

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale
Laurea Specialistica in Ingegneria Civile



Caratterizzazione del campo di moto e turbolenza in un serbatoio di acque basse di dimensioni variabili: analisi con tecnica LSPIV

Relatore:
Prof. Ing. Enrico Orsi
Correlatrice:
Ing. Erica Camnasio
Correlatore ASP:
Maurizio Rosso

Tesi di Laurea di
Antonella Celenza 733481

Anno Accademico 2009/2010

Indice

Sintesi della tesi	4
Abstract	5
Capitolo 1. Introduzione	6
Capitolo 2. Il trasporto e la sedimentazione	8
2.1 Shallow flow	8
2.2 Trasporto di sedimenti	9
2.3 La sedimentazione nei bacini artificiali	13
2.3.1. Evoluzione del processo di sedimentazione	14
2.4 Conseguenze dell'interrimento	18
2.4.1. Conseguenze nell'invaso	18
2.4.2. Conseguenze a valle dell'invaso	20
Capitolo 3. Caratteristiche delle tecniche PIV e LSPIV	22
3.1 La tecnica Particle Image Velocimetry	22
3.1.1. Retrosceca storico	22
3.1.2. Principi della PIV	23
3.1.3. Peculiarità della tecnica	25
3.1.4. Sorgenti di Luce: laser	27
3.1.5. Strumenti e tecniche di registrazione delle immagini	28
3.1.6. Metodi di valutazione digitale	32
3.2 La tecnica Large Scale Particle Image Velocimetry	37
3.2.1. Le particelle traccianti	40
3.2.2. La trasformazione delle immagini	45
3.2.3. La precisione del sistema di misura	46
3.3 Applicazione della tecnica LSPIV per fiumi e dighe	47
3.3.1. Applicazione nell'ingegneria fluviale	47
3.3.1.1. Caso studio 1: il fiume Rodano a Visp (Svizzera)	47
3.3.1.2. Caso studio 2: dinamica fluviale tra due pennelli	49

3.3.1.3.	Caso studio 3: il fiume Nagara in Giappone	50
3.3.1.4.	Caso studio 4: misura della portata di piena	52
3.3.2.	Applicazione nelle costruzioni idrauliche: il caso della diga di Les Gloriettes	55
Capitolo 4.	Esperimenti	58
4.1	Set-up sperimentale	58
4.2	Configurazione e dimensioni delle geometrie investigate	61
4.3	Condizioni sperimentali riguardanti la modellazione fisica	63
4.4	Tecniche di misura	65
4.5	Analisi con acqua pulita	66
4.6	Analisi con acqua e sedimenti	67
Capitolo 5.	Flowmanager	71
5.1	Il software	71
5.2	La pre-elaborazione delle immagini	71
5.3	L'elaborazione delle immagini	72
5.4	Il sistema di coordinate	74
5.5	Cross-correlazione	76
5.5.1.	Densità delle particelle	78
5.5.2.	Calcolo della velocità	79
5.5.3.	Window functions	81
5.5.4.	Filtri	82
5.6	Metodi di validazione	85
5.6.1.	Peak validation	85
5.6.2.	Range validation	87
5.6.3.	Moving Average Validation	88
5.6.4.	Average Filter	90
5.7	Metodi di derivazione	91
5.8	Esempio di analisi	92
Capitolo 6.	Risultati dei test con acqua pulita	98
6.1	Software utilizzati per l'analisi del campo di moto	98
6.1.1.	Il software Surfer 8	98

6.1.2.	Il software TECPLOT 9.0	100
6.2	Streamlines e campi di moto vettoriali delle diverse configurazioni	102
6.2.1.	Campo di moto asimmetrico	103
6.2.2.	Campo di moto simmetrico	104
6.2.3.	Channel-like flow (CH-L)	105
6.3	Classificazione del campo di moto	105
Capitolo 7.	Risultati dei test con sedimenti	109
Capitolo 8.	La tecnica UVP	116
8.1	Descrizione della tecnica	116
8.1.1.	Impedenza acustica	117
8.1.2.	Effetto Doppler	118
8.2	Principio di funzionamento	118
8.2.1.	Disposizione delle sonde	121
8.2.2.	Valori ottenuti dall'indagine	123
Capitolo 9.	Studio della turbolenza	125
9.1	Trattazione teorica	125
9.2	Analisi della turbolenza nel serbatoio	128
Capitolo 10.	Conclusioni	134
Ringraziamenti		137
Indice delle figure		138
Indice delle tabelle		143
Bibliografia		144
Fascicolo delle mappe		148

Sintesi della tesi

Nel presente lavoro di tesi è stata studiata l'influenza di due parametri geometrici adimensionali sull'andamento del campo di moto all'interno di un serbatoio rettangolare di acque basse di dimensioni variabili. È essenziale capire quali tipologie di campo di moto e che tipo di strutture turbolente possono svilupparsi per determinate configurazioni geometriche, perché queste determinano i fenomeni di trasporto dei sedimenti e definiscono le zone del bacino soggette ad erosione o deposito.

Sono state analizzate trenta configurazioni, caratterizzate da lunghezze e larghezze diverse, con la tecnica LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) che permette di misurare la distribuzione delle velocità sulla superficie dell'acqua. Sono state analizzate configurazioni del campo di moto sia con acqua pulita sia in presenza di sedimenti trasportati in sospensione.

In base ai valori dei parametri, il campo di moto 2D all'interno del serbatoio può assumere configurazioni simmetriche, asimmetriche o channel-like flow. Inoltre, la presenza dei depositi stessi influenza la tipologia del campo di moto che si crea all'interno del bacino.

Una volta esaminati i campi di moto per diverse configurazioni geometriche, si è voluto studiare alcune caratteristiche della turbolenza analizzando i valori di velocità ottenuti tramite misure UVP, ottenendo mappe dell'energia cinetica media della corrente e dell'energia associata alle componenti fluttuanti della velocità.

Le mappe sviluppate verranno presentate sottoforma di fascicolo allegato.

Parole chiave: shallow flow, campo di moto, sedimentazione, geometria del serbatoio, LSPIV, UVP, turbolenza.

Abstract

In this thesis the influence of two dimensionless geometric parameters on flow field in a shallow reservoir was investigated. It is essential to understand what kind of flow field and what kind of turbulent structures can develop for different geometric configurations because these determine the sediment transport and define the areas of the basin where erosion or deposit can occur.

Thirty configurations characterized by different lengths and widths were analyzed with LSPIV technique. This allows measurement of the surface velocities. Configurations were tested with clean water and with suspended sediments. Based on the values of parameters, the flow field can be symmetrical, asymmetrical or channel-like flow. Moreover, the deposits influence the type of flow field in the basin.

After investigation of the flow fields for different geometrical configurations, were studied some features of turbulence by analyzing the velocity values obtained by UVP measurements. Maps of the average kinetic energy and maps of the energy associated with the fluctuating velocity components were obtained. The maps developed are presented in the appendix.

Keywords: shallow flow, flow field, sedimentation, reservoir geometry, LSPIV, UVP, turbulence.

