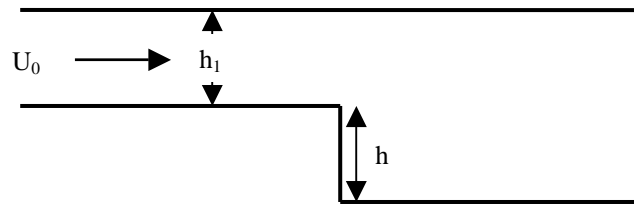
Si osserva un aumento di portata fino al 5%, rispetto al caso in cui il getto è libero di espandersi.

### 3.5. *Analogie e differenze con altre configurazioni sperimentali*

La configurazione ottenuta posizionando una parete lateralmente al getto presenta analogie con altre due configurazioni, note in letteratura come BFS e Twin jet.

#### 3.5.1. *BFS*

Il backward facing step (BFS) consiste in una brusca espansione in un condotto in pressione (gradino di altezza  $h$ , Figura 3. 21).



**Figura 3. 21: Configurazione BFS.**

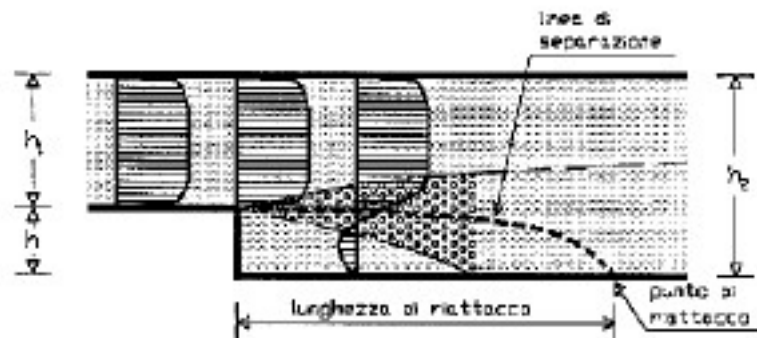
I parametri che influenzano tale situazione possono essere complessivamente riassunti in:

$h/h_1$  = rapporto di espansione con  $h_1$  altezza del canale e  $h$  altezza del gradino

$Re_h$  numero di Reynolds calcolato in funzione della velocità media  $U_0$  a monte del gradino e dell'altezza del gradino  $h$ :  $Re_h = \frac{U_0 h}{\nu}$

In corrispondenza del vertice del gradino si ha il distacco della corrente e la nascita, a causa degli elevati gradienti di velocità verticali, di uno strato di mescolamento. Nel caso in cui l'altezza  $h$  sia molto grande rispetto ad  $h_1$ , lo strato di mescolamento non risente della parete ed evolve quindi verso valle con le caratteristiche di un processo di turbolenza libera (Tumbiolo (1995)).

Se l'altezza del gradino è paragonabile all'altezza del canale, la linea di separazione raggiunge la parete di fondo e si ha il riattacco della corrente su di essa (Figura 3. 22).



**Figura 3. 22: Strato di mescolamento, linea di separazione e punto di riattacco per un gradino di altezza limitata  $h$  (Tumbiolo 1995).**

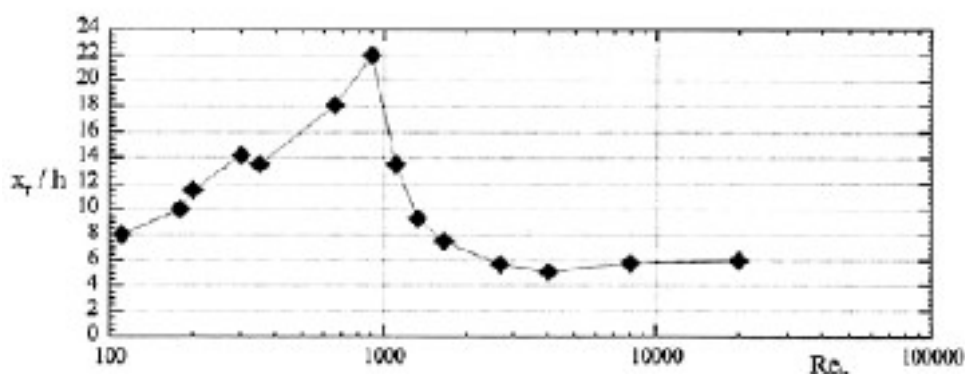


La linea di separazione divide il campo in due regioni. La prima subito a valle del gradino, confinata a valle dal punto di riattacco, è caratterizzata dalla presenza di un vortice principale di ricircolo e un vortice secondario localizzato nell'angolo in basso del gradino.

La seconda regione è localizzata subito a valle del punto di riattacco. In essa si ha la ricostituzione dello strato limite di parete, che si conclude più a valle con il ripristino nella condotta di altezza  $h+h_1$  della corrente uniforme. L'andamento della velocità, caratterizzata dalla presenza delle due zone di ricircolo a monte del punto di riattacco, risulta quindi del tutto analogo a quello dell'offset jet.

A valle del punto di riattacco la presenza della parete superiore nel BFS comporta il ristabilirsi di un profilo uniforme di velocità nella condotta di altezza  $h+h_1$ , mentre nel caso dell'off-set jet si ha lo sviluppo, nel caso di parete sufficientemente lunga, di un wall-jet.

Nella Figura 3. 23, è riportato in un diagramma semilogaritmico, l'andamento della distanza di riattacco  $x_r$ , adimensionalizzata rispetto all'altezza del gradino  $h$ , in funzione del numero di Reynolds, calcolato con la velocità nella sezione di ingresso e l'altezza del gradino (Sinha et al 1981).

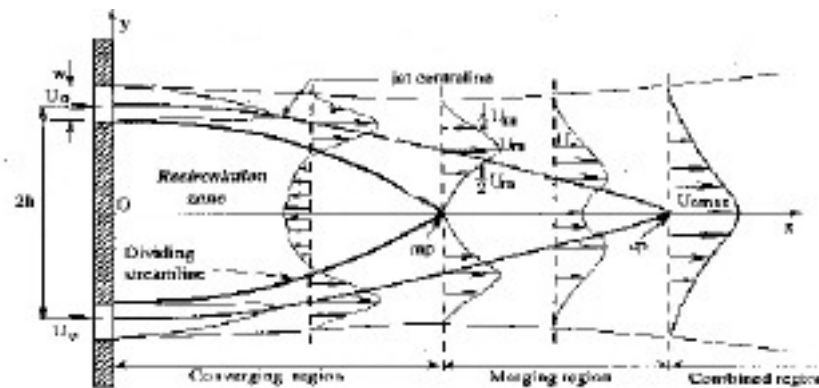


**Figura 3. 23: Andamento della lunghezza di riattacco  $x_r/h$  in funzione di  $Re_h$ .**

Si nota come per un  $Re_h$  maggiore di 4000 la lunghezza  $x_r$  non dipenda dal numero di Reynolds e si mantenga intorno a 6 altezze di gradino.

### 3.5.2. *Twin Jet*

In letteratura il twin-jet è una configurazione ottenuta facendo fluire da due ugelli di stessa dimensione posti ad una distanza  $2h$  due getti con la stessa velocità  $U_0$  (Figura 3. 24).



**Figura 3. 24: Configurazione Twin-jet (Nasr 1997).**

Analogamente al caso dell'offset jet, in seguito all'espansione dei due getti paralleli si crea una zona di ricircolo che porta alla deviazione dei due getti l'uno verso l'altro. Subito a valle del punto  $m_p$  sull'asse di simmetria, che delimita tale zona di ricircolo, inizia una zona in cui i due getti interagiscono tra loro (merging region). Tale interazione porta alla formazione, a valle del punto  $c_p$ , di un unico getto.

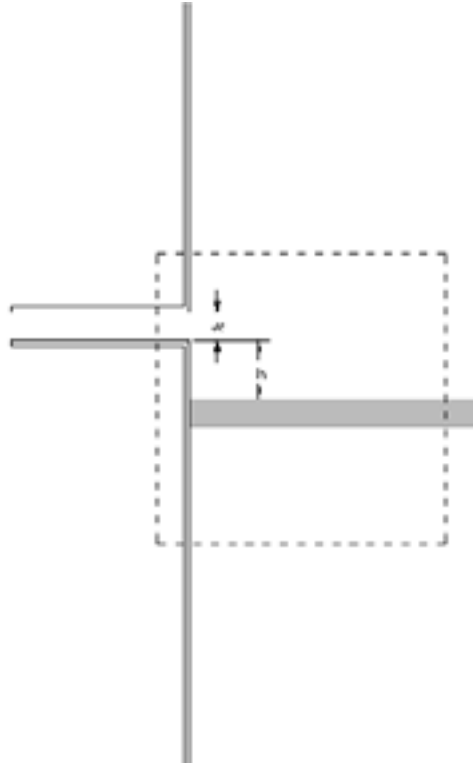
Il piano di simmetria tra i due getti ha quindi un effetto analogo a quello della parete laterale nel caso dell'offset, con la differenza che su di esso non vale naturalmente la condizione di velocità nulla (no-slip), valida invece sulla parete (Nasr 1997).

La differenza sostanziale tra le due configurazioni risiede nello sviluppo del getto a valle del punto  $c_p$ . In presenza di una parete solida sufficientemente lunga si ha la formazione di un wall-jet, mentre i due getti evolvono fino a formare un unico getto.

## **4. L'effetto coanda nell'ingegneria costiera: influenza della superficie libera**

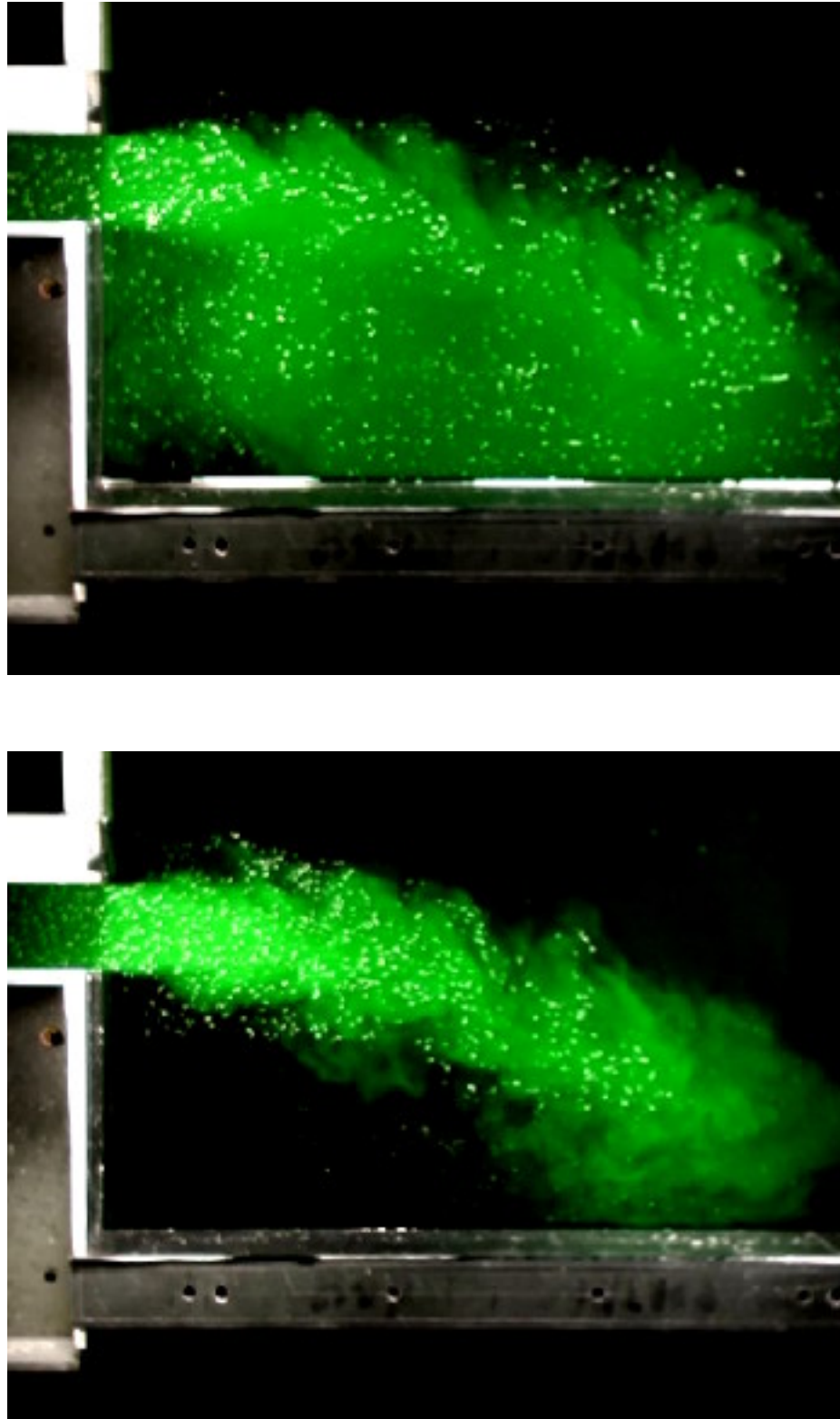
### *4.1 Visualizzazioni*

Anzitutto è stata condotta una vasta campagna di visualizzazioni, finalizzata ad una preliminare descrizione qualitativa dei fenomeni fluidodinamici, tipici dell'effetto Coanda, in presenza di superficie libera. Le visualizzazioni hanno permesso di individuare i valori della portata più significativi, in corrispondenza dei quali è stata condotta la campagna misure anemometriche. Queste ultime sono state effettuate immettendo particelle galleggianti (polvere di legno) sulla superficie libera. Si è ritenuto necessario svolgere delle visualizzazioni preliminari immettendo contemporaneamente colorante e particelle, allo scopo di verificare se il comportamento della superficie libera fosse in grado di rappresentare in maniera soddisfacente il comportamento sull'intera sezione verticale. Ricordiamo infatti, come descritto in precedenza, che il colorante utilizzato viene immesso direttamente nel circuito idraulico, in modo da giungere uniformemente distribuito lungo la verticale del canale di ingresso.



**Figura 4. 1: Configurazione sperimentale.**





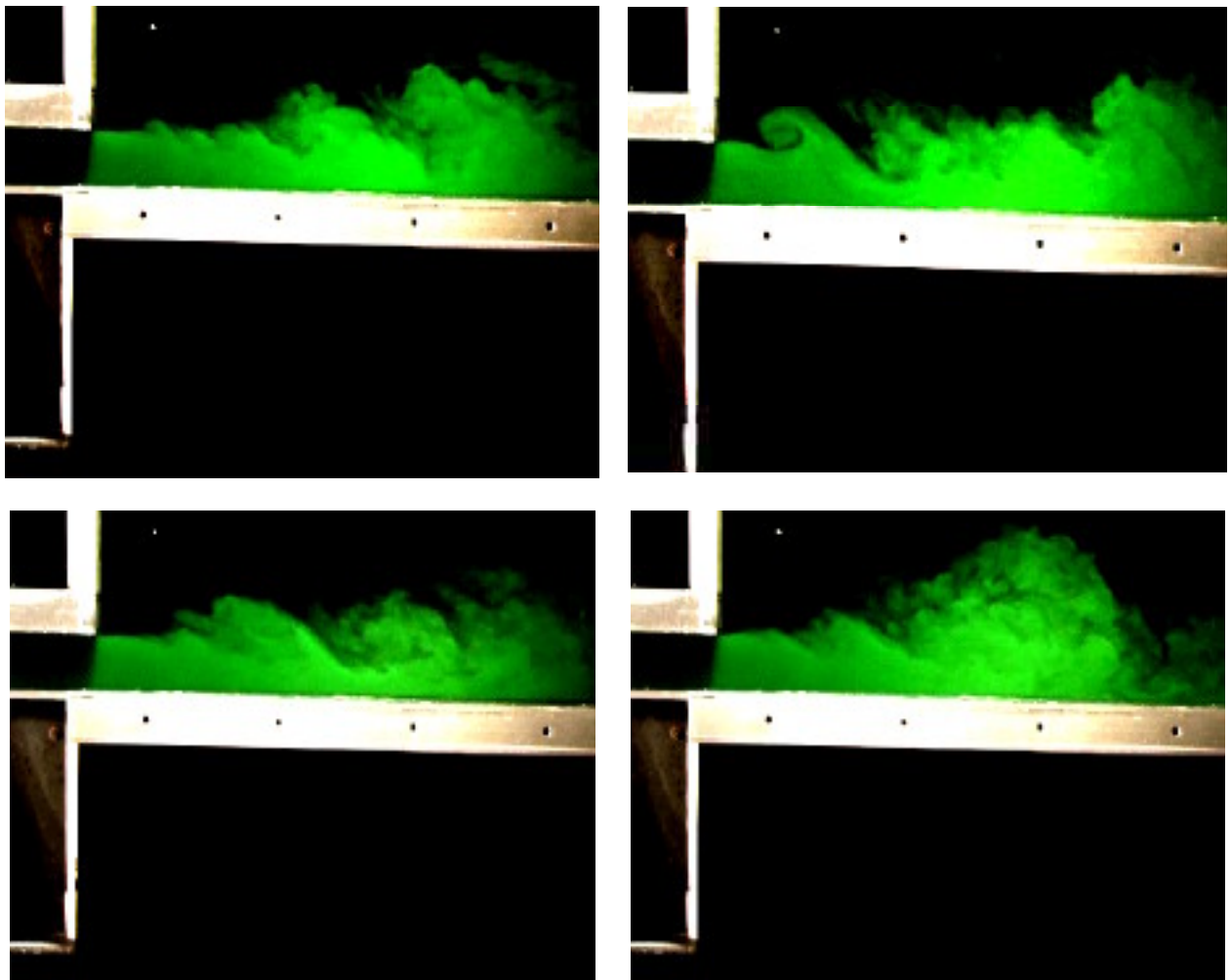
**Figura 4. 2: Visualizzazione con colorante e particelle, sequenza temporale.  $Re\ 5000$ ,  $h/w = 3$ .**

Come si può notare in Figura 4. 2 le strutture del flusso descritte dal moto delle particelle galleggianti sembrano riprodurre in maniera piuttosto soddisfacente la

visualizzazione ottenuta con il colorante che, per sua natura, interessa tutta la profondità.

Durante la campagna di misure, sia le visualizzazioni che le misure PIV sono state acquisite in condizioni di regime, ovvero quando la portata entrante nella vasca è pari a quella che defluisce dallo stramazzo.

