

Misure anemometriche con tecniche ottiche (dispersione di inquinanti in mare)

Dott. Francesco Getuli

*Tutor:
Ing. Francesco Lalli*

Abstract

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. L'interazione idrodinamica fra acque fluviali e acque marine si manifesta principalmente tramite l'effetto di espansione del flusso e l'effetto di galleggiamento dovuto alla differenza di densità tra acque dolci e acque salate. La corrente, abbandonando il canale, continua a fluire nella massa idrica del bacino per inerzia e si espande

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.

Innanzitutto sono stati effettuati esperimenti per l'analisi del caso semplice dell'interazione fra un getto e una parete laterale, noto come effetto Coanda, in condizioni barotropiche. Successivamente è stata eseguita una campagna di esperimenti su un modello in scala del porto. Si è voluto studiare il problema della stratificazione: sono stati eseguiti quindi esperimenti nelle due condizioni barotropica e baroclina. Tali esperimenti sono stati effettuati con tecnica di misura PIV (Particle Image Velocimetry), in un impianto sperimentale in condizioni di acque basse.

Indice

Indice.....	3
Introduzione.....	4
Capitolo 1.....	5
1 L'effetto Coanda.....	5
1.1 Interazione di un getto con una parete laterale.....	7
1.1.1 $\mathbf{b} = h = 0$	8
1.1.2 $h \neq 0, 0^\circ \leq \mathbf{b} \leq 30^\circ$	10
1.2 Applicazioni per l'effetto Coanda.....	20
1.2.1 Configurazione Notar.....	21
Capitolo 2.....	23
2 Apparato sperimentale.....	23
2.1 Struttura esterna.....	23
2.1.1 Vasca di misura.....	24
2.1.2 Impianto idraulico.....	27
2.1.3 Apparato di illuminazione.....	29
2.1.4 Telai.....	31
2.2 Tecniche di misura PIV.....	33
Capitolo 3.....	36
3 Analisi a Reynolds costante e Froude variabile.....	36
3.1 Misure PIV a Reynolds costante e Froude variabile.....	38
Capitolo 4.....	50
4 Analisi a Froude costante e Reynolds variabile.....	50
Capitolo 5.....	63
5 Configurazione completa.....	63
5.1 Esperimenti con diga foranea.....	64
5.2 Esperimenti senza diga foranea.....	71
5.3 Esperimenti in condizioni barocline.....	81
Conclusioni.....	83
Bibliografia.....	87

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.

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. L'interazione idrodinamica fra acque fluviali e acque marine si manifesta principalmente tramite l'effetto di espansione del flusso e l'effetto di galleggiamento dovuto alla differenza di densità tra acque dolci e acque salate. La corrente, abbandonando il canale, continua a fluire nella massa idrica del bacino per inerzia e si espande

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.

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, in condizioni barotropiche. Successivamente è stata eseguita una campagna di esperimenti su un modello in scala del porto. Si è voluto studiare il problema della stratificazione: sono stati eseguiti quindi esperimenti nelle due condizioni barotropica e baroclina. Tali esperimenti sono stati effettuati con tecnica di misura PIV (Particle Image Velocimetry).

Tali risultati sono stati confrontati con risultati numerici

Capitolo 1

1 L'Effetto Coanda

Nel 1910 l'aerodinamico e ingegnere rumeno Henrie Marie Coanda progettò e successivamente costruì il prototipo di un aereo mosso da un motore a getto: sfruttò cioè la spinta prodotta da un compressore azionato da un normale motore a scoppio da 50 cavalli (figura 1.1) per farlo alzare in volo.

Essendo il velivolo realizzato in massima parte in legno, il getto caldo proveniente dal motore danneggiava irreparabilmente la fusoliera perciò posizionò dei pannelli a ridosso dell'ugello, con lo scopo di deviare il getto e di salvaguardare quindi il velivolo stesso.

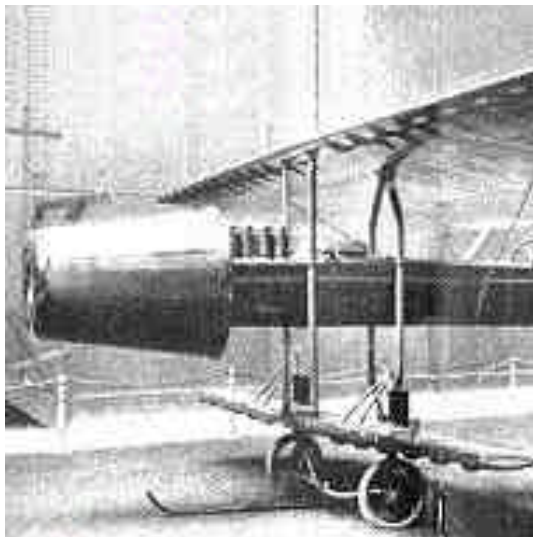


Figura 1.1: Il velivolo progettato da Coanda nel 1910.

L'effetto ottenuto fu molto diverso da quello desiderato, provocando danni ancor più gravi: il flusso infatti seguiva il profilo dei pannelli, restandovi aderente e, invece di allontanarsi dalla fusoliera, vi si avvicinava.

Coanda si interessò al fenomeno e lo studiò in modo approfondito, riuscendo a comprenderlo appieno solo 20 anni più tardi, nel 1930.

Si consideri un getto turbolento incompressibile, con una velocità media U_0 emesso da un ugello bidimensionale di dimensione w in un ambiente contenente lo stesso fluido del getto, che abbia al suo interno una parete laterale inclinata rispetto all'asse del getto di un certo angolo β , ad una distanza h dal centro del getto stesso.

La differenza di pressione tra il fluido appartenente al getto e quello appartenente all'ambiente causa la deflessione del getto stesso verso la parete, fino al congiungimento ad essa in un punto posto ad una certa distanza dall'uscita del getto (x_r), che è noto come punto di riattacco. Viene a crearsi dunque una zona di ricircolo, dovuta al fatto che parte del flusso viene deviato dal punto di riattacco in direzione opposta al getto. A valle del punto di riattacco il flusso evolve in forma di getto di parete (wall jet).

Perciò ogniqualvolta vi sia un getto che fuoriesce da un ugello in un ambiente nel quale sia presente una parete, si ha una deflessione del flusso verso quest'ultima e, se la parete laterale è abbastanza lunga, si verifica l'incidenza del getto in un punto e il successivo sviluppo come wall jet.

Come si vedrà successivamente, l'applicazione di tale fenomeno è utilizzata in molti settori, e, in particolare, in campo aeronautico. Alcuni esempi sono: il flusso su profili ad elevato angolo di incidenza, i sistemi di iniezione di combustibile e l'aumento di spinta per velivoli V\STOL.

Varie indagini sono state realizzate sull'effetto Coanda. Le variabili prese in considerazione sono state principalmente due: la distanza h della parete laterale dell'ugello e l'inclinazione β della parete laterale.

Nel caso di parete laterale non inclinata ($\beta=0$) è stato ricavato, in funzione del parametro h , l'andamento della pressione lungo la parete e la lunghezza di riattacco, calcolata come distanza dalla sezione di uscita al punto di massima pressione statica (Sawyer 1963).

In altri esperimenti più recenti il punto di riattacco viene individuato come il punto vicino alla parete in cui la velocità, calcolata con misure hot-wire, assume il minimo valore in valore assoluto. Da questi studi è stata ricavata una dipendenza lineare della lunghezza di riattacco dalla distanza h , successivamente confermata da esperienze più recenti.

1.1 Interazione di un getto con una parete laterale

Come detto nel paragrafo precedente, un getto è formato da un fluido che esce da un ugello in un ambiente fluido. A causa della differenza di velocità si crea un sottile strato, chiamato shear layer, altamente instabile, che porta alla nascita di strutture vorticosi di grande scala, responsabili del mescolamento del getto con l'ambiente circostante (figura 1.2 Alvi 2003).

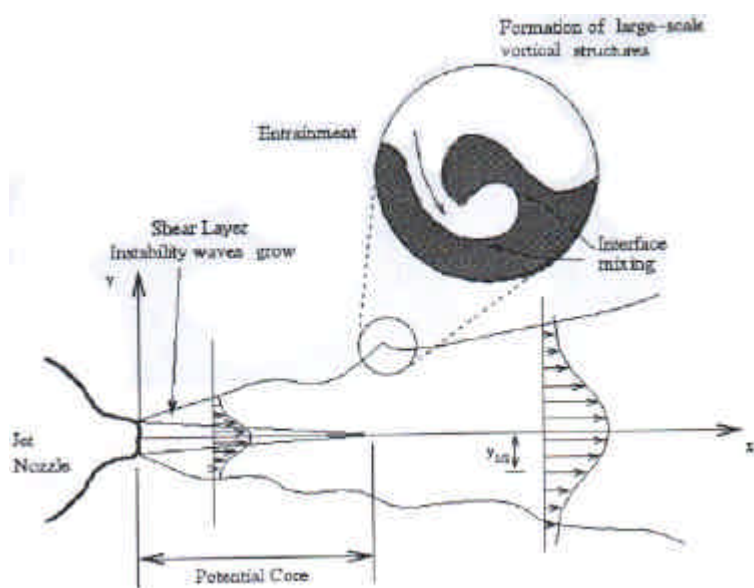


Figura 1.2: Nella struttura del getto è messa in evidenza la formazione delle strutture vorticosi (Alvi 2003).

L'interazione dei vortici porta poi allo svilupparsi di fluttuazioni di velocità nelle piccole scale, che accelerano il mescolamento stesso a livello molecolare.

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 generica distanza h . Una particolare influenza sulle caratteristiche del campo fluidodinamico si riscontra anche variando l'angolo di inclinazione β di tale parete rispetto alla direzione dell'asse di simmetria del getto.

1.1.1 $\beta=h=0$

Nel caso in cui la parete sia adiacente all'uscita del getto e disposta parallelamente alla direzione del getto stesso si ha la configurazione wall-jet.

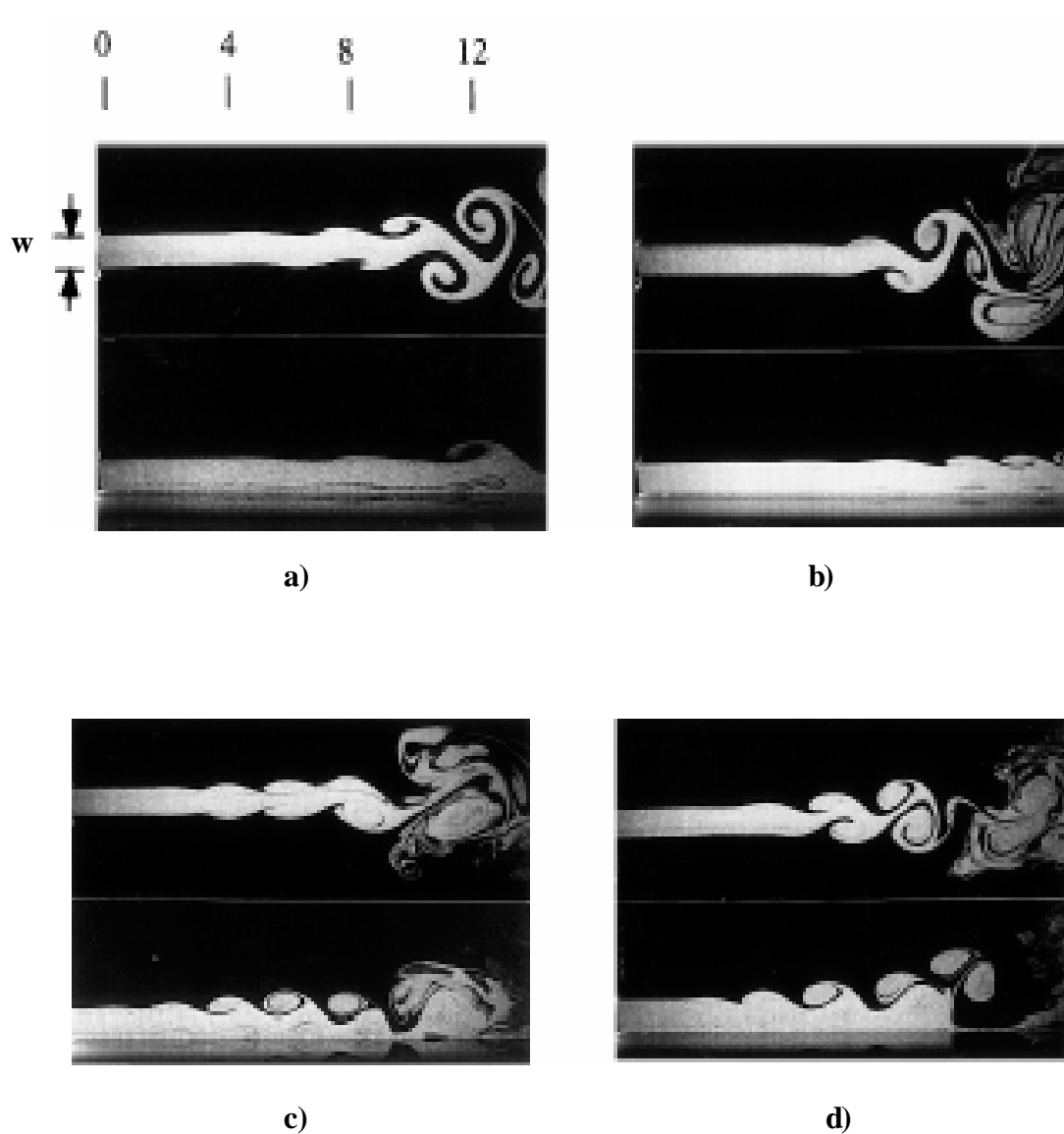


Figura 1.3: Confronto tra getto libero, rappresentato nella parte superiore delle figure, ed il wall-jet:

a) $Re=330$; b) $Re=950$; c) $Re=1450$; d) $Re=1900$.

Gogineni et al. 1997

Come si vede in figura 1.3, la presenza della parete modifica notevolmente l'andamento del flusso, variando il tipo di instabilità ottenuta.

A ridosso della parete si ha l'interazione tra la corrente esterna e lo strato limite sviluppatosi sulla parete stessa: il flusso inizialmente si distacca ma poi, a causa della suddetta interazione, vengono a formarsi delle zone di ricircolo, grazie alle quali si ha il riattacco del getto (figura 1.4); in tali zone si formano dei vortici controrotanti rispetto a quelli della zona esterna.

Uno studio ha messo in evidenza come la distanza dalla sezione di ingresso in cui cominciano a formarsi queste strutture dipenda fortemente dalle condizioni iniziali del getto.

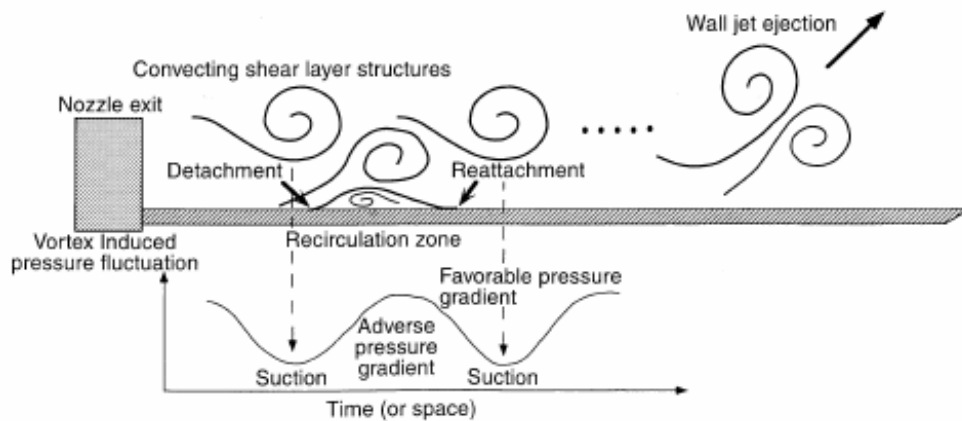


Figura 1.4: Interazione tra lo strato limite e la corrente esterna in un wall jet: viene riportato anche l'andamento della pressione (Gogineni et al 1997)

Da un certo punto in poi è possibile distinguere due regioni nel wall-jet: la prima è la regione più esterna (outer shear layer), soggetta alle instabilità di Kelvin-Helmholtz e caratterizzata dalla formazione di vortici a larga scala; la seconda è invece nella zona adiacente la parete (inner layer), che si comporta come uno strato limite viscoso. L'interazione tra queste due zone porta all'eventuale transizione tra regime laminare e turbolento.

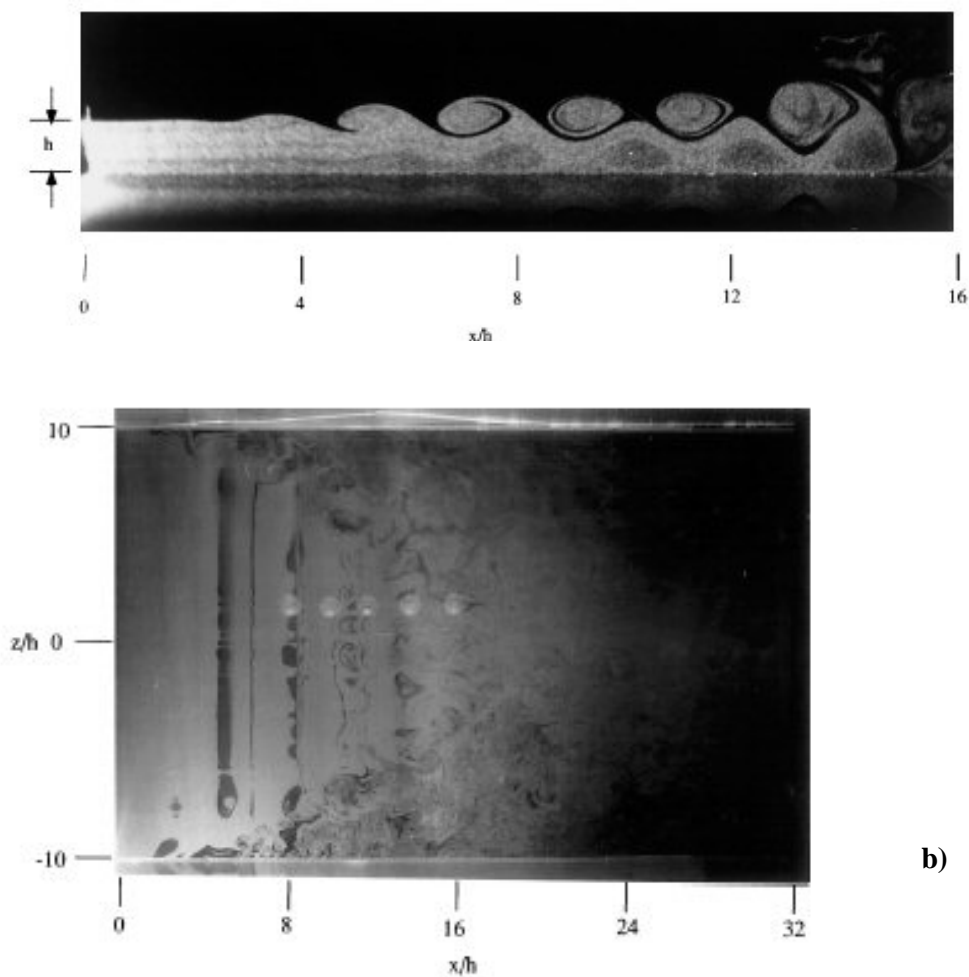


Figura 1.5: Andamento di un wall jet. a) Vista laterale (piano x-y) b) Vista in pianta (piano x-z). (Gogineni et al 1997)

1.1.2 $h \neq 0$, $0 \leq \beta \leq 30^\circ$

Si prenda ora in esame il caso di una parete laterale, posta ad una distanza h , inclinata di un certo angolo β , eventualmente nullo. In figura 1.6 è riportato lo sviluppo del getto per un generico angolo β .

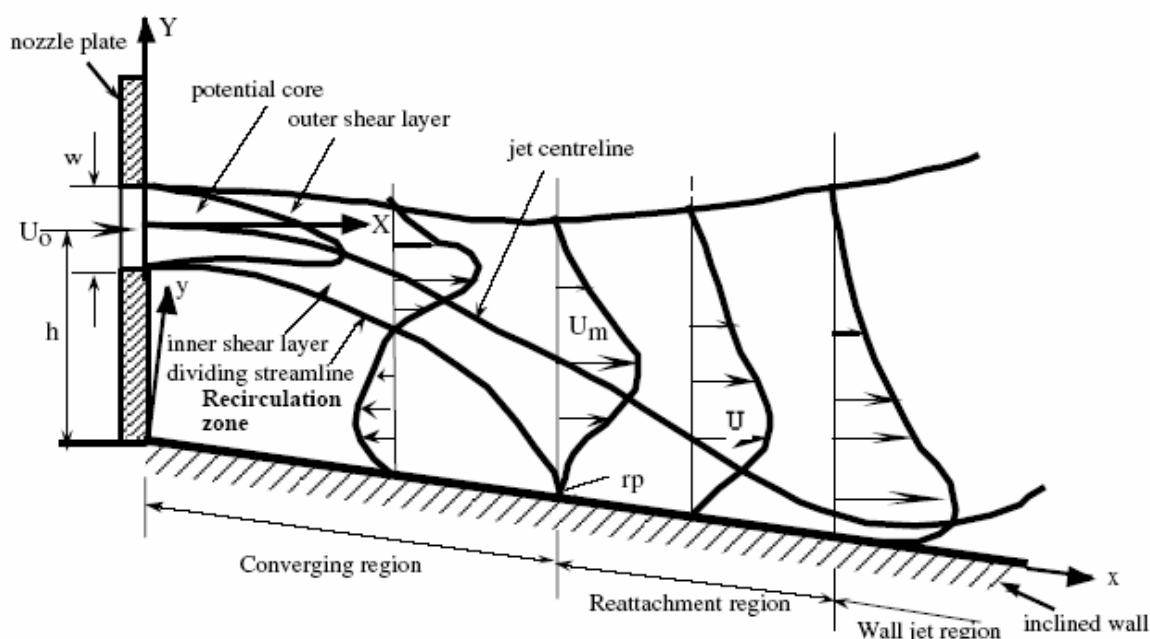


Figura 1.6: Schematizzazione del campo fluidodinamico nell'offset jet con parete inclinata (Nasr et al 1999)

E' possibile individuare tre zone caratteristiche:

- Una zona di ricircolo, confinata tra l'uscita del getto e la lunghezza di riattacco x_r , definita come la distanza tra l'uscita del getto e il punto in cui il getto stesso incide sulla parete.
- Una regione di riattacco. Il punto di riattacco oscilla infatti intorno ad una posizione media, a causa delle instabilità dovute alla non stazionarietà dei vortici presenti nel campo.
- Una regione a valle del punto di riattacco, presente se la parete è sufficientemente lunga, in cui il flusso si comporta come un wall-jet.

La presenza della zona di ricircolo è la caratteristica principale di questo tipo di configurazione. Per spiegarne la formazione bisogna riprendere alcune considerazioni riguardanti il getto libero.

Nel getto libero nascono delle strutture vorticosi responsabili del mescolamento con il fluido circostante che, in assenza di parete, diffondono nell'ambiente fluido. Poiché il

posizionamento della parete laterale limita l'espansione delle strutture vorticosi, queste vengono notevolmente deformate ed accelerate. Si origina così una zona in cui la velocità del flusso risulta maggiore rispetto a quella posseduta dal fluido libero di espandersi, quindi la pressione locale sarà inferiore a quella sul lato libero della parete: tale differenza di velocità comporta un gradiente di pressione nella direzione ortogonale alla parete, che porta alla deviazione del getto verso la parete stessa, come è stato evidenziato da diversi studi (Newmann 1961, Sawyer 1967 e, più recentemente Nozaki 1987).

Successivamente 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 direzione opposta, cioè verso la sezione di ingresso, generando così la zona di ricircolazione, che risulta confinata tra parete orizzontale, parete verticale e getto stesso.

In figura 1.7 sono riportati gli andamenti della velocità vettoriale per varie inclinazioni β della parete. In tali figure è evidenziato il punto di riattacco x_r , dove x è l'ascissa di un sistema di riferimento coerente con l'orientamento della parete.

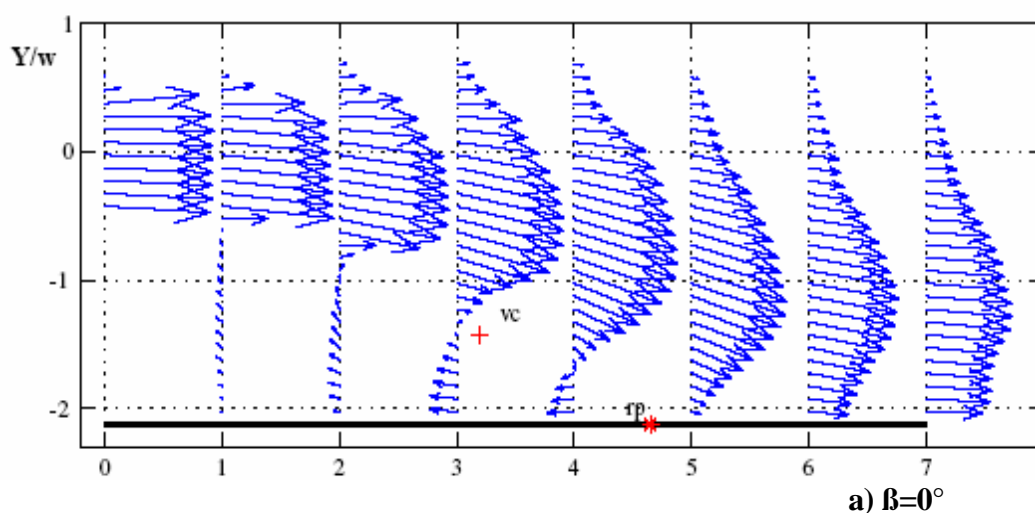
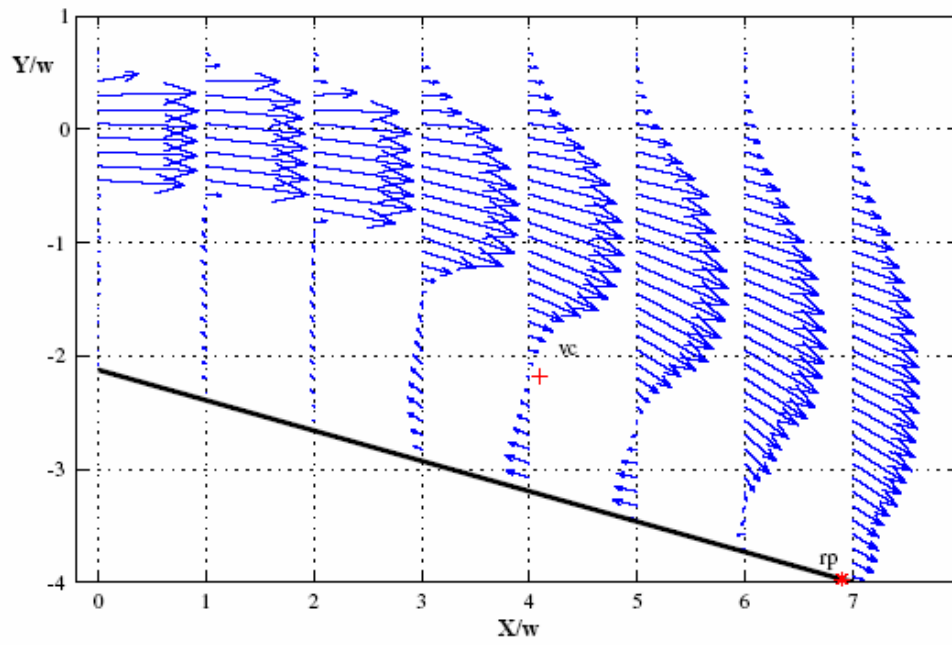
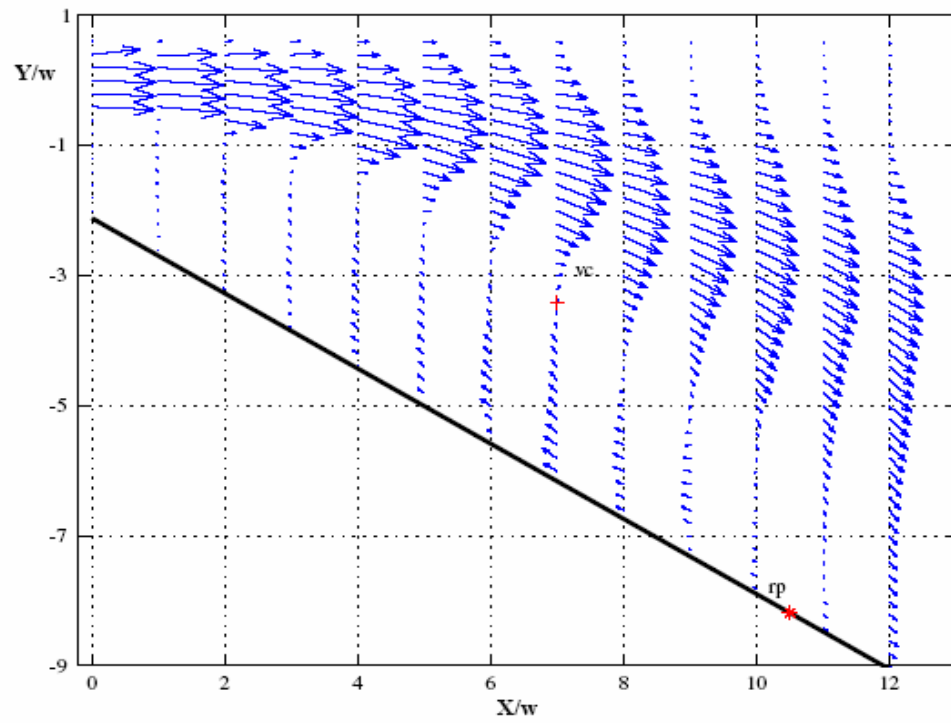


Figura 1.7: Andamento delle velocità tra l'uscita del getto ed x_r , per vari angoli di inclinazione della parete (Nasr et al 2001)



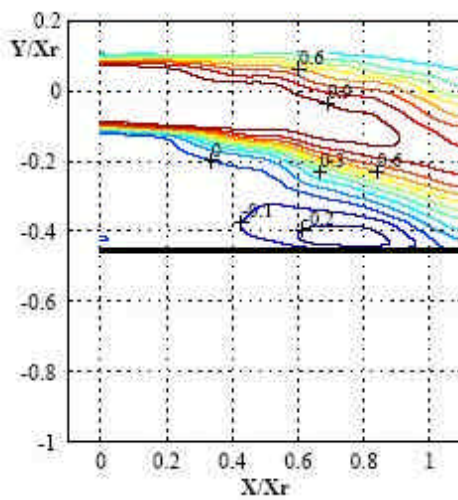
b) $\beta=15^\circ$



c) $\beta=30^\circ$

L'ascissa è la stessa per tutti i casi ma, se si considera il sistema di riferimento solidale on la parete si ottengono i seguenti valori: $x_r=4.65$ per $\beta=0^\circ$, $x_r=7.04$ per $\beta=15^\circ$, $x_r=12.12$ per $\beta=30^\circ$. Si ha dunque un aumento del 51% e del 160% rispettivamente.