Capitolo 1. Introduzione

Conoscere sia l'andamento della corrente sia la velocità del fluido all'interno di un alveo o di una tubazione in pressione, ma soprattutto quali parametri geometrici determinano il campo di moto stesso, è uno degli aspetti di primaria importanza nell'ambito dell'ingegneria idraulica. E' facile immaginare come questi giochino un ruolo determinante per quanto riguarda il trasporto e la sedimentazione di particelle solide in un qualsiasi alveo, sia naturale che artificiale. Si pensi, infatti, al campo della produzione di energia elettrica, all'irrigazione, e a tutti gli ambiti e agli scopi industriali e domestici in cui è essenziale l'utilizzo di acqua.

La deposizione dei sedimenti sul fondo di alvei, serbatoi o di tubature, riduce in primo luogo la capacità e può inoltre provocare intasamenti e ostruzioni di strutture meccaniche. Una gestione corretta dell'alveo può risultare così molto problematica se non si è a conoscenza del comportamento dei sedimenti trasportati dall'acqua. Un altro problema molto importante, strettamente legato all'andamento del fluido, è costituito dai processi erosivi che si sviluppano in prossimità delle pareti del canale.

La pianificazione e la progettazione di un serbatoio sostenibile richiedono, quindi, la previsione accurata del trasporto solido, erosione e deposizione; informazioni che si ottengono dallo studio dettagliato del campo di moto. Questo in genere è caratterizzato da un getto principale in entrata nel serbatoio circondato da zone di ricircolo. Una buona conoscenza dell'evoluzione spaziale del campo di velocità può permettere di individuare le zone critiche che potrebbero essere maggiormente soggette a sedimentazione o zone a velocità elevata che potrebbero portare a erosioni delle sponde del serbatoio.

La forte dipendenza della cinematica del fluido dalla geometria è la base del seguente studio sperimentale. È essenziale poter capire, infatti, quali tipologie di campo di moto possono svilupparsi per determinate configurazioni geometriche.

Sarà quindi studiata l'influenza di due parametri geometrici adimensionali sull'andamento del campo di moto all'interno di un serbatoio rettangolare di dimensioni variabili. In particolare il length to width ratio $\left(\frac{L}{B}\right)$ e l' Expansion Ratio $\left(\frac{B}{b}\right)$ governano le caratteristiche del campo di moto, come la forma e le dimensioni delle grandi strutture turbolente, andando a generare campi di moto simmetrici o campi di moto asimmetrici, nonostante la simmetria geometrica del serbatoio.

Questo lavoro si presenta come un'estensione dell'indagine condotta da Kantoush (2008), il quale iniziò ad analizzare l'influenza della geometria del serbatoio sul campo di moto. I presenti esperimenti hanno esteso il database sperimentale, portando a una visione più completa del fenomeno.

Obiettivo della tesi è la determinazione del campo di moto all'interno di un serbatoio rettangolare di dimensioni variabili attraverso il trattamento di dati sperimentali raccolti dall'Ing. Erica Camnasio del Dipartimento D.I.I.A.R. (Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture viarie, e Rilevamento) del Politecnico di Milano, presso il Laboratorio di Costruzioni Idrauliche LCH della Scuola Politecnica Federale di Losanna EPFL in Svizzera. Tale analisi è preliminare per indagare l'influenza del campo di moto sul deposito dei sedimenti e quindi sulla trapping efficiency.

I dati raccolti sono costituiti da immagini LSPIV ottenute mediante una fotocamera posizionata sopra il serbatoio e da misure di velocità attraverso sonde UVP e sono stati trattati attraverso l'utilizzo di software ad hoc.

Nel capitolo 2 verranno presentate le basi teoriche e un inquadramento generale del problema del trasporto e della sedimentazione nei bacini artificiali.

Il capitolo 3 presenterà le caratteristiche delle tecniche PIV e LSPIV, utilizzata per il reperimento dei dati. Verranno anche presentati dei casi in cui tale tecnica è stata utilizzata con successo.

Nel capitolo 4 verrà descritto il set-up sperimentale, le diverse tecniche di misura e le procedure adottate durante i test con acqua pulita e con sedimenti.

Nel capitolo 5 verrà indicato come sono state acquisite e trattate le immagini, con particolare attenzione al software Flowmanager, mentre nel capitolo 6 e 7 verrà descritto il campo di moto misurato di ciascuna configurazione geometrica sia durante esperimenti con acqua chiara, sia in esperimenti con acqua contenente solidi sospesi.

Il capitolo 8 presenterà una descrizione della tecnica UVP, utilizzata per ottenere informazioni sulle caratteristiche del regime turbolento, i cui risultati sono presentati nel capitolo 9.

Tutte le mappe sviluppate verranno presentate sottoforma di fascicolo allegato.

Capitolo 2. Il trasporto e la sedimentazione

2.1 Shallow flow

Le acque basse (shallow flows) possono essere definite come flussi prevalentemente orizzontali in cui la dimensione verticale H è significativamente più piccola delle due dimensioni orizzontali L , quindi $\frac{H}{L} \ll 1$. Gli shallow flows sono assai presenti in natura in fiumi, estuari, oceani e sono generalmente classificabili come flussi turbolenti a superficie libera.



Figura 2.1 Foto di due dighe sul fiume Lech in Germania.

Nel caso degli shallow flows, le equazioni di Navier-Stokes possono essere semplificate ottenendo le equazioni delle acque basse (SWE) (Moler, 2009):

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(v^2h + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad 2.1$$

Dove t è la variabile indipendente tempo, u e v le velocità medie nella direzione x e y e h la profondità del fluido.

Il confinamento in direzione verticale porta a una separazione dei moti turbolenti tra turbolenza 3D a piccola scala e moti turbolenti 2D su larga scala. Gli shallow flows possono essere considerati bidimensionali o quasi-bidimensionali, sia per quanto riguarda il campo di velocità che le fluttuazioni turbolente.

Laghi, bacini, baie, estuari e regioni costiere hanno spesso una batimetria molto superficiale. I flussi verticali in questi casi sono provocati dal vento, dalle azioni della marea e dalle immissioni dei fiumi, ma sono in genere trascurabili.

Negli shallow flows si possono osservare strutture turbolente bidimensionali su larga scala, con scale di lunghezza di un ordine di grandezza superiore rispetto la profondità.

2.2 Trasporto di sedimenti

Le acque che scorrono in fiumi o canali sono in grado di scavarne il letto, di trasportare particelle e di depositarvi materiale. La conoscenza del fenomeno del trasporto di sedimenti riveste una grande importanza sul piano economico e scientifico ed il suo studio è fondamentale per la conoscenza dell'evoluzione dell'intero bacino idrografico poiché permette ad esempio di:

- prevedere i rischi di cedimento di ponti, di argini ecc.;
- determinare il tempo d'insabbiamento dei bacini di raccolta e dei laghi;
- prevedere le possibili modifiche dei letti fluviali o dei delta in caso di misure di rinaturazione;
- monitorare le variazioni nel trasporto solido in sospensione e di fondo.