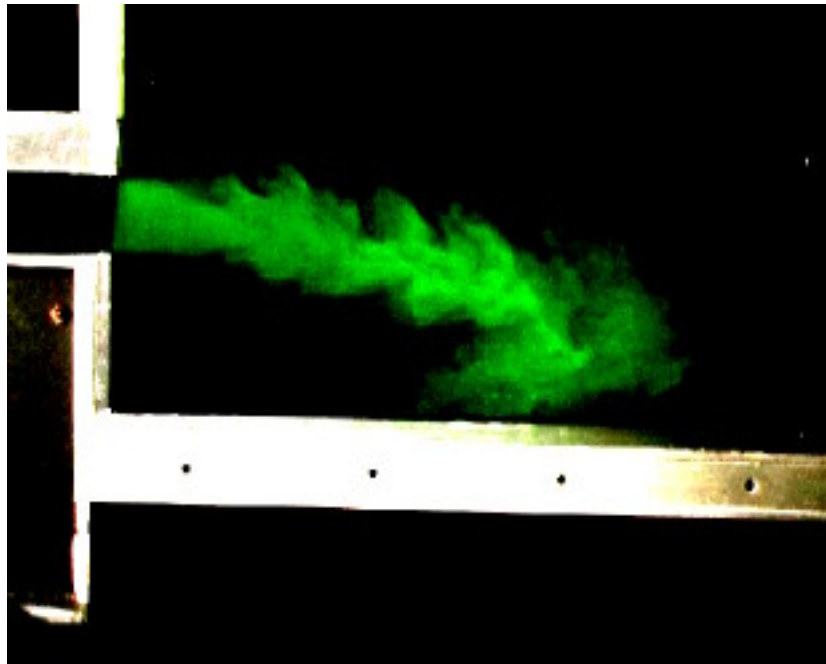
Nella Figura 4. 3 è rappresentata la configurazione ottenuta posizionando la parete tangenzialmente all'uscita del getto ( $h=0$ ). Il getto naturalmente segue la parete: nella corrente esterna nascono strutture vorticoshe la cui evoluzione porta ad un aumento del mescolamento con l'ambiente esterno.



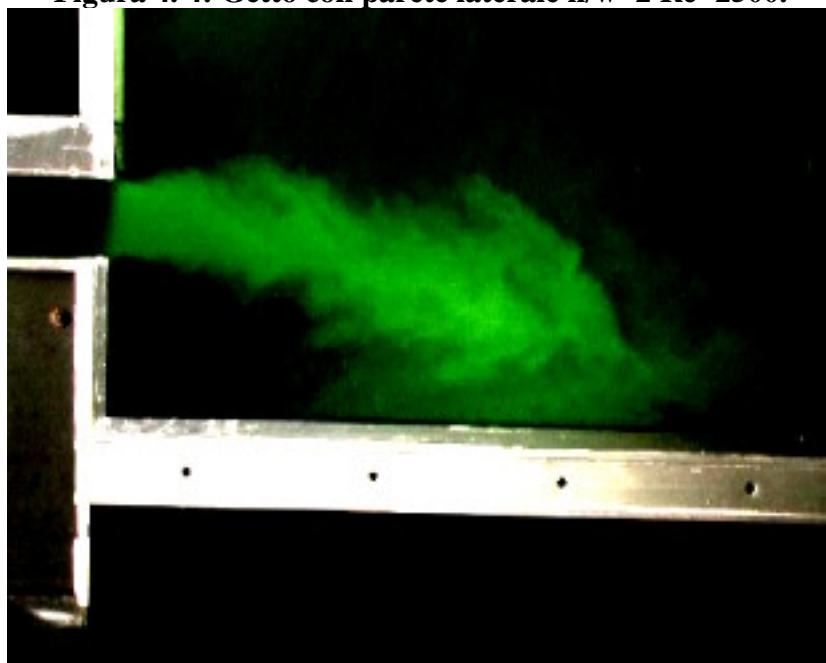
**Figura 4. 3: Wall-jet, sequenza temporale.  $Re=2500$ .**

Posizionando la parete a 10 cm ( $h/w=2$ ) si ha una netta deviazione del getto verso la parete stessa, come mostrato nel precedente capitolo 3 (Figura 4. 4): tale deviazione (effetto Coanda) è dovuta all'aumento della velocità nelle strutture

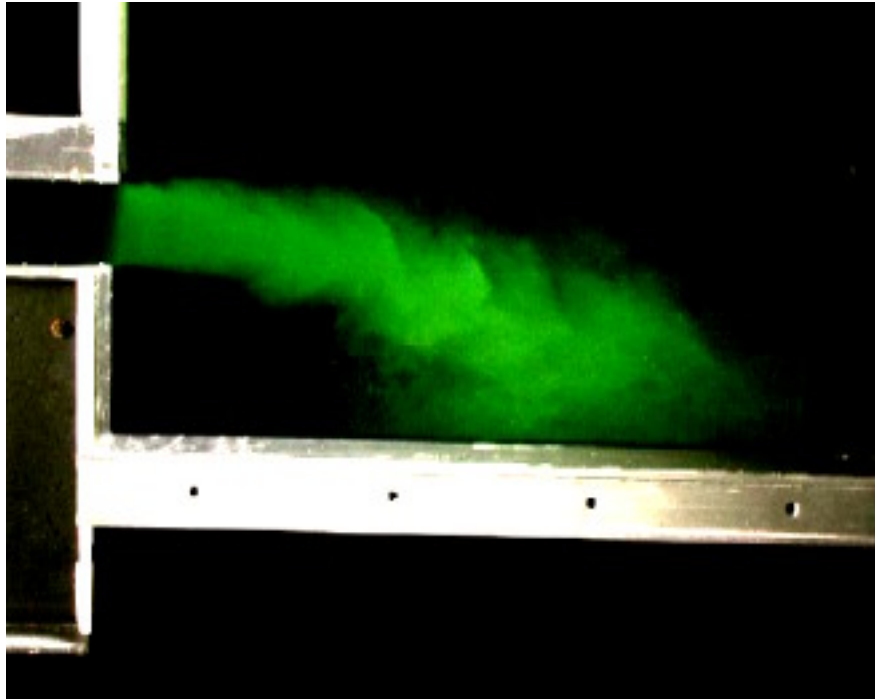
vorticose dal lato della parete e alla conseguente nascita di un gradiente di pressione diretto verso la parete stessa (Lund 1986). In prossimità della parete il getto si divide dando origine ad una zona di ricircolo confinata tra la parete orizzontale, la parete verticale ed il getto stesso. Le visualizzazioni effettuate hanno messo in evidenza come la situazione si ripeta per  $Re=5000$  e  $10000$  (Figura 4. 5 e Figura 4. 6).



**Figura 4. 4: Getto con parete laterale  $h/w=2$   $Re=2500$ .**



**Figura 4. 5: Getto con parete laterale  $h/w=2$   $Re=5000$**



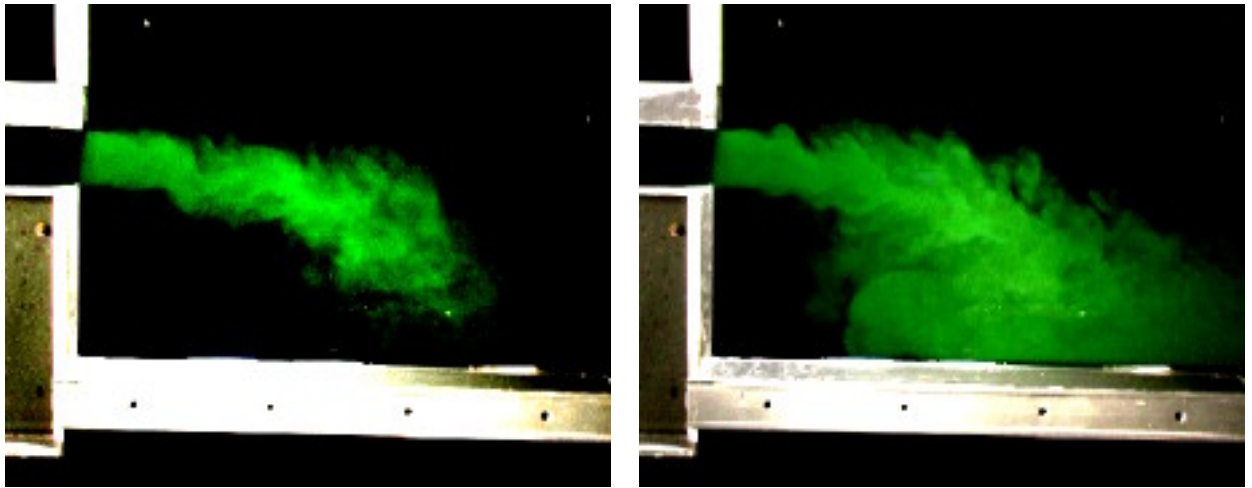
**Figura 4. 6: Getto con parete laterale  $h/w=2$   $Re=10000$**

Il punto di attacco del getto sulla parete dipende principalmente dalla distanza a cui è posta la parete stessa. La determinazione di tale distanza di riattacco e della sua variazione sia in funzione del numero di Reynolds che in funzione di  $h$  è oggetto della campagna di misure PIV.

Dalle Figura 4. 5 e Figura 4. 6 si può intuire come la posizione del punto di attacco del getto sulla parete sia soggetta ad oscillazioni, rispetto ad una posizione media, dovute alla presenza di grandi vortici nello strato di mescolamento che si muovono alternativamente verso monte o verso valle.

Posizionando la parete ad  $h/w=3$  (Figura 4. 7), si riscontra ancora la deviazione del getto, che incide sulla parete in un punto più a valle rispetto al caso precedente, con la conseguente estensione della zona di ricircolo.





**Figura 4. 7: Getto con parete laterale, immagini in sequenza.  $h/w=3$   $Re=2500$ .**

La

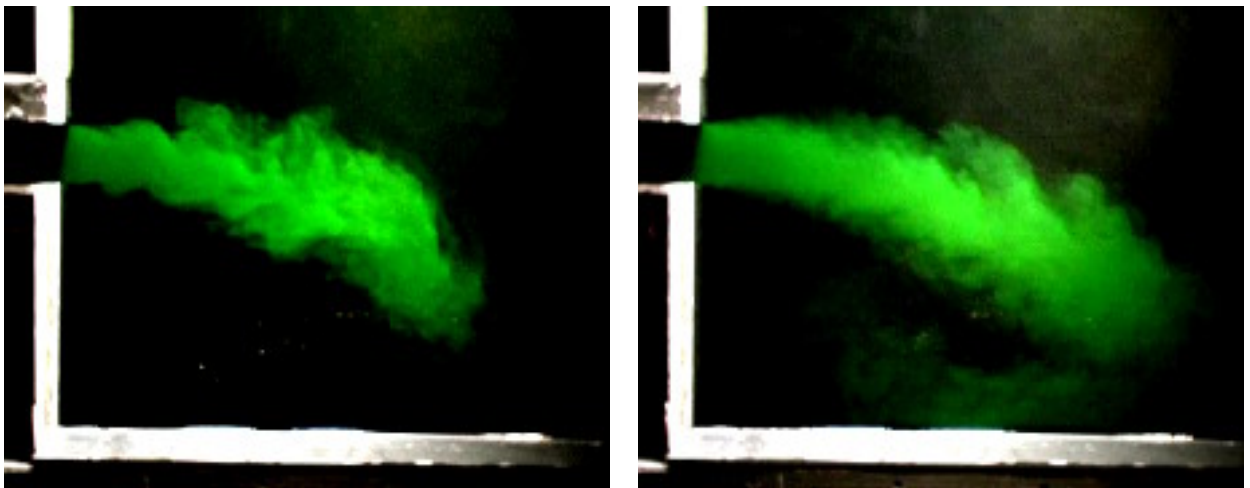
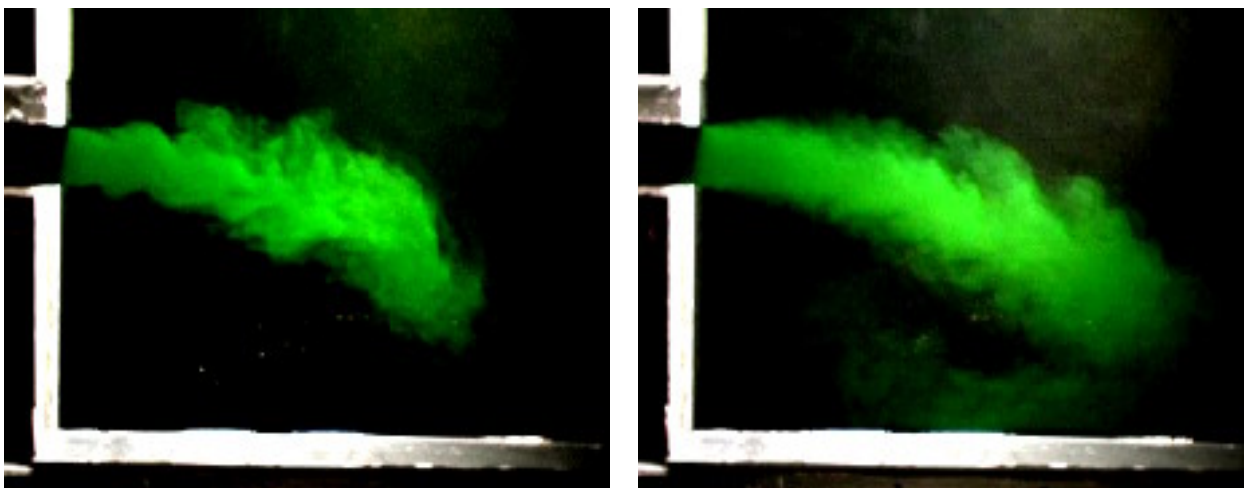
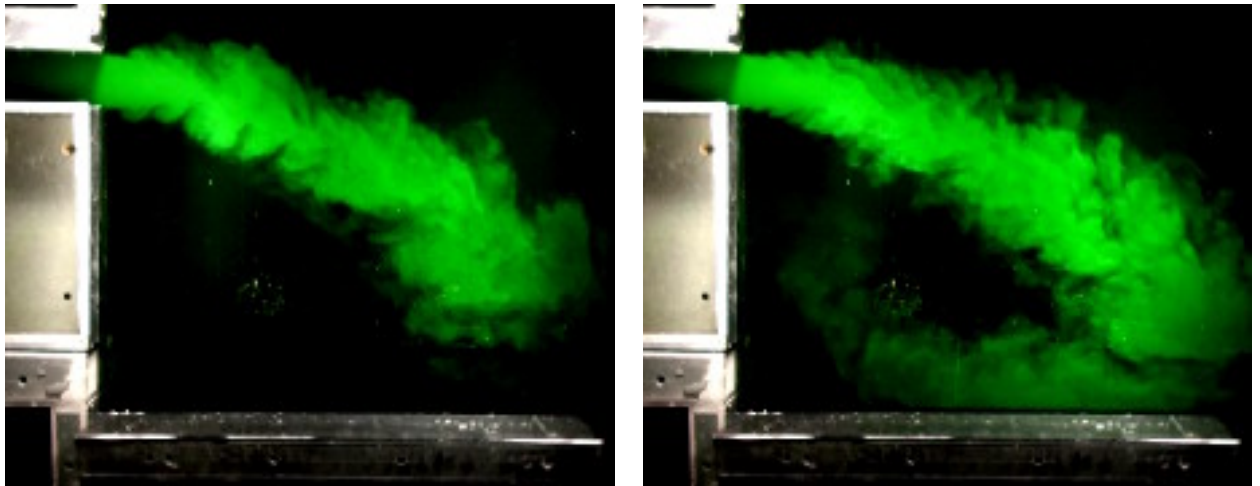


Figura 4. 8 mostra la configurazione ottenuta posizionando la parete a  $h/w=4$  rispetto alla sezione di ingresso del getto. Anche in questa situazione la deviazione del getto verso la parete è netta.



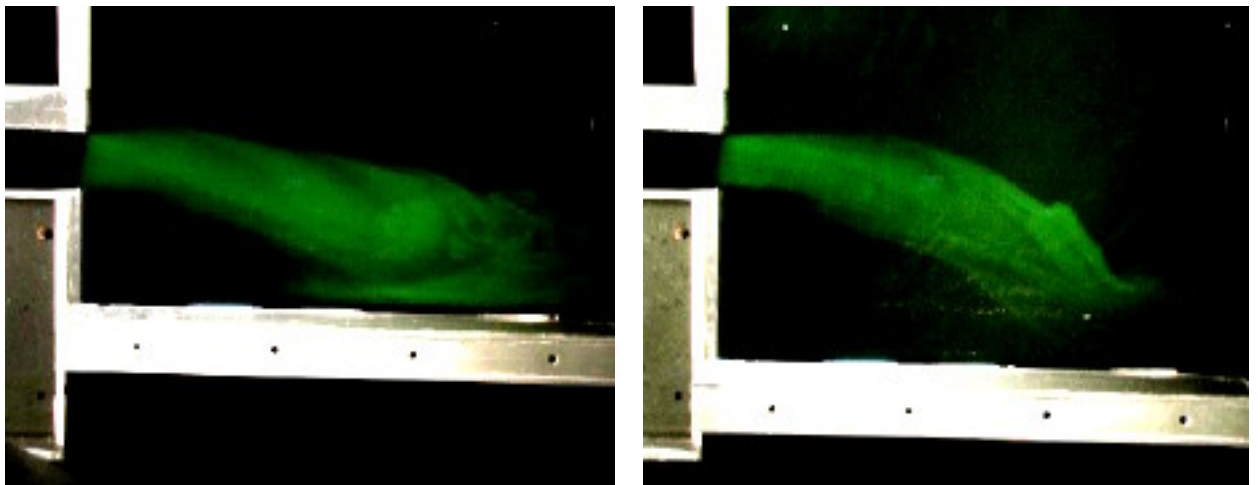
**Figura 4. 8: Getto con parete laterale, immagini in sequenza.  $h/w=4$   $Re=5000$ .**

Allontanando ulteriormente la parete,  $h/w=6$ , si osserva come il punto di attacco oscilla, come nelle altre configurazioni analizzate, rispetto ad una posizione media, posizionata però al di fuori della parete (Figura 4. 9). Questo comportamento suggerisce che la distanza  $h/w=6$  sia una posizione limite, almeno per una parete lunga 50cm, come quella utilizzata in questo studio.



**Figura 4. 9: Getto con parete laterale, immagini in sequenza.  $h/w=6$   $Re=5000$ .**

Nella campagna di visualizzazioni è stato analizzato anche  $Re=500$ . La Figura 4. 10 dimostra come anche per questa bassa velocità sia presente la deviazione del getto sia per  $h/w=2$  che per  $h/w=3$ .



**Figura 4. 10: Getto con parete laterale  $h/w=2$  (sx) e  $h/w=3$  (dx).  $Re=500$ .**

Per velocità del getto così basse ( $U_0=1$  cm/sec), tuttavia, i risultati non sono attendibili, in quanto le condizioni di regime sono molto lente da raggiungere e

instabili; in aggiunta, i moti residui nella vasca possono essere di entità paragonabile o addirittura superiore al flusso indotto dal getto.

#### 4.2 *Conclusioni della campagna di visualizzazioni*

L'effetto più evidente che si riscontra posizionando una parete parallela al getto consiste nell'ottenere un accumulo del colorante nella zona compresa tra la parete e il getto (zona di ricircolo). Le visualizzazioni effettuate con diverse distanze e portate hanno permesso di individuare le caratteristiche principali del flusso generato dall'interazione getto-parete. In particolare si nota come la deviazione del getto, dovuto all'effetto Coanda, si verifica per tutte le configurazioni esaminate; inoltre, fissando una determinata distanza si è osservato come la struttura del flusso sia poco sensibile al variare del numero di Reynolds, nel range esaminato. Lo studio a basse velocità ( $Re=500$ ) ha mostrato notevole instabilità e bassa riproducibilità, sconsigliando lo svolgimento di misure anemometriche per portate troppo basse.