L'influenza dell'inclinazione della parete è stata studiata da Nasr, in un lavoro del 2001, dal quale sono state prese le precedenti immagini. I campi di velocità ottenuti dagli esperimenti sono riportati nelle figure 1.8.



La zona di ricircolo è visibile nell'andamento delle componenti di velocità orizzontale e verticale, adimensionate rispetto ad u_0 (figure 1.9). Dai grafici si vede che, nel range considerato tanto più è inclinata la parete laterale tanto più è estesa la zona di ricircolo. Si nota anche che la velocità verticale adimensionale V/U_0 è positiva solamente nella zona del ricircolo, confermando così l'attrazione che la parete esercita sul getto.

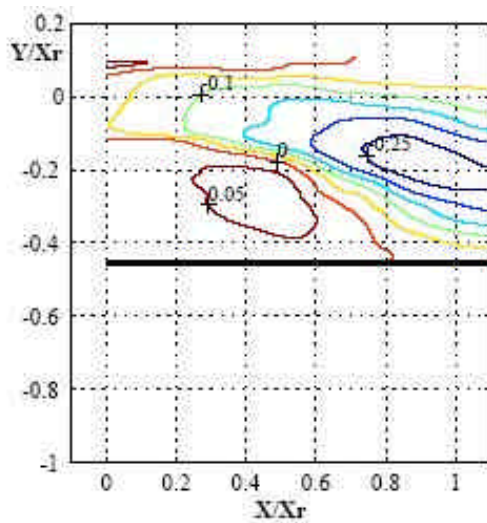
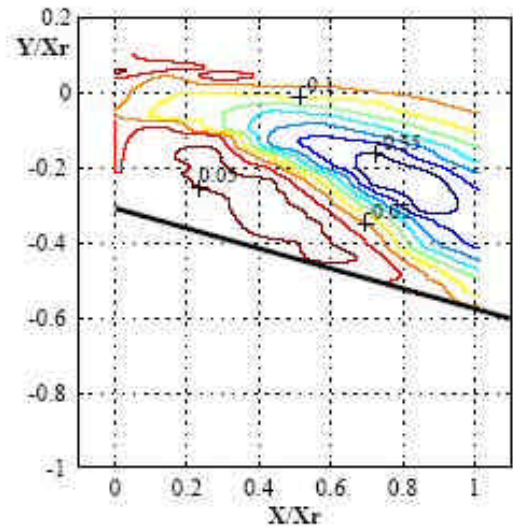
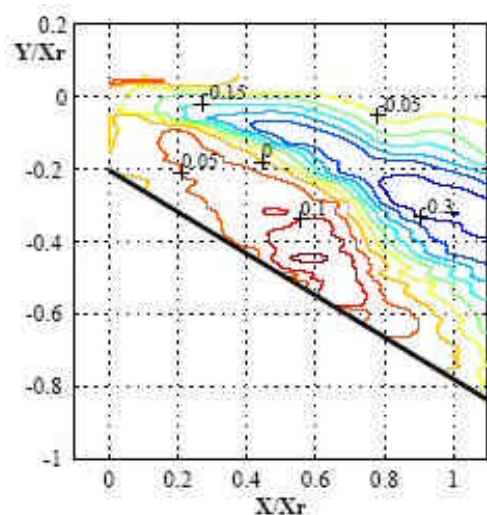
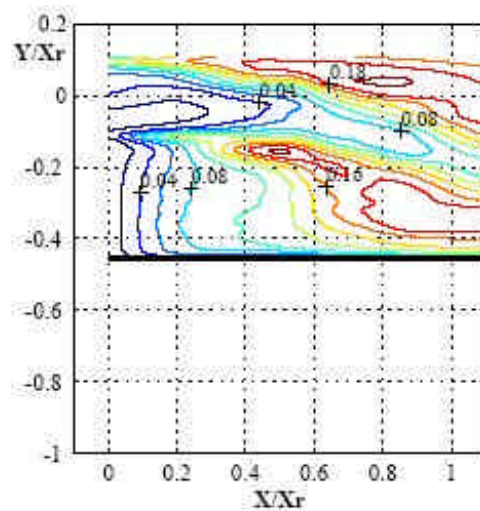
a) $\beta=0^\circ$ b) $\beta=15^\circ$ c) $\beta=30^\circ$

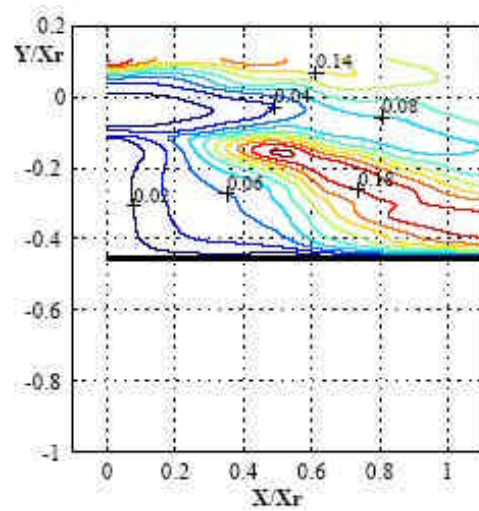
Figura 1.9: Andamento del campo di velocità longitudinale v al variare dell'angolo di inclinazione β della parete. (Nasr et al 2001)

La condizione che deve essere verificata affinché si crei la zona di ricircolo, è l'impedimento di flusso laterale ortogonalmente alla parete. Uno studio di Tsitouras (1986) ha messo in evidenza come una parete laterale forata, garantendo il bilancio di pressione nella zona tra getto e parete ed ambiente esterno, impedisce la nascita della zona di ricircolo e quindi la deviazione del getto stesso.

La presenza della parete influenza anche il comportamento delle variabili turbolente del getto, come evidenziato nelle figure seguenti (figura 1.10 e figura 1.11).



a) $\beta=0^\circ$



a) $\beta=0^\circ$

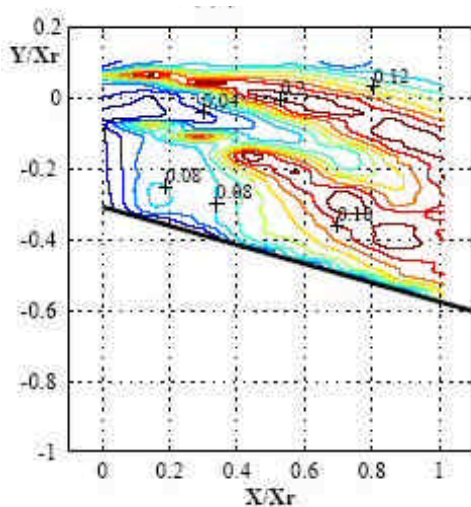
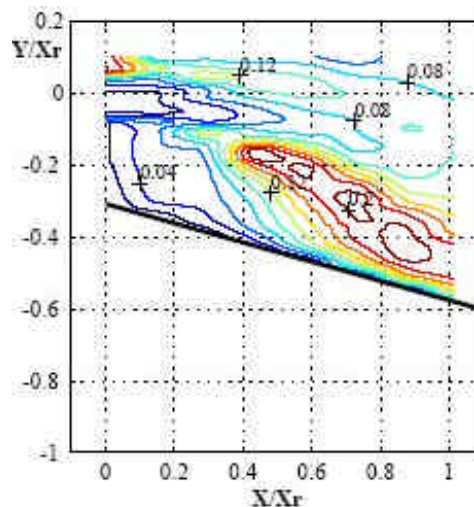
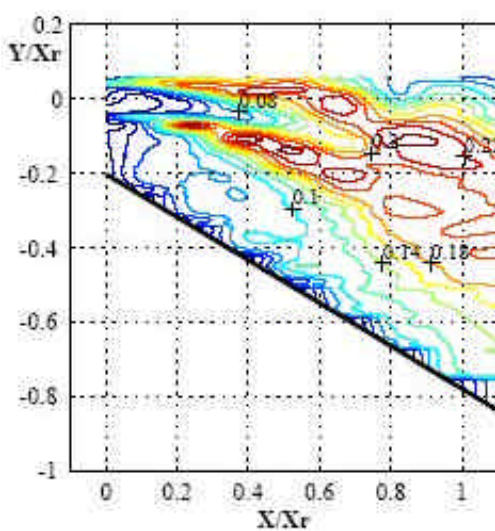
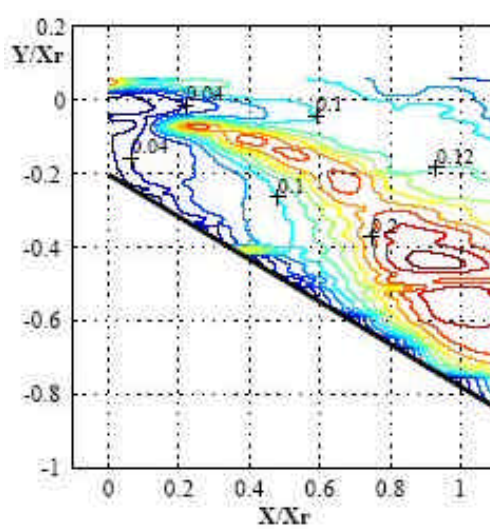
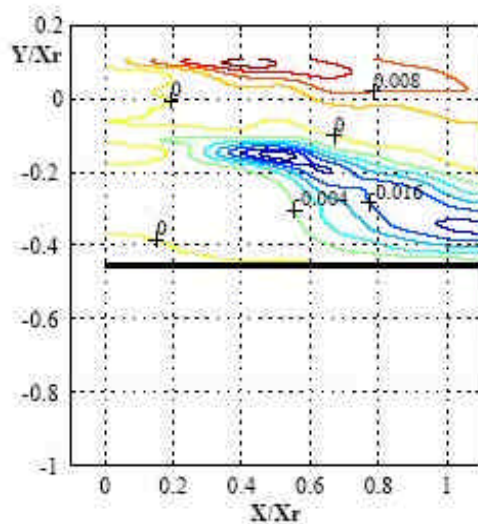
b) $\beta = 15^\circ$ b) $\beta = 15^\circ$ c) $\beta = 30^\circ$ c) $\beta = 30^\circ$

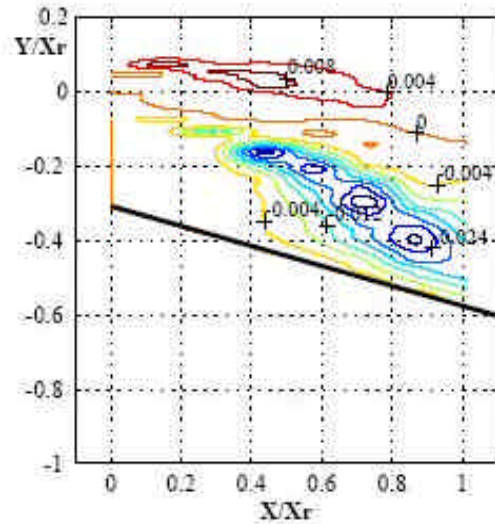
Figura 1.10: Andamento delle fluttuazioni della velocità assiale u' al variare dell'inclinazione β della parete. (Nasr et al 2001)

Figura 1.11: Andamento delle fluttuazioni della velocità trasversale v' al variare dell'inclinazione β della parete. (Nasr et al 2001)

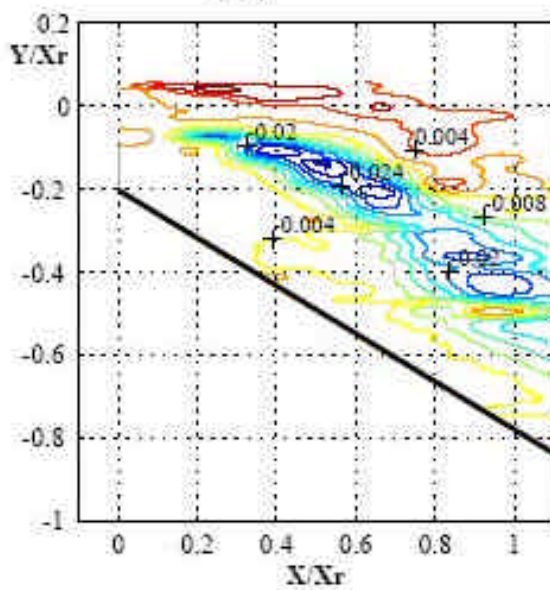
Si riportano infine riportati gli andamenti degli sforzi di Reynolds $\overline{u'v'}$ adimensionalizzati rispetto a u_0^2 (figura 1.12).



a) $\beta = 0^\circ$



b) $\beta = 15^\circ$



c) $\beta = 30^\circ$

Figura 1.12: Andamento del Reynold's stress al variare dell'angolo di inclinazione β della parete. (Nasr et al 2001)

I valori estremi degli sforzi di Reynolds, sia positivi che negativi, individuano l'interfaccia tra la zona esterna ed il getto e tra la zona di ricircolo ed il getto. L'elevato valore degli sforzi di Reynolds in prossimità della linea di divisione tra zona di ricircolo e getto, indica un elevato trasferimento di quantità di moto dovuto al getto che incide sulla parete.

Sono stati realizzati anche vari studi su come varia la lunghezza di riattacco x_r al variare dell'angolo di inclinazione della parete β . Come si vede dal grafico seguente (figura 1.13), che confronta due lavori realizzati a distanza di quasi 40 anni, la dipendenza è non lineare. Per comprendere facilmente il tipo di dipendenza dall'inclinazione è stata tenuta fissa la distanza h dalla parete e in particolare si ha $h=0$.

Come ci si aspetta, dopo un certo valore dell'angolo β , una sua piccola variazione comporta lunghezze di riattacco molto più elevate. Ciò è dovuto al fatto che la parete è così inclinata che il flusso, per poterla raggiungere, deve curvare di molti gradi e, per fare ciò, ha bisogno di molto spazio.

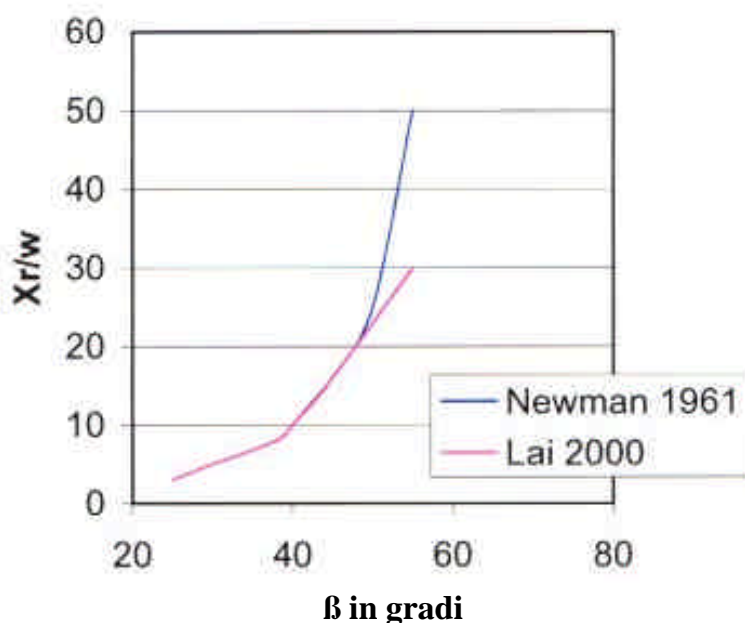


Figura 1.13: Confronto dell'andamento della lunghezza di riattacco x_r al variare di β , con $h=0$

Un'ultima analisi che si può fare, è quella riguardante il decadimento della velocità massima del getto al variare di β , nel sistema di riferimento solidale con la parete. Il risultato, riportato in figura 1.14, è che la velocità del getto non inclinato è meno attenuata rispetto al caso di parete inclinata di $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$, quando l'ascissa venga adimensionata con la lunghezza di riattacco x_r .

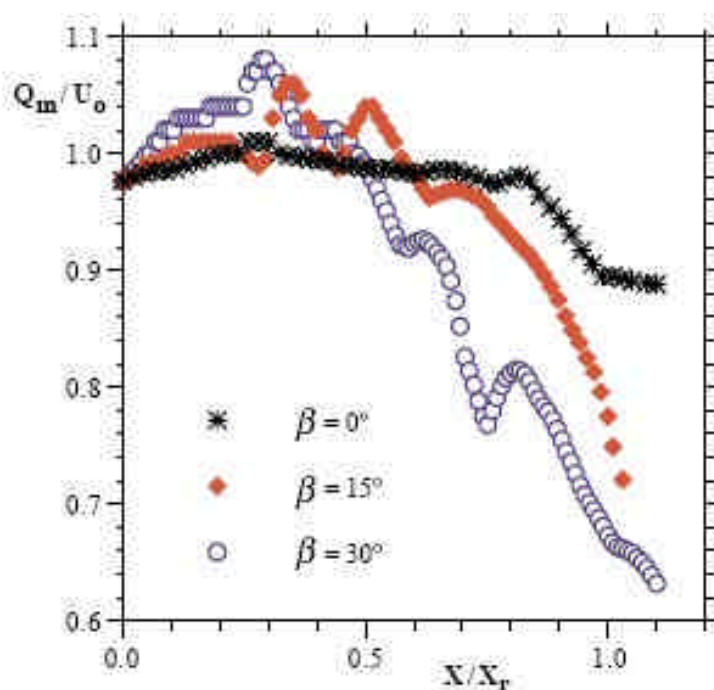


Figura 1.14: velocità al centro del getto per vari angoli β . Con Q_m è indicata la velocità massima. (Nasr et al 1999)

1.2 Applicazioni per l'effetto Coanda

Le applicazioni dell'effetto Coanda sono molteplici, e variano dal campo aeronautico e automobilistico a quello per i combustibili.

Qui ne viene presentata una tra le più importanti

1.2.1 Configurazione Notar

L'effetto Coanda viene anche utilizzato in una particolare configurazione di elicotteri, la cui particolarità è quella di funzionare senza rotore di coda, il quale è sostituito da un piano orizzontale. Tale configurazione, denominata Notar (no tail rotor) ha il vantaggio di essere molto più silenziosa di quella classica, e di ridurre notevolmente le vibrazioni. Questo è dovuto all'eliminazione dell'interazione tra i vortici generati dal rotore di coda e da quello principale.

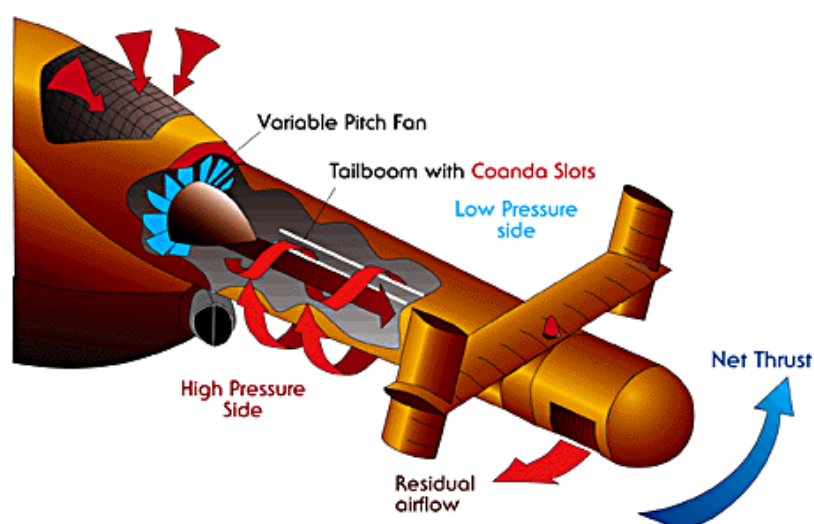


Figura 1.15: Configurazione Notar

Il momento generato dal rotore principale viene bilanciato da una forza laterale generata dall'effetto Coanda. Sotto al rotore è posizionata una presa dinamica, la quale convoglia parte dell'aria proveniente dal rotore stesso verso la coda del velivolo. Parte di questo

flusso viene fatta uscire lateralmente alla coda dell'elicottero: a causa dell'effetto Coanda questo getto ne segue il profilo. In questo modo viene creata un'asimmetria nel flusso proveniente dal rotore principale che investe la coda dell'elicottero con conseguente nascita di una forza laterale che bilancia parte del momento torcente dovuto al rotore principale. La parte restante viene invece diretta sul piano di coda, bilanciando la parte restante del momento.

E' stato dimostrato (Lund 1986) come in tale configurazione si abbia un aumento della portata rispetto ad un getto libero di espandersi. L'esperimento è stato effettuato per un getto bidimensionale, stazionario, incompressibile e completamente turbolento.

Se si indica con m la portata (per unità di lunghezza) in presenza di parete laterale e m_0 la portata nel caso di getto libero si ha il seguente andamento per il rapporto m/m_0 . Sull'asse delle ascisse è riportata la distanza h dalla parete, adimensionata rispetto a w , che è la larghezza della sezione di ingresso.

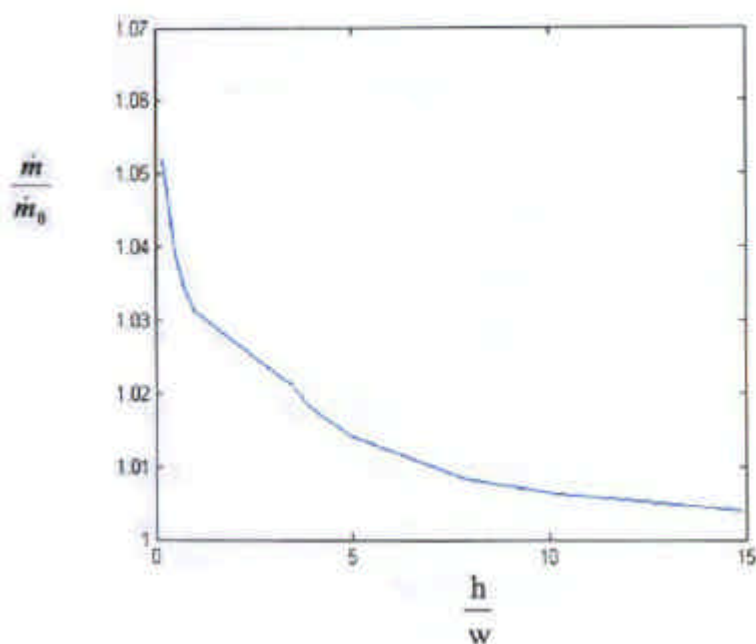


Figura 1.16: Andamento della portata rispetto alla distanza h/w

L'aumento di portata rispetto al caso di getto libero di espandersi è particolarmente importante per rapporti h/w bassi, come riportato in figura 1.16.

Capitolo 2

2 Apparato sperimentale

Analizziamo in questo capitolo quali sono gli apparati di misurazione che sono stati utilizzati durante questo studio.

Il laboratorio utilizzato è quello di idraulica, presso l' Agenzia Protezione Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT), la cui sede è a Castel Romano, in cui si è provveduto alla messa a punto di un apparato sperimentale composto da:

- Struttura esterna
- Vasca di misura
- Impianto idraulico
- Apparato di illuminazione e ripresa.

Vediamoli nel dettaglio.

2.1 *Struttura esterna*

Per garantire il sostentamento dell'apparato sperimentale è stata realizzata una struttura esterna. Per fare ciò sono stati utilizzati dei tubi innocenti, collegati fra loro mediante giunti a due cavelle, come quelli utilizzati in edilizia. Mediante questa struttura è stato possibile fissare l'apparato di illuminazione, quello di ripresa e la canalina di scolo. I tubi innocenti sono stati scelti per la facile reperibilità, la facilità di montaggio e la rigidità che danno a tutto l'impianto. In più è possibile cambiarne la posizione in poco tempo.

2.1.1 Vasca di misura

Le misure sono state effettuate utilizzando una vasca rettangolare lunga 1,5 m e larga 2 m. Il fondo, realizzato in alluminio, ha spessore 6 mm; tale spessore è sufficiente a garantirne la rigidità. Le pareti laterali della vasca, realizzate in plexiglass trasparente, hanno un'altezza di 15 cm e spessore di 1 cm, e verranno utilizzate per future misure lungo la sezione verticale del getto, realizzate con tecnica PIV, mediante l'ausilio di un laser. La vasca è a superficie libera e le dimensioni, adimensionate con la sezione di uscita del getto sono 40x30.

La configurazione attualmente montata su tale vasca è quella del porto di Pescara, in scala 1:1000 sul piano orizzontale 1:100 lungo la direzione verticale. Le strutture portuali sono realizzate in cemento; il molo è stato fissato alla vasca, mentre la diga foranea è rimovibile, consentendo di effettuare esperimenti anche in sua assenza. In figura fig 2.1a è riportata la configurazione completa ed in blu è indicata la diga foranea asportabile

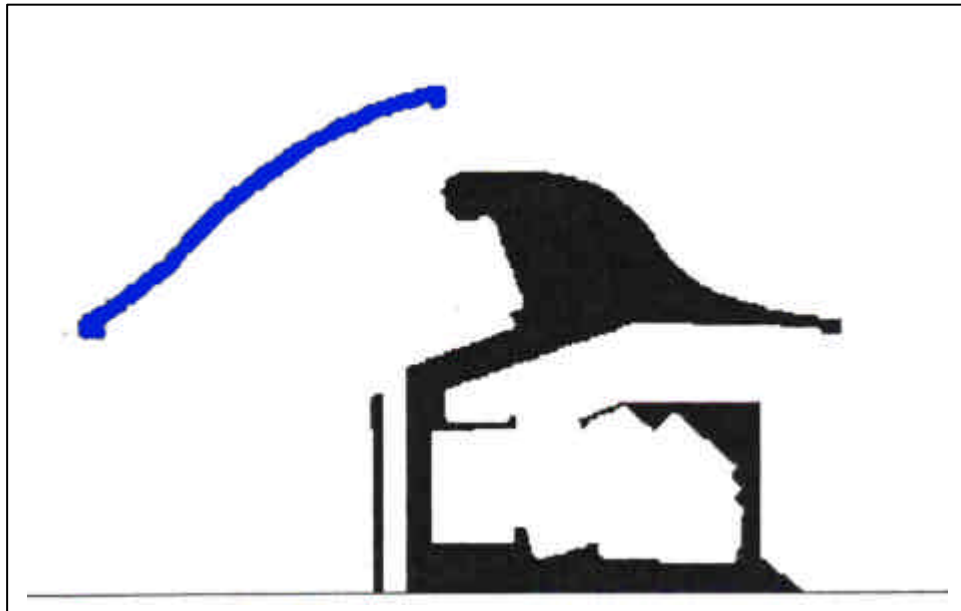


Figura 2.1a: Configurazione completa. In blu è indicata la diga asportabile

La configurazione con parete laterale, che è stata utilizzata per effettuare misure al variare del numero di Reynolds e del numero di Froude viene invece riportata in figura 2.2b. In questo tipo di esperimenti la distanza h dalla sezione di uscita del getto è stata mantenuta fissa e pari ad $h=20$ cm. Poiché la sezione w è in questo caso $w=5$ cm, il rapporto h/w resta anch'esso fisso, e pari a $h/w=4$. Questa scelta è stata effettuata in base ad esperienze realizzate precedentemente nello stesso laboratorio: questo valore garantisce la massimizzazione dell'effetto Coanda, e, poiché la lunghezza di riattacco è piuttosto corta, consente di inquadrare con la telecamera una zona non troppo estesa, consentendo analisi PIV accurate.