Il trasporto solido di un fiume è direttamente dipendente dalla capacità del bacino di fornire materiale e dalla capacità che il fiume ha di trasportare il materiale che vi giunge. Le azioni antropiche possono variare la capacità di trasporto solido, a causa della costruzione di dighe, traverse e serbatoi artificiali.

Si possono trovare, complessivamente, cinque differenti modalità di trasporto solido:

Flottazione (o galleggiamento): consiste nel trasporto del materiale caratterizzato da una densità inferiore rispetto a quella dell'acqua (per esempio tronchi, lastre di ghiaccio, pomici), oppure di corpi in grado di galleggiare per via della forma caratteristica (miche). Il trasporto solido per galleggiamento si verifica soprattutto durante le piene ed è di un certo interesse perché parte di esso viene intrappolato negli invasi artificiali.

Saltazione: coinvolge sabbie grossolane e ciottoli di piccole dimensioni. E' caratteristico dei letti fluviali ad alta rugosità, che generano una maggior turbolenza nella corrente. In questo caso, il materiale alterna breve rotolamento a brevi tratti di trasporto in sospensione.

Rotolamento: coinvolge i ciottoli di dimensioni più rilevanti, che la corrente non riesce a sollevare dal fondale. Gli attriti prolungati smussano progressivamente la forma del corpo litico, che finisce con l'assumere la tipica forma arrotondata dei ciottoli di fiume.

Trasporto di **fondo**: coinvolge intere porzioni di sedimenti fluviali che, nei periodi di piena, vengono trasportati verso valle, coprendo anche distanze considerevoli. Il trasporto solido di fondo concerne i materiali alluvionali grossolani (sabbia, ciottoli e blocchi) e avviene a causa delle correnti idriche secondo processi discontinui di saltellamento, rotolamento e trascinamento. Tale tipo di trasporto si genera quando il materiale, eroso in un bacino idrografico, viene trascinato dall'acqua di ruscellamento nei canali del reticolo idrografico.

Sospensione (o trasporto torbido): si verifica quando le particelle solide erose sono di dimensioni tali da essere trasportate "sospese" nella corrente liquida e riguarda materiale dalla granulometria particolarmente fine (limi, argille ed a volte anche sabbia fine nei fiumi con forte pendenza) che, nel loro insieme, formano "la torbida", che sedimenta solo quando l'energia cinetica delle acque raggiunge valori estremamente bassi. Questo tipo particolare di trasporto è generato dalla turbolenza e dal fatto che le velocità ascensionali di agitazione superano la velocità di sedimentazione propria delle particelle.

Naturalmente, non è la dimensione delle particelle che determina il loro trasporto al fondo o in sospensione, ma la loro dimensione in riferimento alla velocità della corrente; succede quindi che, in un corso d'acqua, le stesse particelle che sono normalmente trasportate al fondo possono essere trasportate in sospensione durante una fase di piena, o, al contrario, che, nello stesso corso d'acqua, le particelle trasportate in sospensione nella parte di fiume iniziale a forte pendenza, vengano poi trasportate al fondo nel corso finale. In generale, la concentrazione media della sospensione torbida è una funzione crescente con la profondità, anche se, durante i campionamenti in una data sezione, è possibile riscontrare numerose anomalie.

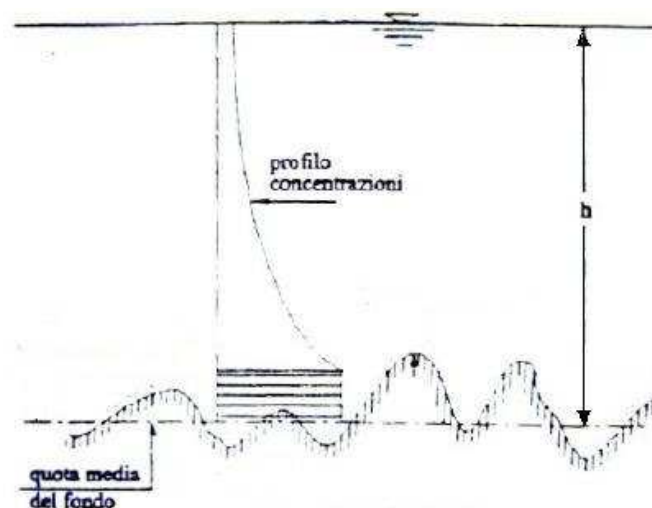


Figura 2.2 Profilo di concentrazione lungo la verticale.

Il fenomeno si differenzia da quelli precedenti perché le particelle, una volta in sospensione, assumono la velocità di traslazione della corrente, mentre le particelle in moto sul fondo si muovono con una velocità media inferiore a quella del fluido sovrastante. Numerosi studi si sono occupati del trasporto in sospensione; la quantità di solido trasportato è legata alla capacità della corrente di sollevare le particelle e al tempo di permanenza delle particelle in sospensione, prima di cadere nuovamente sul fondo (e quindi alla concentrazione di solido all'interno della corrente) (Franzetti et al, 1999).

Il trasporto solido, sia al fondo che in sospensione, è strettamente legato al regime idrologico, ed avviene in misura maggiore in condizioni di piena, quando la portata liquida e la velocità della corrente sono maggiori.

Non c'è un criterio definito e generalmente riconosciuto per distinguere quantitativamente il trasporto di fondo dal trasporto in sospensione; tuttavia alcuni autori hanno proposto delle soglie per l'inizio del trasporto in sospensione: tra questi Bagnold, secondo cui $u_{cr}^*/\omega=1$, Engelund, che propose $u_{cr}^*/\omega=0,25$ e Van Rijn, che diede indicazioni distinguendo la soglia in funzione del diametro caratteristico delle particelle del fondo D^* :

$$\begin{cases} \frac{u_{cr}^*}{\omega} = \frac{4}{D^*} \text{ per } 1 < D^* \leq 10 \\ \frac{u_{cr}^*}{\omega} = 0,4 \text{ per } D^* > 10 \end{cases} \quad 2.2$$

dove u_{cr}^* è la velocità critica, ossia la velocità per la quale ha inizio il movimento, ω è la velocità di deposito del materiale e D^* è definito dalla seguente relazione:

$$D^* = d_{50} \left[\frac{(\frac{\rho_s}{\rho}-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad 2.3$$

Per avere un quadro preciso dell'entità del fenomeno di trasporto fluviale, si deve però aggiungere al trasporto solido anche il **trasporto in soluzione (o chimico)**, che coinvolge i sali minerali, disciolti in acqua. Si tratta di minerali solubilizzati dall'azione delle acque meteoriche sulle rocce che vengono trasportati in soluzione dalla corrente. Il trasporto solido in soluzione è un fenomeno di scarsa importanza e si verifica quando un corso d'acqua attraversa formazioni solubili.

Il materiale trasportato da un corso d'acqua man mano che scende verso valle incontra pendenze minori e, conseguentemente, velocità della corrente sempre minori. Quindi nella

parte terminale di un corso d'acqua a causa delle bassissime pendenze motrici, prevalgono i fenomeni di sedimentazione ed il trasporto è limitato alla frazione granulometrica più sottile.