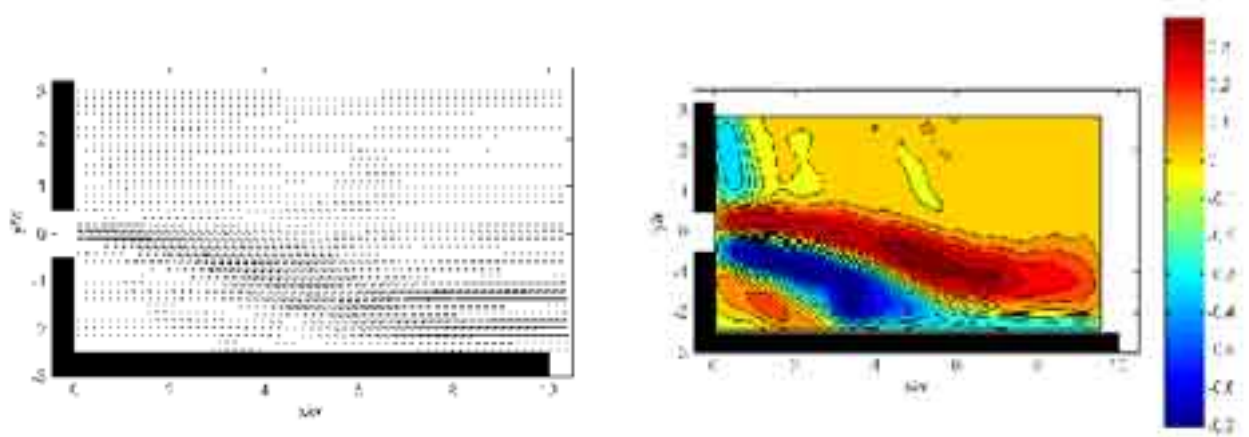
Queste considerazioni preliminari costituiscono il punto di partenza per le misure PIV descritte nel prossimo paragrafo.

#### 4.3 *Misure anemometriche: getto con parete laterale*

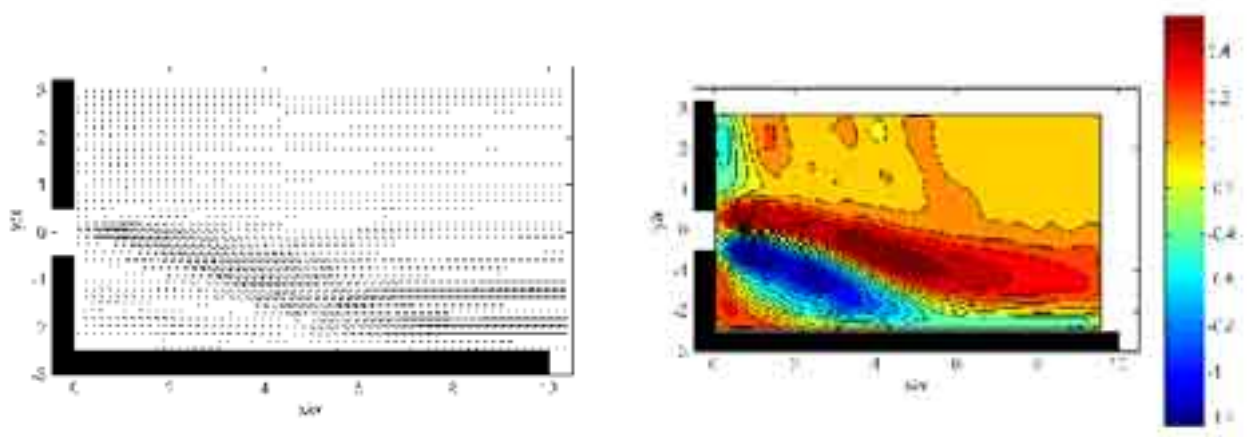
Le misure PIV sono state effettuate per tre numeri di Reynolds, 2500, 5000 e 10000 ponendo la parete a tre distanze:  $h/w=2$ , 3 e 4. Ricordiamo che il numero di Reynolds è stato calcolato in base alla larghezza  $w$  della sezione di ingresso e alla velocità media nel getto, calcolata in base alla portata misurata dai flussimetri. Tali grandezze sono state inoltre utilizzate per riportare in forma adimensionale i vari grafici. Per le varie configurazioni sono stati ricavati i campi di velocità e di vorticità: i valori sono stati ottenuti mediando i campi istantanei in uscita dal programma di cross-correlazione per un tempo di 30 secondi, corrispondente a 750 immagini.

La Figura 4. 11 illustra il campo di velocità media ottenuta posizionando la parete parallelamente all'asse del getto ad una distanza di 10cm ( $h/w=2$ ) con

$Re=2500$ . Si nota come, a causa della parete, si ha una netta deviazione del getto verso la parete stessa, su cui incide generando una zona di ricircolo, evidenziata dai valori di velocità assiali negativi ed una zona analoga al wall-jet. La zona di ricircolo è confinata tra la parete orizzontale, la parete verticale e il getto stesso, con centro posizionato in  $x/w \sim 3$  e  $y/w \sim -1.7$ . Esaminando in dettaglio i profili di velocità, (Figura 4. 20), si nota la presenza di una seconda zona di ricircolo, confinata nell'angolo in basso, caratterizzata da valori della componente assiale di velocità  $u$  positivi. L'andamento di tale componente testimonia quindi la presenza di un vortice che ruota in senso orario, opposto al verso di rotazione della zona principale di ricircolo.

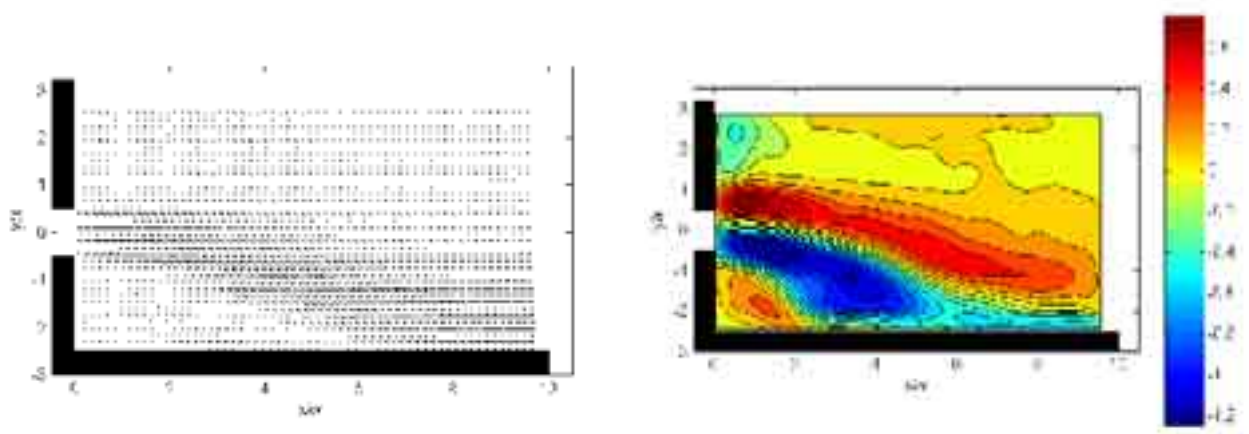


**Figura 4. 11:  $h/w=2$ .  $Re$  2500. Velocità media (sx) e vorticità media (dx).**



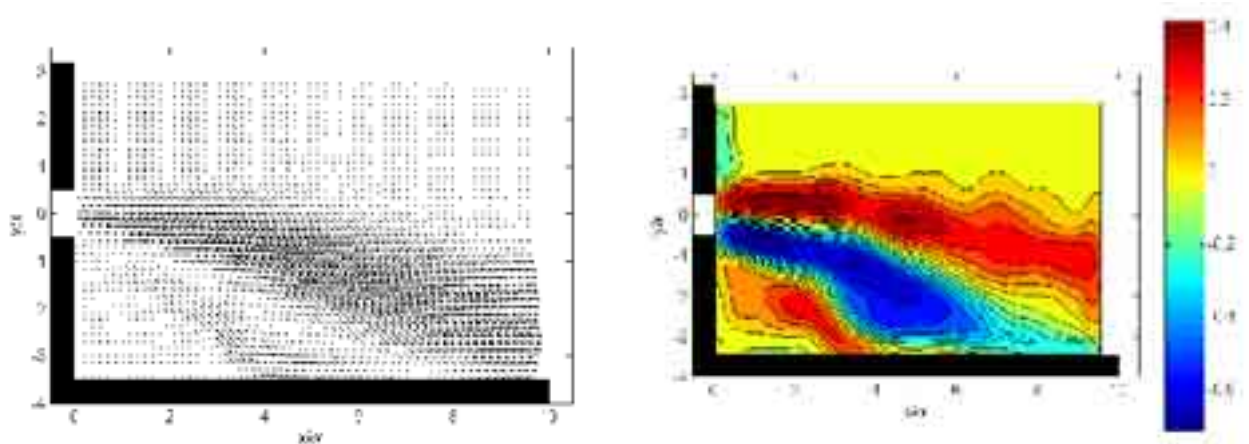
**Figura 4. 12:  $h/w=2$ .  $Re=5000$ . Velocità media (sx) e vorticità media (dx).**

Con  $Re=5000$ , Figura 4. 12, si nota come il centro della zona di ricircolo sia traslato verso la parete verticale, posizionato in  $x/w \sim 2$  e  $y/w \sim -1.5$ : questo comporta che la zona di ricircolo secondaria sia poco estesa in questa situazione.



**Figura 4. 13:  $h/w=2$ .  $Re=10000$ . Velocità media ( $sx$ ) e vorticità media ( $dx$ ).**

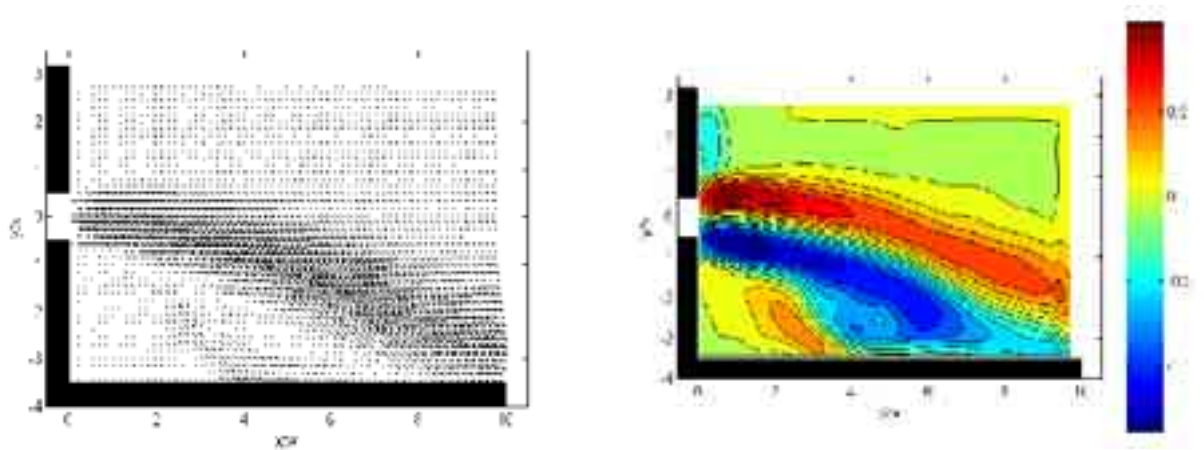
Analoga situazione si osserva per  $Re=10000$ , Figura 4. 13, con centro del vortice in  $x/w \sim 3$  e  $y \sim -1.7$ .



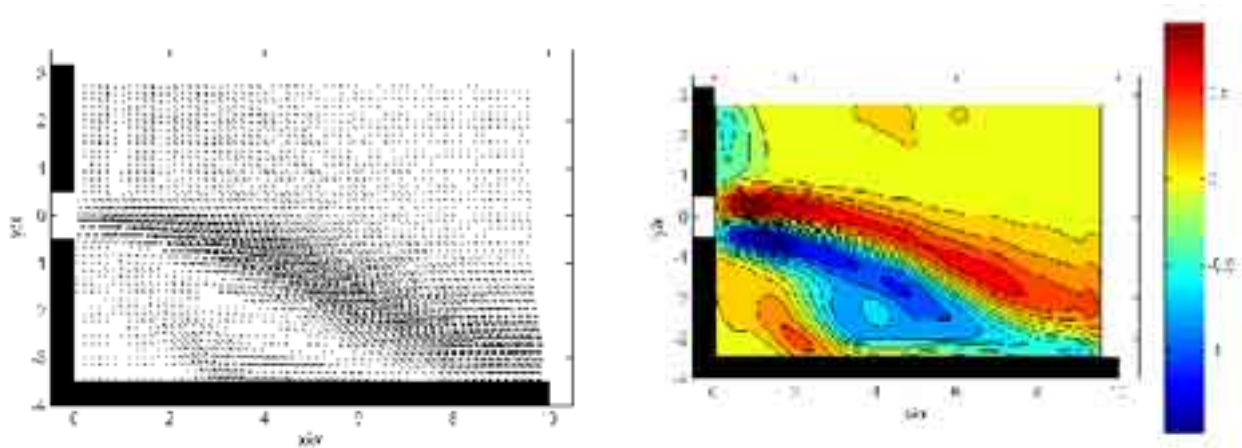
**Figura 4. 14:  $h/w=3$ .  $Re=2500$ . Velocità media ( $sx$ ) e vorticità media ( $dx$ ).**

E' opportuno osservare come l'estensione delle zone di ricircolo principale e secondaria siano legate: poiché la posizione del punto di riattacco rimane pressoché invariata ( $x/w \sim 5.5$ ), all'ampliamento della prima corrisponde la contrazione della seconda e viceversa.



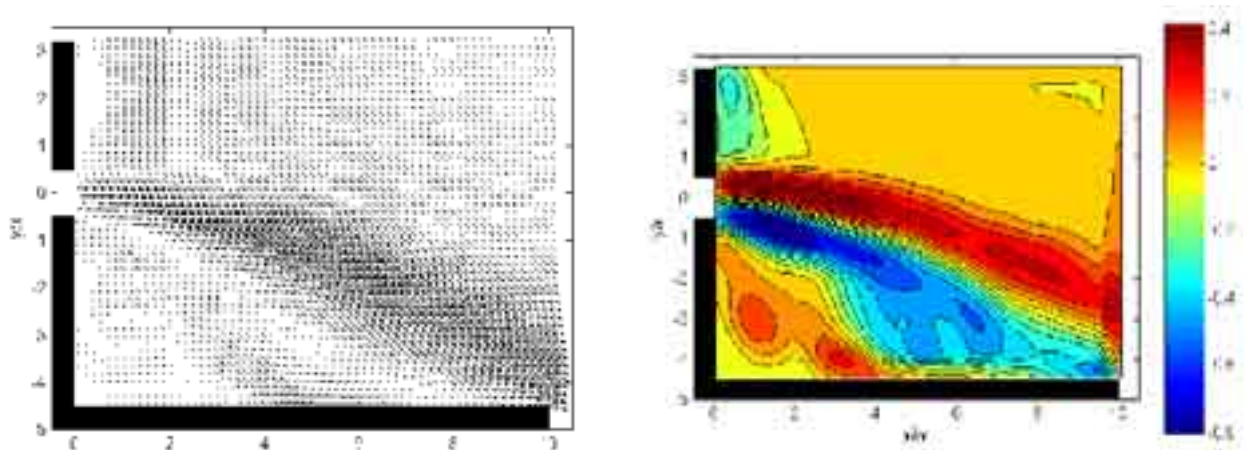


**Figura 4. 15:  $h/w=3$ .  $Re=5000$  . Velocità media (sx) e vorticità media (dx).**

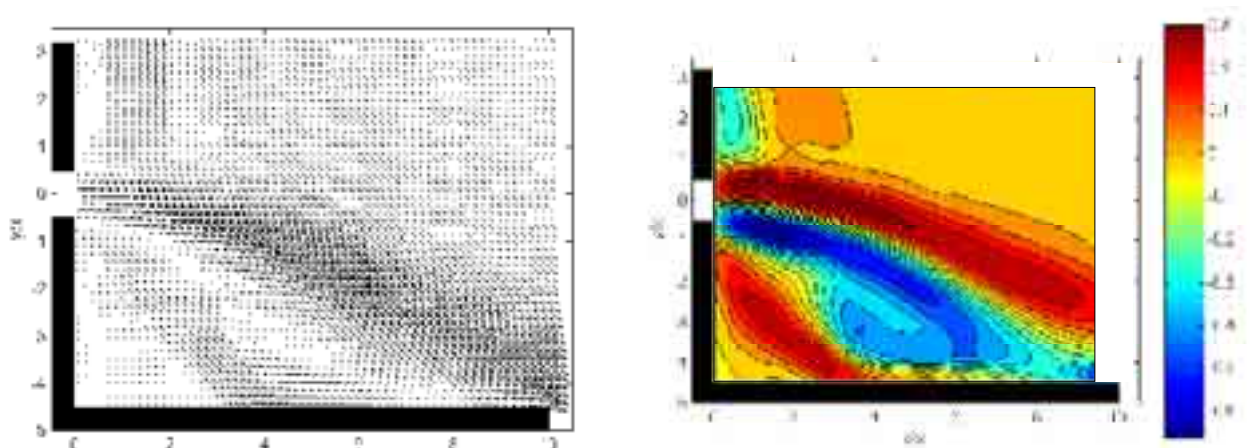


**Figura 4. 16:  $h/w=3$ .  $Re=10000$  . Velocità media (sx) e vorticità media (dx).**

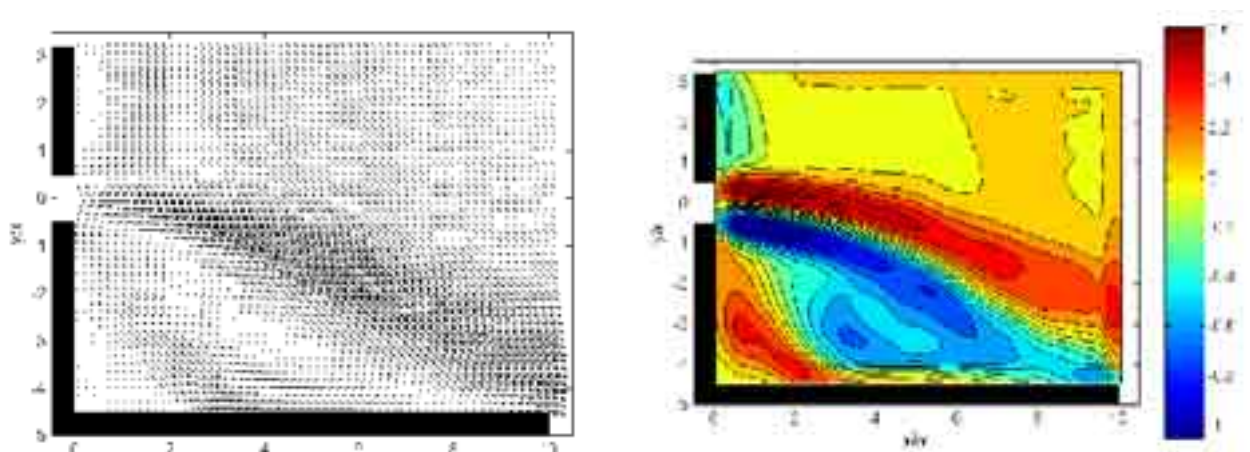
Aumentando la distanza della parete a 15 cm (Figura 4. 14, Figura 4. 15 e Figura 4. 16,  $h/w=3$ ) e a 20cm (Figura 4. 17, Figura 4. 18 e Figura 4. 19,  $h/w=4$ ), si nota un aumento dell'estensione delle due zone di ricircolo dovuto alla traslazione verso valle del punto di riattacco, che si posiziona in  $x/w \sim 7.5$  per  $h/w=3$  e in  $x/w \sim 8$  per  $h/w=4$ . Il centro del vortice principale è posizionato in  $x/w \sim 4.3$  e  $y/w \sim -3$  per  $h/w=3$  con una leggera traslazione verso valle per  $h/w=4$ .