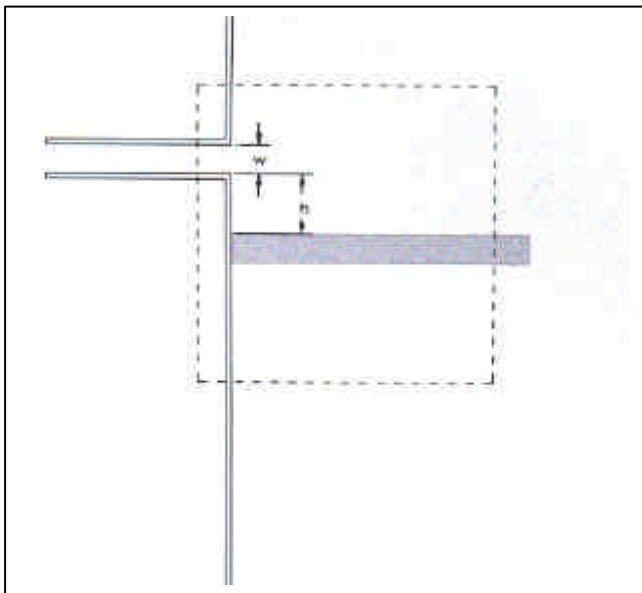


Figura 2.1b: Configurazione semplice. La zona tratteggiata è quella inquadrata dalla telecamera

Al fine di regolare l'altezza dell'acqua all'interno della vasca, è stato realizzato uno stramazzo a dente di sega, composto da una parete fissa e da una parete mobile, sostenuta da una 'L' in alluminio all'interno della vasca.

Il materiale utilizzato per questa struttura è plexiglass per la parete fissa e pvc per la parete mobile (figura 2.2).

Per regolare l'altezza dell'acqua nella vasca bisogna far scorrere la parete mobile su quella fissa, fino a raggiungere il valore desiderato. Tale configurazione garantisce il deflusso uniforme verso il serbatoio, che viene attuato mediante una canalina posta in pendenza, ed appoggiata su due tubi innocenti: l'acqua che defluisce dalla vasca attraverso lo stramazzo

finisce nella canalina, ed è da questa trasportata nuovamente nel serbatoio, realizzando in questo modo un circuito chiuso.

Per la campagna di esperimenti effettuato sulla configurazione completa del porto si è provveduto a regolare l'altezza della superficie libera dal fondo della vasca a 4 cm, come si vedrà successivamente.

Il canale di ingresso alla vasca, che collega i serbatoi alla vasca stessa, è composto di due parti: una in pressione ed una a superficie libera. Questo canale è stato realizzato al fine di avere un ingresso alla vasca il più regolare possibile.

La camera di calma è un cubo di plexiglass con dimensione interna di 20 cm per lato, ed ha uno spessore di 1 cm. Il collegamento con l'impianto idraulico avviene tramite un tubo di 2,5 cm di diametro, innestato in un foro sulla parte inferiore del cubo.

Affinché il flusso uscente dalla camera di calma sia uniforme, è stato inserito un honey-comb dello spessore di 3 cm, con maglie quadrate di 1 cm per lato.

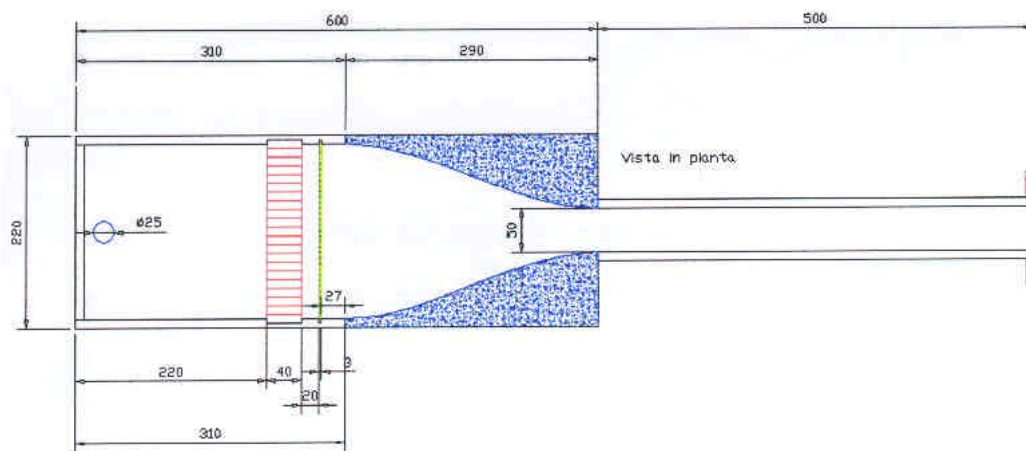


Figura 2.3: Vista in pianta del canale d'ingresso

Uscito dalla camera di calma ed al honey-comb, il flusso incontra un convergente, il cui rapporto di contrazione delle aree è 4, e la cui lunghezza, pari a 1,45 volte la lunghezza della camera di calma, è stata scelta per impedire la separazione nel successivo condotto e ridurre lo spessore dello strato limite. Le pareti sono sagomate a forma di "S", sempre per garantire il

flusso il più allineato possibile con le pareti del condotto. L'angolo di inclinazione media delle pareti del convergente è pari a circa 15° .

Il flusso viene ora fatto passare attraverso un condotto alto 10 cm, che collega il convergente con la vasca di misura. La lunghezza di tale condotto è pari a circa 12 volte la larghezza del canale. La misura di questa lunghezza varia nel caso degli esperimenti in configurazione completa del porto: in tal caso il condotto si estende, in maniera asimmetrica, anche all'interno della vasca di misura: la parete del canale di destra è più lunga dell' 11% rispetto a quella di sinistra.

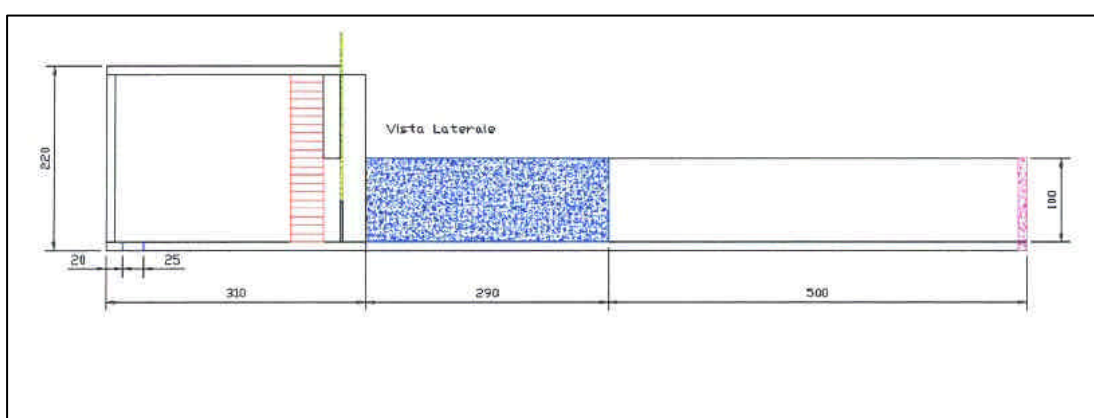


Figura 2.4: Vista laterale del canale di ingresso

2.1.2 Impianto idraulico

L'impianto idraulico, riportato in figura 2.5, è formato da due serbatoi, indicati con S1 ed S2, di diversa capacità (500 l e 200 l) che possono essere utilizzati indipendentemente per alimentare la pompa P, mediante due valvole a saracinesca, indicate con A. L'utilizzo alternato dei due serbatoi è stato utilizzato per le prove in presenza di stratificazione: dapprima è stata riempita la vasca con acqua salata, ottenuta mescolando del sale e dell'acqua

nel serbatoio S1. Nel nostro caso è stata scelta una densità pari a 1020 kg/m^3 , controllata con l'ausilio di un salinometro.

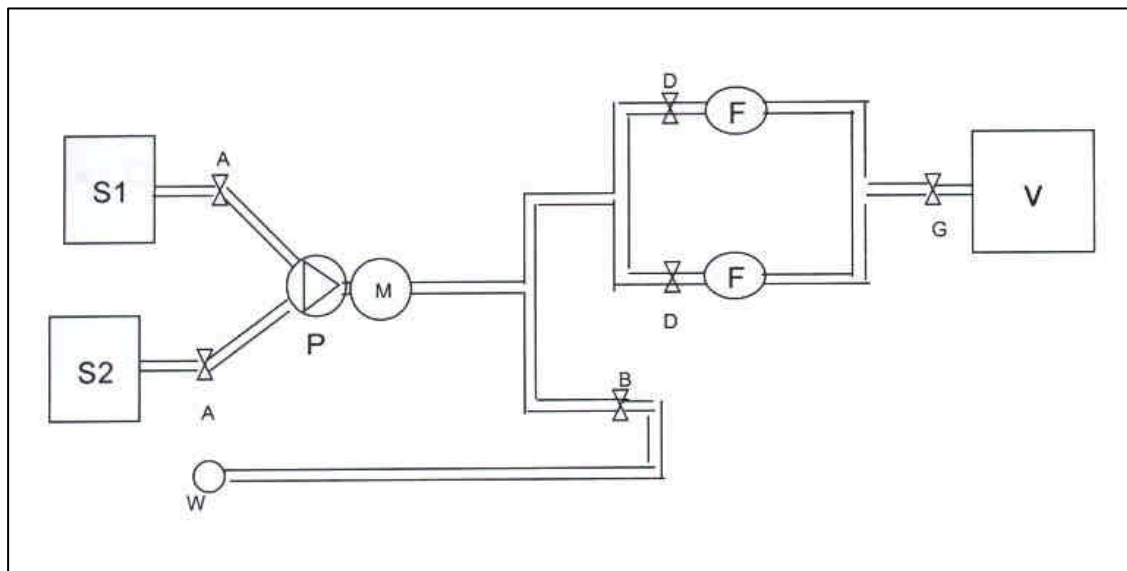


Figura 2.5: schema dell'impianto idraulico

Il serbatoio S2 è stato invece riempito con acqua dolce. Istantaneamente è stata chiusa la valvola del serbatoio S1 ed aperta quella di S2. Fatto passare un tempo caratteristico dipendente dalla portata, durante il quale l'acqua immessa diventa completamente dolce, si effettua la misura PIV. Riusciamo così a studiare il caso baroclinico.

Le caratteristiche della pompa P utilizzata sono riportate in tabella.

Hmax (m)	W (W)	HP (HP)	Qmax (l/s)
28	750	1	2

La portata massima non si è potuta sfruttare, principalmente per problemi legati all'apparato di ripresa: i 25 frame al secondo non erano più sufficienti.

Sulla linea di mandata della pompa P è montato un manometro M , su cui è possibile leggere il valore della pressione all'interno dell'impianto.

Per evitare problemi di sovrappressione è stato predisposto un circuito di by-pass, che, tramite l'apertura della valvola a saracinesca B consente di convogliare parte del flusso nel canale di scarico W. In tal modo si limita la portata e si diminuisce notevolmente la pressione. Non è stato sempre possibile utilizzare questo tipo di operazione: infatti l'apertura della valvola a saracinesca creava delle oscillazioni di portata rilevanti per le basse portate.

Il flusso viene poi fatto passare attraverso un filtro R, così da evitare che il tracciante già utilizzato venisse rimesso in circolo. In più tale filtro contribuisce ad aumentare la pressione dell'impianto, evitando perciò problemi di cavitazione alla pompa quando le perdite di carico del circuito costituiscano un carico insufficiente per la pompa stessa (grandi portate).

Prima di arrivare alla vasca V, il flusso viene fatto passare attraverso uno dei due flussimetri F, selezionato dall'apertura alternata delle valvole a saracinesca D.

Questi dispositivi di misura si basano sulla legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica. Secondo tale legge un conduttore in moto in un campo magnetico induce una tensione; nel nostro caso il conduttore in moto è l'acqua ed il campo magnetico è generato mediante una corrente continua bipolare.

La tensione indotta è proporzionale alla velocità del flusso e da questa si calcola la portata in rapporto alla sezione del tubo. Sul flussimetro viene riportata la portata in litri al secondo.

2.1.3 Apparato di illuminazione e ripresa

Cominciamo con l'analizzare l'apparato di illuminazione. Questo è costituito da 6 lampade indipendenti ed orientabili, fissate alla struttura per mezzo di viti a bloccaggio. La potenza massima di ogni lampada è 120 Watt, e può essere regolata con appositi potenziometri, uno per ogni lampada. La regolazione è necessaria in quanto, se utilizzate tutte alla massima potenza, insorgono sulla superficie libera riflessi ed ombre che disturbano notevolmente l'analisi PIV effettuata in seguito.

A causa della loro vicinanza con l'acqua e l'esercizio in zona ad elevata umidità, le lampade sono certificate IP67.

Per quanto riguarda l'apparato di ripresa, questo è costituito da una telecamera, che deve essere posizionata in modo da inquadrare dall'alto la superficie libera. Il banco ottico è stato dunque fissato a due tubi innocenti, posizionati ad L fra loro, e fissato tramite una vite ad un supporto realizzato in legno. Il fissaggio dei tubi innocenti della telecamera alla struttura esterna mediante giunti ha garantito il posizionamento della telecamera stessa e la possibilità di spostare la ripresa verticalmente.

La telecamera utilizzata è una telecamera Canon digitale, la cui risoluzione è 720×576 pixel, e con una frequenza di acquisizione di 25 frame al secondo.

Il filmato ottenuto su nastro viene successivamente trasferito su computer tramite canale firewire, come mostrato in figura 2.6. Da qui vengono estrapolati 1000 frame, corrispondenti a 40 secondi di ripresa, che verranno successivamente analizzati tramite un apposito programma PIV.

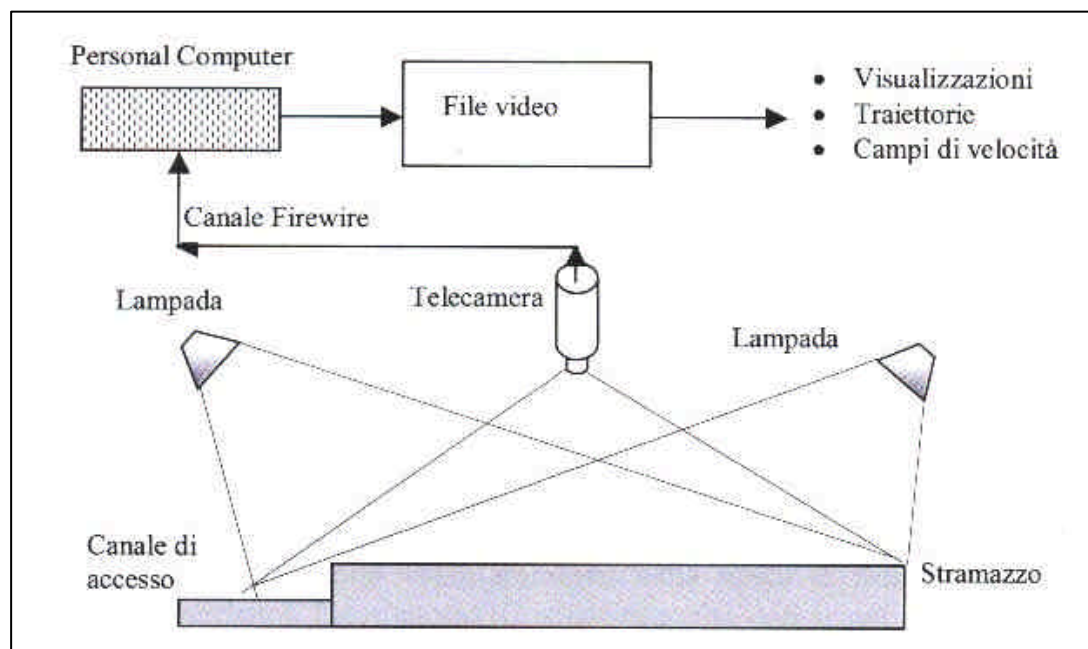


Figura 2.6: Schema di acquisizione

2.1.4 Telai

Nel corso della campagna di esperimenti ci si è chiesto quale fosse l'effetto di lavorare su una vasca chiusa: il fenomeno studiato potrebbe infatti risentire notevolmente dei vortici che vengono a crearsi a causa del ricircolo lungo i bordi laterali della vasca stessa. L'acqua giunta allo stramazzo non esce completamente, ma in parte torna indietro, costeggiando lo stramazzo stesso in entrambe le direzioni, creando i suddetti vortici (figura 2.7).

Il fenomeno studiato avrebbe infatti potuto essere falsato da una eventuale velocità verticale, che avrebbe, nel peggiore dei casi, aumentato in maniera notevole la deviazione del getto verso la parete.

Al fine di limitare questo fatto, e di verificare in quale modo venisse modificato il campo, sono stati progettati e fatti realizzare sei telai, ai quali è stata applicata successivamente una rete metallica a maglia fine, con lo scopo di rompere le strutture vorticose e dissipare dunque il più possibile i vortici.

I telai, realizzati in metallo, sono lunghi 30 cm ed alti 10cm. I piedini in metallo da 2 cm di spessore garantiscono il peso necessario per non essere spostati in acqua dal getto.

E' stata realizzata una campagna di visualizzazioni per capire quale fosse la disposizione più adatta, che è risultata essere quella riportata in figura 2.15 e, successivamente, sono state effettuate misure PIV con e senza i telai alle medesime condizioni di portata e configurazione. I risultati ottenuti saranno descritti ed analizzati nei prossimi capitoli



Figura 2.7: Telai per la dissipazione del vortice

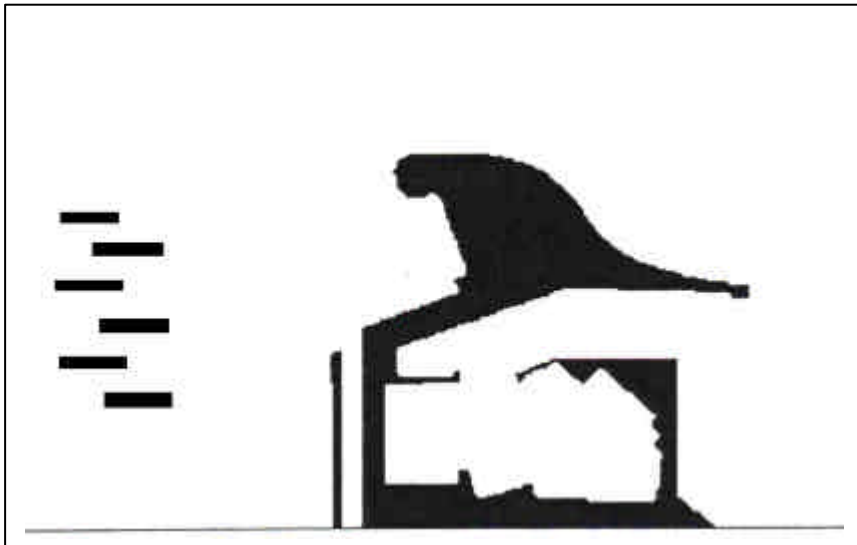


Figura 2.8: Configurazione ottimale dei telai

2.2 Tecniche di misura PIV

La tecnica PIV è una tecnica ottica, non intrusiva che permette di misurare le componenti di velocità di un flusso con buona risoluzione spaziale e temporale.

Il principio di misura si basa sulla determinazione dello spazio percorso da particelle traccianti in un intervallo di tempo noto.

In particolare un apparato di misura PIV è costituito da un sistema di acquisizione, di cui fanno parte sia l'apparato di ripresa che quello di illuminazione, e da un sistema di analisi delle immagini.

La procedura di misura può perciò essere così suddivisa:

- Acquisizione delle immagini
- Analisi delle immagini

La prima parte consiste nell'acquisire immagini da cui sia possibile ricavare la velocità della particella tracciante in un intervallo di tempo noto, dato dall'intervallo di tempo che intercorre tra due fotogrammi successivi: nel caso di una normale telecamera questo intervallo corrisponde ad 1/25 di secondo.

Il sensore dell'apparato di ripresa trasforma l'immagine in una matrice di interi, il cui valore è compreso tra 0, corrispondente all'elemento scuro, e 255, corrispondente all'elemento saturo di luce. L'immagine si presenta quindi come una funzione F del livello di grigio:

$$F(x,y)=f(x,y)$$

La funzione è relativa al piano illuminato e permette la determinazione della velocità tramite la relazione $V = \Delta r / \Delta t$ in cui resta da determinare lo spazio percorso, determinato nella fase di analisi delle immagini acquisite.

In questa seconda fase si suddivide l'immagine in una serie di sottodomini, in cui viene calcolato lo spazio medio percorso dalle particelle presenti. Tale spostamento viene calcolato a partire dalla 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 domini di interrogazione e r_1, r_2 sono le componenti dello spostamento generico su x e su y . La posizione del massimo sul piano (r_1, r_2) individua lo spostamento della particella.

Il codice di calcolo utilizzato è stato Davis, prodotto da LaVision, nelle versioni 7.0 e 7.1. Le dimensioni dei sottodomini sono state 32x32 pixel, distanziate dalle finestre contigue di 16 pixel: è stata infatti impostata una sovrapposizione del 75%, come riassunto in tabella. Finestre di interrogazione più piccole non garantiscono un numero sufficiente di particelle e dunque non consentono un'accurata determinazione del massimo della funzione di correlazione.

Configurazione	Dimensioni finestre	Sovrapposizione e finestre	Sottrazione del minimo	Prove effettuate
Getto Coanda Fr=cost, Re var	16x16	75%	si	Fr=0.18 Re _w = 5000 ÷ 9000
Getto Coanda Re=cost, Fr var	32x32	75%	no	Re _h =4000 Fr = 0.047 ÷ 0.32

Porto Senza diga	32x32	75%	si	Re = 2000 ÷ 7500
Porto Con diga	32x32	75%	no	Re = 2000 ÷ 7500
Porto (baroclino) Senza diga	32x32	75%	si	Re = 2000 ÷ 4000
Porto (baroclino) Con diga	32x32	75%	no	Re = 2000 ÷ 4000

La sottrazione del minimo ha consentito una migliore analisi: le piccole particelle infatti divenivano poco visibili passando sopra il riferimento per la diga foranea, pitturato in maniera diversa rispetto al resto della vasca.

Capitolo 3

3 Analisi a Reynolds costante e Froude variabile

I due parametri che giocano un ruolo fondamentale quando si voglia analizzare un getto a superficie libera sono il numero di Froude ed il numero di Reynolds, che sono definiti come segue:

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu} \quad \text{Fr} = \frac{u}{\sqrt{gh}}$$

In queste formule u indica la velocità del flusso, D è una lunghezza caratteristica, ed h è l'altezza dell'acqua. Per investigare quale sia la dipendenza dell'effetto Coanda da questi parametri nel presente lavoro si è scelto di realizzare due campagne di esperimenti: nella prima viene analizzato cosa avviene quando, in presenza di parete laterale, venga variato il numero di Froude mantenendo costante il numero di Reynolds, mentre nel secondo viene variato il numero di Froude mantenendo costante quello di Reynolds.

Per entrambe le configurazioni si è scelto di tenere fissa la distanza tra uscita del getto e parete laterale: in particolare tale distanza è stata impostata a $h/w=4$. Questa scelta è stata effettuata in base ad esperienze realizzate precedentemente nello stesso laboratorio: questo valore garantisce la massimizzazione dell'effetto Coanda, e, poiché la lunghezza di riattacco è piuttosto corta, consente di inquadrare con la telecamera una zona non troppo estesa, consentendo analisi PIV accurate.

Per queste due campagne di esperimenti è stato realizzato un filmato dal quale sono stati scelti 28 secondi, in base alla qualità del video. Riprendendo la telecamera 25 frame al secondo, sono state estrapolate 700 immagini bmp, dalle quali si è potuto ricavare il campo vettoriale delle velocità, quello vettoriale dell'RMS ed infine gli sforzi di Reynolds.

E' stata successivamente svolta una terza campagna di esperimenti, effettuata su una configurazione più complessa, che riproduce il porto di Pescara in scala (è 1:1000 sul piano orizzontale 1:100 lungo la direzione verticale). Su questa configurazione sono state effettuate prove con e senza diga foranea, come verrà specificato in seguito. In particolare sono state effettuate prove con e senza l'effetto del galleggiamento e prove volte a valutare l'effetto del ricircolo.

3.1 Misure PIV a Reynolds costante e Froude variabile

Le prove effettuate a numero di Froude variabile ed a Reynolds costante sono state realizzate a partire dalla seguente equazione:

$$Re = \frac{uh}{\nu} = const$$

dove u è la velocità, h l'altezza e ν la viscosità cinematica.

Le scelte che si avevano per la lunghezza caratteristica erano infatti due: l'altezza h dell'acqua, che ci dà il Re_h , e la dimensione w dell'ugello, che ci dà il Re_w . Nel nostro caso, come detto, è stato privilegiato il primo. Per poter mantenere costante Re_h è dunque necessario mantenere costante il prodotto $u \cdot h$, e ciò è stato effettuato semplicemente mantenendo costante la portata. Naturalmente per consentire una variazione del numero di Froude bisogna variare l'altezza dell'acqua nella vasca.

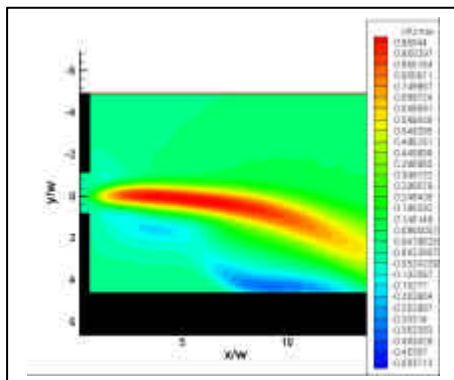
In realtà, per avere un numero di Reynolds ancor più significativo si sarebbe dovuta utilizzare una lunghezza caratteristica che avesse tenuto conto di entrambe le dimensioni, come ad esempio la grandezza $l=2A/p$ dove A è l'area della sezione $A=h \cdot w$ e p è il perimetro della sezione $p=2 \cdot (h+w)$. Tenere costante questa lunghezza, sebbene più corretta teoricamente, avrebbe dato grossi problemi pratici. Si è dunque scelta l'altezza h come dimensione caratteristica.

Gli esperimenti effettuati sono sette, e la portata è stata impostata a $Q=0,2$ questo valore ci consente di avere numeri di Froude non troppo elevati, ai quali insorgono problemi di increspatura delle onde, che renderebbero inattendibile con i mezzi utilizzati (in particolare a causa delle riprese dall'alto), i risultati ottenuti dall'analisi PIV; in tabella sono riportati i valori dell'altezza h , di Froude, di Re_h e di Re_w .

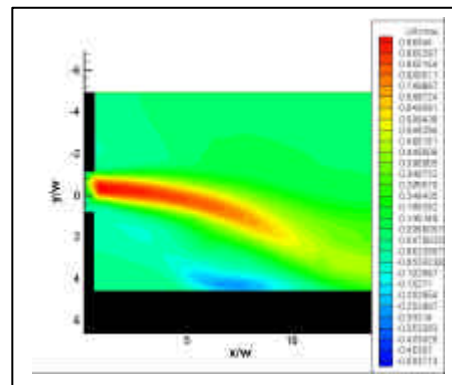
h (m)	U (m/s)	Fr	Re _h	Re _w
0.0250	0.16	0.3231	4000	8000
0.0400	0.10	0.1596	4000	5000
0.0500	0.08	0.1142	4000	4000
0.0600	0.07	0.0869	4000	3200
0.0700	0.06	0.0690	4000	2857
0.0800	0.05	0.0564	4000	2500
0.0900	0.04	0.0473	4000	2222

Tabella 3.1: Esperimenti realizzati a Re_h costante e numero di Froude variabile

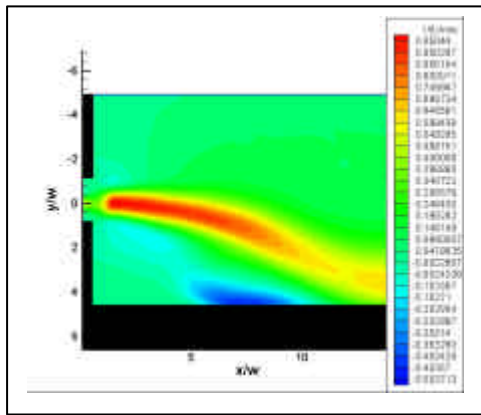
In figura 3.1 viene riportato l'andamento della velocità assiale u adimensionata rispetto alla velocità massima (assiale) u_0 . Da notare come l'ascissa e l'ordinata siano adimensionate rispetto alla larghezza del canale w .