I concetti basilari della classificazione per modalità di trasporto sono sintetizzati nelle seguenti figure:

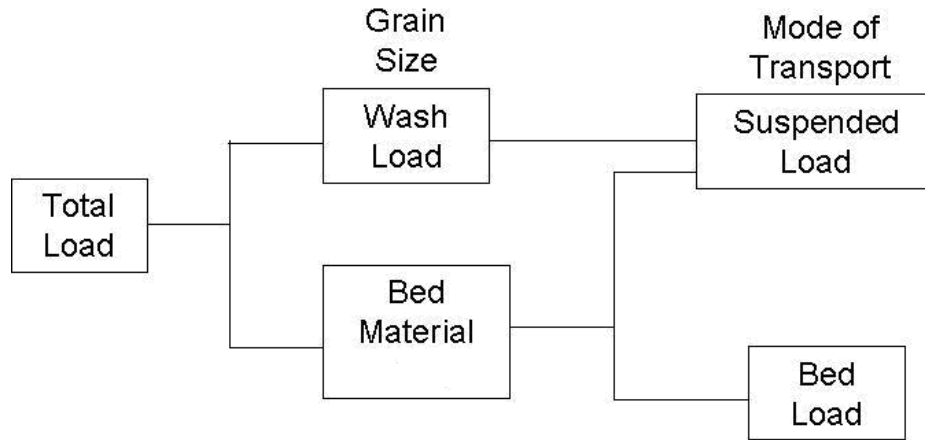


Figura 2.3 Classificazione dei sedimenti per modalità di trasporto.

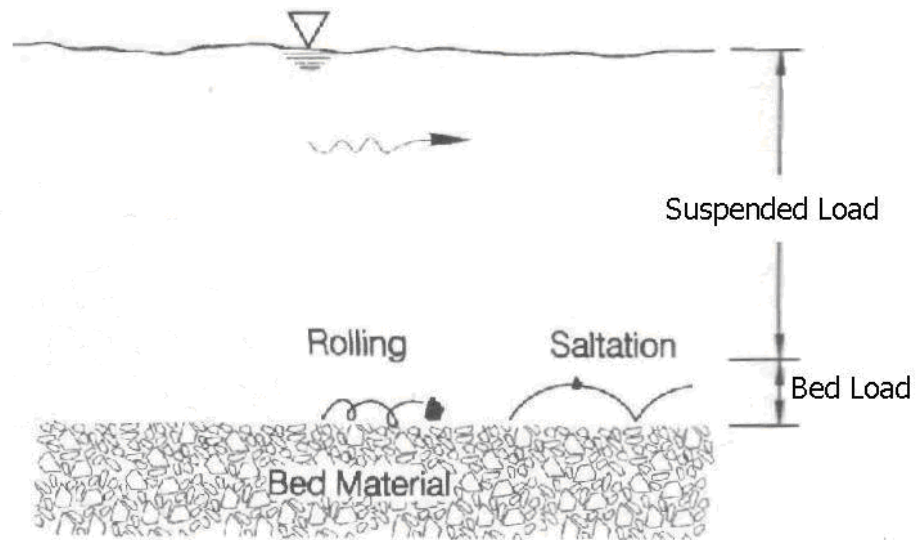


Figura 2.4 Schematica rappresentazione del trasporto di sedimenti (Fan e Morris, 1997).

Il *wash load* è la porzione di sedimenti composta dai grani più piccoli, ed è normalmente trasportata in sospensione senza una significativa interazione con il letto fluviale. Il *bed material* consiste in grani prevalentemente localizzati nel letto mobile del fiume (movable bed). Il termine *bed load* è utilizzato per designare materiale grossolano che è in contatto continuo o intermittente con il letto. Il carico sospeso (“*suspended load*”) si riferisce al materiale che si muove in sospensione, sostenuto nella colonna d’acqua dalla turbolenza o in sospensione colloidale.

La classificazione per modalità di trasporto dipende sia dalle dimensioni delle particelle sia dalla turbolenza del corso d'acqua. Limi e argille sono generalmente trasportati in sospensione, mentre sabbia e ghiaia come *bed load*.

In particolare, la sabbia può essere stabile sul letto, può rotolare (*rolling*) o rimbalzare (*saltation*) sul fondo o può essere anche trasportata in sospensione (*suspended load*), poiché la sua tipologia di trasporto dipende dalla velocità e dalla turbolenza della corrente.

2.3 La sedimentazione nei bacini artificiali

La presenza di uno sbarramento artificiale altera la naturale condizione di equilibrio dei corsi d'acqua, creando un'area caratterizzata da velocità idriche basse e, di conseguenza, da un'elevata capacità di sedimentazione del materiale solido trasportato dalla corrente.

I laghi artificiali che si vengono a creare a monte delle opere di sbarramento sono utilizzati per accumulare e modulare l'acqua a scopo idroelettrico, potabile o irriguo; tuttavia, col passare del tempo essi perdono parte della propria capacità di invaso a causa dell'interrimento determinato dalla sedimentazione del materiale solido trasportato dalle acque che affluiscono al serbatoio.

Il tasso d'interrimento è estremamente variabile, dipende dalle caratteristiche idrogeologiche del bacino, dal regime idrico del corso d'acqua intercettato, dalle caratteristiche geo-morfologiche del bacino stesso ed inoltre è correlato all'età media del serbatoio.

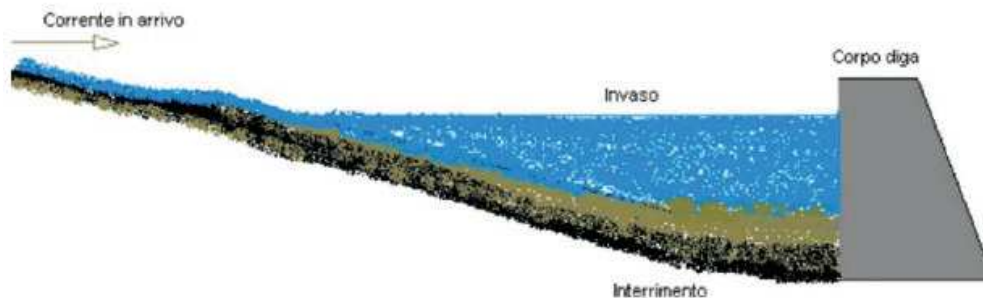


Figura 2.5 Schematizzazione del fenomeno dell'interrimento.

Nel contesto italiano si riscontrano, in alcuni bacini alpini, valori di produzione di sedimenti che superano $1000 \text{ t/km}^2/\text{anno}$, mentre, in media, in Italia i valori oscillano fra 120 e $600 \text{ t/km}^2/\text{anno}$. E' necessario effettuare, per tale motivo, interventi periodici di rimozione e smaltimento del materiale sedimentato.