**Figura 4. 17:  $h/w=4$   $Re=2500$  . Velocità media (sx) e vorticità media (dx).**



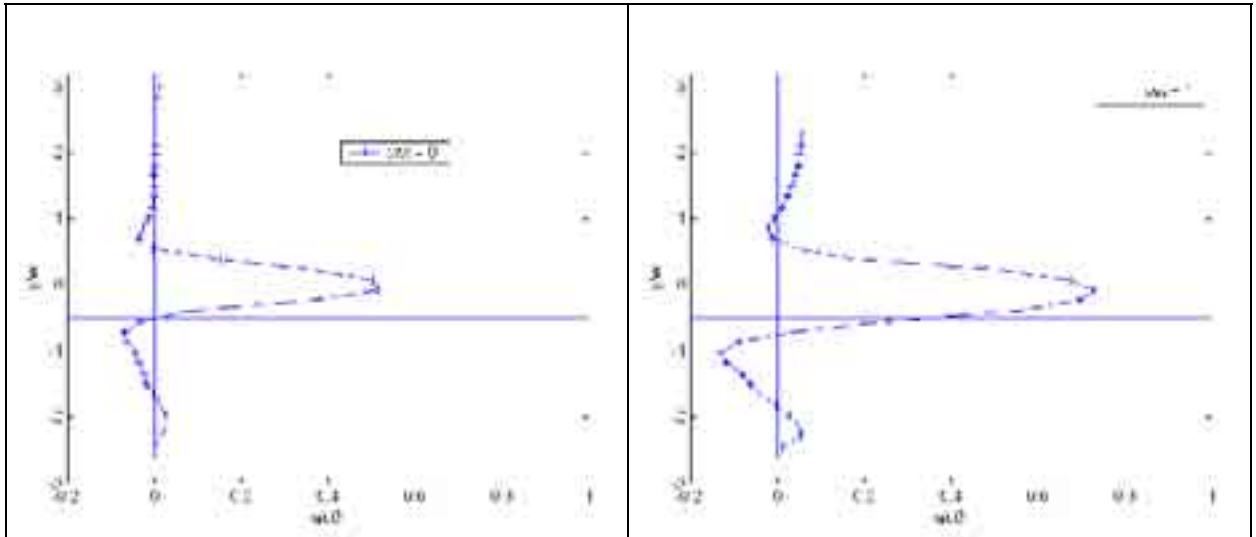
**Figura 4. 18:  $h/w=4$ .  $Re=5000$ . Velocità media (sx) e vorticità media (dx).**



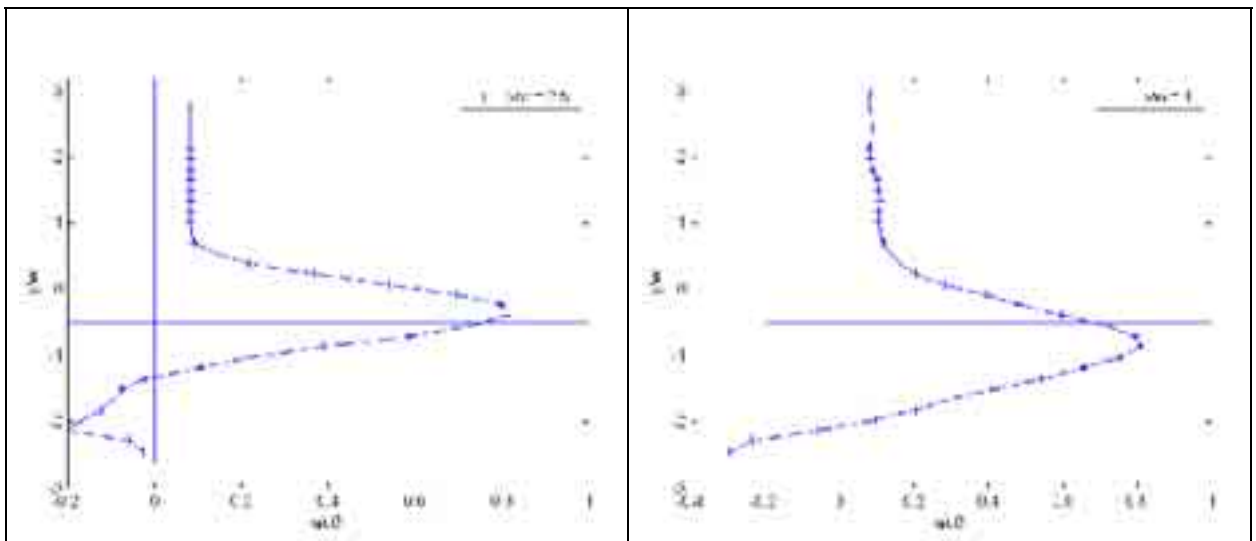
**Figura 4. 19:  $h/w=4$ .  $Re=10000$ . Velocità media (sx)e vorticità media (dx).**

L'andamento della velocità assiale in diverse sezioni per  $h/w=2$  e  $Re$  5000 (Figura 4. 20, Figura 4. 21 e Figura 4. 22) conferma e precisa la presenza delle due

zone di ricircolo. Si nota inoltre la deviazione del flusso verso la parete, evidenziata dall'abbassamento del punto di massima velocità rispetto all'asse del getto.

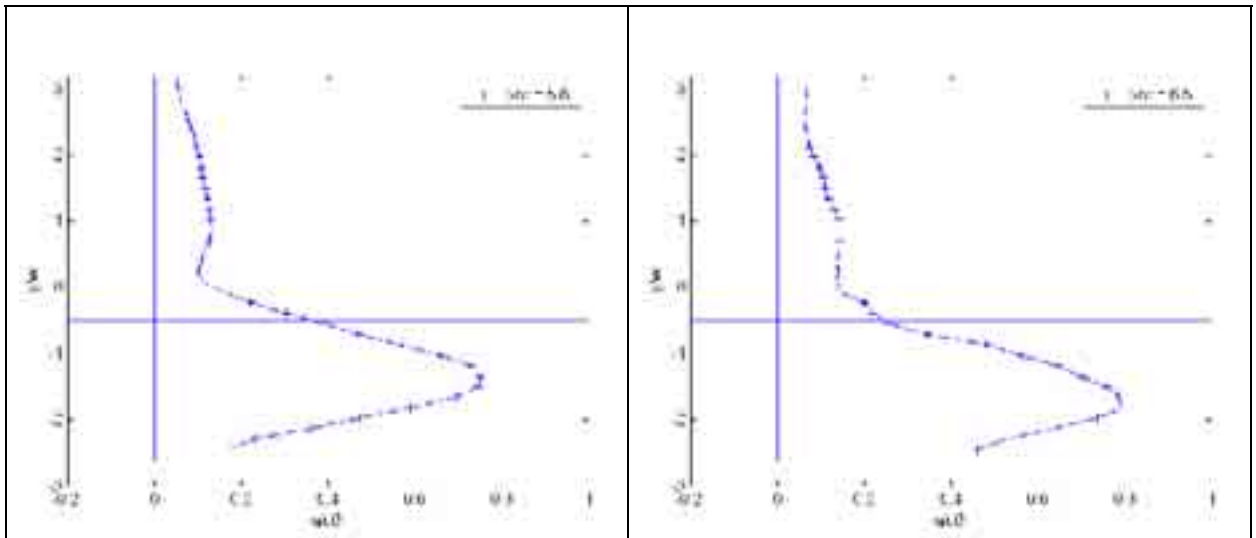


**Figura 4. 20: Componente assiale di velocità  $u/U_0$  nelle sezioni  $x/w=0$  e  $x/w=1$  ( $h/w=2$ ,  $Re=5000$ ).**



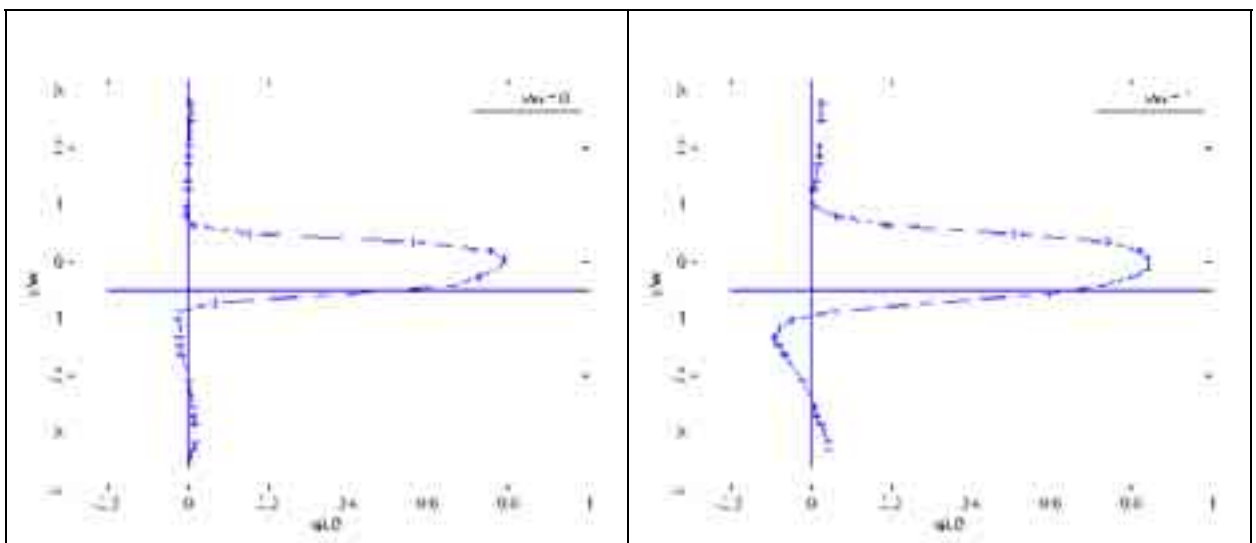
**Figura 4. 21: Componente assiale di velocità  $u/U_0$  nelle sezioni  $x/w=2.5$  e  $x/w=4$  per  $h/w=2$ .  $Re=5000$ .**



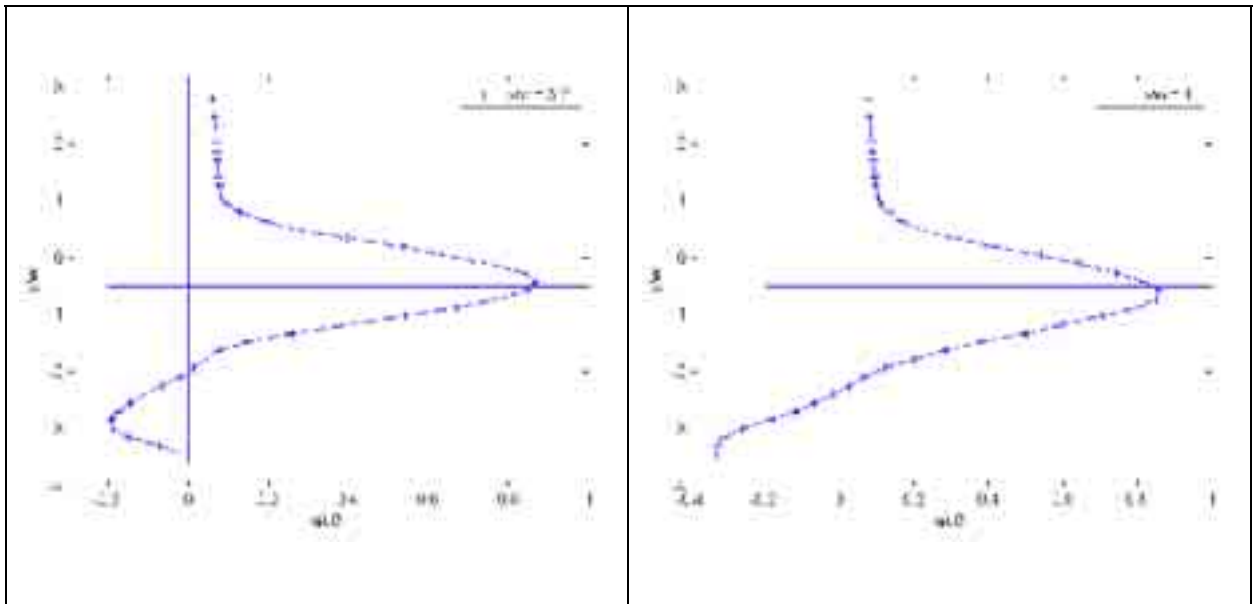


**Figura 4. 22: Componente assiale di velocità  $u/U_0$  nelle sezioni  $x/w=5.6$  e  $x/w=6.5$  per  $h/w=2$ .  $Re=5000$ .**

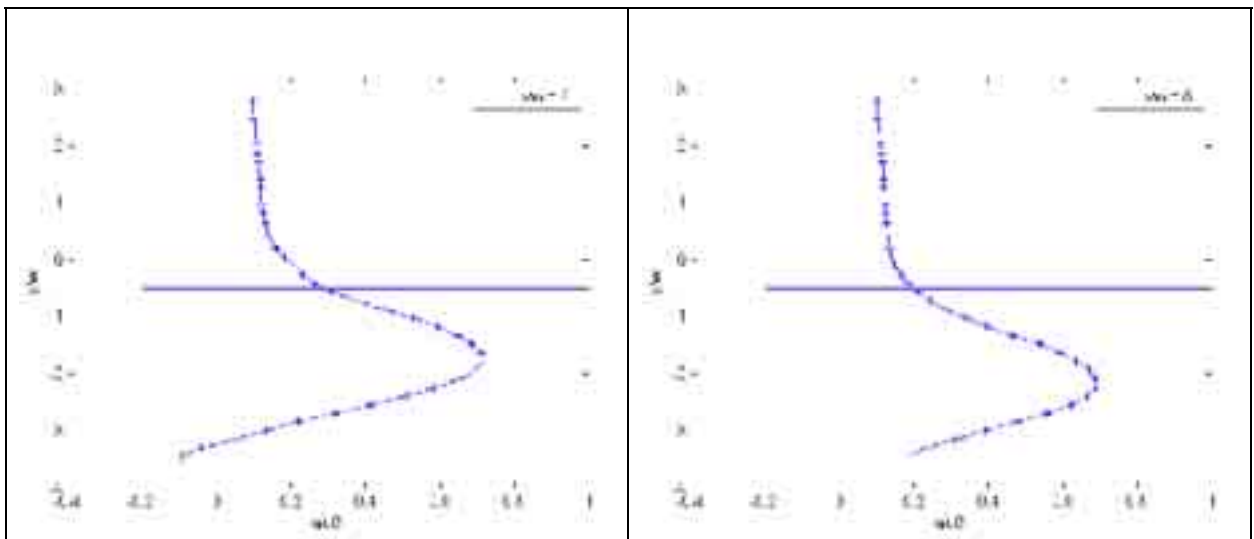
Nella configurazione con  $h/w=3$  si osserva un ampliamento della zona di ricircolo secondaria, come evidenziato dai profili di velocità riportati nelle Figura 4. 23, Figura 4. 24 e Figura 4. 25.



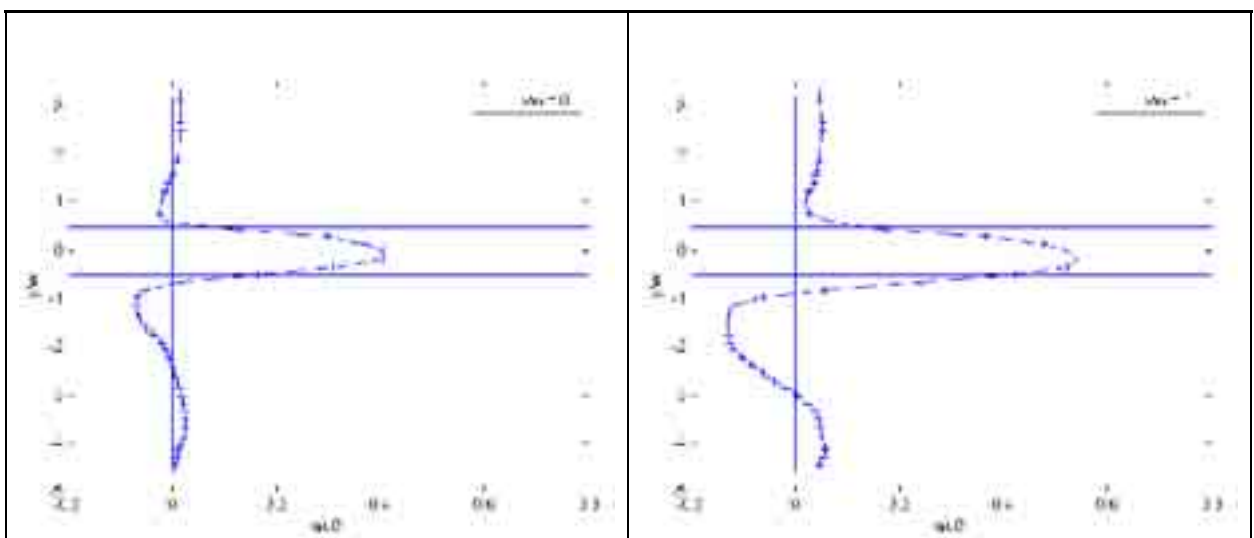
**Figura 4. 23: Componente assiale di velocità  $u/U_0$  nelle sezioni  $x/w=0$  e  $x/w=1$  per  $h/w=3$ .  $Re=5000$ .**



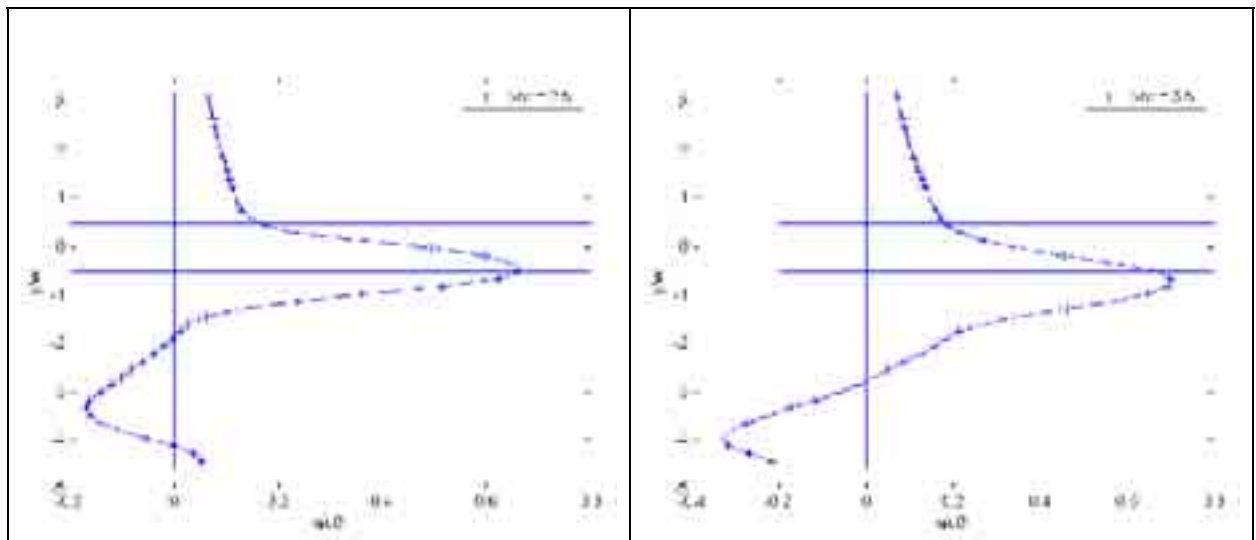
**Figura 4. 24: Componente assiale di velocità  $u/U_o$  nelle sezioni  $x/w=3.2$  e  $x/w=4$  per  $h/w=3$ .  $Re=5000$ .**