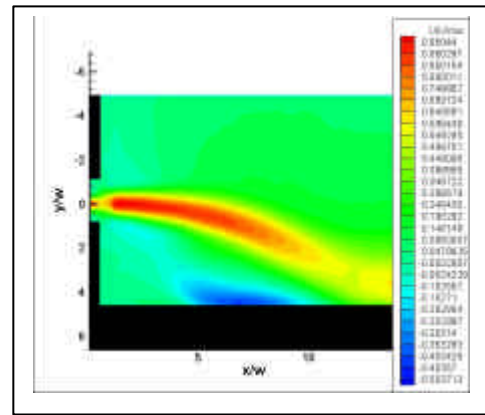
a) Fr 0.3231



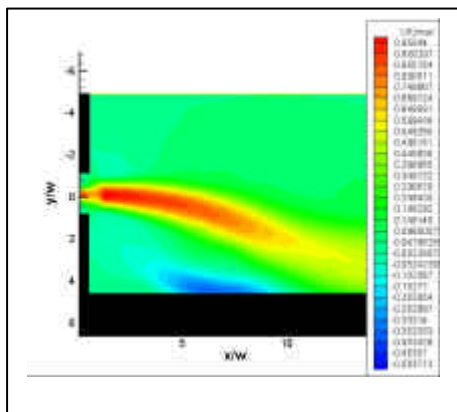
b) Fr=0.1596



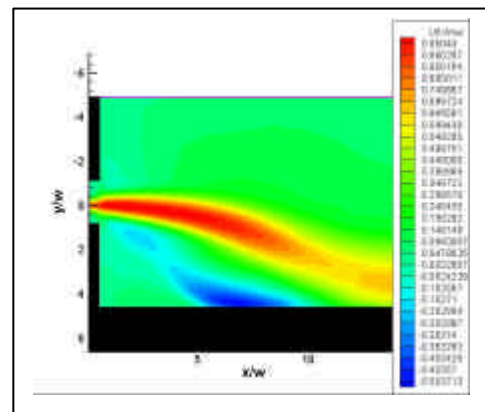
c) $Fr=0.1142$



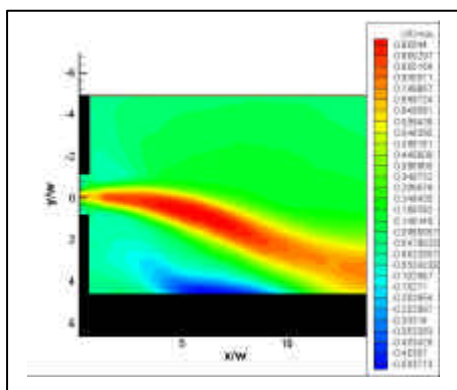
d) $Fr=0.0869$



e) $Fr=0.0690$



f) $Fr=0.0564$

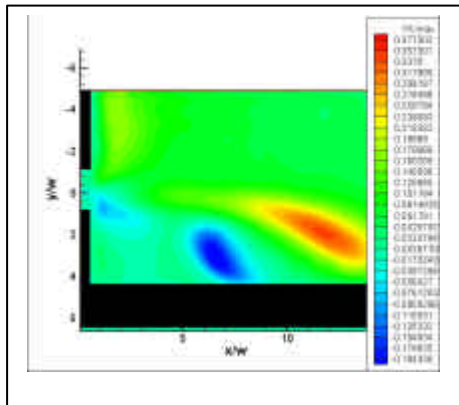


g) $Fr=0.0473$

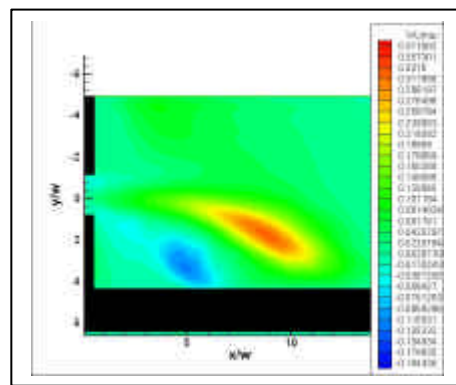
Figura 3.1: Andamento della velocità assiale U/U_0 al decrescere del Froude

E' possibile notare la velocità assiale negativa che viene a crearsi tra la sezione di uscita e la parete: questo ci indica la presenza del vortice responsabile dell'effetto Coanda. E' possibile anche notare un secondo vortice controrotante rispetto al primo (zona di ricircolo secondaria) e limitato a sinistra dalla parete, che in generale si attenua al diminuire del numero di Froude.

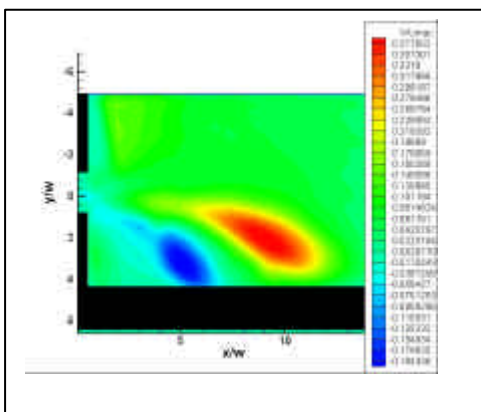
Nella figura 3.2 viene invece riportato l'andamento della velocità verticale v , adimensionata ancora con la velocità massima assiale u_0 . Si nota che tale velocità è pressoché nulla per ascisse x/w 2-3, per poi aumentare a causa della presenza della parete. Il valore massimo raggiunto da v/u_0 è circa 0.4.



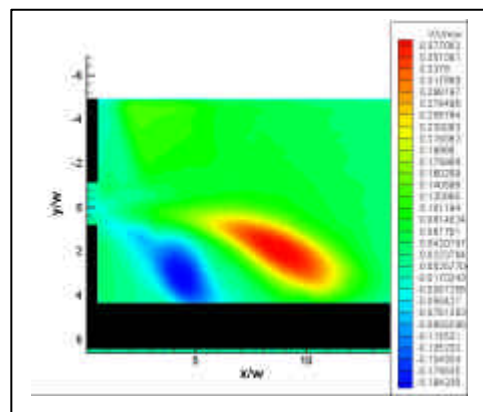
a) Fr 0.3231



b) Fr=0.1596

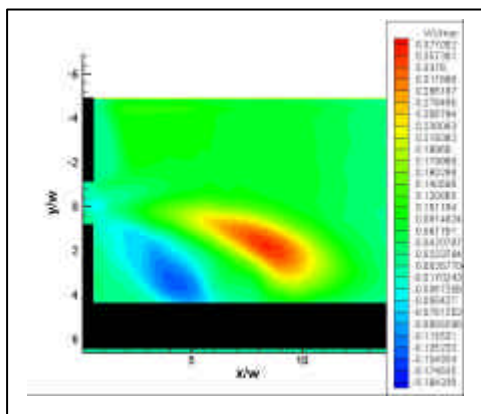
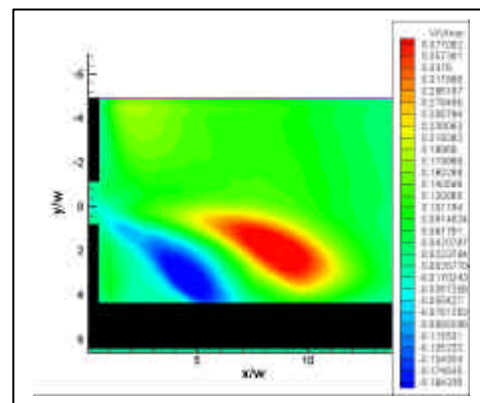


c) Fr=0.1142



d) Fr=0.0869

Anche guardando queste figure è possibile intuire la presenza del vortice secondario dalla la velocità positiva (anche se piuttosto debole) nei pressi della parete al di sotto del getto. La “coda” della velocità verticale negativa diretta verso la sezione di uscita del getto è dovuta anche all’azione di attrazione che il flusso esercita sul fluido circostante (oltre che al suddetto vortice).

e) $Fr=0.0690$ f) $Fr=0.0564$

Possiamo poi notare un aumento dello spessore della velocità massima verticale al diminuire del Froude, che sta ad indicare che minore è la velocità, maggiore è la massa d’acqua che risente della presenza della parete laterale. La zona interessata sembra avvicinarsi all’uscita del getto man mano che il numero di Froude diminuisce.

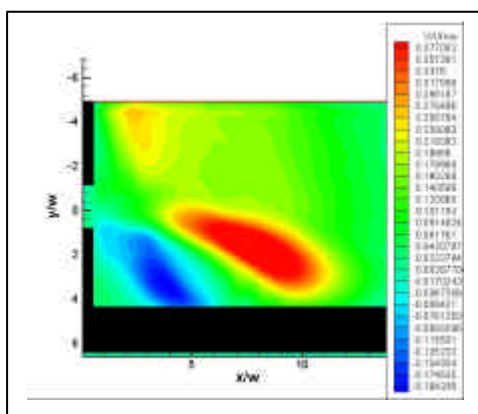
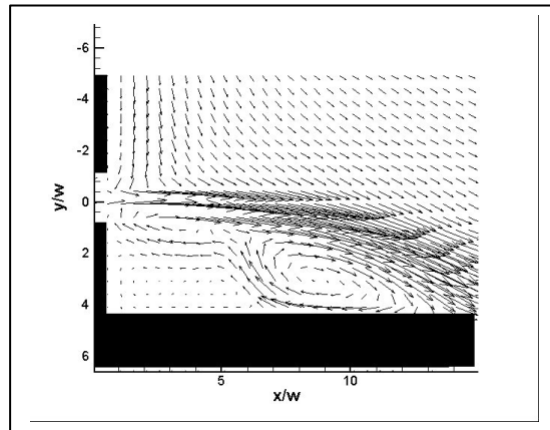
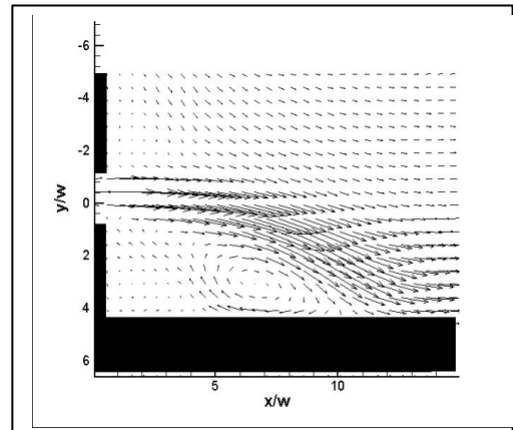
g) $Fr=0.0473$

Figura 3.2: Andamento della velocità verticale per vari numeri di Froude

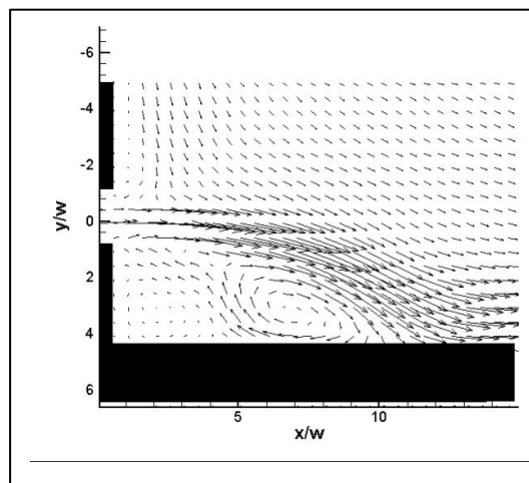
Viene ora riportato (figura 3.3) l'andamento vettoriale della velocità. E' possibile distinguere i vortici primario e secondario, il quale si restringe al diminuire del Froude: a bassi valori di questo parametro la velocità verticale si sviluppa abbastanza presto, non lasciando spazio per il vortice secondario.



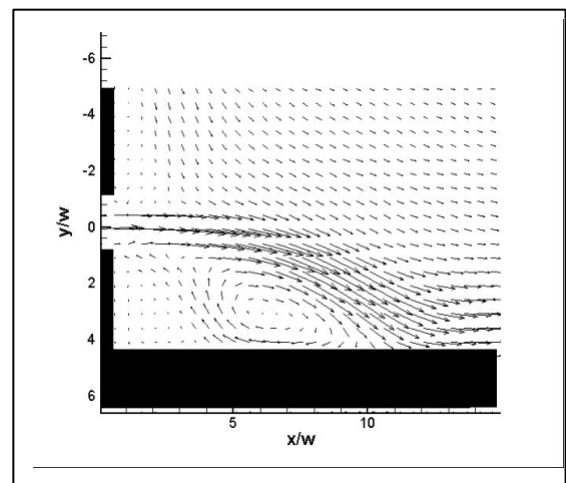
a) $Fr=0.3231$



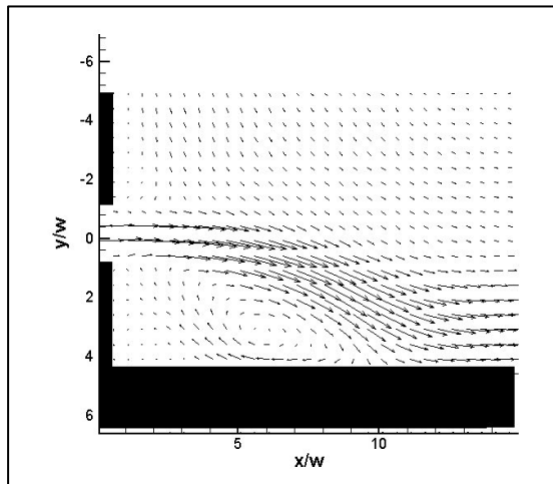
b) $Fr=0.1596$



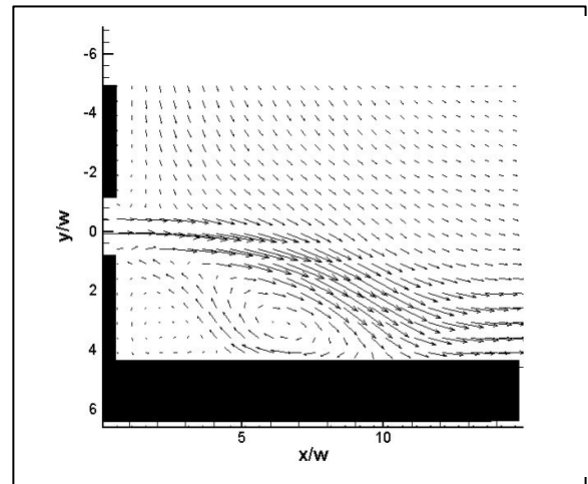
c) $Fr=0.1142$



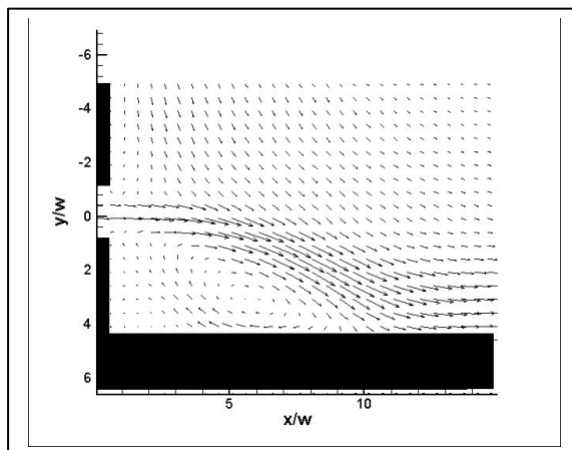
d) $Fr=0.0869$



e) $Fr=0.0690$



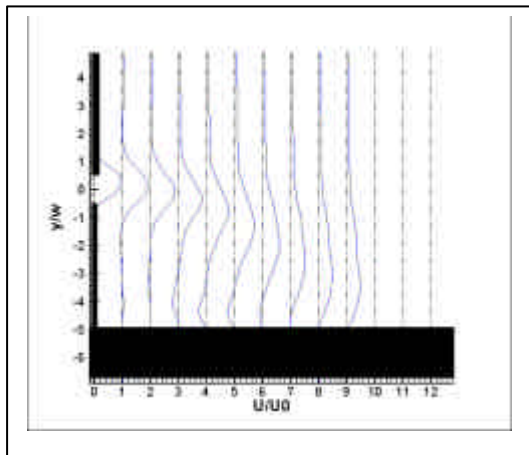
f) $Fr=0.564$



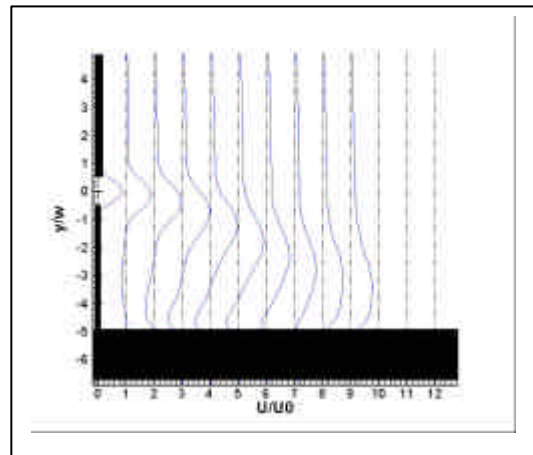
g) $Fr=0.0473$

**Figura 3.3: Andamento della
velocità vettoriale per i vari
numeri di Froude**

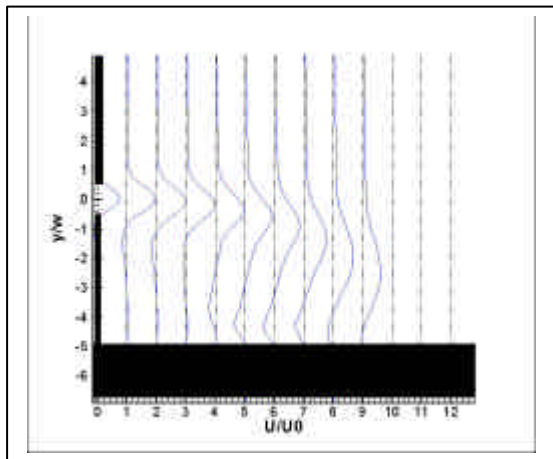
Dall'andamento vettoriale è già possibile individuare il punto di inversione della velocità; è comunque utile analizzare i grafici dei profili delle velocità del flusso lungo varie sezioni x/w , di cui vengono riportati alcuni esempi in figura (figura 3.4).



a) $Fr=0.3231$



b) $Fr=0.1596$



c) $Fr=0.0473$

Figura 3.4: profili di velocità al variare del Froude per tre sezioni

Si notano immediatamente la zona a velocità orizzontale negativa in un certo intervallo, che conferma la presenza del vortice, e il punto in cui la suddetta velocità cambia segno, passando da negativa a positiva che definisce la distanza di riattacco.

In alcuni casi la velocità ha una doppia inversione che conferma la presenza, per i numeri di Froude più bassi, di un secondo vortice.

Risulta evidente l'effetto di attrazione che la parete esercita sul getto: la velocità massima in ogni sezione è spostata verso la parete stessa, confermando così la presenza dell'effetto Coanda. Si nota infine come il flusso si sviluppa, a valle del punto di riattacco, come un flusso di parete.

Analizziamo ora più nel dettaglio la lunghezza di riattacco x_r : per calcolare questa grandezza vengono considerati i valori di velocità ricavati nei pressi della parete (nel nostro caso ad una distanza $y=0.2w$ dalla parete) e si ricava la distanza per cui la velocità cambia segno, passando da negativa a positiva. Tale distanza è proprio x_r .

Nel grafico successivo (figura 3.5a) viene riportato l'andamento di x_r al variare del numero di Froude.

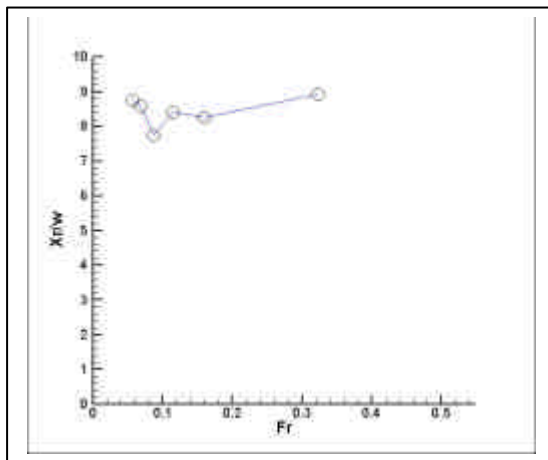


Figura 3.5a : Punto di riattacco x_r ai vari numeri di Froude

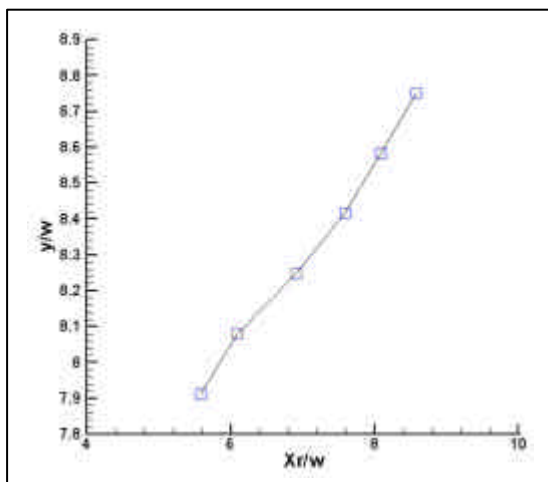


Figura 3.5b : Andamento della x_r al variare della distanza y/w per $Fr=0.0869$

Si può affermare che, almeno nel range di variazione del presente lavoro, la lunghezza di riattacco x_r risulta indipendente dal numero di Froude. In questa analisi il numero di Froude varia di un ordine di grandezza, passando da 0.0454 a 0.3231: per valori più elevati

sarebbero insorti problemi con la telecamera essendo il flusso troppo veloce, mentre non è stato possibile analizzare valori più bassi a causa dell'apparato sperimentale; da un lato infatti la pompa utilizzata non ha consentito di scendere sotto un certo livello di portata, dall'altro lo stramazzo non ha consentito di diminuire l'altezza della vasca oltre un certo livello. Al fine di valutare l'errore commesso nel considerare la lunghezza di riattacco x_r non esattamente sulla parete, si è realizzato la figura 3.5b. Da tale figura, realizzata per un solo numero di Froude ($Fr=0.0869$) si vede che gli ultimi punti variano in maniera lineare, garantendo un errore massimo di circa 0.3-0.4 nella valutazione di x_r/w . Questo conferma l'attendibilità del risultato riportato in figura 3.5a

Vista l'indipendenza della lunghezza di riattacco x_r dal numero di Froude ci si può chiedere cosa avviene all'asse del getto quando venga variato il parametro.

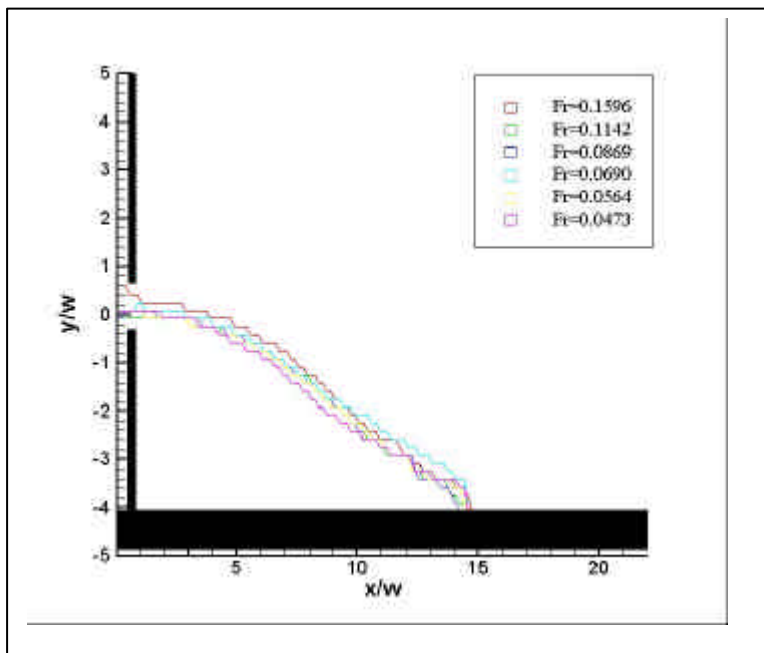


Figura 3.6: Asse del getto, ricavato come massimo modulo per ogni sezione, al variare del numero di Froude.

Per ogni punto è stato ricavato il modulo della velocità e per ogni sezione è stato trovato il punto in cui tale modulo risulta massimo. La figura 3.6 mostra il risultato ottenuto.

Anche l'asse del getto risulta essere indipendente dal numero di Froude.

Per completare lo studio sulla lunghezza di riattacco nella figura 3.7 viene riportato l'andamento della velocità, adimensionata rispetto alla velocità massima nei pressi della parete. Più precisamente si è utilizzata una distanza dalla parete pari a $0.2w$.

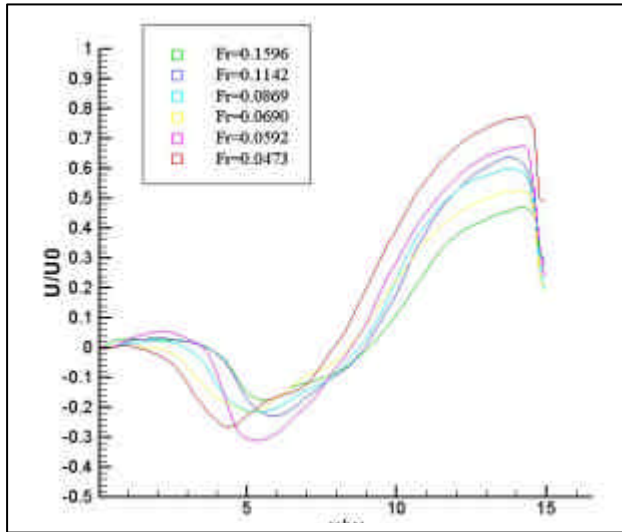


Figura 3.7: Andamento della velocità lungo la parete per i vari numeri di Froude analizzati

Anche da questa figura è possibile riconoscere il punto di riattacco come il punto in cui la velocità orizzontale u si azzerava. Il punto di riattacco è pressoché lo stesso per tutti i valori del Froude analizzato. Si può poi verificare che per alcuni valori del Froude inizialmente la u/u_0 è positiva. Questo indica ancora la presenza di un secondo vortice.

Per concludere l'analisi vengono riportati gli andamenti delle fluttuazioni di velocità.

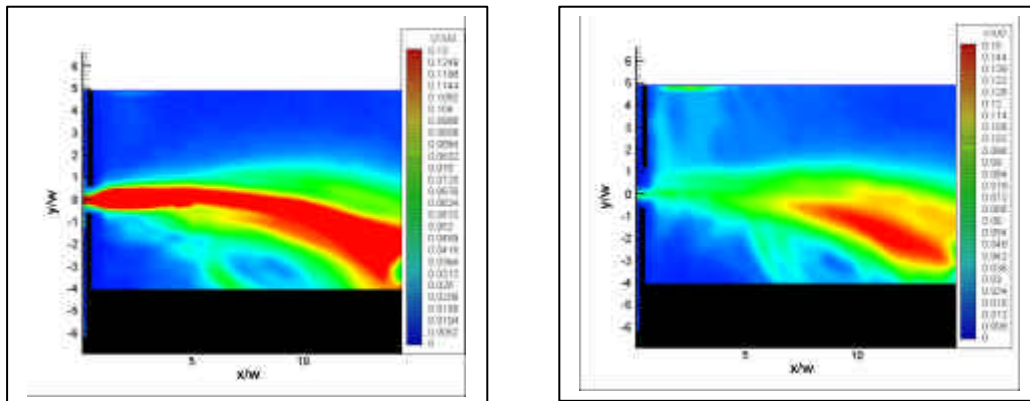


Figura 3.8: Fluttuazioni di velocità assiale u'/u_0 (sinistra) e trasversale v'/u_0 (destra). $Fr=0.3231$

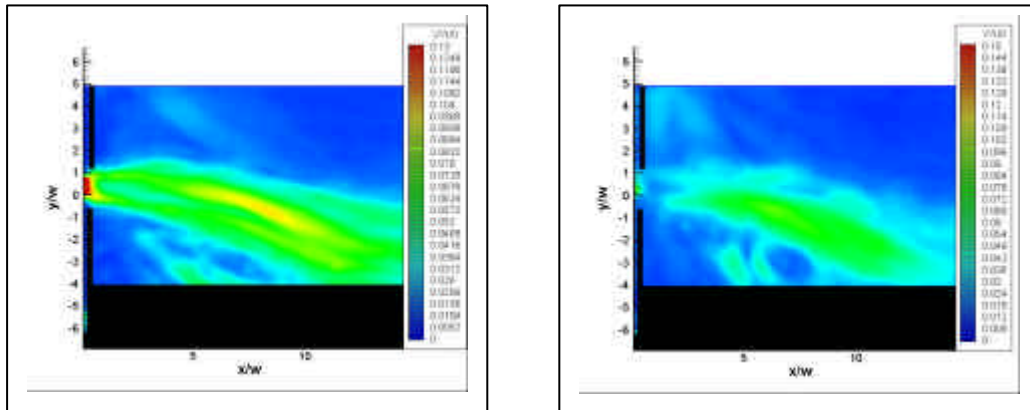


Figura 3.9: Fluttuazioni di velocità assiale u'/u_0 (sinistra) e trasversale v'/u_0 (destra). $Fr=0.1596$

E' possibile notare come le fluttuazioni di u siano sempre maggiori nel ramo che è più lontano dalla parete: in questa zona si ha dunque una maggior turbolenza.

Le figure sono state adimensionate con la massima velocità assiale del campo (u_0) e la scala è sempre la stessa. Per quanto riguarda la fluttuazione verticale v' si nota che il valore più elevato è sempre al centro del getto e risulta localizzato nei pressi di $x/w=5$.

Dalla fluttuazione v' risulta evidente la presenza del vortice di ricircolo principale.