Il tasso annuo complessivo di interrimento, a livello mondiale, secondo le stime della Banca Mondiale (organo internazionale che sostiene il progetto di opere di importanza pubblica, concedendo prestiti dopo aver vagliato ed analizzato il progetto stesso secondo gli obiettivi iniziali), si aggira attorno all'1% della capacità di invaso complessiva. Questa stima, però, è poco indicativa della situazione reale dato che il problema è estremamente complesso e notevolmente variabile in relazione alla diversità delle situazioni reali considerate (Molino, 2004). Infatti, citando il responsabile dighe della Banca Mondiale Alessandro Palmieri (2001): “Un fiume porta sempre acqua e sedimenti e, se una persona progetta le opere di immagazzinamento pensando solo all'acqua, va incontro ad un insuccesso. La situazione varia moltissimo da fiume a fiume e da condizione a condizione. In certi casi (come in Norvegia) questo trasporto solido è quasi nullo. In altri casi è più terra che acqua. Bisogna progettare e gestire le opere tenendo bene in mente questa realtà. In Banca stiamo lavorando molto su questo settore”.

La capacità d'invaso rappresenta una risorsa costosa e non rinnovabile e, se non si prevede la rimozione del materiale solido depositato, tale risorsa rischia di perdersi col tempo, dato che non potrà mai verificarsi un naturale processo di eliminazione dei sedimenti.

Essa richiede in ogni caso un'attenta politica di gestione. Anche nei paesi in via di sviluppo ci si sta avvicinando, infatti, rapidamente alla saturazione per quanto riguarda la possibilità di costruire nuovi invasi, soggetti come sono a vincoli tecnici, economici ed ambientali sempre più stringenti. Così, come è già avvenuto in molti paesi industrializzati, il costo di recupero di un metro cubo d'invaso “annullato” dall'interrimento tende in un prossimo futuro ad essere competitivo con il costo dello stesso metro cubo “creato” per mezzo di una nuova diga (Motta et al, 2006).

2.3.1. Evoluzione del processo di sedimentazione

La tipologia del materiale trasportato dalla corrente dipende dal processo erosivo dei terreni afferenti alla rete di drenaggio che confluisce nel lago artificiale.

Il fenomeno della sedimentazione presenta le seguenti fasi:

1) **Degradazione superficiale**, che è determinata da uno o più dei seguenti fenomeni:

- **Alterazione**: è l'insieme di processi chimici (ossidazione, idratazione, ecc.) nel corso dei quali muta la composizione mineralogica della roccia, con il peggioramento delle sue caratteristiche tecniche fino alla rottura dei legami chimici.

- **Dissoluzione:** è il processo chimico dovuto alle acque che disciolgono i minerali (come per esempio la dolomia CaCO_3) solubili delle rocce, i gusci, gli scheletri e i resti animali e vegetali.
- **Erosione:** è la degradazione fisica che ha come effetto l'asportazione graduale di suolo o roccia per opera di agenti quali il vento, l'acqua o il ghiaccio oppure per effetto di movimenti gravitativi.
- **Processi biologici:** gli organismi che utilizzano minerali per accrescersi contribuiscono notevolmente ad intaccare le rocce superficiali.

2) **Trasporto:** il materiale degradato di norma viene trasportato anche molto lontano dal punto di origine ove risiede la roccia madre. Concorrono al trasporto l'acqua, il vento, il ghiaccio e la forza di gravità che vengono detti mezzi di sedimentazione.

3) **Deposito:** le cause principali della deposizione di materiale all'interno dei bacini lacustri sono sia di tipo fisico che chimico. Le prime dipendono dalla diminuzione di velocità delle acque degli immissari all'entrata nel bacino (cioè viene a mancare l'energia necessaria al trasporto dei sedimenti), fatto che provoca la deposizione, provvisoria o permanente, del solido sospeso. Le seconde invece dipendono soprattutto dall'interazione tra le varie specie chimiche caratteristiche delle acque (Lucarelli et al, 2006).

In genere, la frazione più grossolana si deposita immediatamente dopo l'ingresso del fiume nel bacino a causa della diminuzione della velocità, mentre i sedimenti più fini sono trasportati a valle e si depositano successivamente.

I depositi che si presentano in un vaso artificiale possono essere di quattro tipi (Figura 2.6):

- **Depositi delta:** contengono la frazione più grossolana dei sedimenti che rapidamente si deposita nella zona di immissione del fiume nel lago. Tale tipo di deposito può essere costituito interamente da sedimenti a grana grossa o contenere anche una piccola frazione di sedimenti fini come il limo.
- **Depositi a cuneo (wedge):** sono più spessi in prossimità della diga e diventano più sottili andando verso monte. Questa forma è causata tipicamente dalle correnti di torbidità che trascinano i sedimenti fini nelle vicinanze della diga.
- **Depositi rastremati (tapering):** si manifestano quando il deposito diventa progressivamente più sottile muovendosi verso la diga. Si presentano in genere nei lunghi invasi con un alto livello d'acqua.

- **Depositi uniformi:** sono inusuali ma possono verificarsi in piccoli invasi con una frequente fluttuazione del livello dell'acqua ed un basso carico di sedimenti fini.

I diversi tipi di depositi possono trovarsi anche contemporaneamente in uno stesso bacino e possono variare da zona a zona del bacino stesso. Le differenze sono dovute alle diverse condizioni idrologiche, alla dimensione dei grani e alla geometria dell'invaso. Per esempio, in bacini aventi un livello d'acqua fluttuante nell'anno o che vengono periodicamente svuotati, i sedimenti depositati in precedenza possono essere erosi ed alterati da processi come l'erosione del fiume e l'azione delle onde. Inoltre, bisogna considerare anche l'apporto di sedimenti da eventuali altri affluenti oltre all'immissario principale.

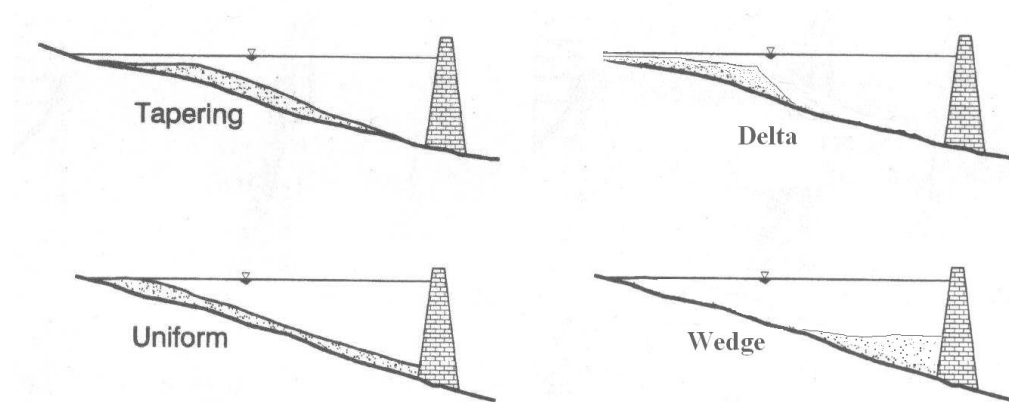


Figura 2.6 Profili longitudinali di deposizione dei sedimenti negli invasi artificiali.

Le zone di deposito longitudinale nei bacini possono essere divise in tre zone principali, come illustrato in Figura 2.7.