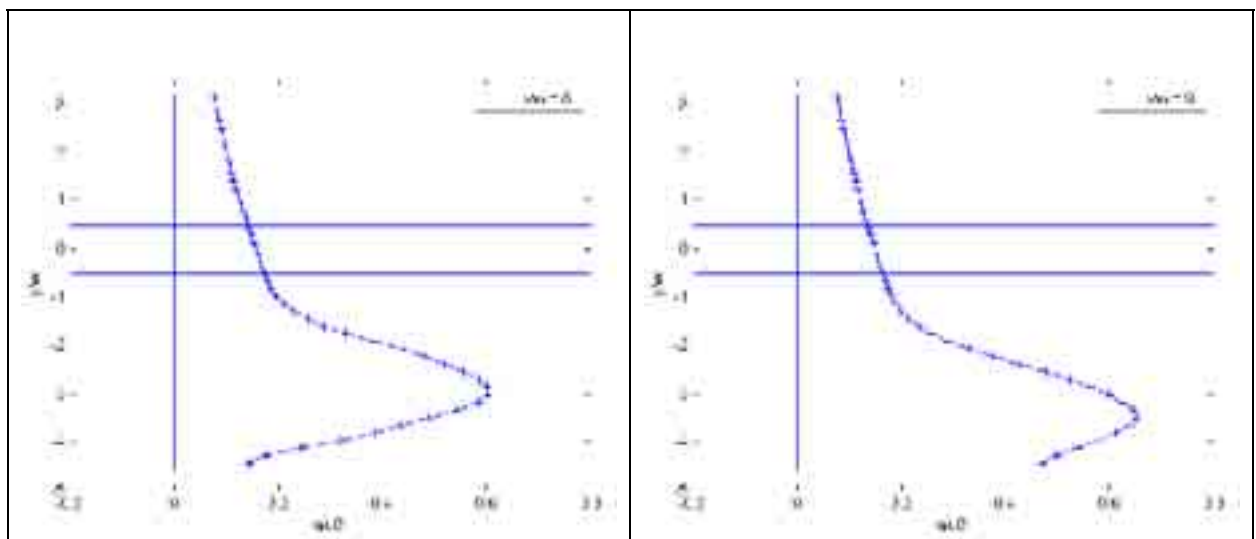
**Figura 4. 25: Componente assiale di velocità  $u/U_o$  nelle sezioni  $x/w=7$  e  $x/w=8$  per  $h/w=3$ .**



**Figura 4. 26: Componente assiale di velocità  $u/U_o$  nelle sezioni  $x/w=0$  e  $x/w=1$  per  $h/w=4$ .**

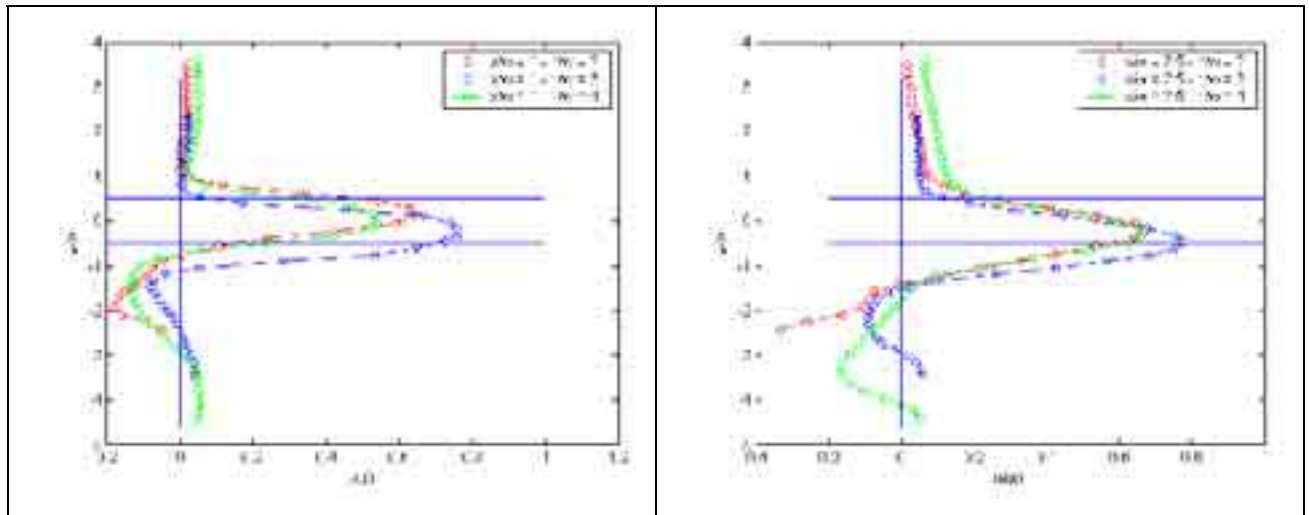


**Figura 4. 27: Componente assiale di velocità  $u/U_0$  nelle sezioni  $x/w=2.5$  e  $x/w=3.5$  per  $h/w=4$ .  $Re=5000$ .**

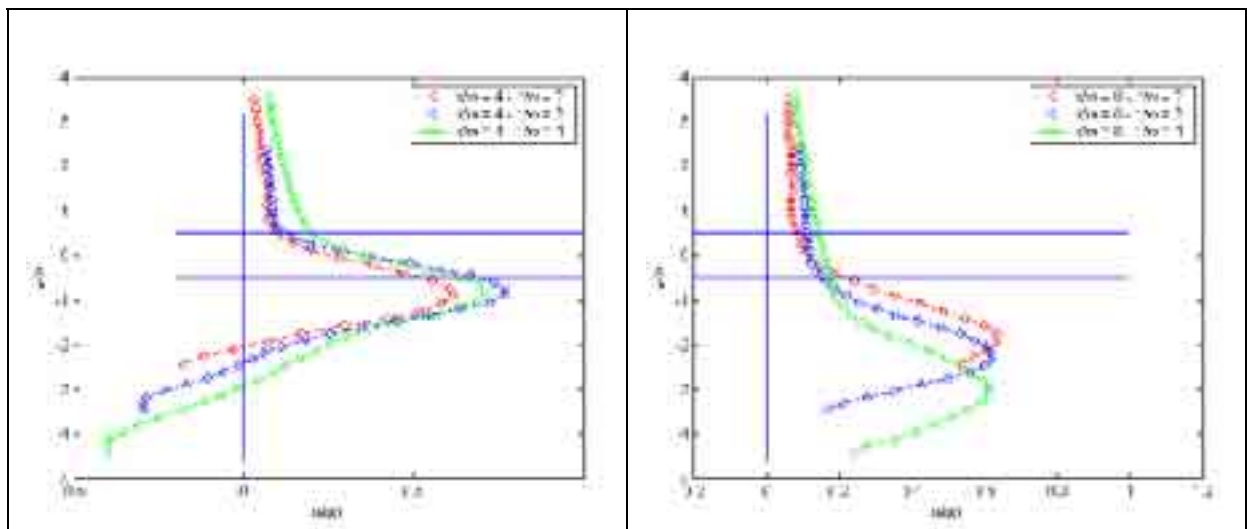


**Figura 4. 28: Componente assiale di velocità  $u/U_0$  nelle sezioni  $x/w=8$  e  $x/w=9$  per  $h/w=4$ .  $Re=5000$ .**

L'estensione della zona di ricircolo secondaria aumenta posizionando la parete ad  $h/w=4$ , come si nota nelle Figura 4. 26, Figura 4. 27 e Figura 4. 28. Per confronto, nelle Figura 4. 29 e Figura 4. 30, vengono riportati i profili di velocità adimensionali in diverse sezioni per i tre rapporti  $h/w$  esaminati. In particolare si può notare come l'andamento della velocità sia analogo per tutte le configurazioni con una deviazione maggiore del getto per  $h/w=4$ .



**Figura 4. 29: Componente assiale di velocità  $u/U_o$  nelle sezioni  $x/w=1$  e  $x/w=2.5$  per  $h/w=2, 3, 4, Re=5000$ .**



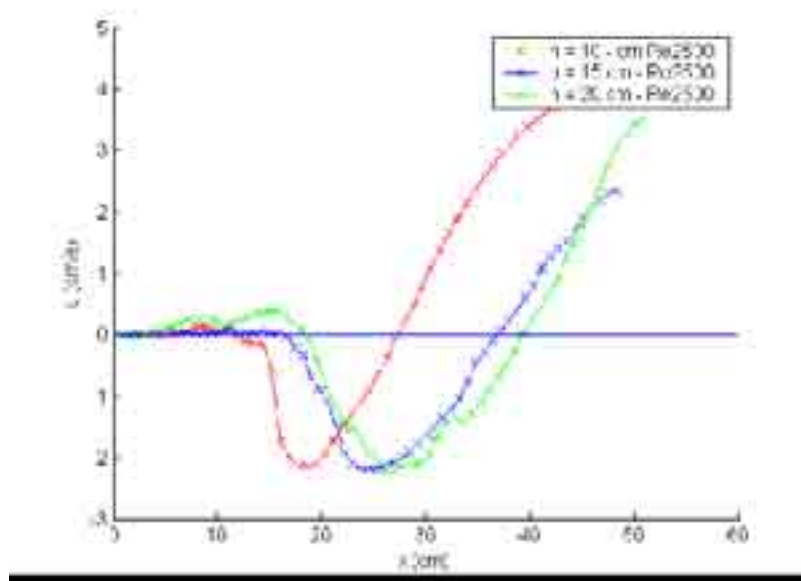
**Figura 4. 30: Componente assiale di velocità  $u/U_o$  nelle sezioni  $x/w=4$  e  $x/w=8$  per  $h/w=2, 3, 4, Re=5000$ .**

#### 4.3.1 Determinazione della lunghezza di riattacco

I profili di velocità permettono di ricavare la posizione media del punto di riattacco  $x_r$ . Tale posizione media dipende dalla distanza  $h$  a cui è posta la parete e dal numero di Reynolds. Ricordiamo che nel presente studio sono state esaminate tre lunghezze, 10 , 15 e 20 cm, corrispondenti rispettivamente a  $2w$ ,  $3w$  e  $4w$ , avendo indicato con  $w$  la larghezza del canale di ingresso.

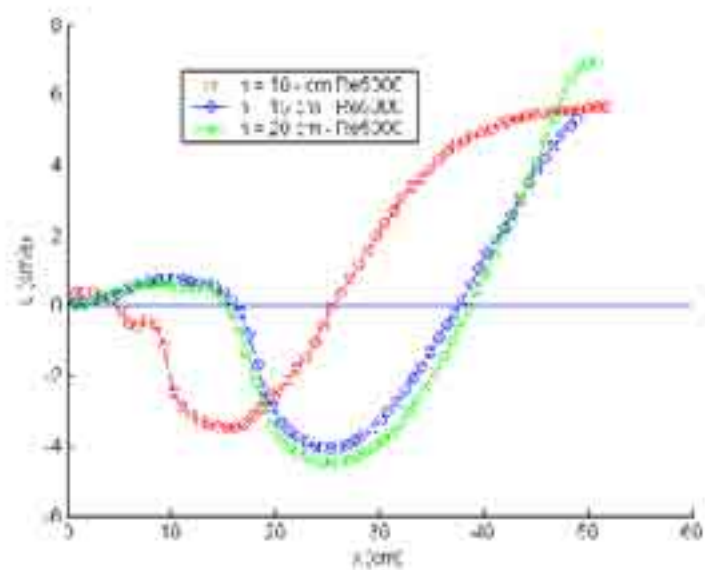
Nella Figura 4. 31 viene riportato l'andamento della componente assiale di velocità in corrispondenza della parete, ad una distanza di  $\sim 1$  cm, nelle varie

configurazioni, per  $Re=2500$ . E' riconoscibile anche in questo grafico la presenza dei vortici principale e secondario. Il punto di riattacco è calcolato in corrispondenza dell'ultima inversione del segno di  $u$ . In questo modo si ottiene per i tre valori di  $h/w$  2, 3 e 4 una posizione di  $x_r/w$  rispettivamente di 5, 7.12 e 7.6.

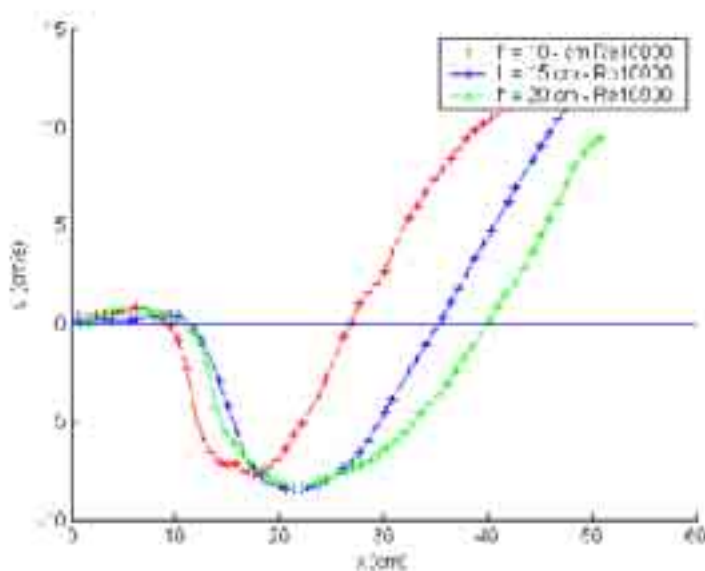


**Figura 4. 31: Velocità assiale lungo la parete in funzione di  $x$ .  $Re=2500$ .**

L'andamento della velocità  $u$  è analoga per i tre numeri di Reynolds esaminati. In particolare la Figura 4. 32 riporta l'andamento di  $u$  per  $re=5000$ , mentre la Figura 4. 33 si riferisce a  $Re=10000$ . In particolare si nota come il valore assoluto della velocità all'interno della zona di ricircolo aumenti all'aumentare della distanza  $h$ .

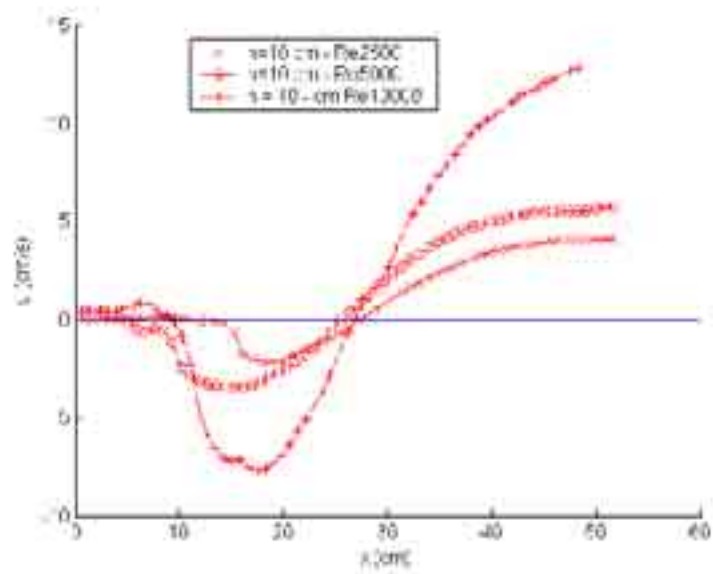


**Figura 4. 32: Velocità assiale lungo la parete in funzione di x. Re= 5000**



**Figura 4. 33: Velocità assiale lungo la parete in funzione di x. Re=10000**

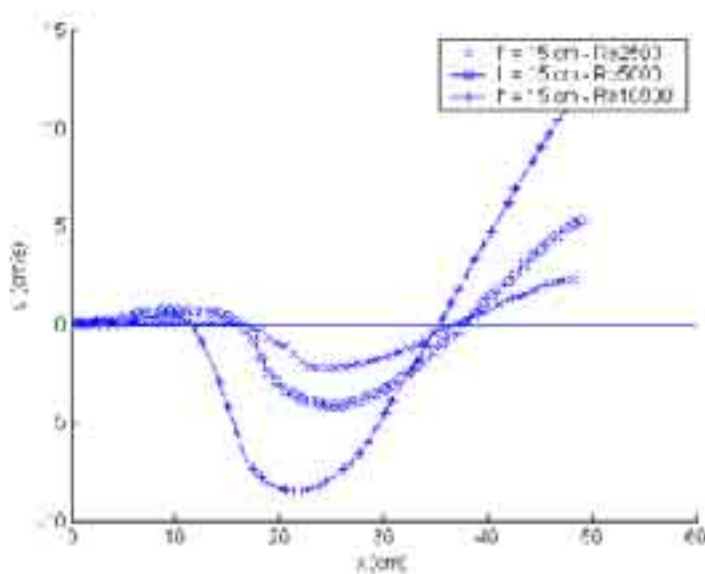
Nelle Figura 4. 34, Figura 4. 35 e Figura 4. 36 viene analizzata la dipendenza dal numero di Reynolds: viene infatti illustrato l'andamento della componente di velocità assiale  $u_x$ , misurata in corrispondenza della parete, posta a distanza rispettivamente  $h/w=2, 3$  e  $4$ , per i tre numeri di Reynolds esaminati.



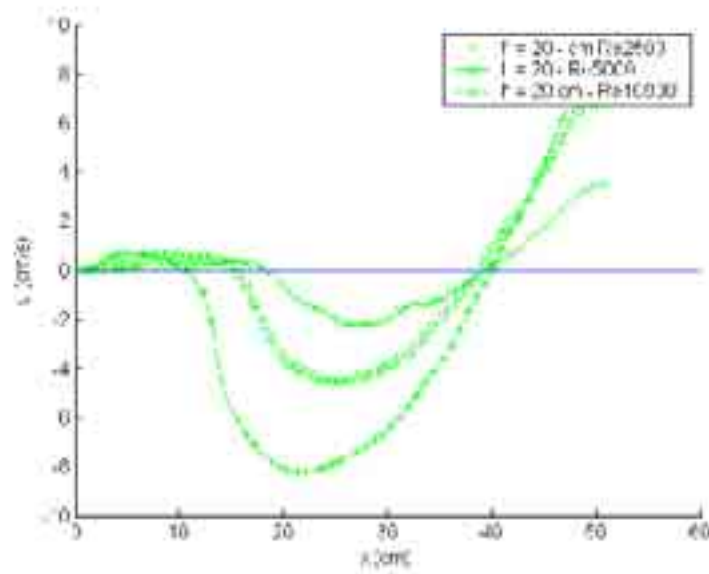
**Figura 4. 34: Velocita' assiale lungo la parete.  $h/w=2$**

Dai grafici si evince come il punto di attacco  $x_r$  risulti pressoché indipendente dal numero di Reynolds: le variazioni che si riscontrano non possono essere prese come effettive variazioni della posizioni di  $x_r$ . tali variazioni risultano infatti dello stesso ordine di grandezza degli errori di misura nell'ambito della tecnica utilizzata.