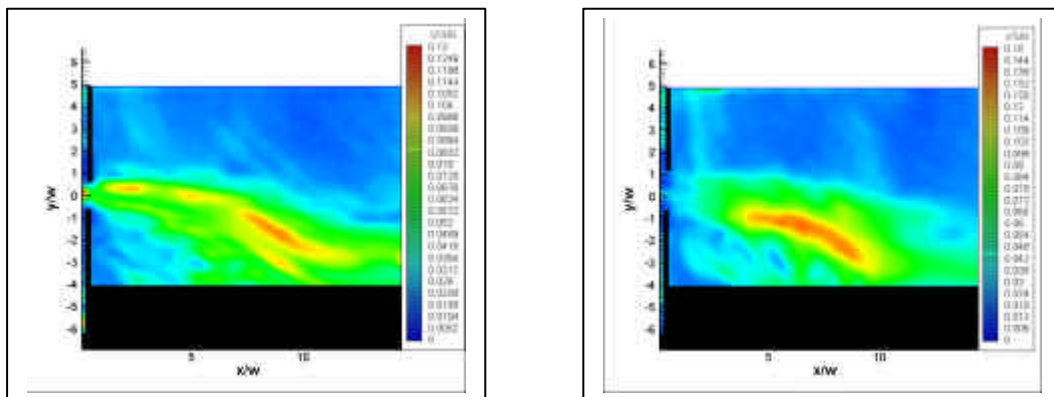


Figura 3.10: Fluttuazioni di velocità assiale u'/u_0 (sinistra) e trasversale v'/u_0 (destra). $Fr=0.0473$

Capitolo 4

4 Analisi a Froude costante e Reynolds variabile

Analizziamo in questo capitolo cosa avviene ad un getto che venga immesso in un ambiente con la presenza di una parete laterale, mantenendo costante il numero di Froude e facendo variare il numero di Reynolds.

I parametri su cui possiamo agire sono dunque i seguenti:

$$Re = \frac{uD}{\nu} \quad Fr = u / \sqrt{gh}$$

La u da noi scelta è la velocità massima assiale del getto u_0 , mentre h è l'altezza dell'acqua nella vasca e dunque nel condotto di ingresso. Per quanto riguarda la lunghezza caratteristica D abbiamo invece due scelte: l'altezza h , dalla quale si ha Re_h , e la lunghezza della sezione d'uscita del getto w , che ci dà invece Re_w . Tuttavia la scelta del Reynolds è meno vincolante rispetto al caso precedente, poiché ora variano entrambi.

Come detto si è dovuta realizzare il laboratorio una condizione in cui il numero di Froude sia costante: per fare ciò si deve avere necessariamente

$$\frac{u}{\sqrt{h}} = \text{const}$$

La velocità deve perciò essere fatta variare con la radice quadrata dell'altezza. Questo ci porta alla definizione di Re_h :

$$Re_h = Fr \sqrt{g \cdot h} / \nu$$

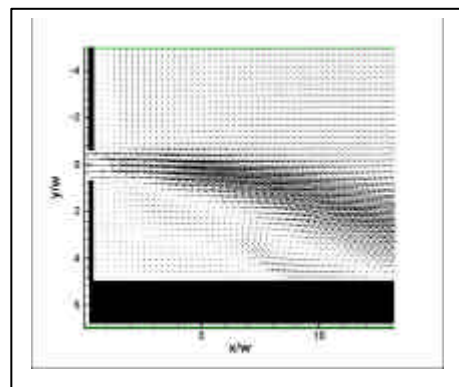
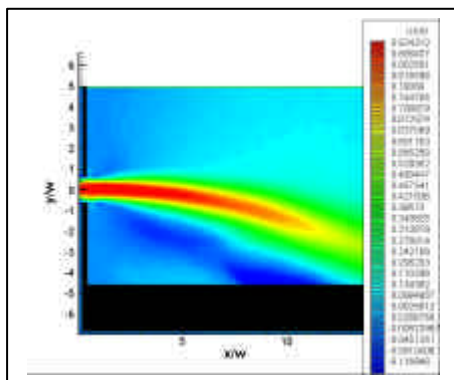
Essendo il Froude, g e ν costanti, Re_h varia come $u^{3/2}$.

Il Re_w varia invece semplicemente come la velocità. La tabella successiva (tabella 1.1) sintetizza le prove svolte in questa condizione.

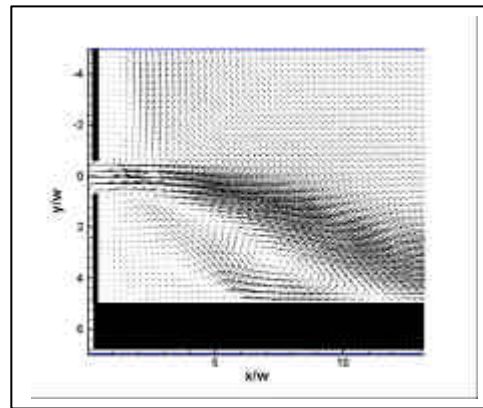
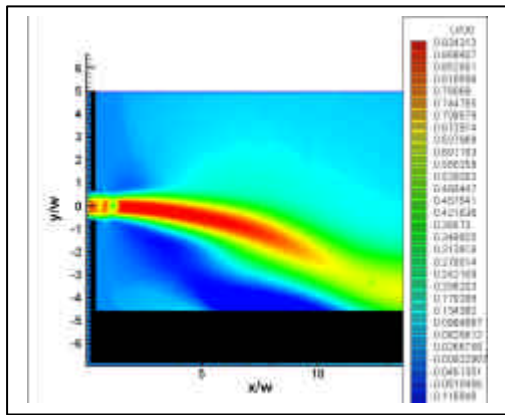
Sono stati effettuati otto esperimenti, facendo variare l'altezza dell'acqua agendo sullo stramazzo, ed utilizzando la pompa per agire sulla portata e dunque sulla velocità. Il numero di Froude scelto è 0.18; bisogna però tener conto di possibili errori, dovuti ad oscillazioni sulla rilevazione della portata dei flussimetri, che possono essere dell'ordine del 10-15%. Mantenere costante il numero di Froude è risultato infatti essere piuttosto laborioso.

h (cm)	U(m/s)	Fr	Re_w	Re_h
3	0.0980	0.18	5000	3000
4	0.1145	0.18	5730	4580
5	0.1328	0.18	6600	6600
6	0.1385	0.18	6700	8350
7	0.15625	0.18	7800	11000
8	0.164	0.18	8200	13100
9	0.1822	0.18	9000	16000

Le figure successive mostrano l'andamento della velocità u , adimensionata rispetto alla velocità massima di ogni campo u_0 (figura 4.1), e confrontata con l'andamento vettoriale del campo.

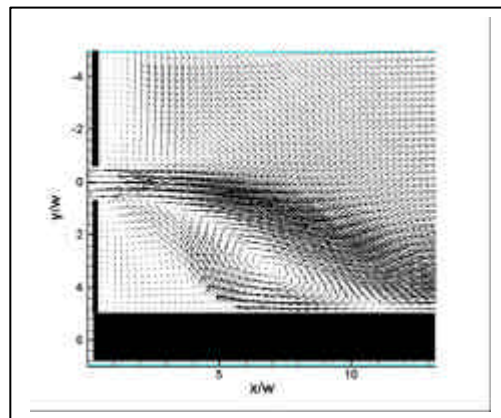
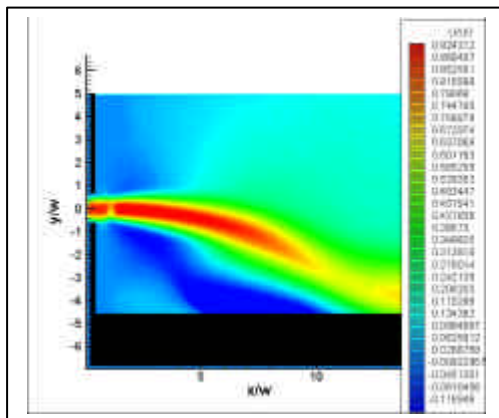


a) $Re_w=5000$

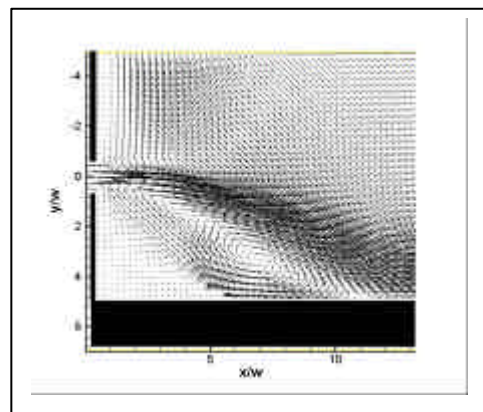
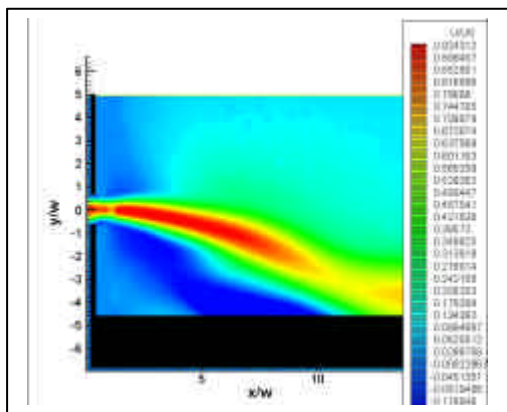


b) $Re_w=5730$

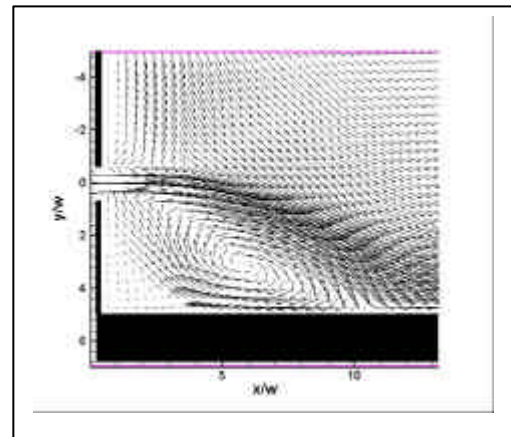
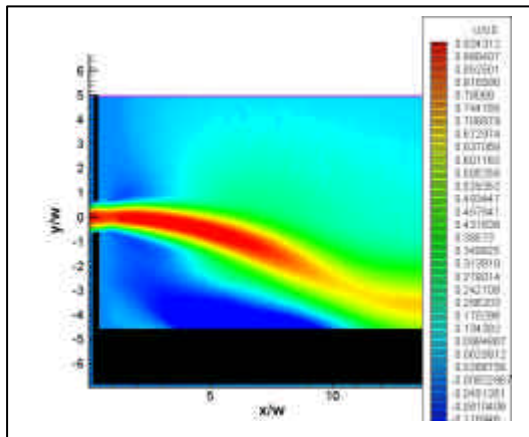
Da queste immagini si nota come l'inclinazione del getto vari all'aumentare el Reynolds: si ha una brusca variazione dell'asse del getto, che poi si assesta per rimanere quasi costante per i valori del numero di Reynolds più elevati.



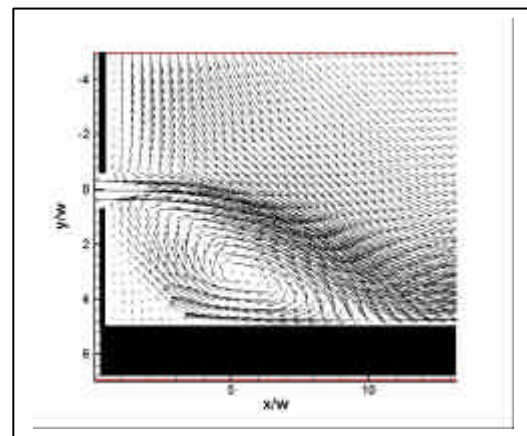
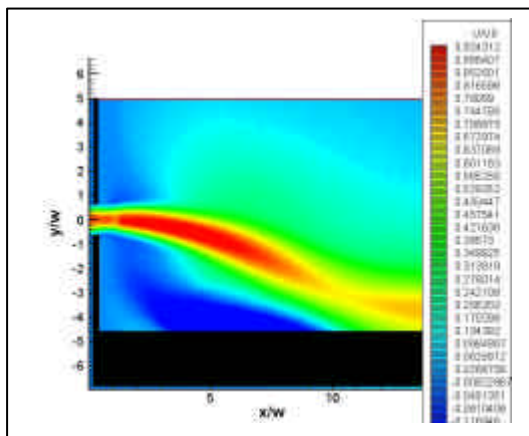
c) $Re_w=6600$



d) $Re_w=6700$



e) $Re_w=7800$



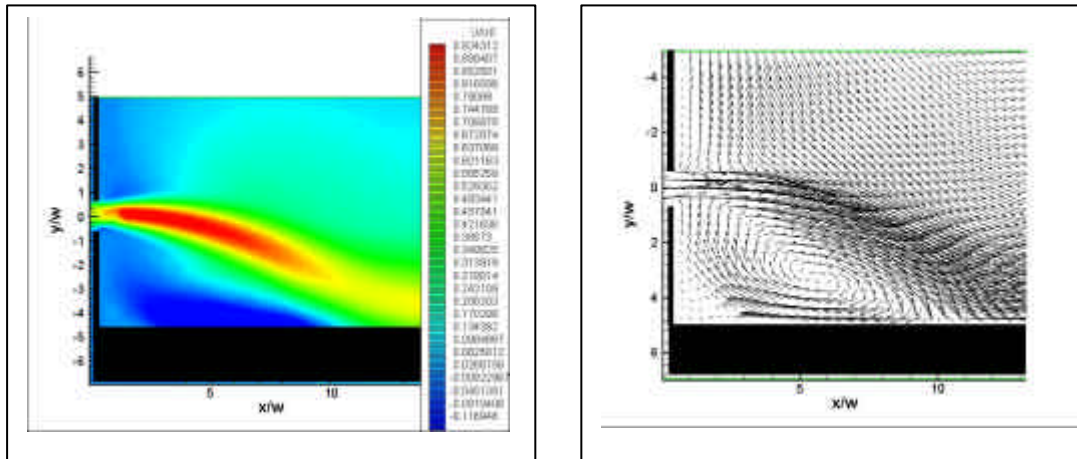
f) $Re_w=8200$

E' possibile notare l'ampia zona di ricircolo, sotto al getto: l'andamento negativo della velocità è indicativo di un vortice.

E' in più già possibile avere un'idea di come varierà la lunghezza di riattacco x_r .

Tale distanza può infatti essere definita come punto in cui la velocità passa da negativa a positiva. Si vede nel nostro caso che questa diminuisce all'aumentare del numero di Reynolds.

Anche in questo caso il limite massimo sul valore di Reynolds è stato imposto dalle limitazioni sulla telecamera e sullo stramazzo, che non avrebbero consentito da una parte l'acquisizione corretta per velocità così elevate, e dall'altra non si sarebbe potuto mantenere il numero di Froude costante aumentando ulteriormente l'altezza dell'acqua nella vasca.

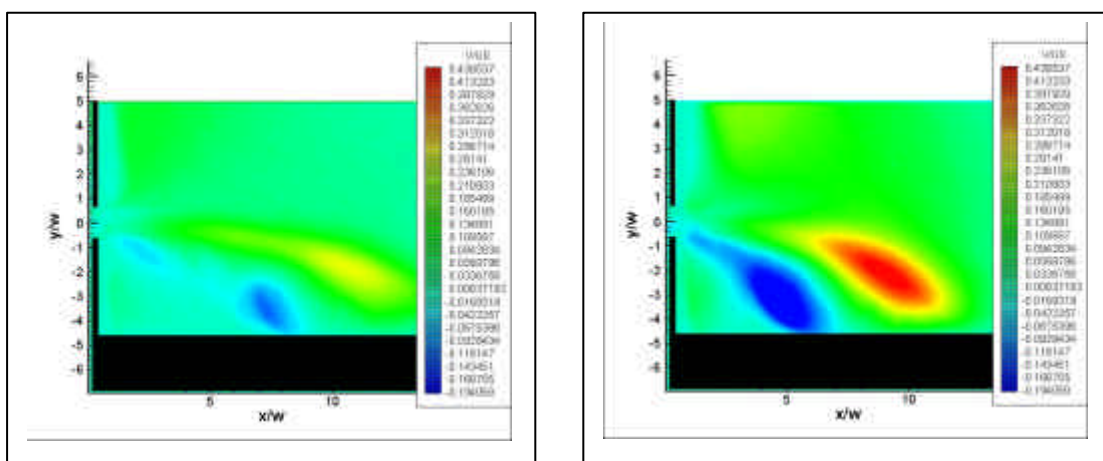


g) $Re_w=9000$

Figura 4.1: Andamento della velocità assiale al variare del numero di Reynolds. Il Froude è costante e pari a 0.18

L'andamento vettoriale conferma le affermazioni precedenti: si nota la creazione del vortice primario e secondario, e nei casi a basso Reynolds un terzo vortice. E' confermata anche la diminuzione della lunghezza di riattacco x_r .

Dall'alto è evidente l'effetto della vasca chiusa: si ha un vortice di grande estensione che risulta essere molto debole, che accentua l'attrazione che il getto dovrebbe esercitare sul fluido circostante.



a) $Re_w=5000$

b) $Re_w=6600$

Le figure 4.2 riportano invece, a titolo di esempio, l'andamento di quattro velocità verticali, adimensionate anch'esse con u_0 . Tale parametro ci consente di stimare l'importanza delle velocità verticali rispetto a quelle orizzontali.

La velocità verticale ci da una idea di dove si creano i vortici, e di come vengono modificati da un eventuale cambiamento del parametro.

L'esperimento è stato infatti realizzato in vasca chiusa, dove l'azione di ricircolo può modificare il campo in maniera sensibile, come vedremo nel prossimo capitolo.

La tendenza della velocità verticale è quella di "avvicinarsi" alla sezione di uscita del getto all'aumentare del numero di Reynolds..

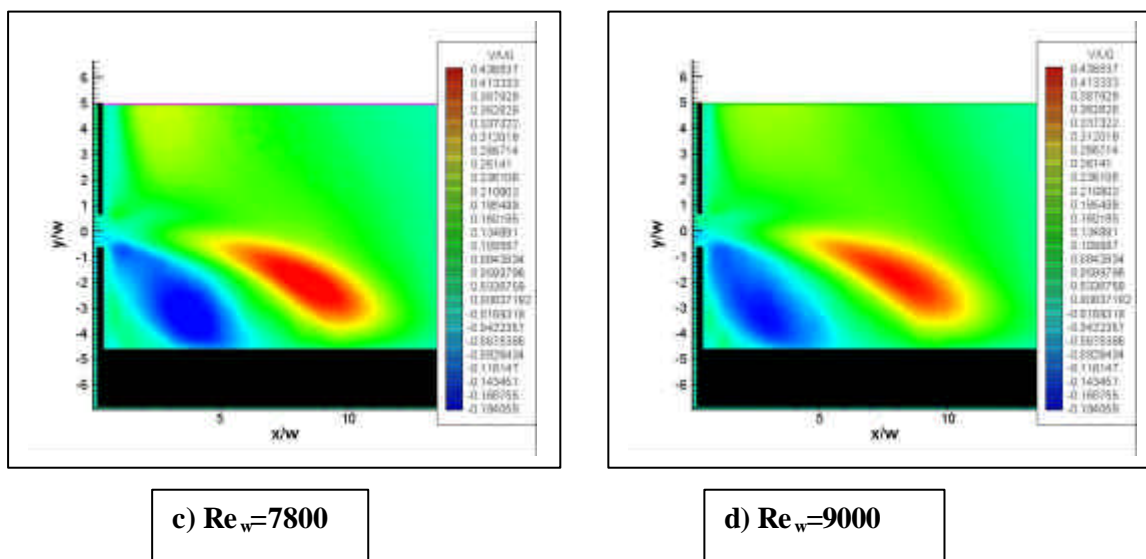


Figura 4.2: Andamento della velocità verticale adimensionata con u_0 ai vari Reynolds

Tale avvicinamento può essere giustificato con la diminuzione della lunghezza di riattacco x_r : l'asse del getto, incidendo la parete a coordinate x/w minori, sposta il vortice verso la sezione di uscita del getto.

E' poi possibile notare anche in questo caso la presenza del vortice secondario, individuabile dall'allungamento che la velocità verticale negativa ha verso la sezione di uscita.

Ai valori più elevati del parametro questo vortice non ha più spazio per formarsi.

Bisogna evidenziare poi il fatto che la velocità verticale massima sia pressoché costante (escludendo il primo caso). Questo vale sia per le velocità positive che negative. Quello che cambia è invece la zona di estensione di tali velocità massime, che tende ad aumentare: si ha cioè un ispessimento.

Per evidenziare la consistenza dell'effetto Coanda e per avere un grado migliore di accuratezza sulla lunghezza di riattacco x_r , nelle figure 4.3 sono riportati gli andamenti delle velocità assiale per dieci sezioni e per quattro valori del Re_w

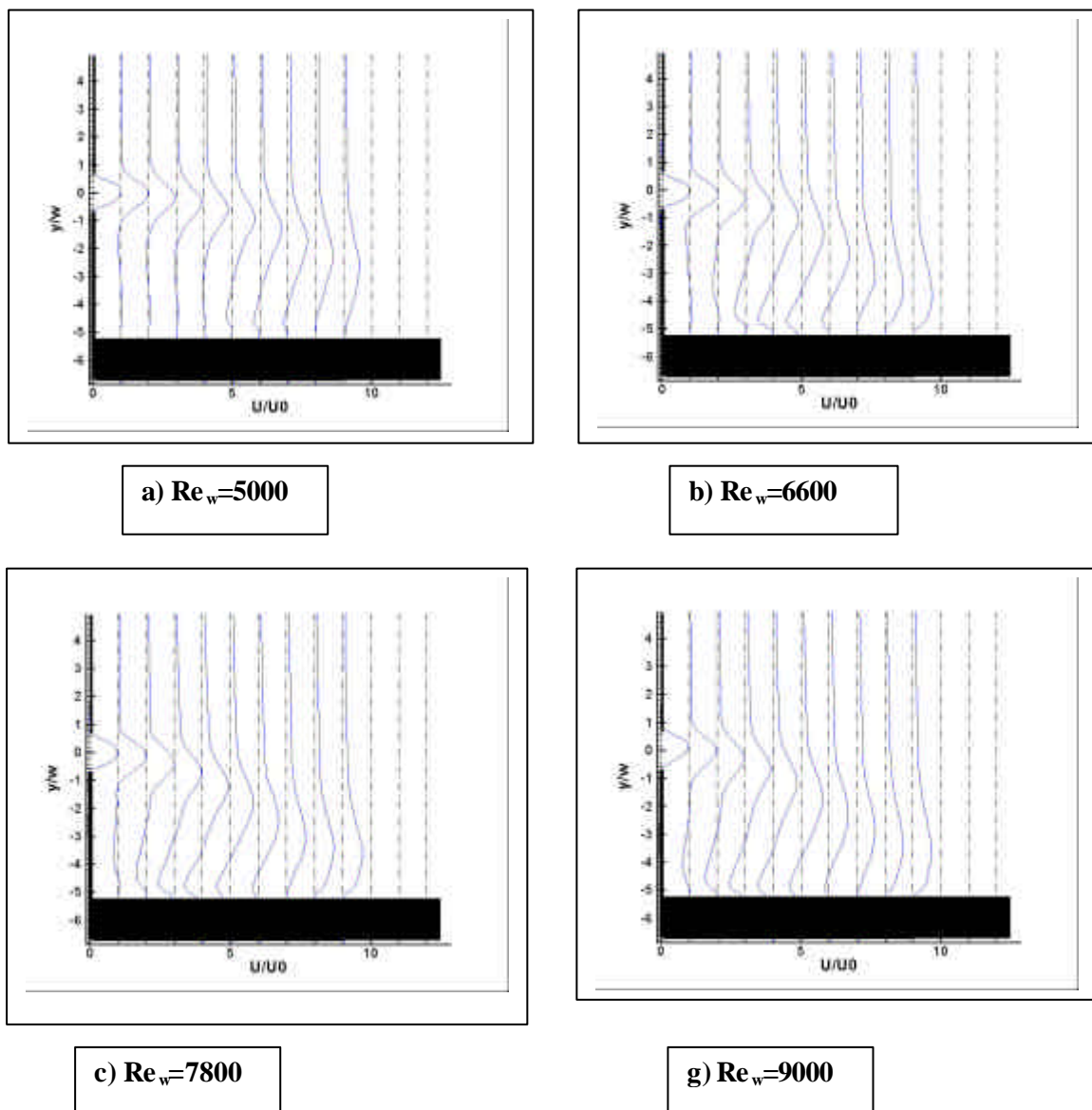


Figura 4.3: Andamento dei profili di velocità a vari Re_w .

Nelle prime tre sezioni l'andamento è praticamente lo stesso in tutti i casi, ed è dunque individuabile come il potential core. Successivamente si nota l'inversione della velocità, che ci consente di individuare il vortice primario.

Anche in questo caso si nota che il flusso curva verso la parete a causa dell'effetto Coanda, e, dopo il riattacco, lo sviluppo del flusso come getto di parete. Anche nella parte positiva delle y/w è presente una componente assiale, seppure molto debole, dovuta sia all'entrainment, che attira il fluido della vasca verso il getto, sia al vortice di ricircolo dovuto ad una zona di prova limitata.

Nella prossima figura è riportato l'andamento della distanza di riattacco x_r al variare del parametro (figura 4.4a), valutata come in precedenza.

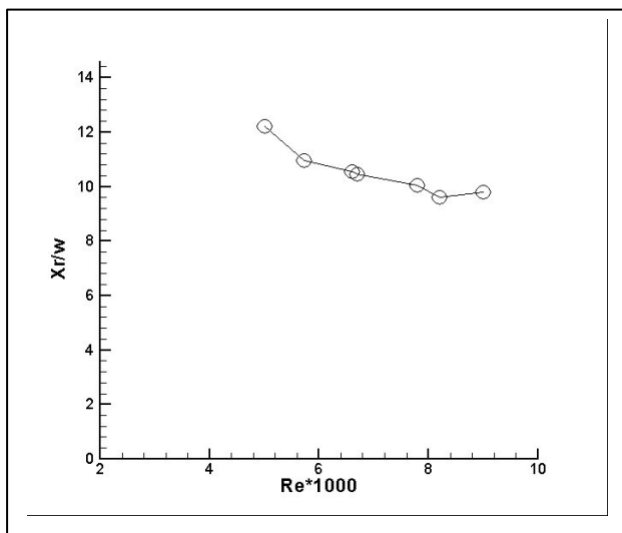


Figura 4.4a: Andamento della lunghezza di riattacco in funzione del numero di Reynolds, valutato su w

A differenza del caso a numero di Froude variabile, ora la lunghezza di riattacco tende a decrescere con andamento più o meno lineare. L'ascissa della figura è un numero di Reynolds diviso per 1000.

Si riporta per completezza anche il grafico ottenuto utilizzando in ascissa la grandezza Re_h (figura 4.4b). In questo grafico si vede che l'andamento diviene quasi lineare.

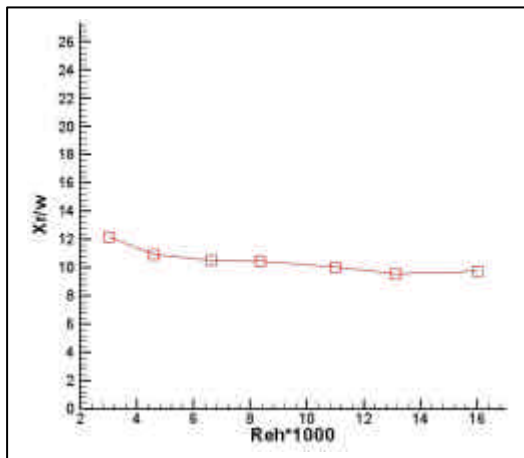


Figura 4.4b: Andamento della lunghezza di riattacco in funzione del numero di Reynolds valutato su h

E' da tener conto che in questo lavoro si è potuto variare il numero di Reynolds (valutato con w) tra 5000 e 9000, non potendo studiare casi con particelle più veloci di 18 cm/s; non si è potuto perciò verificare se l'aumento della lunghezza di riattacco nell'ultimo punto è confermato da misure a numero di Reynolds più elevati. Per avere comunque una idea di cosa cambia all'interno del flusso, analizziamo l'asse del getto; per individuarlo è stato ricavato il massimo valore del modulo della velocità e ne è stato trovato il massimo in ogni sezione. Il risultato è riportato in figura 4.5

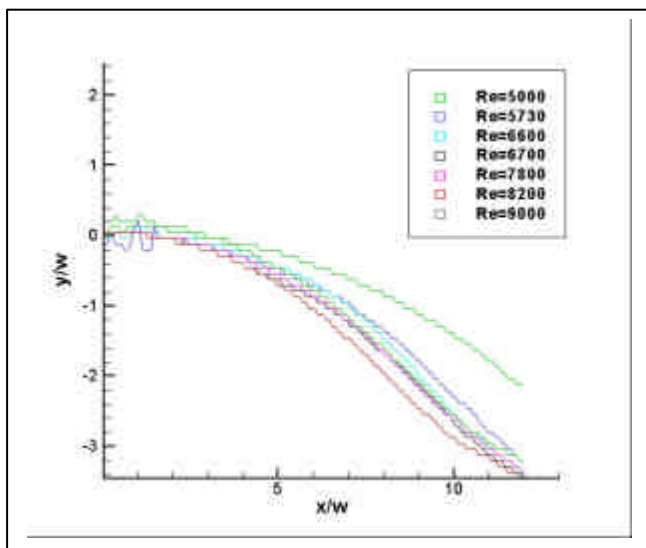


Figura 4.5: Asse del getto al variare del Reynolds. Il Froude è pari a 0.18

L'asse del getto tende ad abbassarsi all'aumentare del parametro; questo conferma la diminuzione della lunghezza di riattacco x_r , riscontrata precedentemente. Anche in questo

caso quando il Reynolds raggiunge 9000 l'asse del getto si sposta nuovamente verso l'alto coerentemente con quanto avviene per la lunghezza di riattacco.