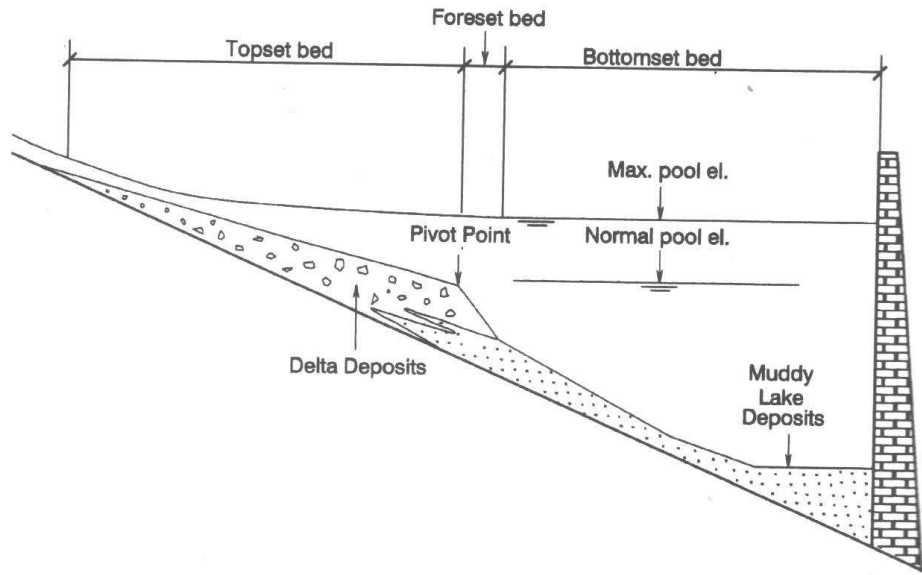


Figura 2.7 Zone di deposizione in un vaso artificiale.

Il “*topset bed*” corrisponde al rapido deposito di sedimenti. Esso termina in corrispondenza della fine del deposito delta. Il “*foreset bed*” rappresenta la zona di passaggio dai depositi delta (composti sia da materiale fine che grossolano) ai depositi di solo materiale fine ed è caratterizzata da un incremento della pendenza della superficie di interfaccia solido-liquido.

Il “*bottomset bed*” consiste in particelle fini che sono depositate da flussi stratificati, o da flussi non stratificati; il *bottomset bed* può includere anche materiale organico autoctono prodotto da alghe o piante acquatiche.

Il “*pivot point*” segna il passaggio tra il *topset bed* e il *foreset bed*.

Il “*muddy lake*” è costituito dalle particelle più fini (limo e argilla) che sono trasportate fino alla diga dalle correnti di torbidità.

Le regole di funzionamento della diga hanno una grande influenza sulla forma dei depositi. Infatti, a seguito delle operazioni di svaso effettuate per eseguire ispezioni o manutenzione degli organi di manovra, si verificano variazioni nella struttura del profilo di sedimentazione, che provocano un maggiore accumulo di materiale sedimentato a ridosso delle opere di scarico. Tale materiale, che si addossa alle opere di scarico, può addirittura ostruirle mettendo in crisi le operazioni di regolazione, con risvolti negativi sulla sicurezza dello sbarramento.

Generalmente, gli invasi hanno uno sviluppo di linee di costa tale da innescare nuovi fenomeni erosivi che portano ad incrementare il carico dei sedimenti entrante nel lago, causando un'ulteriore modifica della forma dei depositi.

Un fenomeno di enorme importanza nei processi di sedimentazione delle dighe è la presenza di correnti di torbidità le quali, a causa dell'alta concentrazione di materiale generalmente in sospensione, sono flussi di natura stratificata. Tale elevata concentrazione può facilitare, in certe condizioni, il raggiungimento da parte dei sedimenti delle opere di presa, ostruendole e diminuendo la vita utile dei macchinari idraulici.

2.4 Conseguenze dell'interrimento

Il trasporto e la deposizione dei sedimenti interessano tutte le opere di sbarramento ma, dal momento che i tempi di interrimento degli invasi in genere sono estremamente lunghi, per anni il problema è stato ignorato. Non essendo visibile, in quanto avveniva sott'acqua, il problema è stato rimosso dalla coscienza popolare, politica ed ingegneristica.

Al giorno d'oggi, vari provvedimenti sono stati presi a riguardo e sono stati sviluppati programmi europei e legislazioni apposite.

2.4.1. Conseguenze nell'invaso

Una serie di problemi si possono presentare a monte delle dighe come risultato della sedimentazione.

Perdita della capacità d'invaso. La deposizione dei sedimenti può ridurre la capacità d'invaso, rendendo il serbatoio poco efficiente sia per il rifornimento dell'acqua che per il controllo delle piene: infatti, la riduzione del volume di invaso ha conseguenze sulla minore capacità di regolazione dei deflussi e di laminazione delle piene. Tale perdita di capacità effettiva di immagazzinamento, nel caso di bacini d'alimentazione di impianti idroelettrici, si ripercuoterà sulla quantità di energia prodotta, mentre nel caso di acque ad uso idropotabile od irriguo potrà diminuire la quantità e la qualità dell'acqua approvvigionata alla popolazione o alle piantagioni. Per quanto riguarda la capacità di laminazione delle piene, la riduzione del volume disponibile all'immagazzinamento, può rendere il serbatoio insufficiente ad accogliere il volume della piena di progetto prevista.

Deposizione del delta. La porzione grossolana dei sedimenti in afflusso si deposita formando depositi delta che non solo riducono la capacità d'invaso, ma possono anche causare un sovralluvionamento che si estende per molti chilometri a monte dell'invaso artificiale, con un possibile maggiore rischi di inondazione di infrastrutture, città e campi agricoli. Se il letto del fiume si ricopre di abbondante vegetazione, il livello del pelo libero

può ulteriormente elevarsi a causa dell'incremento della scabrezza idraulica e la vegetazione, a sua volta, può intrappolare sedimenti promuovendo una sedimentazione addizionale.

Navigazione. Sia la navigazione commerciale che ricreativa può essere severamente impedita dall'accumulo dei sedimenti, specialmente nei delta e in vicinanza delle anse del fiume.

Inquinamento dell'aria. Negli invasi usati stagionalmente per l'irrigazione, i depositi essiccati dei sedimenti fini, che emergono in superficie, possono essere erosi e trasportati dal vento, creando uno spiacevole e insano rischio alle vicine comunità.

Rischio di terremoti. E' stato ipotizzato che la presenza di sedimenti contro le dighe possa significativamente incrementare la forza di un terremoto che agisce sulla struttura stessa. Inoltre, i sedimenti accumulati vicino alla diga possono essere liquefatti dal sisma e scorrere verso gli scarichi di fondo sotterrandoli o ostruendoli.

Stabilità. I sedimenti accumulati possono accrescere il carico sulla diga rendendo necessaria un'eventuale nuova verifica di stabilità.