La pendenza delle curve a valle del punto di attacco denota come la componente  $u$  per  $Re=10000$  cresca più rapidamente rispetto  $Re= 5000$  e  $Re=2500$ .

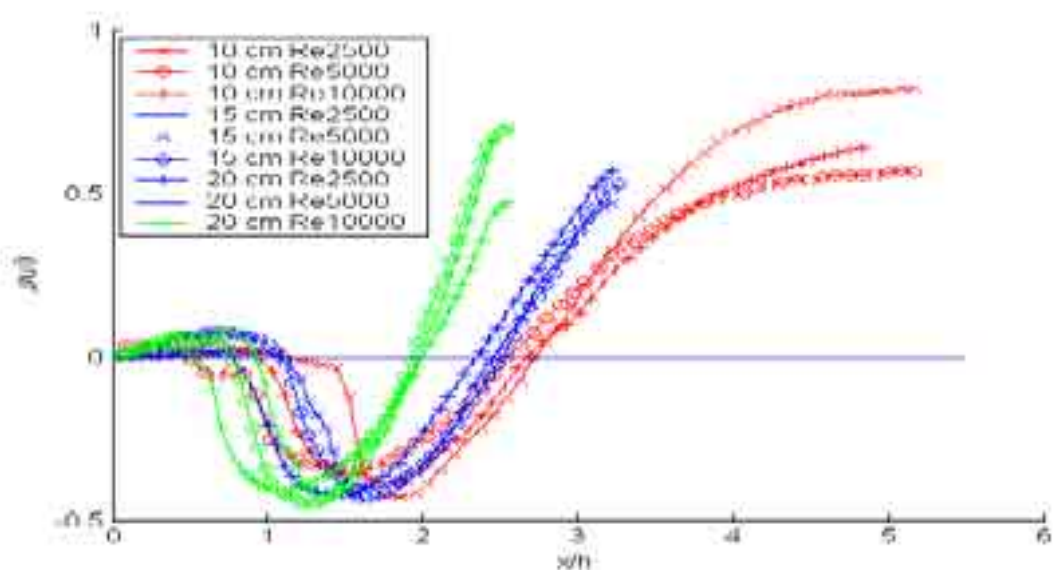


**Figura 4. 35: Velocità assiale lungo la parete.  $h/w=3$**



**Figura 4. 36: Velocità assiale lungo la parete.  $h/w=4$**

L' indipendenza del punto di attacco dal numero di Reynolds è conforme ai risultati ottenuti da altri autori (Lund 1986, Nasr 1997, Nozaki 1981, Sawyer 1960).



**Figura 4. 37: Velocità assiale (adimensionalizzata rispetto alla velocità media) in funzione di  $x/h$ .**

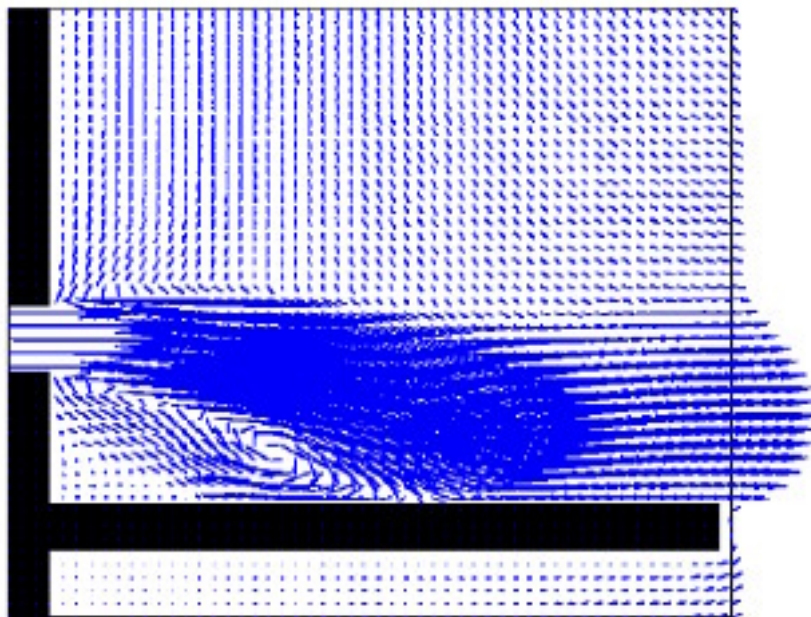
L'indipendenza dal numero di Reynolds viene ulteriormente dimostrata dalla Figura 4. 37, in cui è riportata la componente  $u$  di velocità adimensionalizzata rispetto alla velocità media nel getto (ottenuta dalle misure di portata) in funzione della lunghezza  $x$  adimensionalizzata con la distanza della parete  $h$ . In questo caso la distanza  $x_r/h$  del punto di riattacco tende a diminuire con



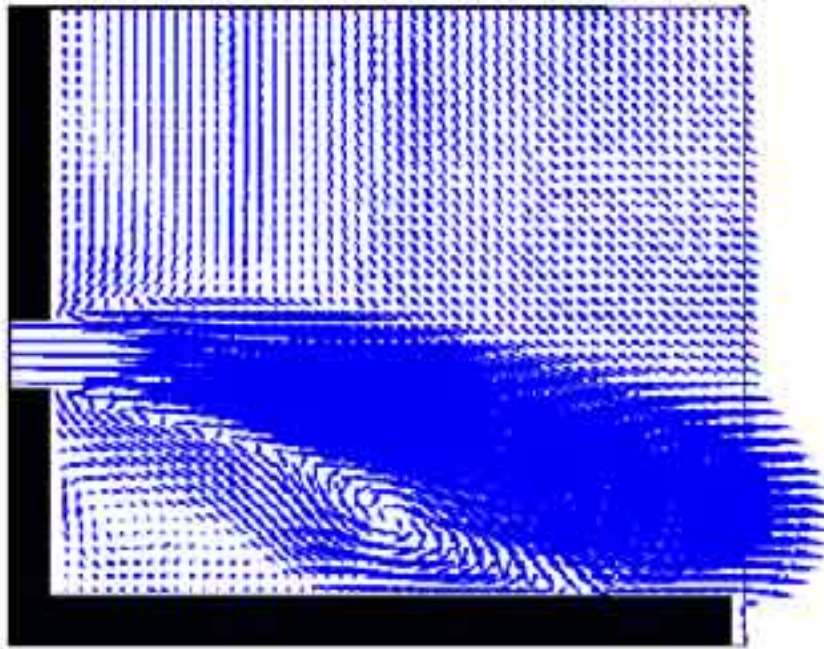
l'aumentare di  $h$ , mentre naturalmente nella rappresentazione dimensionale  $xr$  tende a crescere.

#### 4.4 *Simulazioni numeriche*

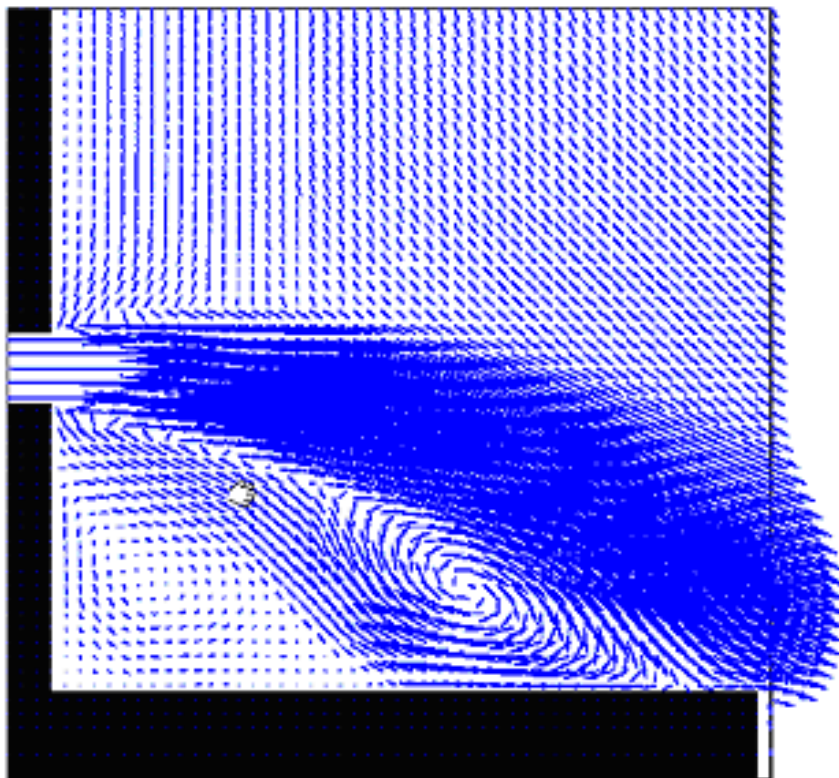
Le Figura 4. 38, Figura 4. 39 e Figura 4. 40 mostrano i campi fluidodinamici ottenuti con il modello numerico descritto nel capitolo 2; i risultati mostrano un significativo accordo con gli esperimenti, come illustrato nel paragrafo successivo dal punto di vista quantitativo per quanto concerne la lunghezza di riattacco.



**Figura 4. 38:  $Re\ 10000$ .  $h/w = 2$ . Campo di velocità.**



**Figura 4. 39: Re 10000.  $h/w = 3$ . Campo di velocità.**

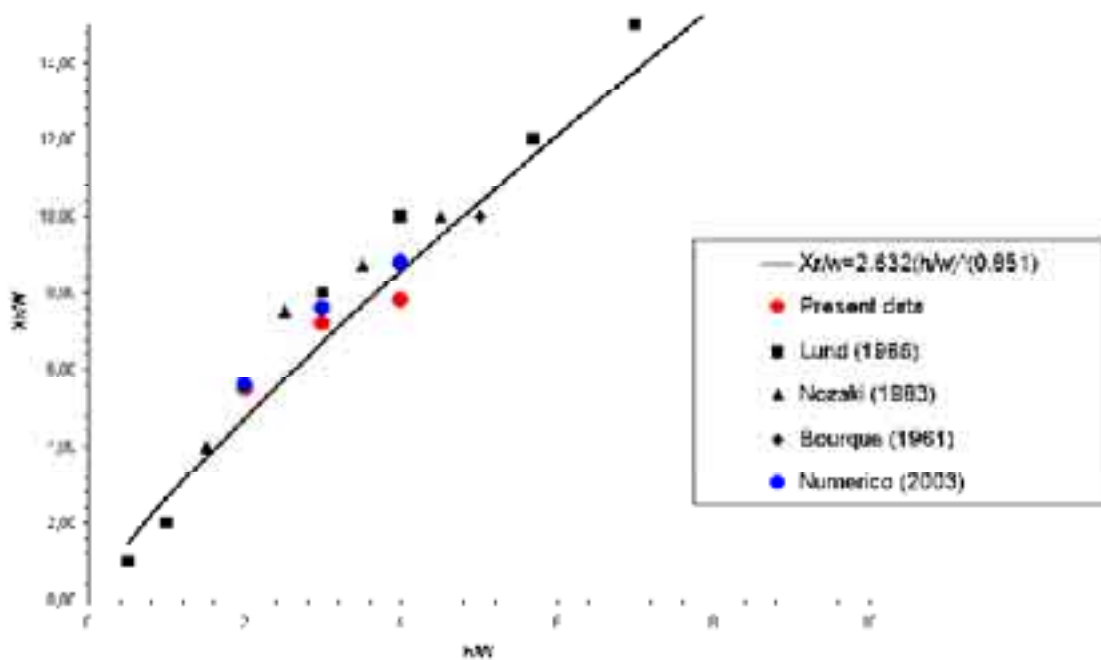


**Figura 4. 40: Re 10000.  $h/w = 4$ . Campo di velocità**

#### *4.5 Confronti*

Nella Figura 4. 41 vengono rappresentati i valori dei punti di riattacco della vena fluida alla parete laterale, adimensionalizzati rispetto alla larghezza del getto, in

funzione della distanza della parete stessa. I risultati sperimentali ottenuti risultano in buon accordo sia con i dati disponibili in letteratura sia con quelli relativi alla soluzione del codice numerico APAT. I risultati ottenuti sinora non consentono quindi di rilevare sostanziali differenze legate agli effetti di frontiera libera. Le applicazioni dell'effetto Coanda nel campo dell'ingegneria costiera si mostrano quindi possibili, almeno alla luce dei risultati sin qui ottenuti.



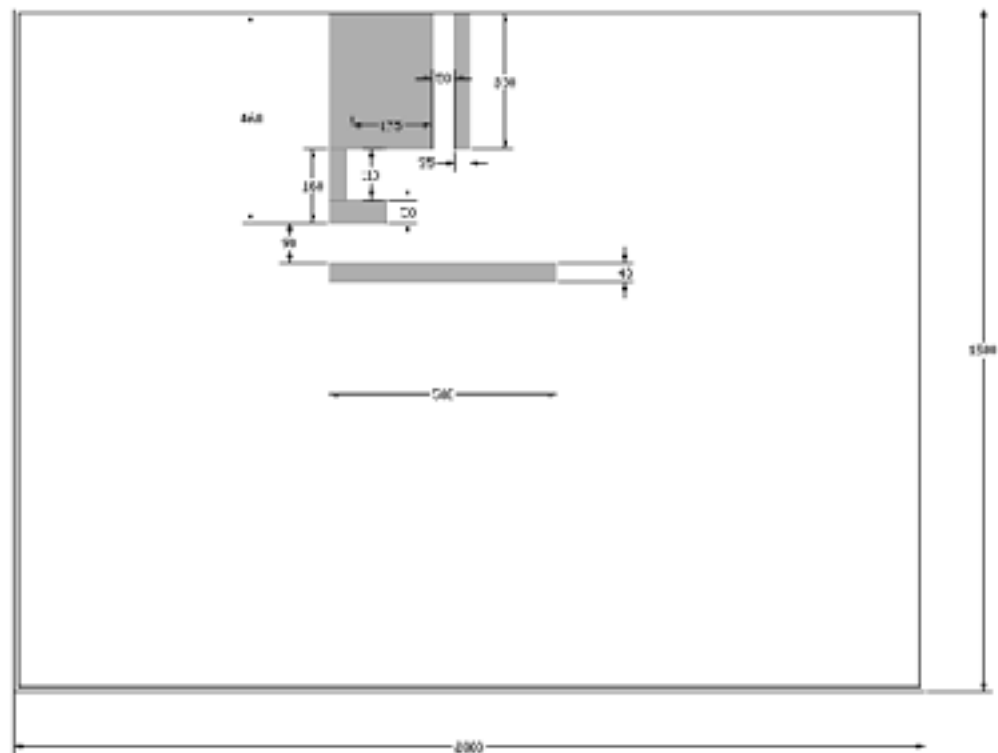
**Figura 4. 41: Lunghezza di riattacco nell'effetto Coanda: confronto tra dati sperimentali, soluzione numerica e dati di letteratura**

## 5. L'effetto coanda nell'ingegneria costiera: schema di porto-canale

Viene ora analizzata una configurazione complessa, ottenuta inserendo nella vasca due elementi in pvc (Figura 5. 1):

una parete ortogonale alla direzione del getto;

una parete sagomata ad L posizionata lateralmente a sinistra rispetto all'asse del getto.



**Figura 5. 1: Schema di porto canale. Misure espresse in mm.**

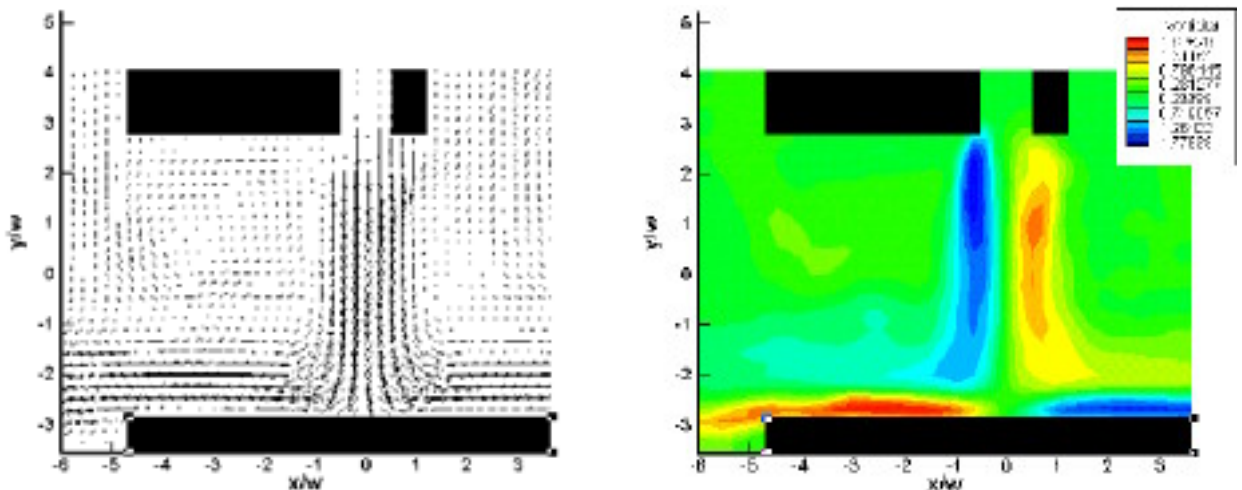
Lo studio di tale configurazione è finalizzato ad analizzare le modifiche apportate al campo fluidodinamico dall'elemento sagomato ad L. Per evidenziare tali modifiche è stato prima effettuato lo studio della configurazione ottenuta posizionando solo la parete ortogonale al getto e in seguito è stata

analizzata la configurazione completa. L'analisi è stata svolta per 2 valori del numero di Reynolds, 5000 e 10000.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti, che mostrano come l'interazione delle strutture del flusso con la parete ad L provochi la nascita di una zona di ricircolo. Tale struttura vorticoso dà luogo alla generazione di un gradiente della superficie libera che devia il getto verso l'elemento ad L. Il punto di ristagno sulla parete perpendicolare al getto si sposta conseguentemente nella stessa direzione. Il risultato di questi fenomeni consiste in una significativa riduzione della portata verso destra (il lato opposto a quello dove viene posizionata la struttura ad L), rispetto al flusso in assenza della struttura.

### 5.1 Misure anemometriche

Nelle Figura 5. 2 e Figura 5. 3 sono riportati i valori, mediati nel tempo, della velocità e della vorticità nel campo fluidodinamico, nella configurazione con antemurale, rispettivamente per  $Re=5000$  e  $Re=10000$ .