Effettuiamo ora un'analisi di ciò che avviene nei pressi della parete laterale, e precisamente ad una distanza $y/w=0.2$ dalla struttura.

Il risultato è riportato nella figura 4.6

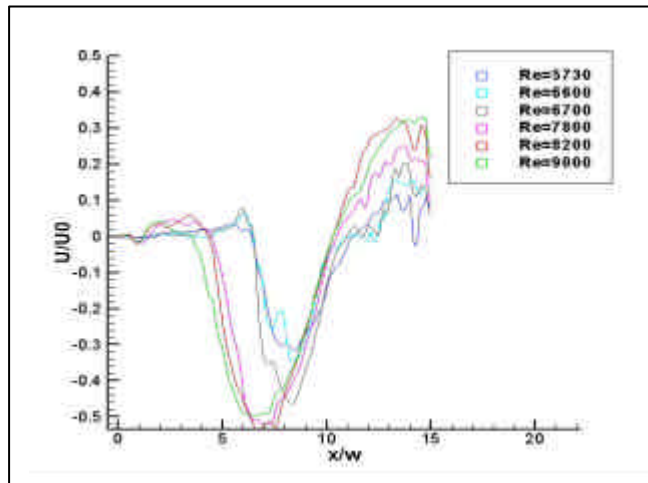


Figura 4.6: Andamento della velocità lungo la parete laterale

Al crescere del Reynolds la distanza a cui si trova la velocità minima diminuisce, confermando lo spostamento del vortice verso la sezione d'uscita. E' possibile notare un aumento del modulo della velocità assiale: questo indica che il vortice, all'aumentare del Reynolds, diventa più intenso.

Si vuole ora vedere come variano le fluttuazioni di velocità. Le figure 4.7, 4.8 si riferiscono alle fluttuazioni di velocità assiale (u') e verticale (v').

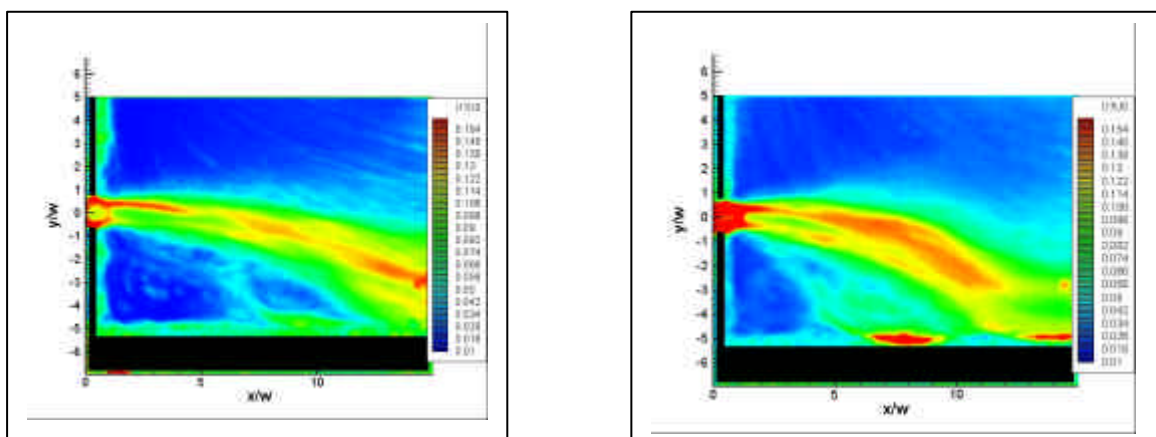


Figura 4.7: Andamento della fluttuazione di velocità assiale per Re=5000 (destra), Re=6600 (sinistra)

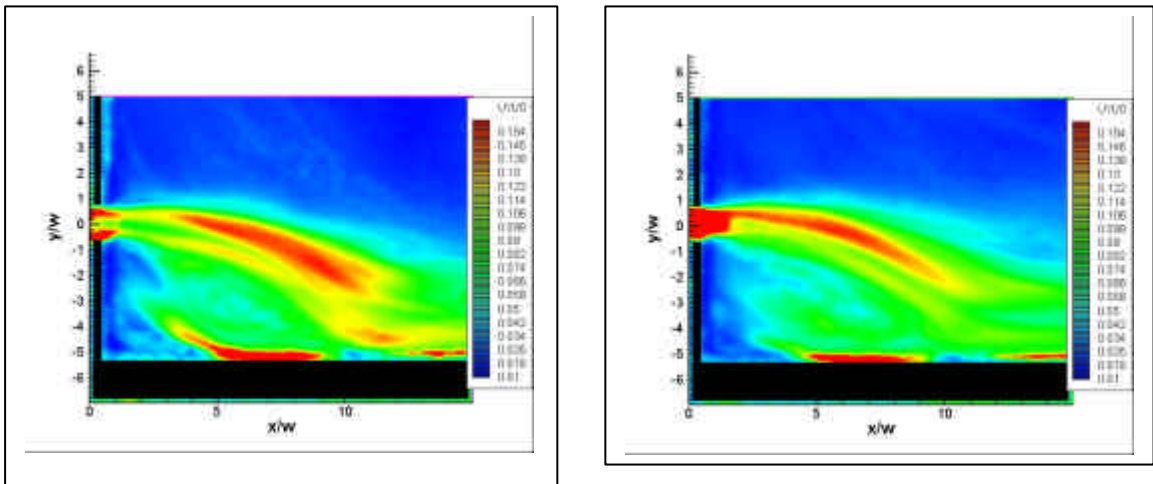


Figura 4.8: Andamento della fluttuazione di velocità assiale per $Re=7800$ (destra), $Re=9000$ (sinistra)

L'andamento delle fluttuazioni rivela che anche in questo caso il mescolamento tra fluido appartenente al getto e fluido appartenente all'ambiente della vasca avviene ai bordi del getto: sono infatti presenti due pennacchi laterali, nei quali il valore di fluttuazione è massimo. Immediatamente dopo la sezione di uscita del getto la u'/u_0 è simmetrica rispetto all'asse x/w , presentando ancora i due picchi: questo è in analogia a ciò che avviene nel getto libero. Successivamente il flusso risente della parete laterale, curvando verso di essa: non si ha più simmetria tra le due parti, causando uno sbilanciamento della fluttuazione. I valori più elevati si riscontrano sempre nel picco superiore.

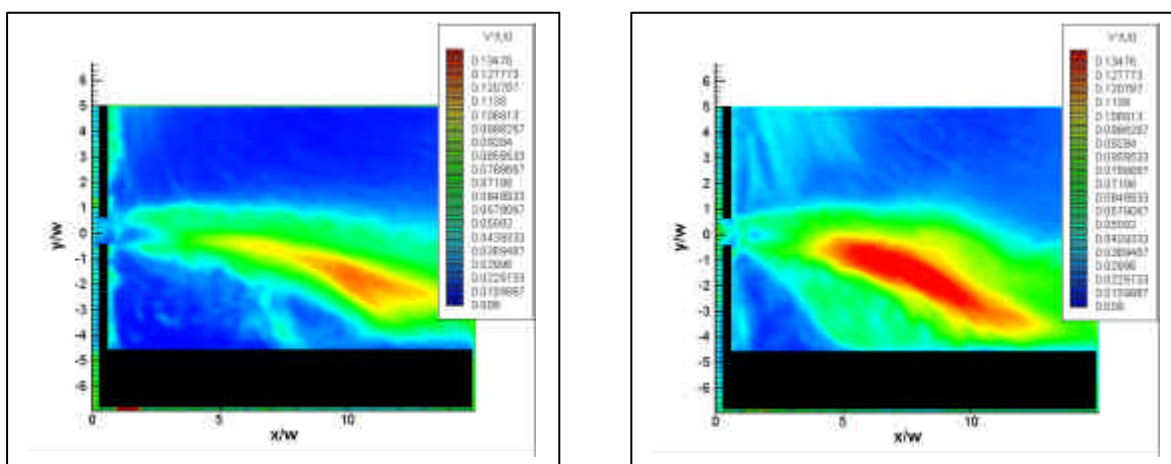


Figura 4.9: Andamento delle fluttuazioni v'/u_0 $Re=5000$ (destra), $Re=6600$ (sinistra)

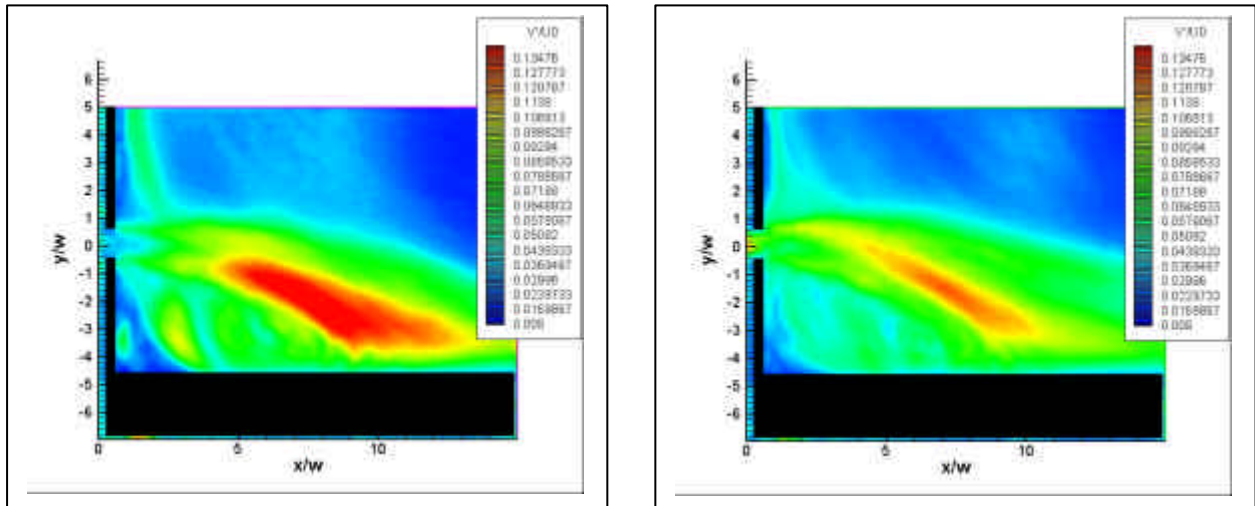


Figura 4.10: Andamento delle fluttuazioni v'/u_0 $Re=7800$ (destra), $Re=9000$ (sinistra)

Le fluttuazioni di v , riportate nelle figure 4.9, 4.10 presentano anch'esse i due caratteristici picchi laterali, anche se meno accentuati. Sono posizionati più lontano dalla sezione di uscita rispetto ai picchi della u' , proprio come avviene nel getto libero. Per quanto riguarda invece il valore massimo, questo è sempre localizzato al centro del getto, a partire da una distanza $x/w=5$ dall'entrata del getto nella vasca.

Concludiamo la nostra analisi riportando, in figura 4.11, 4.12 l'andamento degli sforzi di Reynolds per i casi analizzati.

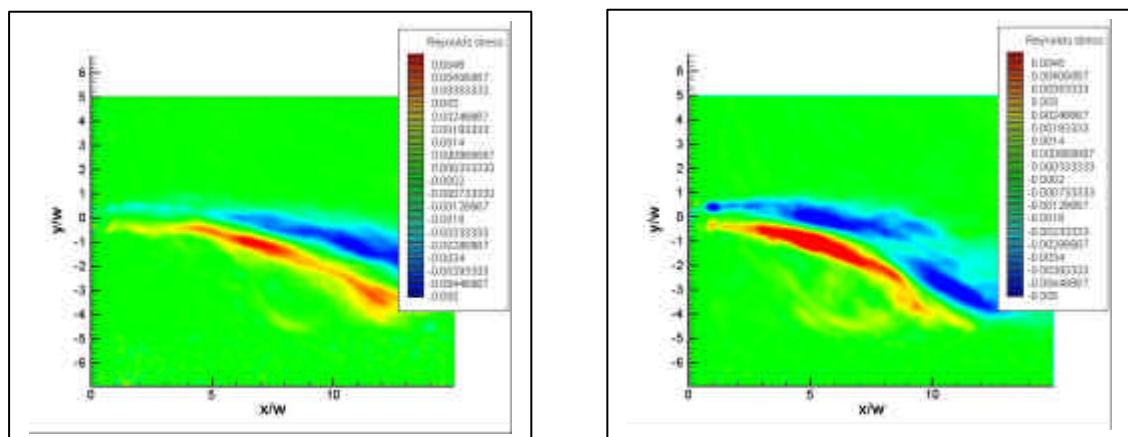


Figura 4.11: Andamento degli sforzi di Reynolds per $Re=5000$ (destra), $Re=6600$ (sinistra)

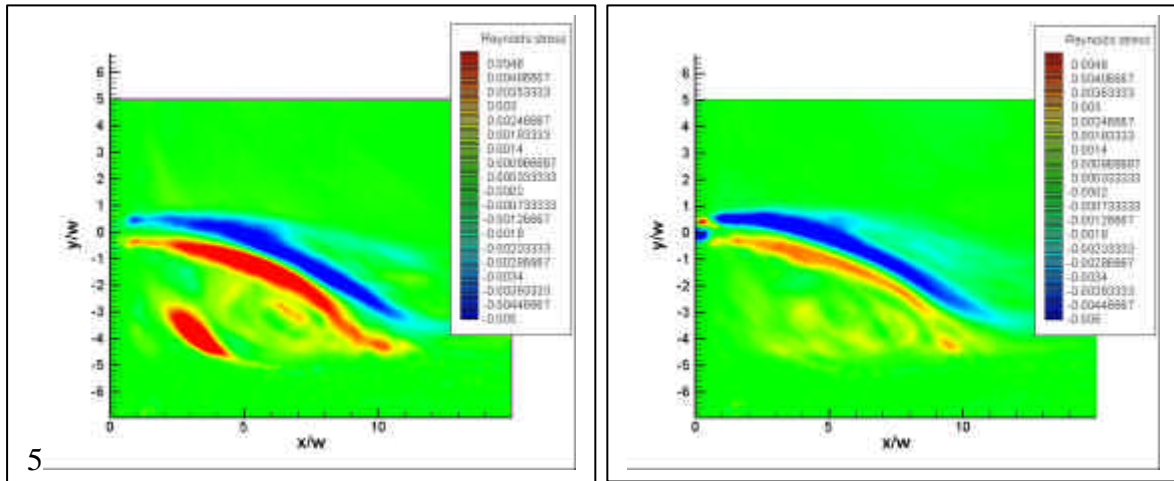


Figura 4.12: Andamento degli sforzi di Reynolds per $Re=7800$ (destra), $Re=9000$ (sinistra)

L'andamento degli sforzi di Reynolds viene modificato rispetto al caso di getto libero dalla presenza di una parete laterale: come accade per velocità assiale e fluttuazioni si ha l'attrazione del flusso da parte del pannello laterale. Quello che si mantiene è l'andamento antisimmetrico con valore nullo al centro del getto. e' anche da notare come sia evidente il vortice che si forma tra parete laterale e sezione d'uscita del getto.

Capitolo 5

5 Configurazione completa

Oltre al caso di flusso che immette in una vasca con la presenza di una parete laterale, si è studiata una configurazione più complessa. L'analisi è stata effettuata su un modello in scala del porto di Pescara (1:1000 sul piano orizzontale e 1:100 su quello verticale). Si è proceduto ad effettuare esperimenti dapprima in assenza di stratificazione, con e senza la diga foranea, e, successivamente, sono stati effettuati esperimenti in condizioni barocline.

Nelle figure 5.1 ed 5.2 sono riportate le due configurazioni.

Una indagine preliminare è stata effettuata mediante visualizzazioni: come colorante è stata utilizzata la fluorescina sodica, immessa nel serbatoio insieme all'acqua, al fine di avere una rapida descrizione qualitativa dei fenomeni che si verificano in configurazioni così complesse. Da queste visualizzazioni è stato notato che le pareti laterali della vasca non influiscono sugli esperimenti in presenza della diga foranea, mentre creano un vortice di ricircolo nel caso questa sia assente. Tale vortice sarà studiato in uno dei prossimi paragrafi.

L'altezza dell'acqua per questa serie di esperimenti è stata mantenuta costante e pari a 4 cm: il numero di Froude ed i numeri di Reynolds (basati sulla lunghezza w e sulla lunghezza h) variano dunque esclusivamente con la velocità.

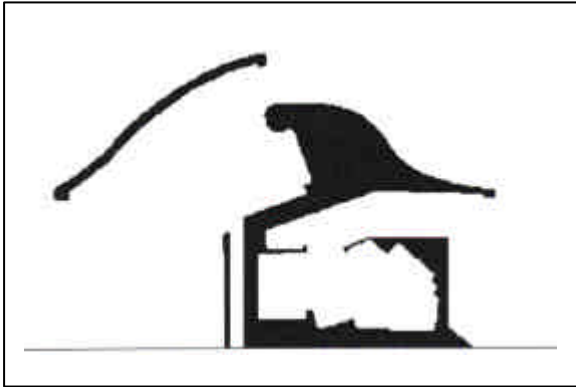


Figura 5.1: Configurazione portuale con diga foranea

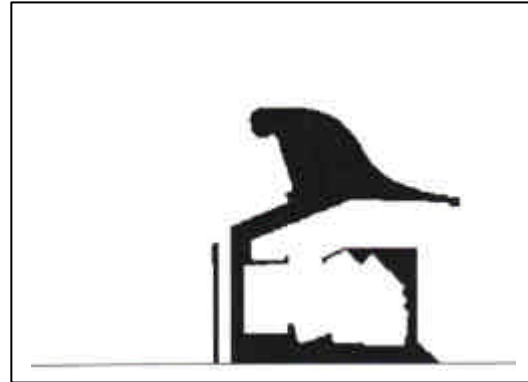


Figura 5.2: Configurazione portuale senza diga foranea

In questa configurazione la sezione di uscita del getto è $w=4$ cm: si ha dunque l'uguaglianza tra Re_h e Re_w .

Verranno ora analizzate separatamente le due configurazioni, entrambe in condizioni barotropiche: verrà utilizzata esclusivamente acqua dolce.

Sono stati effettuati esperimenti in entrambi i casi a varie portate e dunque a varie velocità del flusso.

5.1 Esperimenti con diga foranea

La breve campagna di visualizzazioni ha evidenziato la presenza di due vortici principali. Il primo, posizionato all'interno del molo, si sviluppa quasi istantaneamente, ed ha una forte intensità. Il secondo vortice è invece dovuto alla presenza della barriera, ed è più lento a crearsi, di minore intensità, ma più molto più esteso rispetto al precedente.

Le visualizzazioni hanno anche consentito di verificare come, in questa configurazione, non vi sia interazione tra pareti laterali e flusso: il fatto che la vasca sia limitata lateralmente è risulta cioè irrilevante. Le visualizzazioni sono state utili anche per determinare il range di portate per cui effettuare le misure PIV.

I risultati delle visualizzazioni sono riportati in figura 5.3.

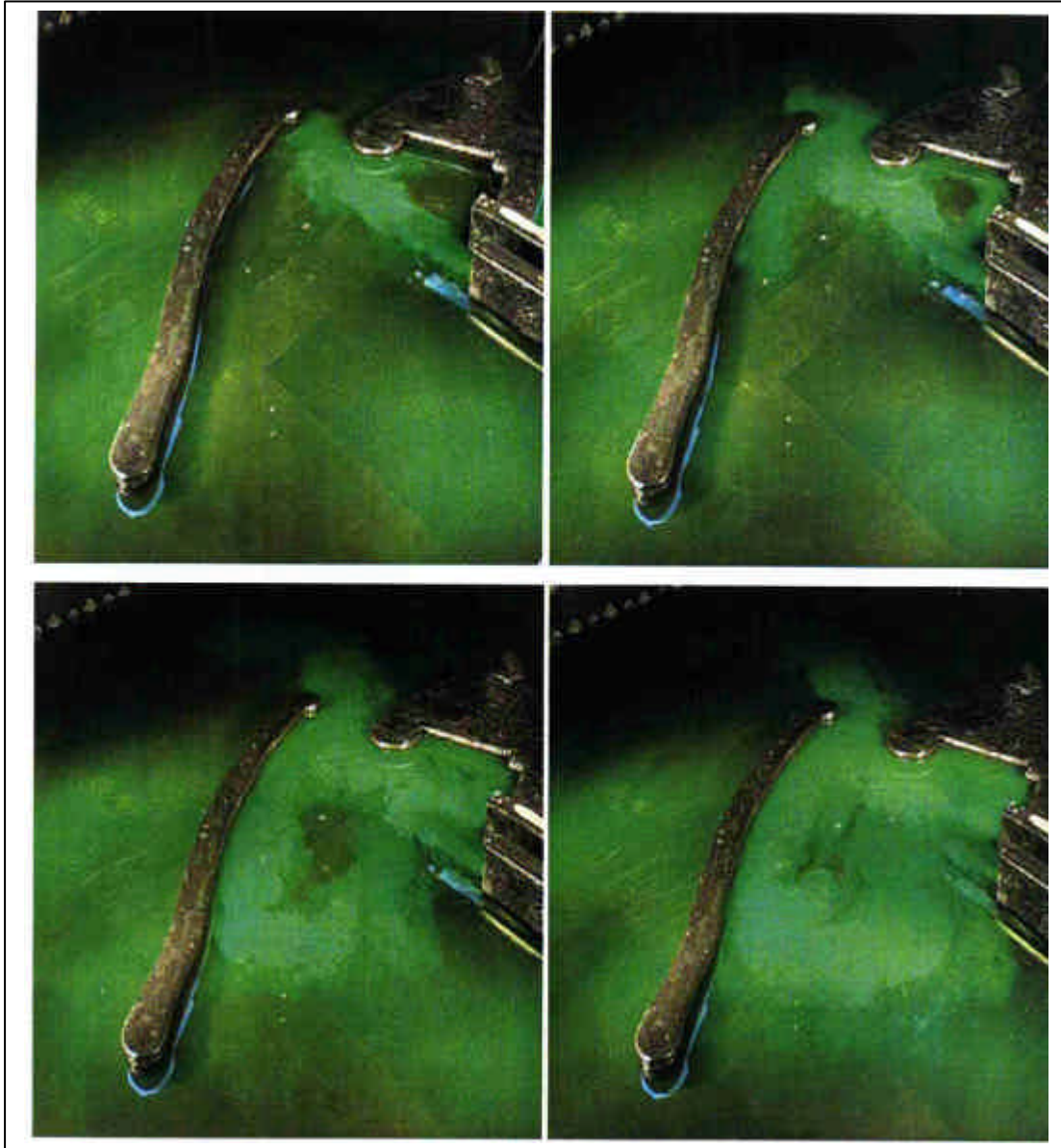
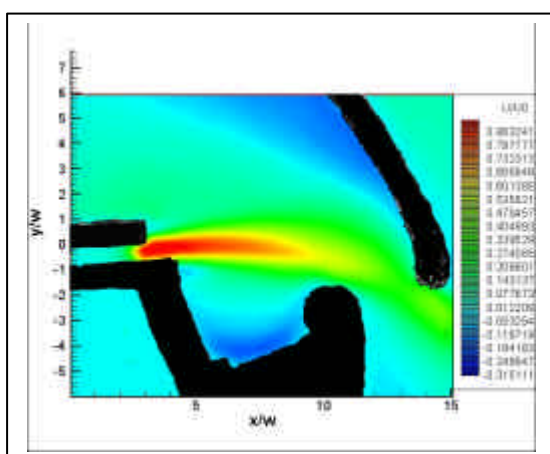


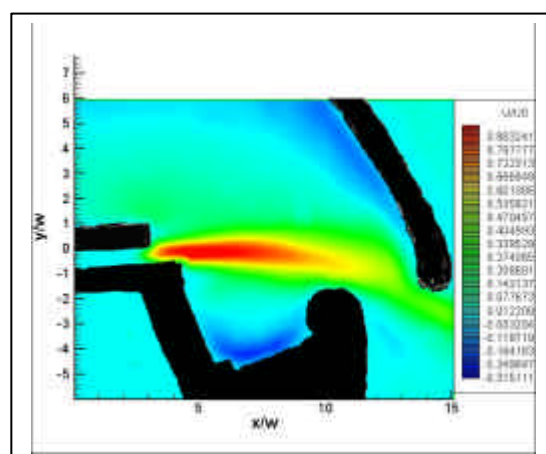
Figura 5.3: Visualizzazioni in sequenza temporale. $Re=7500$, $Fr=0.3$

Effettuate le visualizzazioni preliminari si è poi passati all'analisi PIV; in tabella sono stati riportati gli esperimenti svolti. Cominciamo dunque con l'esaminare come si comporta la velocità assiale u , adimensionata rispetto alla velocità massima u_0 di ogni campo (figura 5.4)

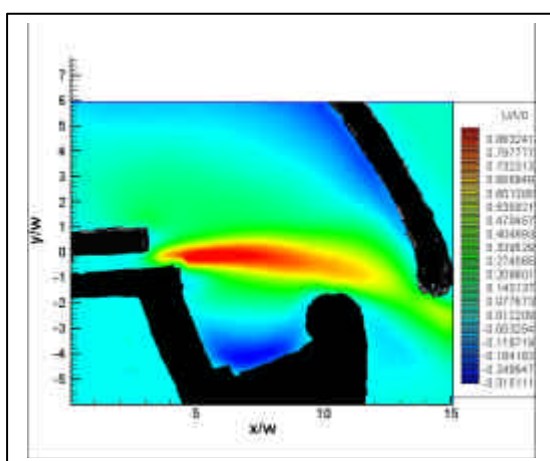
Q(l/s)	u(cm/s)	Re	Fr
0.08	5	2000	0.08
0.16	10	4000	0.16
0.20	12.5	5000	0.20
0.24	15	6000	0.24
0.3	18.75	7500	0.30



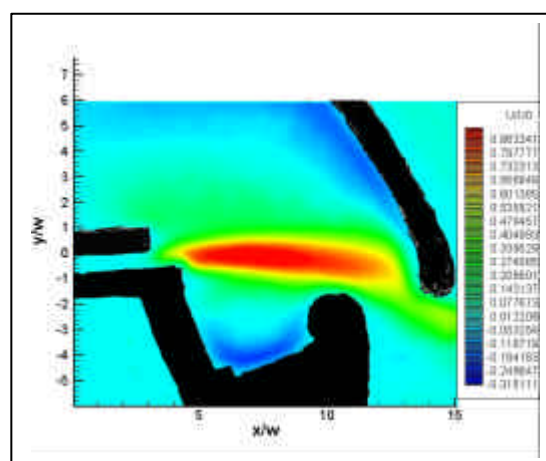
a) Re=2000



b) Re=4000



c) Re=5000



d) Re=6000

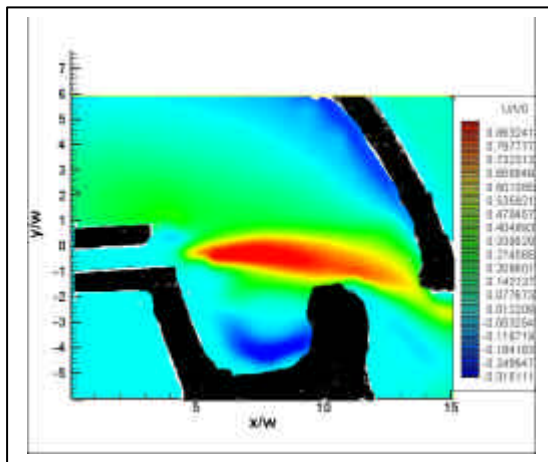
e) $Re=7500$

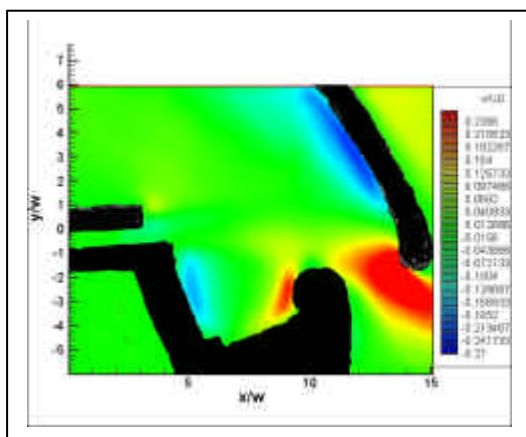
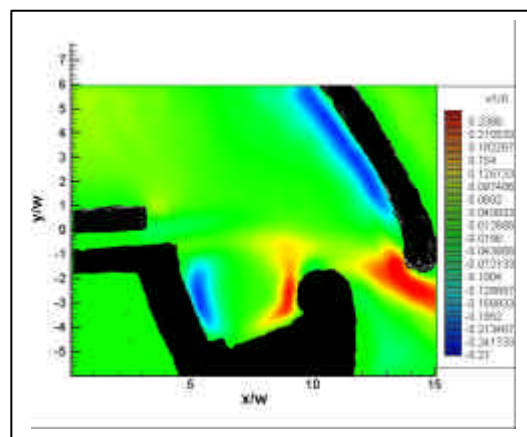
Figura 5.4: Andamento della velocità assiale u/u_0 della velocità al variare del numero di Reynolds

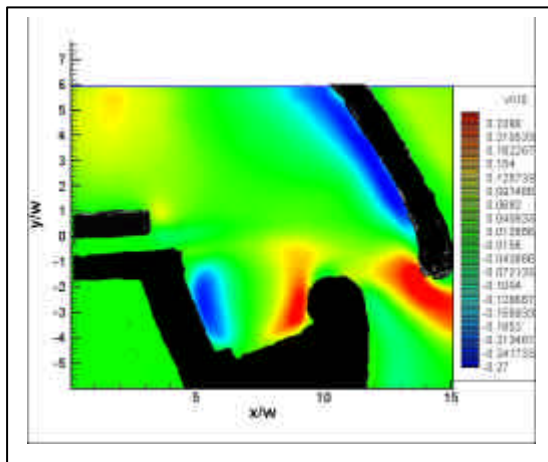
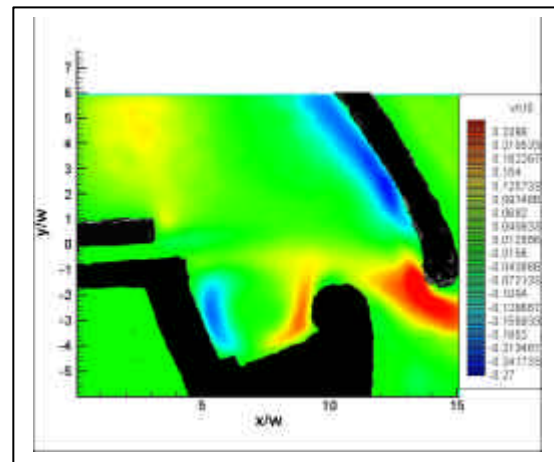
L'andamento del flusso conferma quanto visto dalle visualizzazioni: sono presenti due vortici, il primo dei quali piuttosto intenso e posizionato all'interno del molo.