Abrasion e perdita di energia. Nelle centrali idroelettriche, i sedimenti più grandi di 0,1 mm possono danneggiare le paratoie, accelerare l'erosione dei macchinari, in particolare degli ugelli e delle palette delle turbine Pelton. Questo fatto riduce l'efficienza nella generazione di energia e, infine, comporta la sostituzione necessaria dei macchinari.

Scarichi di fondo e opere di presa. I sedimenti possono occludere scarichi di fondo e opere di presa. Soprattutto durante le alluvioni estreme, depositi di materiale, che possono raggiungere uno spessore anche di alcuni metri, possono avvenire in poche ore. Ad esempio, i sedimenti e i detriti depositati nella diga di Valdesia nella Repubblica Dominicana durante il passaggio dell'uragano David nel 1979, bloccarono l'opera per 6 mesi.

Ecologia. I cambiamenti dovuti alla sedimentazione possono drammaticamente alterare l'ecosistema del lago, turbando la composizione e la sussistenza delle specie viventi. Infatti, la velocità di corrente molto elevata unita ad alti livelli di trasporto solido, in sospensione e di fondo, possono causare la morte della fauna ittica presente nel bacino. Altri eventi che potrebbero verificarsi sono:

- una variazione della composizione della comunità ittica con perdita delle specie più sensibili;
- una riduzione numerica delle popolazioni normalmente insediate;
- un cambiamento dei rapporti relativi fra le diverse taglie di esemplari presenti.

Infatti, oltre alla componente terrigena, viene trasportata dagli immissari anche una componente organica o inorganica di origine autoctona (organismi viventi, batteri, alghe,

protozoi, etc). Questa, depositandosi sul fondo, può dare origine a crisi anossiche localizzate, provocate dalla sua degradazione microbica.

2.4.2. Conseguenze a valle dell'invaso

La sedimentazione nel bacino porta ad una riduzione di apporto di materiale organico, nutrienti ed inquinanti, come i pesticidi, a valle.

Ciò può essere al tempo stesso vantaggioso e svantaggioso; perché, se a valle si riducono i nutrienti si possono causare danni all'ecosistema, mentre se si riducono gli inquinanti migliora la qualità dell'ambiente.

Di seguito sono illustrate altre conseguenze, che si verificano a valle dell'invaso suddivise in negative e positive:

Aspetti negativi: i tratti del fiume a valle delle dighe soffrono l'impatto ambientale provocato dalla riduzione del flusso e dall'alterazione del regime idrico, dalla riduzione dell'apporto solido, dall'alterata dinamica dei nutrienti e dal cambiamento di temperatura.

La morfologia del fiume a valle degli sbarramenti viene molto influenzata dalla riduzione del rifornimento di sedimenti sul letto del fiume stesso e si crea un tratto di alveo in erosione con abbassamento della linea di *thalweg* (come mostrato in Figura 2.8) formata dall'insieme dei punti più profondi di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua.

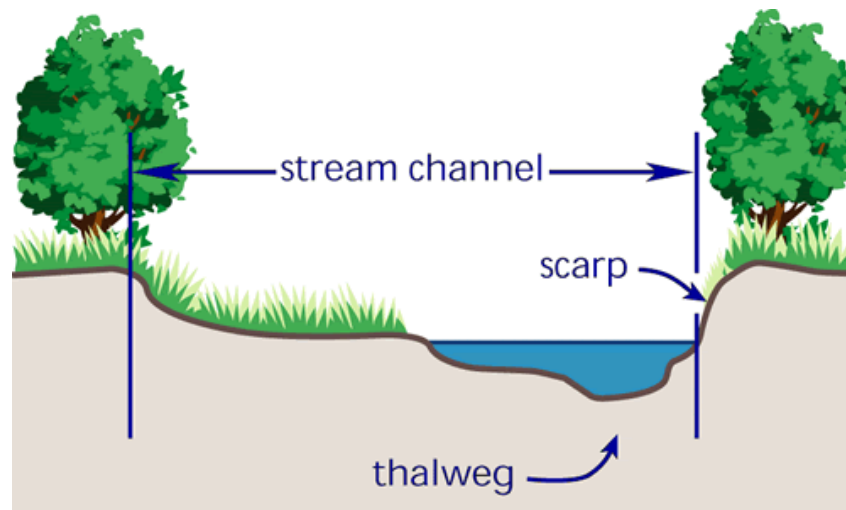


Figura 2.8 Rappresentazione della linea di thalweg.

Il mancato apporto solido può incrementare sia l'altezza delle rive, sia il tasso di erosione delle rive stesse, sia l'erosione delle pile dei ponti.

L'uso ricreativo può essere compromesso, come nel Gran Canyon, dove i cordoni litorali usati come campeggi sono stati significativamente erosi a causa del mancato apporto solido da monte dovuto alla presenza della diga Glenn Canyon.

Aspetti positivi: la riduzione della concentrazione dei solidi sospesi nel tratto a valle della diga può essere benefica per organismi acquatici sensibili ad un elevato livello di solidi sospesi. Molte destinazioni ad uso ricreativo possono beneficiare enormemente della riduzione dei sedimenti e della maggior chiarezza dell'acqua. Inoltre, i sedimenti intrappolati negli invasi riducono, a valle, la necessità di dragare i fiumi e i porti fluviali per permettervi la navigazione.

Un'altra conseguenza positiva riguarda la morfologia costiera: per esempio, il carico di solidi sospesi nel basso Mississippi diminuì subito dopo la costruzione dello sbarramento Gavin Point sul fiume Missouri (affluente del Mississippi) avvenuta nel 1953, e nel 1984 l'emissione di sedimenti nel golfo del Messico era solo un terzo di quella antecedente al 1953. La riduzione dell'emissione dei sedimenti è uno dei principali fattori che hanno contribuito a un rapido arretramento del delta del Mississippi.

Gli invasi possono ridurre enormemente il trasporto dei detriti organici usati come fonte di cibo dall'ecosistema a valle.

Inoltre, a seguito di operazioni di rilascio di sedimenti a valle della diga, si potrebbe avere un negativo impatto ambientale sull'ecosistema acquatico di valle. Infatti, si può verificare un netto peggioramento della qualità dell'acqua, con aumento della torbidità, della concentrazione di solidi sospesi e di inquinanti e una diminuzione dell'ossigeno disciolto.

Gli effetti nocivi dei solidi sospesi sugli organismi acquatici possono essere letali (causano cioè la morte di singoli individui), sub letali (danneggiano i tessuti o la fisiologia degli organismi) e comportamentali (vengono modificati i modelli comportamentali caratteristici di un organismo in ambiente non perturbato) (Garofalo e Granata, 2005).

In conclusione, le dighe hanno un impatto ambientale complesso e notevolmente variabile nel tempo e nello spazio. La costruzione di un invaso artificiale rappresenta una singolare e potenziale alterazione permanente del sistema fluviale e per questo, prima di costruire, è necessario un approfondito studio di impatto ambientale. Il controllo dei sedimenti non ha meno importanza rispetto al controllo idraulico, in modo da garantire che le dighe forniscano un servizio a lungo termine ed un accettabile livello di impatto ambientale (Buscarnera e Celenza, 2008).