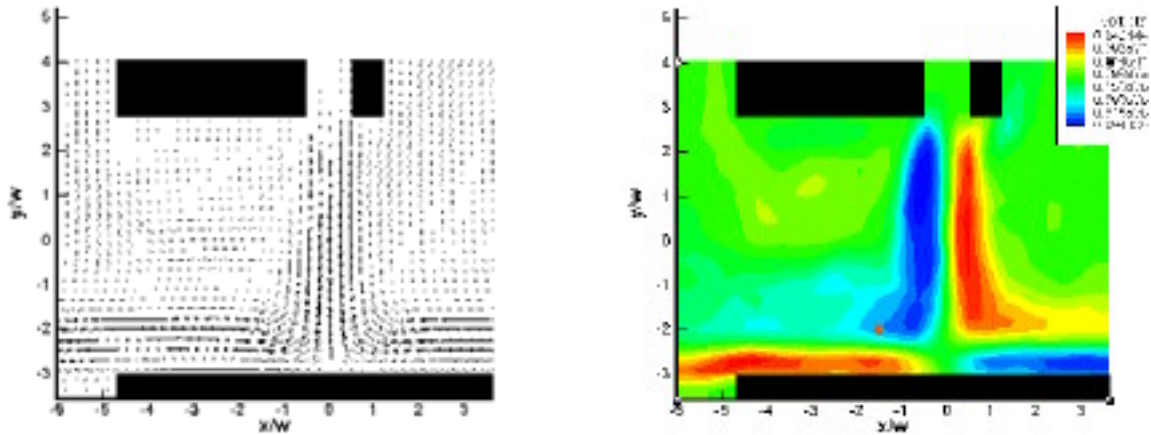


**Figura 5. 2:  $Re=5000$ . Velocità (sx) e vorticità (dx) mediate nel tempo. Vorticità espressa in  $\text{sec}^{-1}$**

Si nota come in tale situazione il getto, raggiunto l'antemurale, si divida in due parti pressoché simmetriche, che proseguono aderenti alla parete perpendicolare

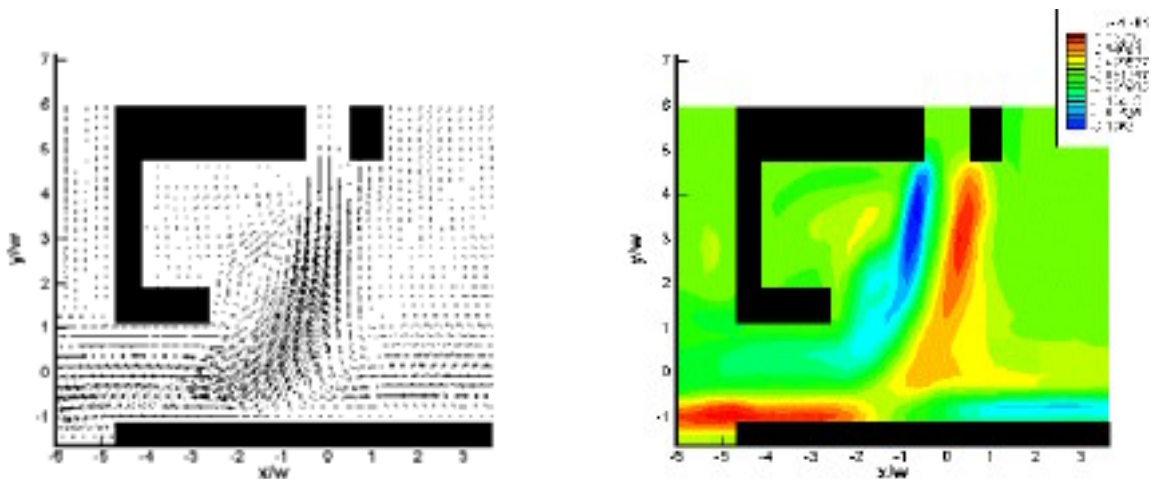


in direzioni opposte. La configurazione non cambia al variare del numero di Reynolds.



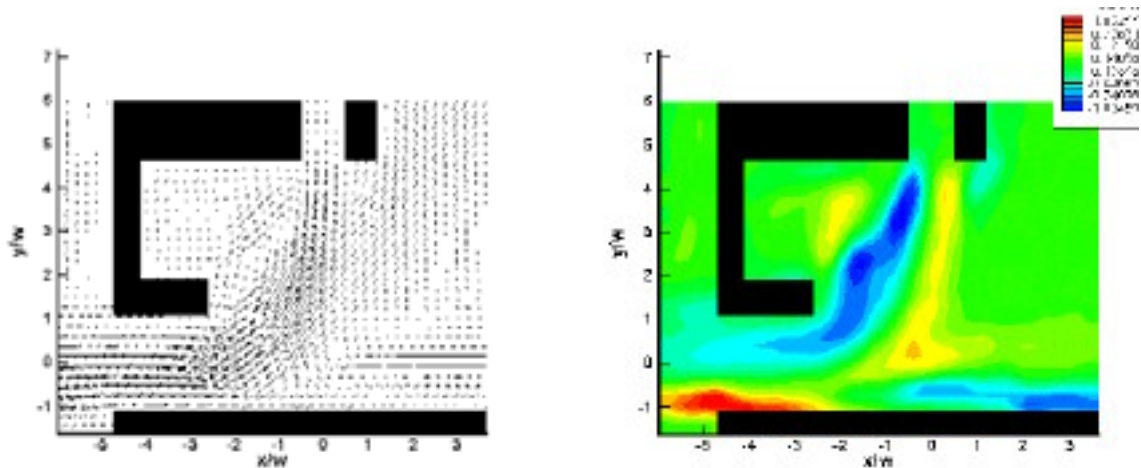
**Figura 5. 3:  $Re=10000$ . Velocità (sx) e vorticità (dx) mediate nel tempo.**

L'inserimento della parete laterale ad L (Figura 5. 4 e Figura 5. 5) dà luogo all'effetto Coanda: sul vertice della parete si forma infatti una grande struttura vorticoso, che provoca la deviazione del getto verso sinistra.



**Figura 5. 4:  $Re=5000$ . Velocità (sx) e vorticità (dx) mediate nel tempo.**

Si genera quindi una evidente asimmetria nel campo di velocità e, di conseguenza, la maggior parte del flusso viene orientato verso sinistra.

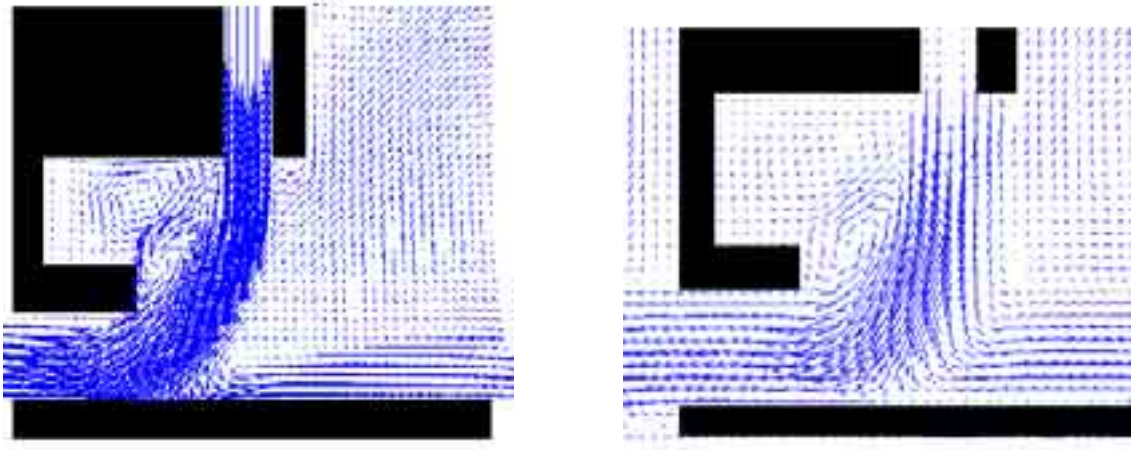


**Figura 5. 5:  $Re=10000$  . Velocità (sx) e vorticità (dx) mediate nel tempo.**

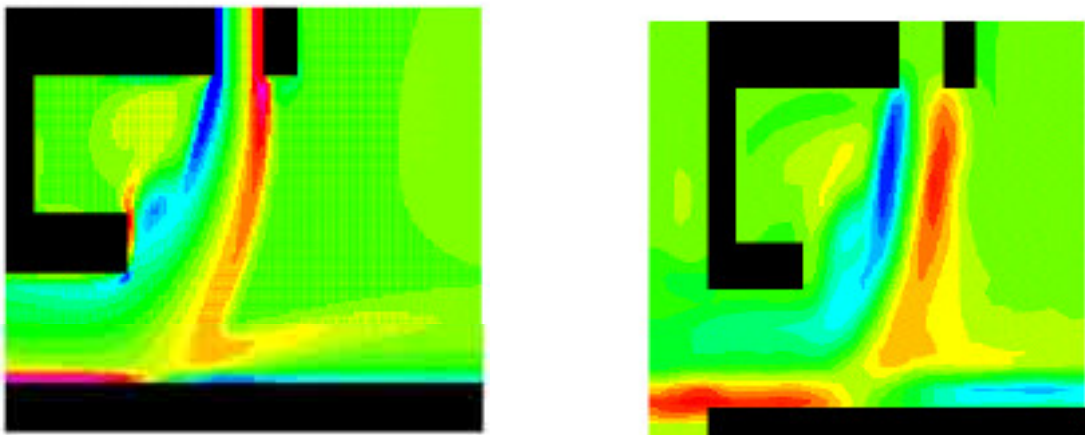
L'analisi del campo di velocità mostra la presenza, oltre alla grande struttura di ricircolo posizionata in corrispondenza dello spigolo del lato sagomato ad L, di una struttura minore, rotante in verso opposto rispetto alla precedente, il cui centro si posiziona all'interno della cavità delimitata dallo stesso elemento. All'interno di tale cavità si genera quindi un campo fluidodinamico noto in letteratura come driven cavity (Shankar et al 2000) e caratterizzato dalla presenza di due vortici posizionati negli angoli della cavità stessa. La soluzione numerica (Figura 5. 6 e Figura 5. 7) riproduce la fenomenologia descritta, in ottimo accordo con i dati sperimentali: il modello numerico sviluppato appare pertanto idoneo alla simulazione dei fenomeni idrodinamici affrontati nel presente studio.

E' importante osservare che l'effetto Coanda in presenza di una parete laterale parallela al getto, descritto nel capitolo 4, e' stabile, riproducibile, affidabile, a prescindere dalle caratteristiche del flusso, dalla distanza e caratteristiche della parete (é stata anche provata una configurazione con parete scabra) a patto che la parete laterale sia impermeabile, il flusso sia ovunque subcritico e tenendo comunque presente che in questo studio non sono stati esaminati gli effetti di stratificazione. In questo caso, invece, la geometria più complessa, a causa della presenza dell'antemurale, rende la fenomenologia meno semplice e l'effetto di

deviazione meno stabile; in particolare si è notato che piccole modifiche della forma del molo ad L possono dare luogo a una deviazione del flusso meno evidente.



**Figura 5. 6: Velocità media  $Re=5000$ . Soluzione numerica (sx), PIV (dx).**



**Figura 5. 7: Vorticità media  $Re=5000$ . Soluzione numerica (sx), PIV (dx).**

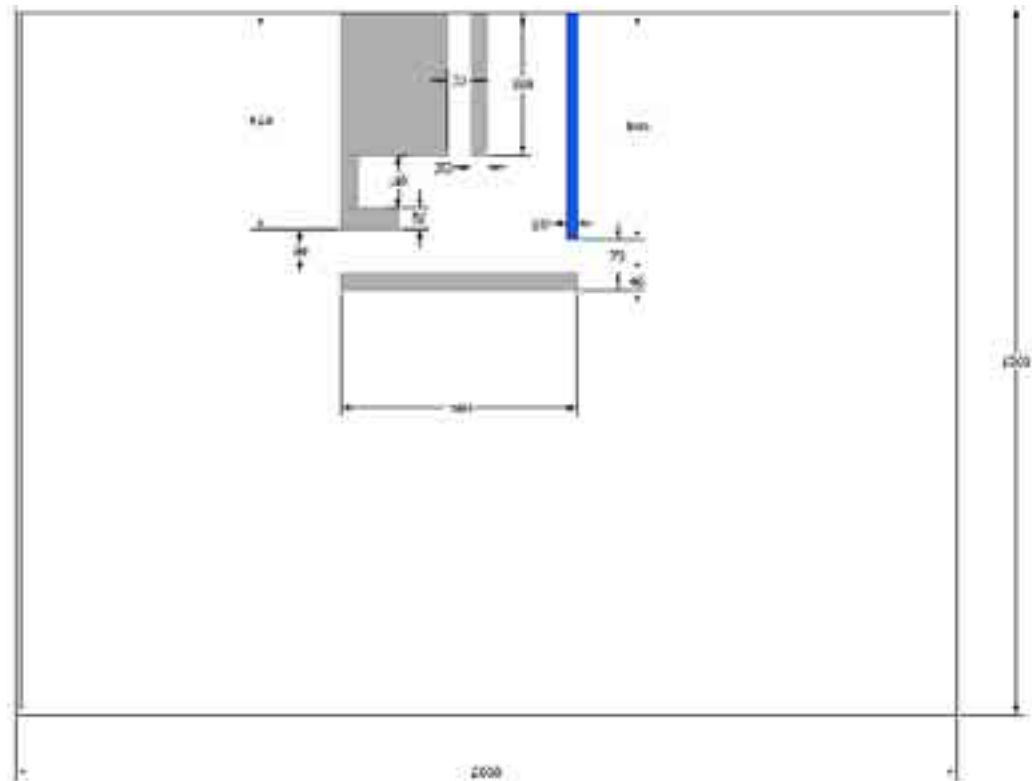
## 5.2 Visualizzazioni. Controllo del flusso.

E' stato evidenziato come la configurazione del porto canale con antemurale e molo laterale (Figura 5. 1) dia luogo ad una deviazione del getto verso la parete ad L con una conseguente riduzione di portata verso destra, ossia il lato opposto alla struttura ad L stessa, rispetto alla configurazione con antemurale. Al fine di



ridurre ulteriormente questa componente di portata si è pensato di apportare le seguenti modifiche:

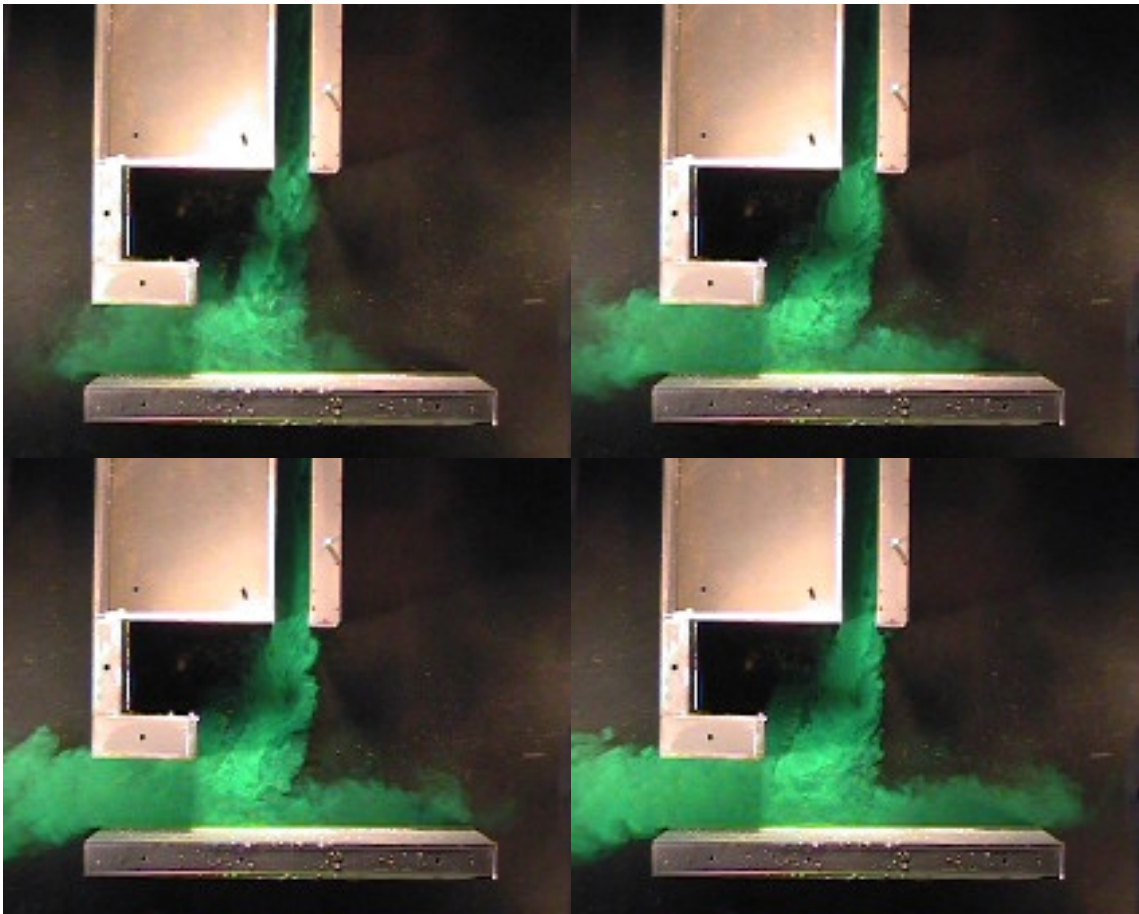
a) inserire un elemento lineare parallelo al getto posizionato dalla parte opposta rispetto al molo sagomato ad L, nell'ottica di diminuire la sezione attraverso cui defluisce la componente del getto verso destra (Figura 5. 8);