Anche in questo caso il getto risente della parete laterale, curvando sensibilmente verso ordinate negative: bisogna infatti notare come il canale di uscita non sia orizzontale, ma inclinato verso l'alto di circa 4°

Da notare anche come, all'aumentare del numero di Reynolds si abbia un ispessimento del cuore del getto, mentre l'intensità del vortice all'interno del molo resta pressoché costante.

Nella figura 5.5 viene ora riportato l'andamento della velocità verticale v/u_0 .

a) $Re=2000$ b) $Re=4000$

c) $Re=5000$ d) $Re=6000$

E' ben visibile in queste immagini il vortice che si crea tra la barriera e la parete verticale: questo vortice non è dovuto alle pareti laterali della vasca, come detto in precedenza.

Il flusso dopo essere uscito dal molo prosegue verso il basso, come risulterà più evidente dai campi vettoriali.

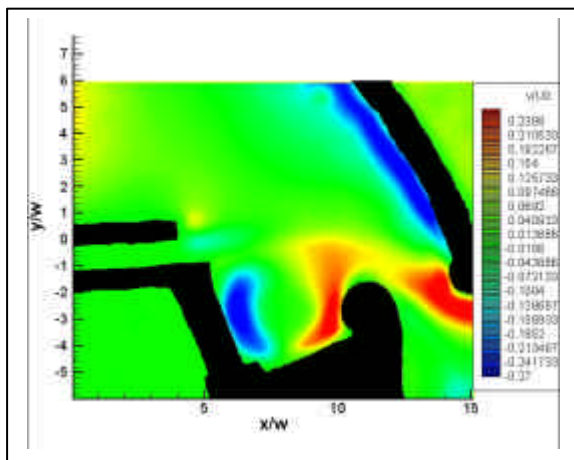
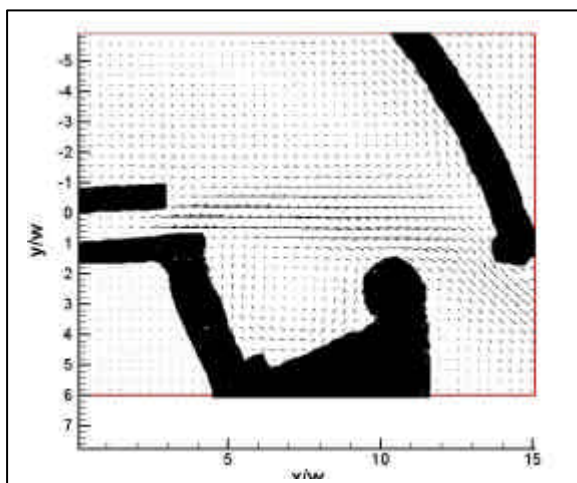
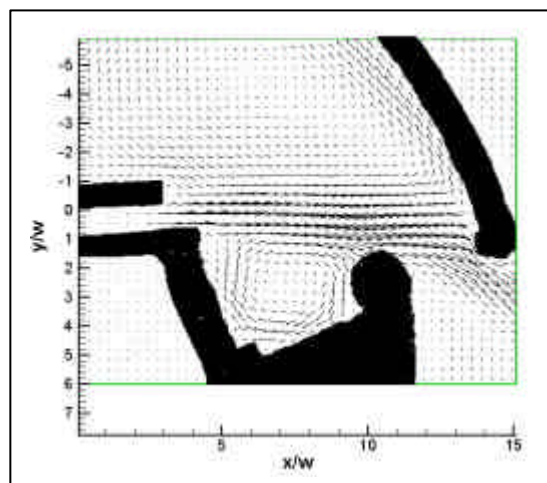
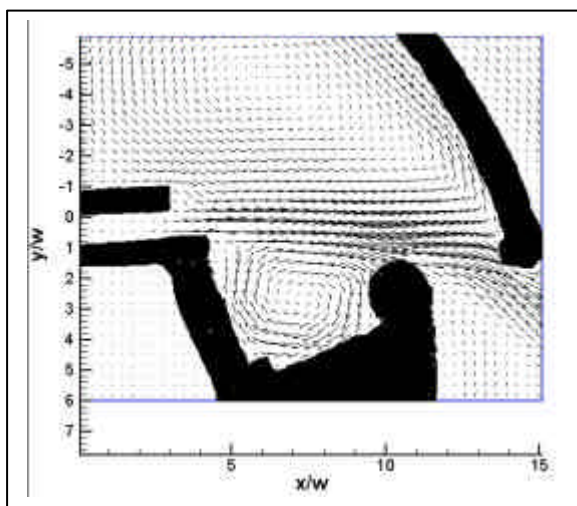
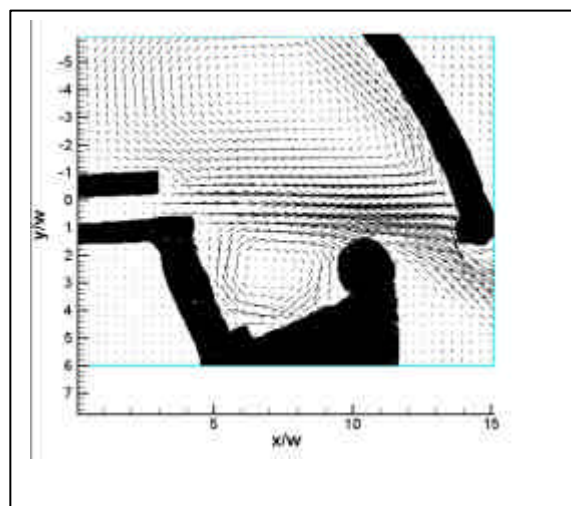
e) $Re=7500$

Figura 5.5: Andamento della velocità verticale v/u_0 della velocità al variare del Reynolds

Bisogna infatti considerare che il condotto d'uscita del getto non è orizzontale, bensì inclinato di $\alpha \approx 4^\circ$. Perciò anche l'effetto di attrazione esercitato sulle velocità e mostrato nelle figure 5.4 risulta essere notevole.

In figura 5.6 è rappresentato l'andamento vettoriale del campo.

a) $Re=2000$ b) $Re=4000$ c) $Re=5000$ d) $Re=6000$

Dal campo vettoriale è possibile notare il punto di ristagno, localizzata sulla diga foranea: una parte del flusso risale la barriera mentre l'altra esce dal molo. Con l'aumento della velocità, la percentuale di portata che risale la barriera diminuisce rispetto alla portata totale.

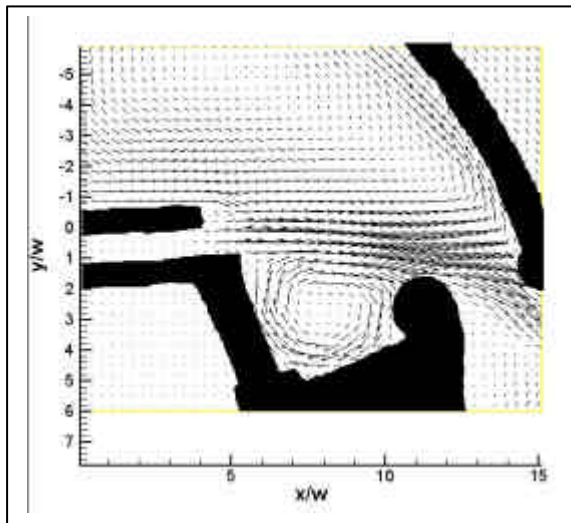
e) $Re=7500$

Figura 5.6: Andamento vettoriale della velocità ai vari numeri di Reynolds

Si riportano in figura 5.7 e figura 5.8 due andamenti di vorticità, che mettono in evidenza l'intensità dei due vortici.

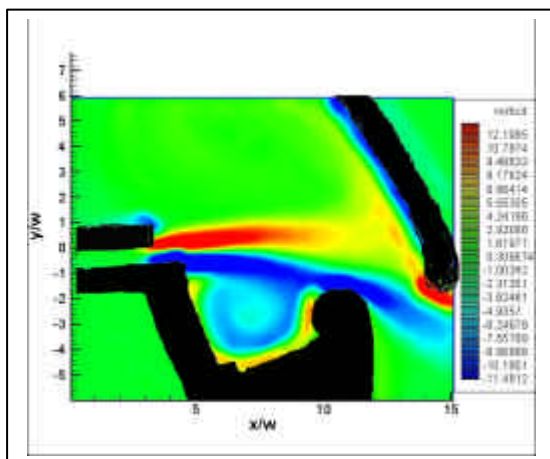


Figura 5.7: Andamento della vorticità per $Re=4000$

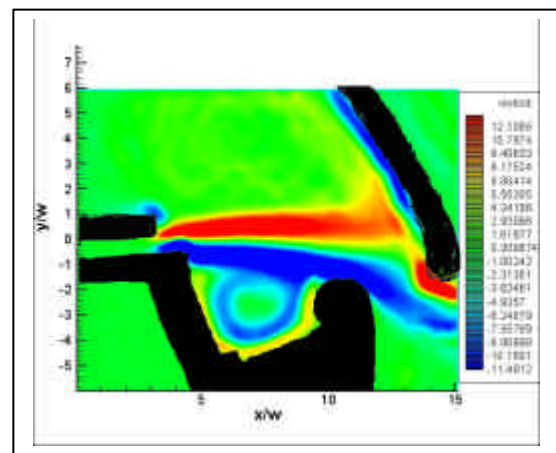


Figura 5.8: Andamento della vorticità per $Re=6000$

L'asse del getto, ricavato come massimo del modulo per ogni sezione, evidenzia che, dopo una zona iniziale dovuta al canale asimmetrico, il flusso percorre sempre la stessa via, essendo forzato dalla strettoia creata della barriera (figura 5.9). Bisogna tener conto che la misura del modulo è inizialmente falsata dalla presenza del condotto asimmetrico.

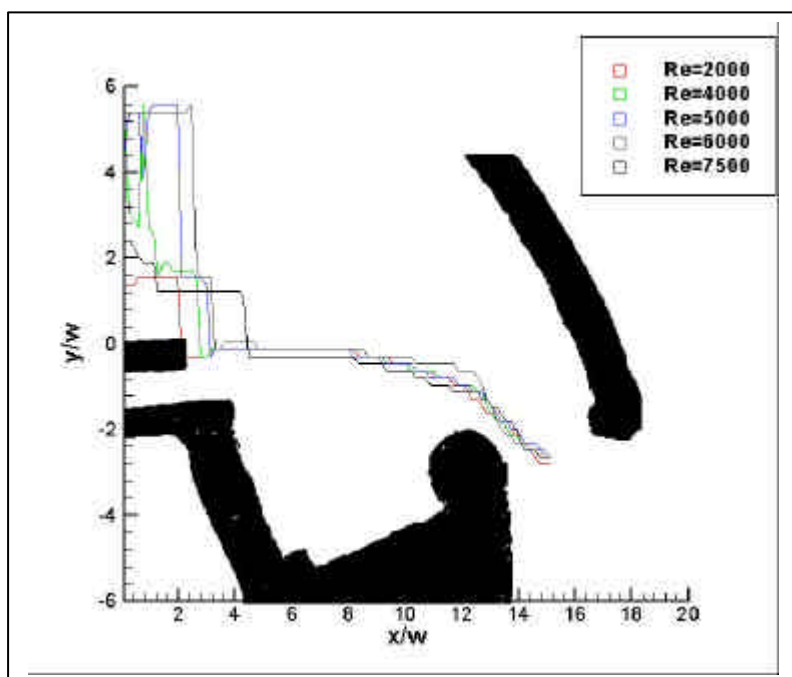


Figura 5.9: Asse del getto

5.2 Esperimenti senza diga foranea

Si è successivamente passati all'analisi del flusso nel caso in cui non sia presente la diga foranea; si è dunque provveduto a rimuovere la barriera realizzata in cemento.

Le condizioni degli esperimenti sono riportate in tabella.

Q(l/s)	U(cm/s)	Re	Fr	telai
0.08	5	2000	0.08	No
0.16	10	4000	0.16	No + si
0.20	12.5	5000	0.20	No
0.24	15	6000	0.24	No + si
0.30	18.75	7500	0.30	No + si

Dalle visualizzazioni ci si è resi conto che, per portate elevate, il ricircolo creato dalla vasca chiusa era notevole. Si è dunque deciso di progettare e far realizzare dei telai su cui montare delle reti metalliche con lo scopo di rompere le strutture vorticose del flusso, e ridurre quindi la velocità che il vortice induce sul getto.

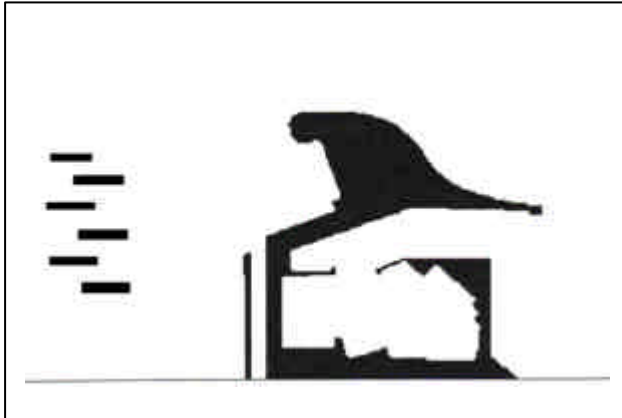
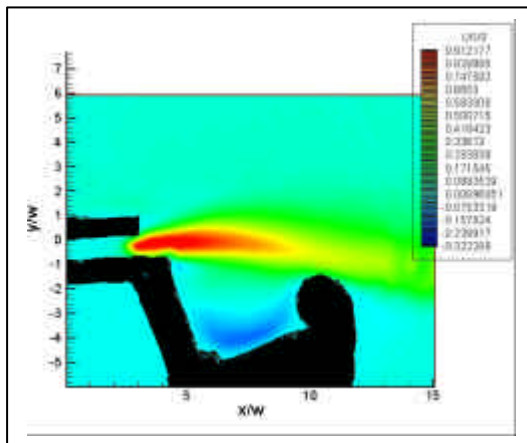


Figura 5.10:
Configurazione con sei
telai

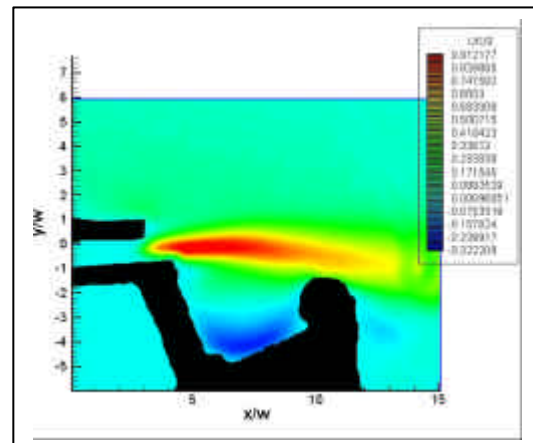
Innanzitutto è stata realizzata una campagna di visualizzazioni, per valutare quale configurazione avrebbe garantito la maggior dissipazione senza modificare il campo fluidodinamico; la scelta, riportata qualitativamente in figura 5.10, è stata di inserire tre schiere da due telai ognuna; il primo di ogni schiera è adiacente alla parete. In questo modo le strutture sono abbastanza lontane dal getto, in modo da non influenzarne l'andamento.

Con l'intento di valutare l'errore che si commette facendo esperimenti in ambiente limitato, si è proceduto a ripetere le esperienze con e senza i telai, nelle medesime condizioni fluidodinamiche, cioè stessi numeri di Froude e di Reynolds. L'ultima colonna della tabella indica quali esperimenti sono stati replicati con l'inserimento dei telai.

In figura 5.11 sono riportati gli andamenti di u/u_0 a due numeri di Reynolds differenti; si nota, per $Re=5000$, un allungamento della zona a velocità massima ed una maggiore intensità del vortice interno al molo rispetto a $Re=2500$.

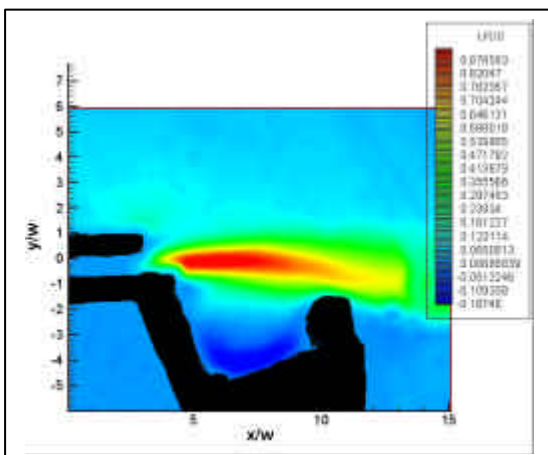


a)

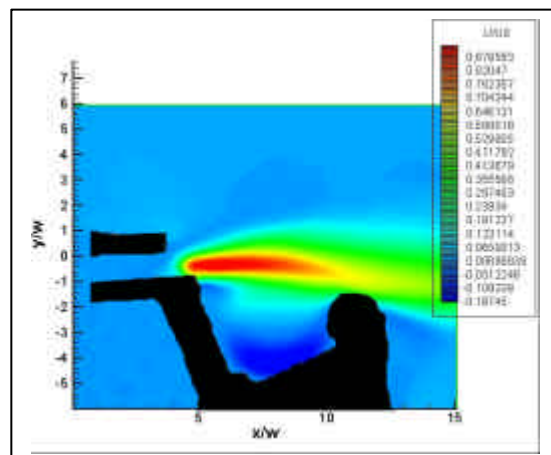


b)

Figura 5.11: Andamento di u/u_0 per a) $Re=2000$, b) $Re=5000$



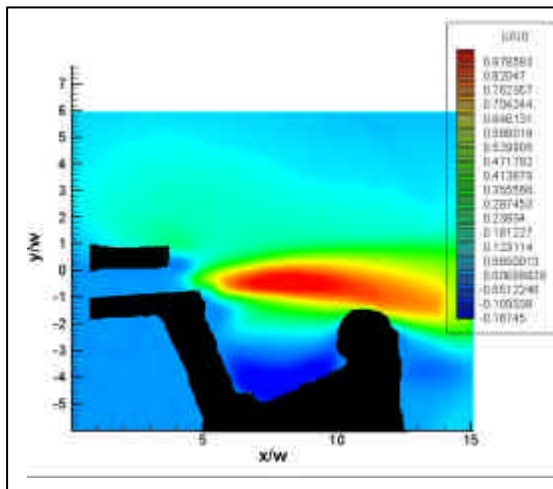
a)



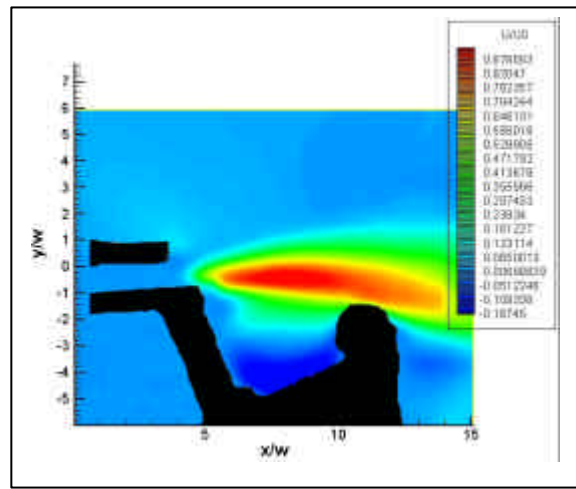
b)

**Figura 5.12: Andamento di u/u_0 per $Re=4000$. Confronto :
a) senza telai e b) con telai**

Viene ora riportato in figura il confronto tra l'andamento senza i telai e con i telai (figure 5.12, 5.13, 5.14). Si nota che, nel caso in cui sono presenti i telai, il campo presenta velocità assiali pressoché nulle per ordinate positive, tuttavia né l'inclinazione del flusso dovuto all'effetto Coanda, né lo spessore del getto risultano variati sensibilmente.

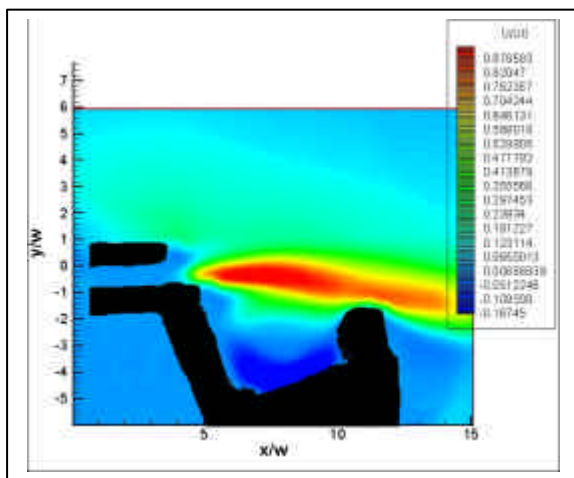


a)

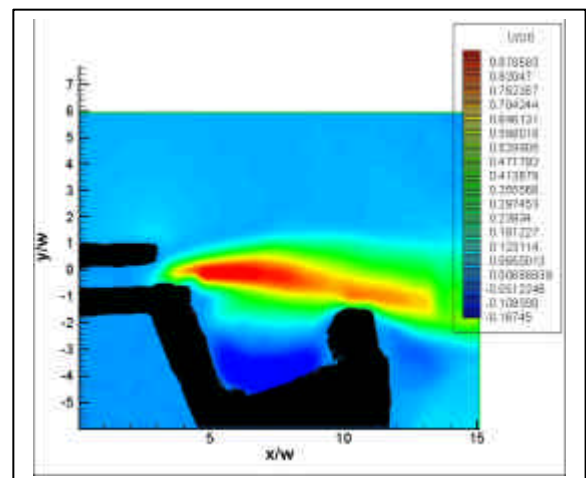


b)

Figura 5.13: Andamento di u/u_0 per $Re=6000$. Confronto: a) senza telai e b) con telai



a)



b)

Figura 5.14: Andamento di u/u_0 per $Re=7500$. Confronto: a) senza telai e b) con telai

Anche nei casi a numeri di Reynolds più elevati si vede come le velocità assiali non siano presenti per ordinate positive. Si riscontra, per Reynolds pari a 7500 senza i telai, un leggero allungamento della zona a velocità massima, dovuto alla velocità indotta dal vortice, che causa la compressione del getto.

Risulta anche in questo caso molto utile analizzare la componente verticale di velocità v/u_0 , confrontata nei due casi (figura 5.15 , 5.16 e 5.17)

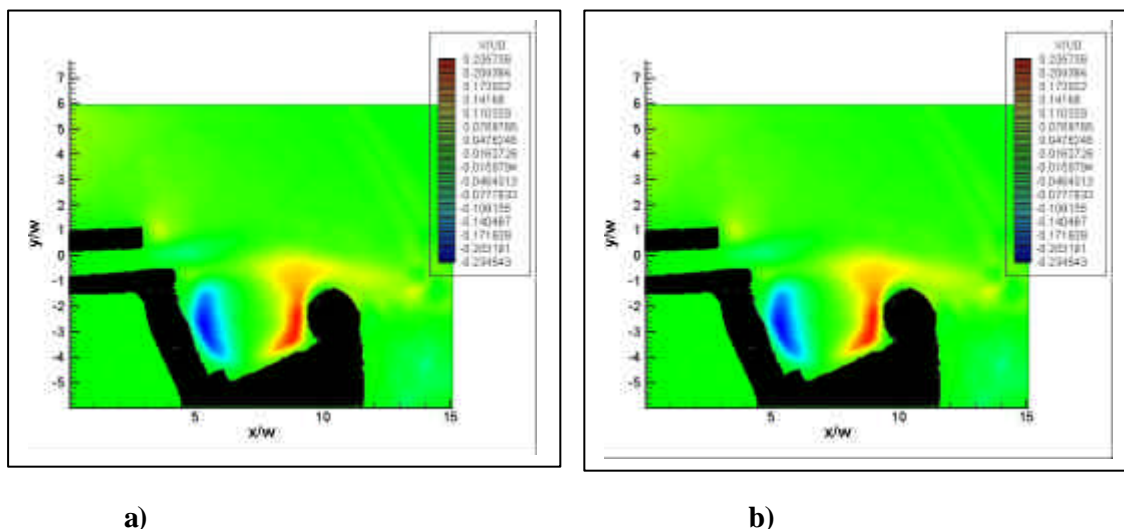


Figura 5.15: v/u_0 a) con la presenza dei telai b) senza i telai. $Re=4000$

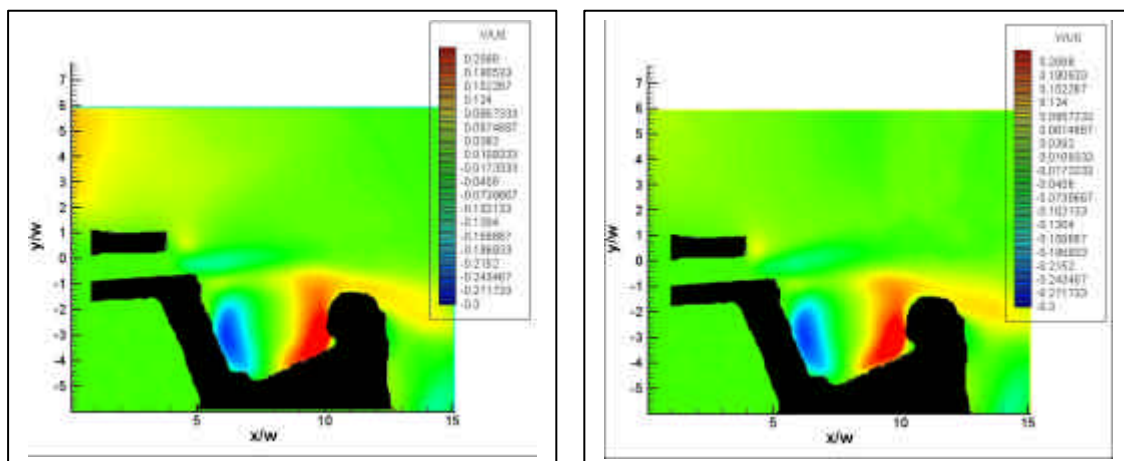


Figura 5.16: v/u_0 con la presenza dei telai (destra) e senza i telai (sinistra). $Re=6000$

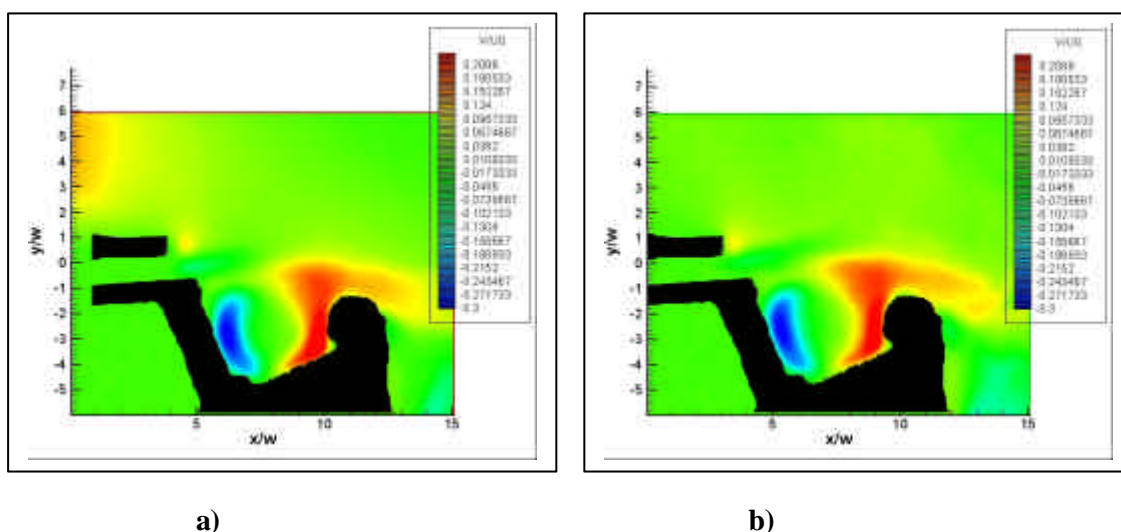


Figura 5.17: Andamento di v/u_0 per $Re=7500$. Confronto : a) senza telai e b) con telai

In questo caso si vede, anche se non benissimo, che al centro del getto la velocità verticale tende, nel caso con i telai a essere più accentuata per le ordinate positive mentre la velocità sulla parte superiore del campo risulta essere quasi completamente annullata. Tale effetto è ben rappresentato nel campo vettoriale (figura 5.18 e 5.19)

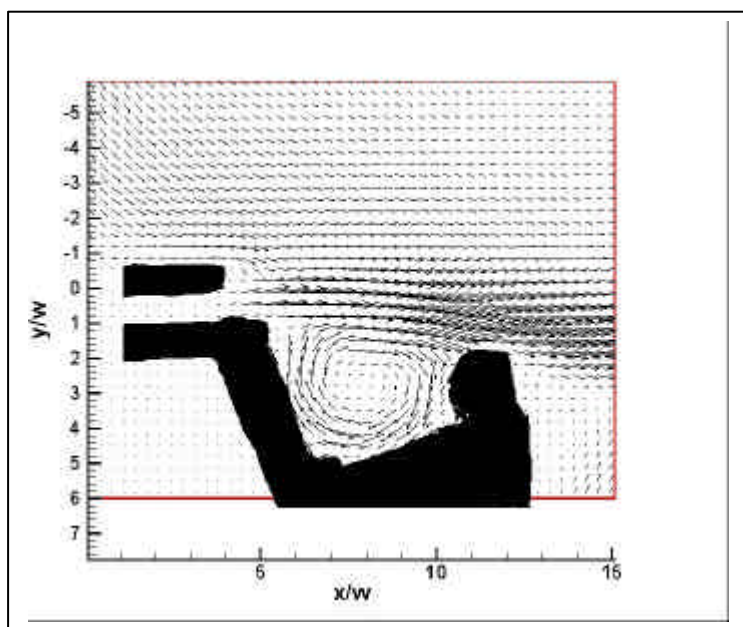


Figura 5.18a: Andamento vettoriale di velocità per $Re=7500$ senza l'ausilio dei telai.

In entrambi i casi si vede che il molo agisce proprio come la parete laterale del caso descritto nei capitoli precedenti, generando un effetto Coanda anche più forte di quei casi: il vortice che si crea al suo interno è infatti analogo a quello creato dalla parete, ma in questo caso non sono presenti vortici controrotanti che ne dissipano la forza. La sua intensità, rispetto all'effetto Coanda base, risulta dunque maggiore così come la deviazione del flusso.

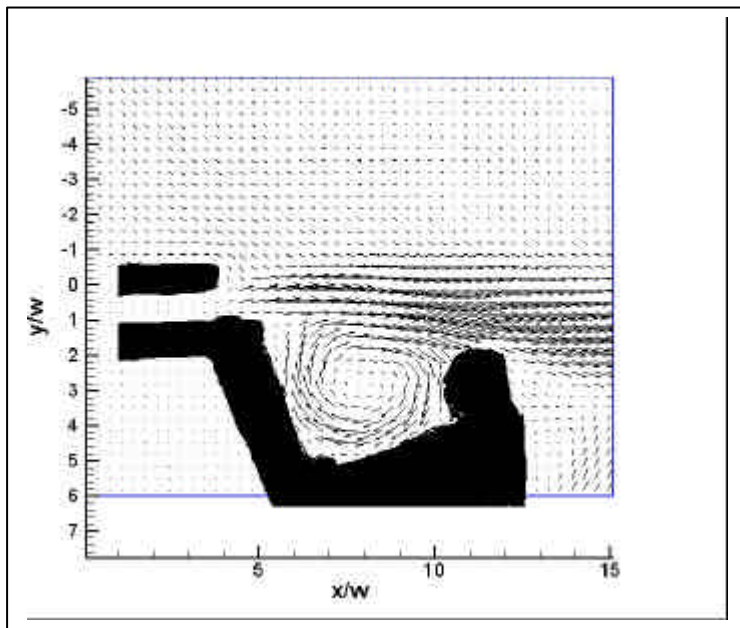
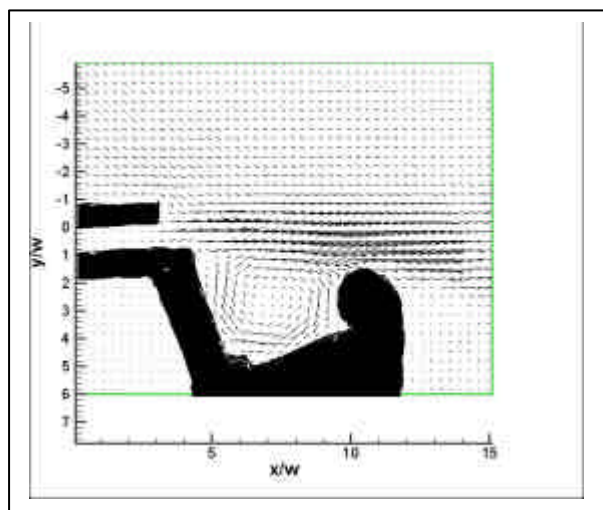
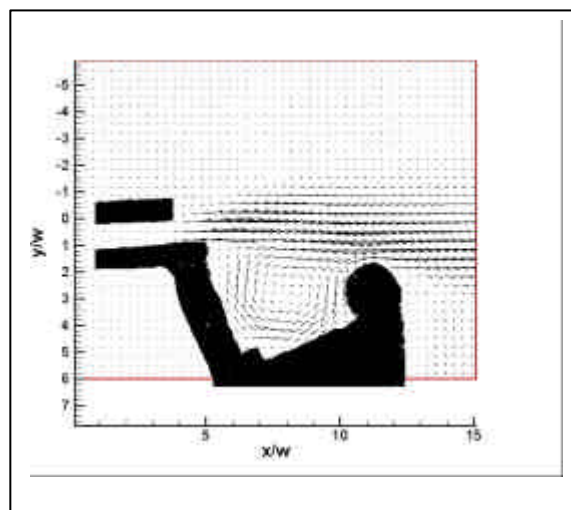


Figura 5.18b: Andamento vettoriale di velocità per $Re=7500$ con l'ausilio dei telai.

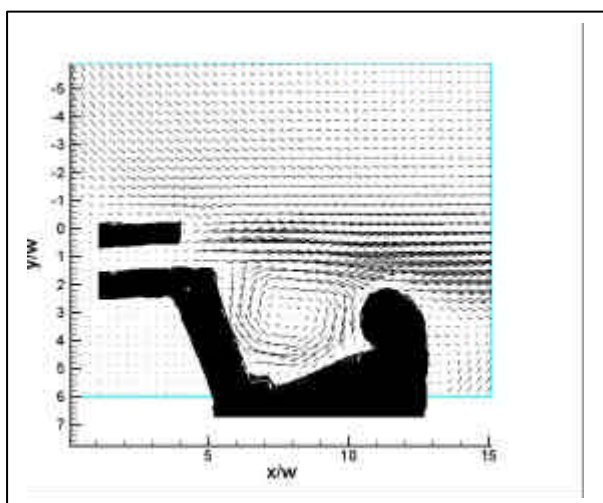
Dal campo vettoriale si vede molto bene l'effetto dei telai, che hanno quasi annullato la velocità verticale nella zona al di sopra del canale di ingresso. Il flusso ne risulta solo in minima parte cambiato: vi è una minima tendenza ad allargarsi in presenza dei telai.



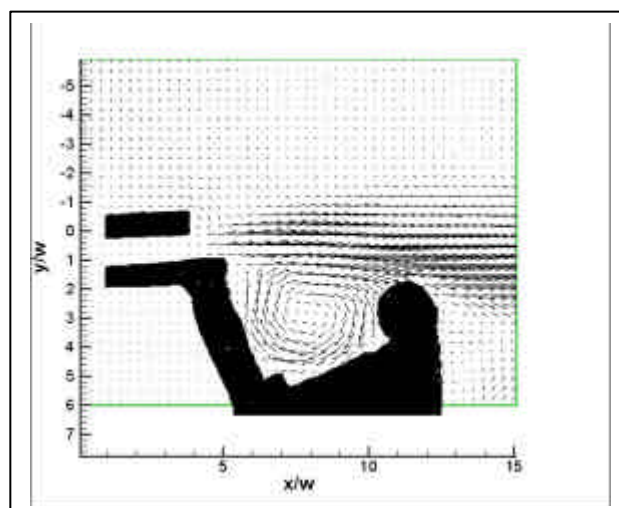
a)



b)

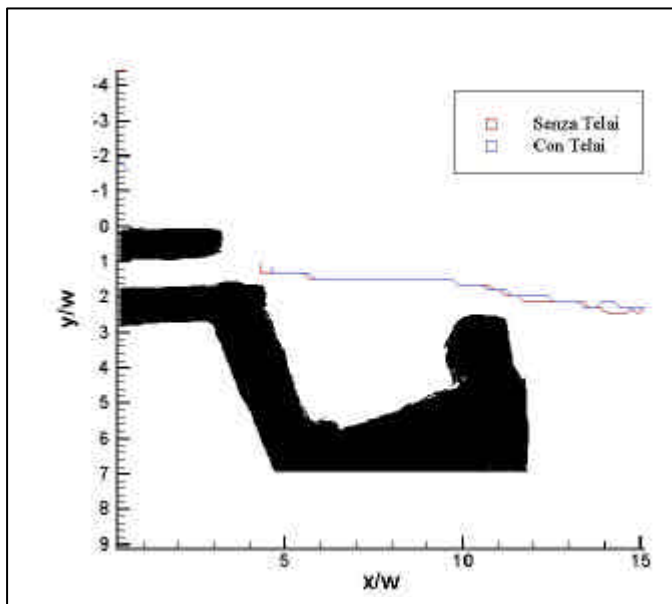


c)

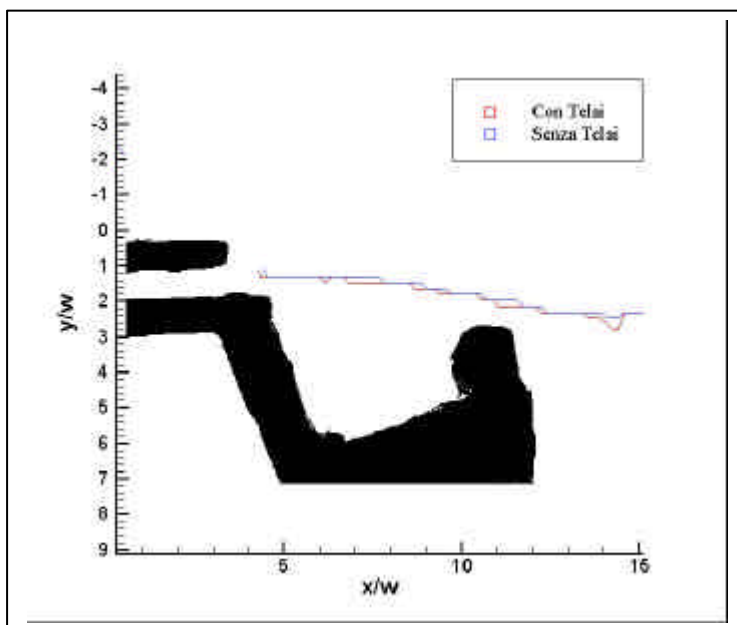


d)

Figura 5.19: Andamento vettoriale della velocità ;a) Re 4000 senza telai b)Re=4000 senza telai c)Re=6000 senza telai d)Re=6000 con telai



a)



b)

**Figura 5.20: Andamento dell'asse di velocità per a) $Re=6000$
b) $Re=7500$**

In figura 5.20 viene rappresentato l'asse del getto, individuato come massimo del modulo di velocità per ogni sezione. Vengono comparati gli andamenti per uno stesso numero di Reynolds, con e senza l'introduzione dei telai. Si vede che la differenza è quasi inesistente.

L'effetto Coanda, generato dal vortice all'interno del molo, è comunque ben visibile: il flusso devia verso la parete, tenendo conto del fatto che il canale del getto è inclinato verso l'alto.

Lo studio effettuato ha dunque dimostrato che nell'apparato sperimentale utilizzato e nel range di variazione del numero di Reynolds, l'approssimazione che si fa utilizzando la vasca chiusa è del tutto accettabile. Nell'esperimento con numero di Reynolds più elevato analizzato (7500) ha iniziato ad evidenziarsi il problema della compressione del flusso causata dal vortice generato dalle pareti laterali; tale problema sarebbe stato sicuramente più rilevante per valori di velocità più elevati.

L'effetto Coanda nella configurazione completa senza la diga foranea si crea a causa del vortice che si genera all'interno del molo: il getto viene attratto verso il basso dalla sua azione. All'aumentare del numero di Reynolds tale effetto aumenta.

5.3 Esperimenti in condizioni barocline

L'ultima campagna di esperimenti è stata realizzata con l'intento di valutare l'interazione tra un getto di acqua dolce che immette in un ambiente di acqua salata.

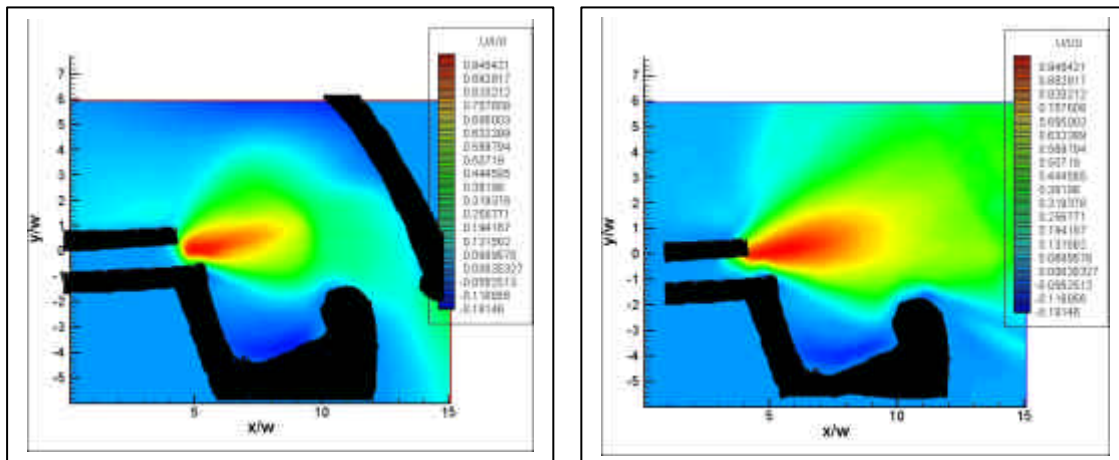
Si è pertanto provveduto, mediante del comune sale marino, a raggiungere una densità di 1020 kg/m^3 per l'acqua; il valore è stato verificato mediante l'impiego di un salinometro.

Anche in questo caso è stata preventivamente realizzata una serie di visualizzazioni, per avere una idea del comportamento del flusso e per definire le condizioni in cui realizzare gli esperimenti successivi. Ci si è resi conto che la velocità del flusso d'acqua dolce, galleggiando sull'acqua salata, è molto più elevata del caso barotropico. Ci si è dunque limitati ad analizzare due portate, con e senza la diga foranea.

Per prima cosa si è riempito il serbatoio con acqua a densità 1020 kg/m^3 , riempiendo con essa la vasca e lasciando girare il sistema solamente con acqua salata, per raggiungere condizioni di regime. E' stata chiusa la valvola di accesso al serbatoio d'acqua salata e contemporaneamente è stata aperta quella collegata con il serbatoio di acqua dolce: in tal modo si cambia l'alimentazione del circuito idraulico.

Si è provveduto a cronometrare il tempo trascorso dall'immissione d'acqua dolce, in modo da avere, all'inizio della ripresa, sempre la stessa quantità d'acqua dolce immessa, e dunque la stessa densità di acqua. E' in tal modo possibile il controllo della stratificazione.

Naturalmente la ripresa viene fatta sulla superficie libera: non si ha pertanto alcuna informazione su ciò che avviene nelle sezioni profonde.



a)

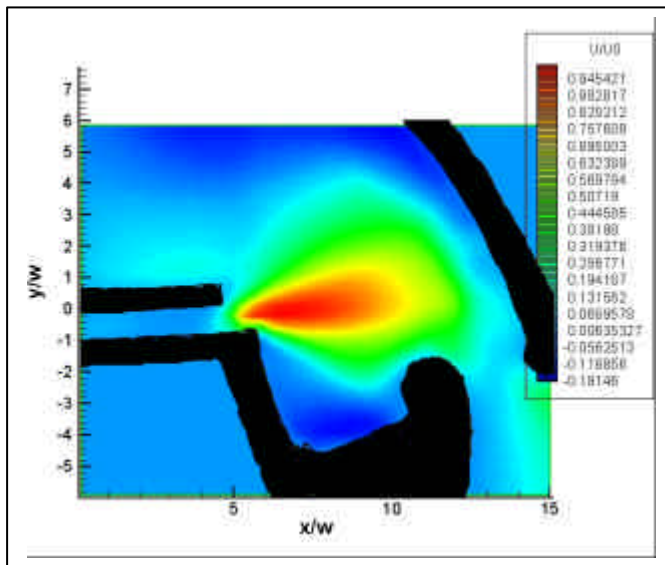
b)

Figura 5.21: andamento di u/u_0 per $Re=2000$ a) con diga , b) senza diga

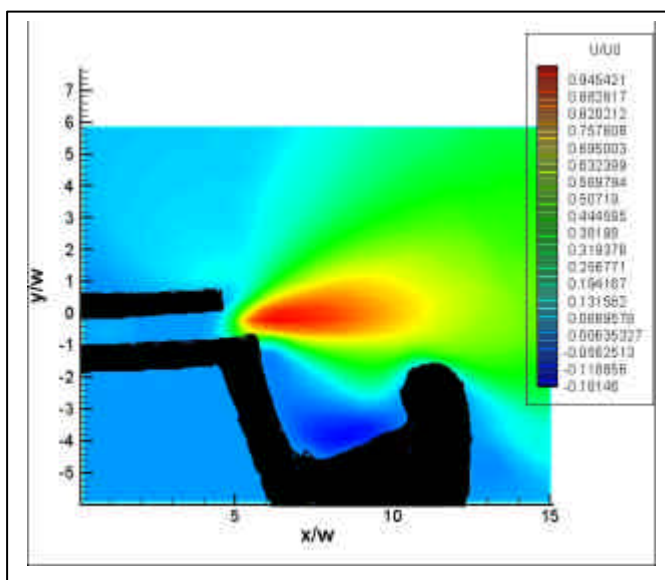
In figura 5.21 è riportato il confronto tra ciò che avviene in condizioni barocline con e senza la diga foranea. Si nota immediatamente che rispetto al caso barotropico il getto si disperde in maniera molto maggiore. Si nota altresì che il vortice all'interno del molo non è più così intenso e ciò provoca la quasi scomparsa dell'effetto Coanda: il flusso prosegue ora in modo pressoché parallelo al canale d'uscita del getto.

Nel caso in cui è presente la barriera si nota una zona adiacente alla diga stessa in cui la velocità è praticamente nulla.

Nella figura 5.22 è presentato il confronto a $Re=4000$ tra il caso con barriera e quello senza.



a)



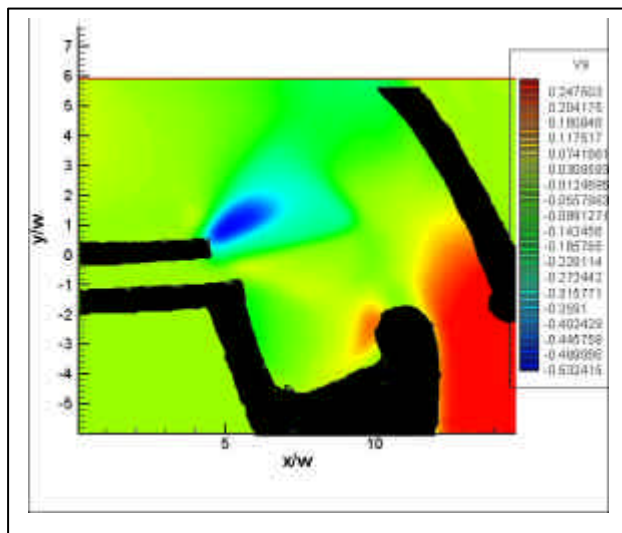
b)

Figura 5.22: andamento di u/u_0 per $Re=4000$ a) con diga , b) senza diga

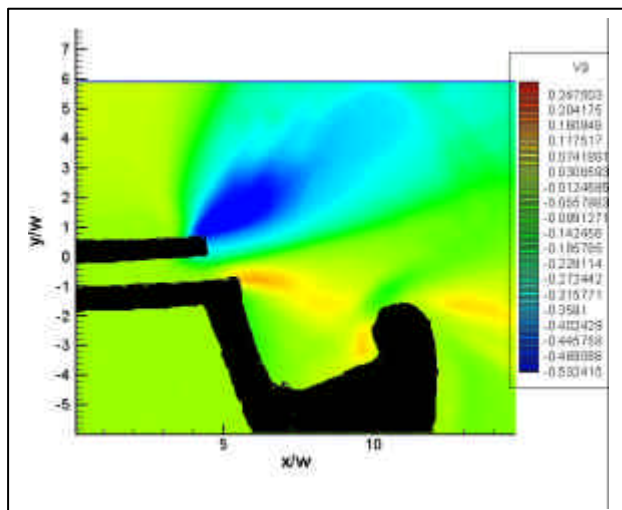
Si nota anche che la presenza della diga foranea non ha più l'importanza vista precedentemente: il flusso a valle viene deviato, ma rimane una certa velocità orizzontale. Anche il flusso a monte della barriera non ne viene influenzato in maniera apprezzabile.

Nella figura 5.23 viene riportato il confronto tra le velocità verticali, adimensionate con la velocità massima assiale.

L'andamento della velocità verticale conferma che il vortice che si forma nel molo è molto piccolo e che il flusso ne è molto poco influenzato.



a)



b)

Figura 5.23: andamento di v/u_0 per $Re=2000$ a) con diga , b) senza diga

6 Conclusioni

Lo studio effettuato ha messo in evidenza come, posizionando una parete lateralmente ad un getto, si abbia un effetto di attrazione che porta a far incidere il getto sulla parete stessa, in un punto la cui posizione è stata indicata con x_r (punto di riattacco).

Tale effetto, noto come effetto Coanda è stato verificato al variare del numero di Froude

$(0.0473 \leq Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} \leq 0.3231)$ mantenendo costante il numero di Reynolds

$(Re_h = \frac{uh}{\nu} = 4000)$ ed effettuando sette esperimenti.

Successivamente sono stati realizzati altri sette esperimenti al variare del numero di Reynolds $(3000 \leq Re_h \leq 16000)$, mantenendo costante il numero di Froude $(Fr = 0.18)$.

Da queste due serie di esperimenti è risultata la sostanziale indipendenza della lunghezza di riattacco dal numero di Froude nell'intervallo investigato.

E' risultata invece una dipendenza più o meno lineare dal numero di Reynolds.

I risultati ottenuti con la tecnica PIV risultano in buon accordo con esperimenti realizzati precedentemente con lo stesso apparato sperimentale.

Si è poi analizzata una configurazione più complessa, riprodotte in scala il porto di Pescara.

Sono stati effettuati dieci esperimenti con e senza la diga foranea.

In particolare è stata effettuata una campagna di esperimenti con lo scopo di valutare l'effetto del ricircolo causato dalla vasca chiusa. Sono stati progettati e fatti realizzare appositi telai, sui quali è stata applicata una rete metallica, con lo scopo di dissipare il vortice creato dal ricircolo.

Sono state effettuate tre prove con numero di Reynolds e numero di Froude uguali, con e senza i telai.

Tali esperimenti hanno messo in luce come le velocità assiali non siano praticamente influenzate dal ricircolo, mentre le velocità verticali presentano qualche differenza, soprattutto nella zona sopra la sezione d'uscita del getto.

Si è infine effettuata, sempre sulla configurazione portuale, una campagna di esperimenti in condizioni barocline, con lo scopo di analizzare eventuali differenze dal caso barotropico. Queste analisi sono state effettuate per due numeri di Reynolds, con e senza la presenza della diga foranea.

I risultati hanno messo in luce come l'effetto Coanda scompaia quasi completamente, principalmente a causa del fatto che si genera un vortice molto debole all'interno del molo.

La vasca di misura è stata realizzata in plexiglass prevedendo la possibilità di studiare il comportamento del flusso nelle varie sezioni lungo la verticale, ad esempio tramite l'utilizzo di un laser, mediante il quale sarà possibile studiare la presenza e gli effetti di una eventuale stratificazione.

Bibliografia

- Adams E.W., Johnston J.P., (1988): "*Effects of the separating shear layer on the reattachment flow structure. Part 2: Reattachment length and wall shear stress*", experiment in fluids, Vol 6, pagg 493-499
- 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*". McGraw-Hill
- Anderson D.(2001): "*Fundamentals of Aerodynamics*". McGraw-Hill
- 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.
- Ayukawa K.,Shakuchi T., (1976): "*Analysis of a jet attaching to man offset parallel plate*", Bulletin of the JSME, Vol19, pagg 395-405.
- Bashir J., Uberoi M.S., (1975): "*Experiments on turbulent structure and heat transfer in a two dimensional jet*", Phys.Fluids, Vol 18.
- Bourque C.,(1967): "*Reattachment of a two-dimensional jet to an adjacent lateral plate*". In advances in Fluidics Ed.By F.Brown ASME, New York, pagg 192-204
- Bourque C., Newmann G., (1960): "*Reattachment of a two-dimensional incompressible jet to an adjacent flat plate*". Aerion Quat 11, pagg 201-232
- Eaton J.K., Johnston J.P., (1981): "*A review of research of subsonic turbulent flow reattachment*", AIAA Journal, Vol 19 pagg 1093-1100.
- Geropp D., Odenthal H.J., (2000): "*Drag reduction of motor vehicles by active flow control using the Coanda effect*", experiment in fluids, Vol 28, pag 74-85.
- Gogineni S., Shih C., (1997): "*Experimentla investigation of the unsteady structure of a transitional plane wall jet*". Experiments in fluids, Vol 23 pagg 121-129.
- Hoch J., Jiji L.M., (1981): "*Two-dimensional turbulent offset jet-boundary interaction*". Journal of Fluids Engineering, Vol 103, pagg 154-161.
- Kim D.S., Yoon S.H., Lee D.H., Kim K. C., (1996): "*Flow and heat measurement of a wall attaching offset jet*" Int. J. Heat Mass Transfer. Vol 39 pagg 2907-2913

- Kuang J., Hsu C. T., Qiu H., (2001): "*Experiments on vertical turbulent plane jets in water of finite depth*". J. Engineering Mechanics, pagg 18-25.
- Kundu K.P. (1990): "*Fluid mechanics*"
- Lai J.C.S.; Lu D., (1996): "*Effect of wall inclination on the mean flow and turbulence characteristics in a two dimensional wall jet*", Int J. Heat and Fluid Flow , Vol 17, pagg 377-385
- Lund T.S., (1986). "*Augmented thrust and mass flow associated with two dimensional jet reattachment*". AIAA Journal, Vol 24, n°12, pagg1964-1970.
- Nars A., Lai J. C.S.,(1997) : "*Comparison of flow characteristic 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.,(1998) : "*The effect of wall inclination on an inclined offset jet*". Iran University of Science & Technology e School of Aerospace and Mechanical Engineering Australian Defence Force Academy
- Newmann 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
- Palfrey J.R.R., Liburdy J.A., (1986): "*Mean flow characteristics of a turbulent offset jet*". Journal of Fluids Engineering, Vol 108 pagg 82-88
- Romano G.P., (2002): "*Dispense del corso di Aerodinamica sperimentale*". Ingegneria Aerospaziale, Università degli Studi di Roma La Sapienza.
- Sawyer R.A., (1963): "*Two dimensional reattaching flows including the effects of curvature on entrainment*", Journal of Fluid Mechanics, Vol 17, pagg 481-498
- Schlichting H., (1979): "*Boundary layer Theory*", McGraw –Hill.
- Song H.B., Yoon S.H., Lee D.H., (1999): "*Flow and heat transfer characteristics of a two dimensional oblique wall attaching offset jet*". International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 43, pagg 2395-2404
- Yoon S.H., Kim K.C., Kim D.S., Chung M.K. (1993): "*Comparative study of a turbulent wall-attaching offset jet and plane wall jet*". KSME, Vol 7, pagg 101-112