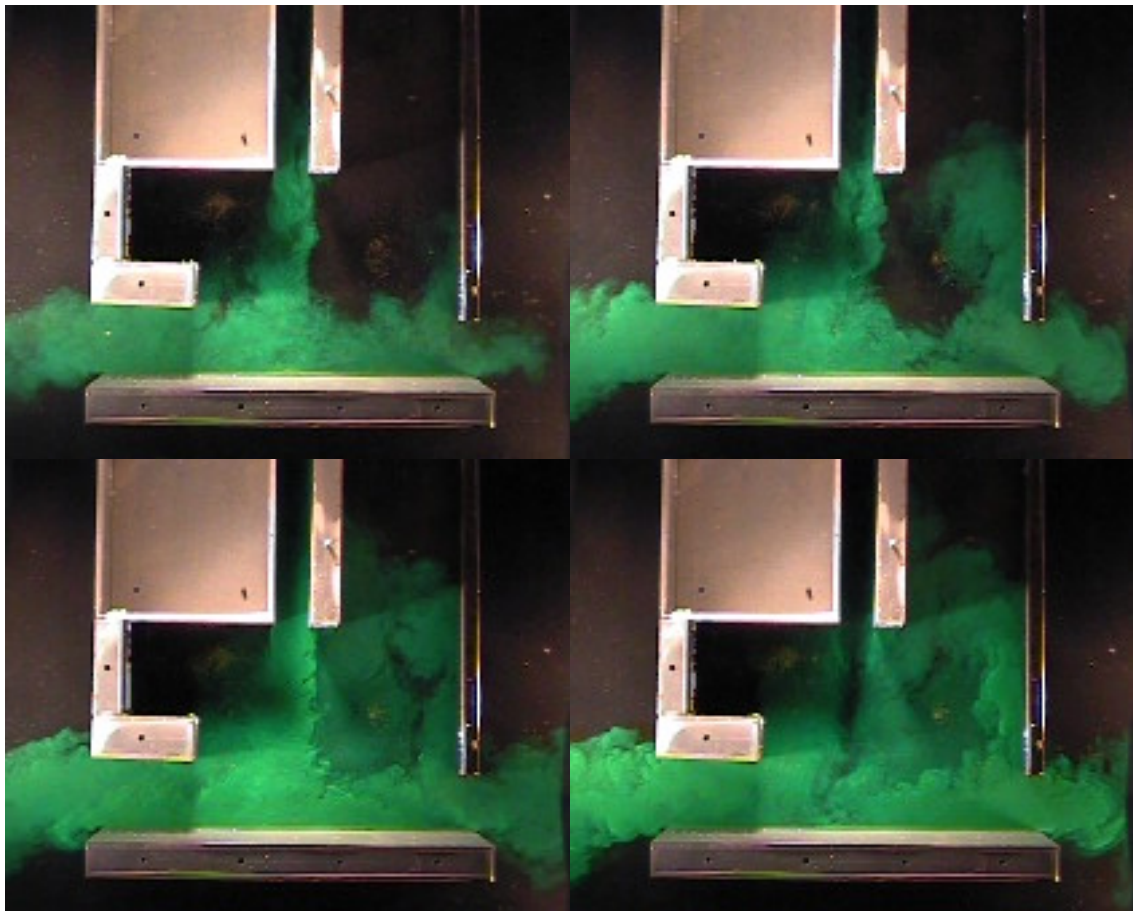
**Figura 5. 8: Configurazione con pennello.**

b) realizzare delle feritoie nell'antemurale ed inserire un setto perpendicolare, attiguo ad una delle feritoie (Figura 5. 9)

Anzitutto, analizzando le visualizzazioni relative alla configurazione originaria (antemurale e molo laterale ad L, Figura 5. 10) si evince come il flusso verso destra sia prevalentemente confinato in una regione di spessore limitato aderente alla parete. Questo porta a supporre che la prima variante proposta non sia adeguata allo scopo. In effetti, le visualizzazioni effettuate in questa configurazione (Figura 5. 11) mostrano che il getto, raggiunta la parete orizzontale, si divide in due componenti in direzione opposta pressoché equivalenti e la portata che defluisce verso destra sembra essere addirittura leggermente superiore rispetto al caso senza pennello e senza elemento ad L. L'effetto Coanda verso sinistra (elemento ad L) viene quindi bilanciato dall'effetto Coanda verso destra (pennello). Inoltre, la componente del getto orientata verso destra si separa, a sua volta, in due parti, dando origine ad una grande struttura vorticoso antioraria compresa tra il pennello e il molo guardiano di destra, non raggiunta dal flusso esterno (entrainment) ma alimentata esclusivamente dal getto, come si nota dall'accumulo del colorante in tale zona.

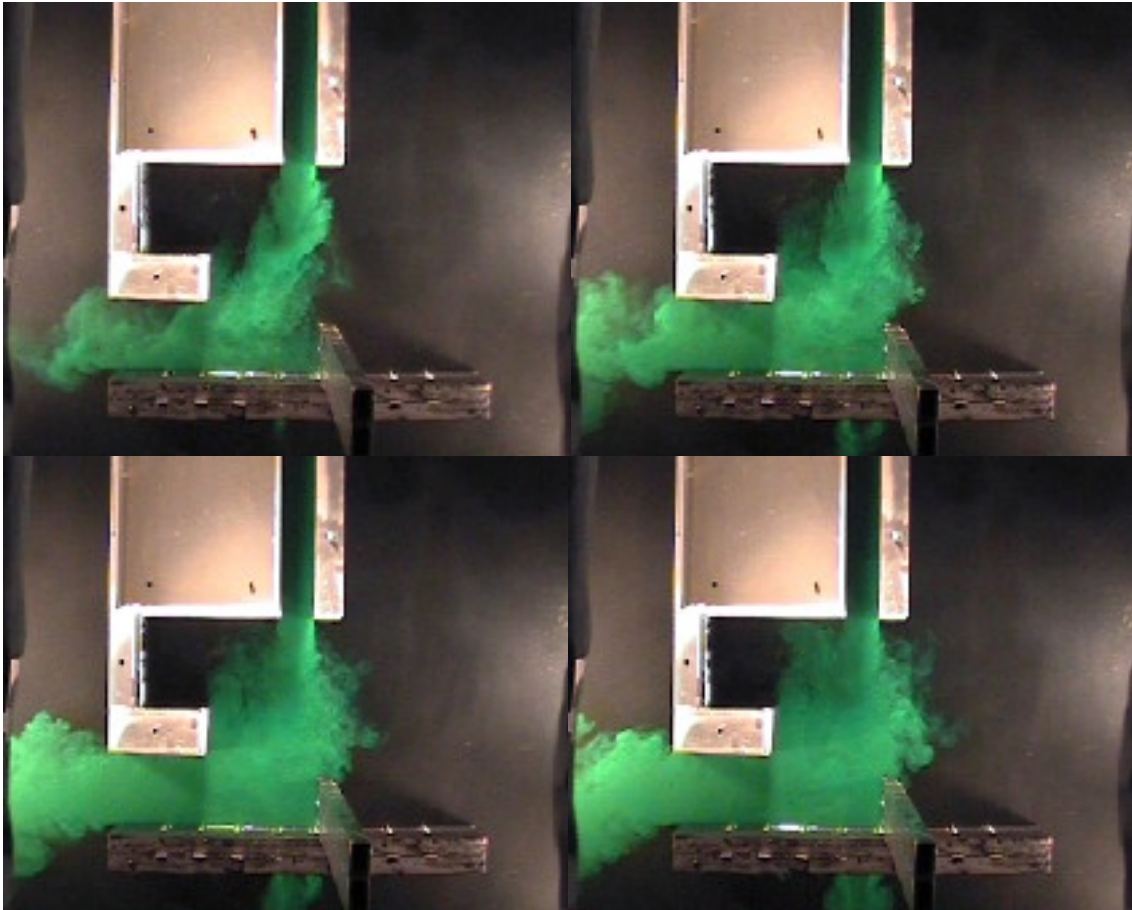


**Figura 5. 10: Visualizzazioni: configurazione originaria (sequenza temporale,  $Re = 10000$ ).**



**Figura 5. 11: Visualizzazioni: configurazione con pennello (sequenza temporale,  $Re = 10000$ ).**

La seconda configurazione proposta prevede invece la realizzazione, sulla parete orizzontale, di due fessure di 10 mm di larghezza, distanti tra loro 41 mm, e posizionate frontalmente rispetto al getto. Inoltre viene collocato un elemento ortogonale all'antemurale, situato a destra del punto di ristagno come evidenziato in Figura 5. 9. In tale configurazione (Figura 5. 12) il flusso verso destra viene impedito dalla presenza del setto e parte del deflusso viene smaltito attraverso i fori praticati sulla parete perpendicolare al getto.



**Figura 5. 12: Visualizzazioni: Configurazione con feritoie e setto (sequenze temporali,  $Re = 10000$ ).**

## **Conclusioni**

Nel presente studio è stata rilevata l'importanza della conoscenza del campo fluidodinamico nei pressi di opere marittime, essendo la costa ricettore di inquinanti. Gli ambienti di transizione rappresentano, infatti, un ecosistema in grado di accumulare temporaneamente o definitivamente molti contaminanti trasportati dai fiumi verso il mare, organici e inorganici. A questo scopo è risultato utile affrontare una valutazione di tipo sperimentale e parallelamente un'analisi numerica del campo fluidodinamico di alcuni esempi di opere marittime. Si è riscontrato come i risultati numerici siano in buon accordo con i risultati sperimentali ottenuti. Nella presente analisi non sono stati tenuti in considerazione gli effetti apportati dalla stratificazione dovuta alla diversa salinità e temperatura delle acque fluviali e marittime (galleggiamento) la cui stima risulterebbe interessante in analisi future.

## Bibliografia

- Adrian R. J. (1991): "*Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics*". Annual Reviews of Fluid Mechanics, Vol. 23, pagg. 261-304.
- Alvi F. S., (2003): "*Experiments in Thermal and Fluid Sciences*". Biblioteca del Florida College of Engineering.
- Anderson D., Eberhardt S., (2001): "*A physical description of Flight*". Understanding flight, McGraw-Hill.
- ANPA (2000): "*Effetti delle opere antropiche recenti sull'equilibrio naturale dell'area circostante il porto-canale di Pescara*", rapporto tecnico ANPA.
- Aravamudhan V. R., Moretti P. M., Chang Y. B., (1998): "*An experimental study of the Coanda effect for 90-degree turning of subsonic air jets*". ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting.
- Borthwick A.G., Barber R.W. (1992): "*River and Reservoir Flow Modelling using the Transformed Shallow Water Equations*", International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 14, 1193-1217.
- Bouguet J.-Y., (2002): "*Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm*". Intel Corporation Microprocessor Research Labs.
- Casulli V. (1990): "*Semi-implicit Finite Difference Methods for the Two-Dimensional Shallow Water Equations*", Journal of Computational Physics, Vol. 86, 56-74.
- Casulli V. (1999): "*A Semi-Implicit Finite Difference Method for Non-Hydrostatic Free-Surface Flows*", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 30, 425-440.
- Cenedese A., Romano G. P. (1990): "*PIV: a new technique in flow velocity measurements*". Excerpta, Vol. 5, pagg. 57-97.
- Chetverikov D. (2002): "*Particle image velocimetry by feature tracking*". Computer Analysis of Images and Patterns, LNCS Vol. 2124, Springer Verlag, pagg. 325-332.
- Didden N., Ho C. M., (1985): "*Unsteady separation in a boundary layer produced by an impinging jet*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 160, pagg. 235-256.
- Eriksson J. G., Karlsson R. I., (2001): "*Near-wall turbulence structure in the plane jet in still surroundings*". Faxén laboratory, Royal Institute of technology, Stockholm, Sweden.
- Everitt K. W., Robins A. G., (1978): "*The development and structure of turbulent plane jets*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 88, parte III, pagg. 563-583.
- Erhardt Ferron A., (2000): "*Theory and applications of digital image processing*". University of applied Sciences Offenburg, pagg. 1-48.
- Fadlun E.A., Verzicco R., Orlandi P., Mohd-Yusof J. (2000): "*Combined Immersed-Boundary Finite-Difference Methods for Three-Dimensional Complex Flow Simulation*", Journal of Computational Physics, vol. 161, 35-60.
- Glauert M. B., (1956): "*The wall jet*". Journal of Fluid Mechanics, Vol.1, pagg. 625-643.
- Gogineni S., Shih C., (1997): "*Experimental investigation of the unsteady structure of a transitional plane wall jet*". Experiments in Fluids, Vol.23, pagg. 121-129.
- Gogineni S., Visbal M., Shih C., (1999): "*Phase-resolved PIV measurements in a transitional plane wall jet: a numerical comparison*". Experiments in Fluids, Vol.27, pagg. 126-136.



- Gonzalez R. C., Woods R. E., (2002): "*Digital imaging processing*". Review Material, second edition, Prentice Hall, NJ.
- Grinstein F. F., (2001): "*Vortex dynamics and entrainment in rectangular free jets*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 437, pagg. 69-101.
- Guillou S., Nguyen K.D. (1999): "*An Improved Technique for Solving Two-Dimensional Shallow Water Problems*", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 29, 465-483.
- Gutmark E. J., Grinstein F. F., (1999): "*Flow control with noncircular jets*". Annual Reviews of Fluid Mechanics, Vol. 31, pagg. 239-272.
- Gutmark E., Wygnanski I., (1976): "*The planar turbulent jet*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 73, parte III, pagg. 465-495.
- Haeuser J., Paap H.G., Eppel D., Mueller A. (1985): "*Solution of Shallow Water Equations for Complex Flow Domains Via Boundary-Fitted Co-Ordinates*", International Journal for Numerical Methods Fluids, Vol. 5, 727-744.
- Hoch J., Jiji L. M., (1981): "*Two-dimensional turbulent offset jet-boundary interaction*". Journal of Fluids Engineering, Vol. 103, pagg. 154-161.
- Hsiao F. B., Sheu S. S., (1994): "*Double row vertical structures in the near field region of a plane wall jet*". Experiments in Fluids, Vol.17, pagg. 291-301.
- Hussain A. K. M. F., (1986): "*Coherent structures and turbulence*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 173, pagg. 303-356.
- Hussain A. K. M. F., Clark A.R., (1981): "*On the coherent structure of the axisymmetric mixing layer: a flow-visualization study*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 104, pagg. 263-294.
- Jeong J., Hussain F., Schoppa W., Kim J., (1997): "*Coherent structures near the wall in a turbulent channel flow*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 332, pagg. 185-214.
- Jeong J., Hussain F., (1995): "*On identification of a vortex*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 285, pagg. 69-94.
- Krothapalli A. K., Baganoff D., Karamcheti K., (1981): "*On the mixing of a rectangular jet*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 107, pagg. 201-220.
- Lai J. C. S., Lu D., (2000): "*An inclined wall jet: mean flow characteristics and effects of acoustic excitation*". Experiments in Fluids, Vol.29, pagg. 45-55.
- Lalli F., Berti D., Miozzi M., Miscione F., Porfidia B., Serva L., Vittori E., Romano G.P. (2001): "*Analysis of Breakwater-Induced Environmental Effects at Pescara (Adriatic Sea, Italy) Channel-Harbor*", 11<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway
- Lalli F., Berti D., Miozzi M., Miscione F., Porfidia B., Vittori E., De Girolamo, P. (2001): "*Porto di Pescara: analisi degli effetti indotti sul litorale dal nuovo molo di levante*", Rapporto Tecnico Gruppo di Lavoro ANPA-Ministero delle Infrastrutture.
- Lalli F., Miozzi M., Romano G. P., (2002): "*Some remarks on river mouth flow*".
- Lalli F., Miozzi M., De Girolamo P (2002): "*Aspetti idrodinamici e ambientali del porto-canale di Pescara: simulazioni numeriche e indagini sperimentali*", rapporto tecnico APAT.
- Le H., Moin P. (1991): "*An improvement of Fractional Step Methods for the Incompressible Navier-Stokes Equations*", Journal of Computational Physics, Vol. 92, 369-379.
- Liska R., Wendroff B. (1999): "*Two Dimensional Shallow Water Equation By Composite Schemes*", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 30, 461-479.



Lloyd P. M., Stansby P. K., (1997): "*Shallow-water flow around model conical islands of small side slope. Part I: Surface piercing*". Journal of Hydraulic Engineering, December 1997, pagg. 1057-1067.

Lloyd P. M., Stansby P. K., (1997): "*Shallow-water flow around model conical islands of small side slope. Part II: Submerged*". Journal of Hydraulic Engineering, December 1997, pagg. 1068-1077.

Lund T. S., (1986): "*Augmented thrust and mass flow associated with two-dimensional jet reattachment*". AIAA Journal, Vol. 24, N°12, pagg. 1964-1970.

Marrocu M., Ambrosi D. (1999): "*Mesh Adaptation Strategies for Shallow Water Flow*", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 31, 497-512.

Matsuda H., Iida S., Hayakawa M., (1990): "*Coherent structures in three-dimensional wall jet*". Journal of Fluids Engineering, Vol. 112, pagg. 462-466.

Miozzi M., (2003): "Advanced particle tracking velocimetry using feature tracking". Dipartimento Idraulica, Trasporti e Strade, Università La Sapienza, Roma.

Morandi Cecchi M., Marcuzzi F. (1999): "*Adaptivity in Space and Time for Shallow Water Equations*", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 31, 285-297.

Nars A., Lai J. C S., (1997): "*Comparison of flow characteristics in the near field of two parallel plane jets and an offset plane jet*". Physics of Fluids, Vol. 9, N°10, pagg. 2919-2931.

Nars A., Lai J. C S., (1998): "*A turbulent plane offset jet with small offset ratio*". Experiments in Fluids, Vol. 24, pagg.47-57.

Nars A., Lai J. C S., (1999): "*The effects of wall inclination on an inclined offset jet*". Iran University of Science & Technology e School of Aerospace and Mechanical Engineering Australian Defence force Academy.

Newman B. G., (1961): "*The deflexion of plane jets by adjacent boundaries – Coanda effect*". Boundary layer and flow control, Pergamon Press, Oxford, England, Vol. 1, pagg. 232-264.

Nozaki T., (1983): "*Reattachment flow issuing from a finite width nozzle. Rept. 4, Effects of aspect ratio of the nozzle*". Bulletin of the JSME, Vol. 26, N° 221, pagg.1884-1890.

Nozaki T., Hatta K., Nakashima M., Matsumura, H., (1979): "*Reattachment flow issuing from a finite width nozzle. Rept. 1*". Bulletin of the JSME, Vol. 22, N° 165, pagg.340-347.

Nozaki T., Hatta K., Sato N., Matsumura H., (1981): "*Reattachment flow issuing from a finite width nozzle. Rept. 2, Effects of initial turbulence intensity*". Bulletin of the JSME, Vol. 24, N° 188, pagg.363-369.

Pelfrey J. R. R., Liburdy J. A., (1986): "*Mean flow characteristics of a turbulent offset jet*". Journal of Fluids Engineering, Vol. 108, pagg. 82-88.

Ramaprian B. R., Chandrasekhara M. S., (1985): "*LDA measurements in plane turbulent jets*". Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pagg. 264-271.

Romano G. P., (2002): "*Dispense del corso di Aerodinamica sperimentale*". Ingegneria Aerospaziale, Università degli Studi di Roma La Sapienza, pagg. 198-212.

Sawyer R. A., (1960): "*The flow due to a two-dimensional jet issuing parallel to a flat plane*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 9, pagg. 543-561.

Sawyer R. A., (1963): "*Two-dimensional reattaching flows including the effects of curvature on entrainment*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 17, pagg. 481-498.

Shakouchi T., Kuzuhara S., (1982): "*Analysis of a jet attaching to an offset parallel plate. Rept. 2, Influence of an opposite wall*". Bulletin of the JSME, Vol. 25, N° 203, pagg.766-773.

Shankar P. N., Deshpande, M. D., (2000): "*Fluid mechanics in the driven cavity*". Annual Reviews of Fluid Mechanics, Vol. 32, pagg. 93-136.

Shi J., Tomasi C., (1994): "*Good features to track*". IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, USA.

Tsitouras C. D., Jiji L. M., (1986): "*Experimental study of surface pressure in three-dimensional turbulent jet/boundary interaction*". AIAA Journal, Vol. 24, N°7, pagg. 1201-1203.

Tsuchiya Y., Horikoshi C., (1986): "*On the spread of rectangular jets*". Experiments in Fluids, Vol. 4, pagg.197-204.

Tumbiolo A., (1995): "*Studio sperimentale del campo fluidodinamico a valle di un gradino*". Tesi di dottorato di ricerca in Ingegneria Idraulica, Università degli Studi di Roma La Sapienza.

Zaman K. B. M. Q., (1996): "*Axis switching and spreading of an asymmetric jet: the role of coherent structure dynamics*". Journal of Fluid Mechanics, Vol. 316, pagg. 1-27.