Capitolo 3. Caratteristiche delle tecniche PIV e LSPIV

3.1 La tecnica Particle Image Velocimetry

La tecnica PIV (Particle Image Velocimetry), introdotta negli anni '80, permette di fare misure del campo di velocità di una predefinita regione di fluido in moto. Negli ultimi dieci anni questa tecnica si è diffusa grazie allo sviluppo delle capacità di memorizzazione ed elaborazione dati in tempo reale dei moderni calcolatori, e alla sostituzione delle tecniche analogiche con tecniche digitali per l'acquisizione d'immagini. La PIV è oggi utilizzata prevalentemente in campi che riguardano la meccanica dei fluidi, per ricerche sui flussi d'aria e d'acqua e nella ricerca aerodinamica.

3.1.1. Retrosceca storico

Sin dagli albori della propria storia l'essere umano si è sempre interessato all'osservazione della natura ed, in particolare, allo studio dei corpi in moto in un fluido. L'obiettivo era ottenere stime grossolane della velocità e visualizzare le strutture che si originano in un flusso quali vortici, scie a valle di un ostacolo, pozzi, sorgenti, ecc.

Inizialmente, la descrizione delle proprietà del flusso era ristretta solo a caratteristiche qualitative. Tuttavia, un geniale artista e osservatore attento della natura come Leonardo Da Vinci fu in grado di realizzare disegni molto dettagliati delle strutture entro un flusso di acqua tramite semplice osservazione. Forse il primo documento in cui compare una visualizzazione di un flusso è stato eseguito da Leonardo da Vinci nei suoi studi qualitativi della meccanica cardiaca e del sistema vascolare nel 16° secolo (Navaei, 2005).

Un grande passo avanti nella ricerca avvenne quando divenne possibile sostituire tali osservazioni passive della natura con esperimenti che fossero in grado di estrarre informazioni sul flusso utilizzando tecniche di visualizzazione. Un noto promotore di tali procedure fu Ludwig Prandtl, uno dei principali rappresentanti della meccanica dei fluidi, il quale all'inizio del secolo scorso, progettò e utilizzò tecniche di visualizzazione in un tunnel d'acqua per studiare alcuni aspetti dei flussi non stazionari, dietro ad ali e ad altri oggetti.

Essendo in grado di variare un discreto numero di parametri dell'esperimento (forma geometrica, angolo d'incidenza, velocità del flusso, stazionarietà o non stazionarietà del moto), Prandtl comprese molte caratteristiche di base dei fenomeni di flusso non stazionario.

Comunque a quel tempo era possibile solo una descrizione qualitativa del campo di moto, senza che fosse possibile fornire dati quantitativi sulla velocità del fluido.

L'invenzione della fotografia fornì ai ricercatori la possibilità di registrare le loro osservazioni con maggiore affidabilità e precisione. E' possibile che, prima dell'applicazione per scopi di ricerca sulla dinamica dei fluidi, siano stati i fotografi a iniziare l'acquisizione di immagini dei flussi. In parallelo con il progresso della tecnologia fotografica, vale a dire con l'aumento della risoluzione spaziale delle fotografie, l'innovazione del laser ha reso possibile il miglioramento della risoluzione temporale (n° di frames acquisiti per unità di tempo). Questi miglioramenti hanno aperto la strada a una nuova famiglia di visualizzazione del flusso basato su sistemi di misurazione ottica, con il nome globale di laser velocimetry.

Oggi, 100 anni dopo gli esperimenti di Ludwig Prandtl, è possibile estrarre facilmente anche informazioni quantitative sul campo di velocità istantaneo, utilizzando una videocamera e particelle distribuite all'interno del fluido. I principi fondamentali che stanno alla base di questa tecnica sono ben noti da lungo tempo; tuttavia, sarebbe stato necessario il progresso scientifico e tecnico raggiunto negli ultimi 15 anni nelle ottiche, nei laser, nell'elettronica, nelle tecniche video e nei computer per sviluppare ulteriormente una tecnica nata per una visualizzazione qualitativa del flusso ad uno stadio tale da poterla impiegare per misure quantitative di campi di velocità istantanei complessi. Uno studio approfondito dello sviluppo della PIV si può trovare in (Keane e Adrian, 1992). Oggi, la PIV è una tecnica consolidata applicata allo studio dei flussi in molti settori di ricerca e sistemi commerciali per l'acquisizione e il trattamento delle immagini tramite tecnica PIV sono facilmente disponibili.

3.1.2. Principi della PIV

Descriviamo ora le caratteristiche di base di questa tecnica di misura, il cui nome si potrebbe tradurre in “**Misure di velocità a partire da immagini di particelle**”.

L'apparato sperimentale di un sistema P.I.V. consiste tipicamente di diversi sottosistemi. Nella maggior parte delle applicazioni occorre aggiungere al flusso delle particelle traccianti, le quali devono essere illuminate, in un piano all'interno del flusso, almeno due volte entro un breve intervallo temporale. La luce riflessa dalle particelle deve essere registrata o su un singolo fotogramma o su una sequenza di fotogrammi.

Lo spostamento delle immagini delle particelle, nel tempo intercorrente fra gli impulsi di luce, deve essere determinato attraverso una stima dalle registrazioni PIV. Per maneggiare la grande quantità di dati che possono essere raccolti impiegando la tecnica PIV, è richiesta una sofisticata post-elaborazione

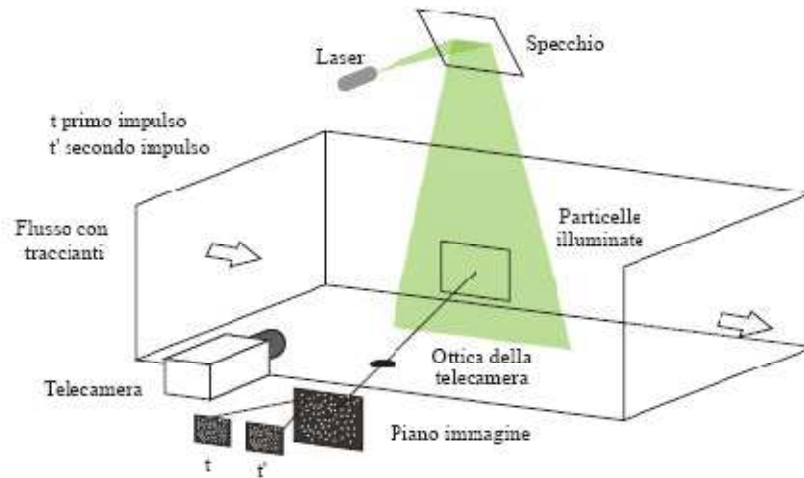


Figura 3.1 Tipico apparato sperimentale per la Particle Image Velocimetry in una galleria del vento.

La Figura 3.1 illustra brevemente un tipico apparato per registrazioni PIV. Piccole particelle traccianti vengono aggiunte al flusso. Una regione rettangolare piana (lamina di luce) all'interno del flusso viene illuminata due volte tramite un raggio laser (doppio impulso di luce). Il tempo fra i due impulsi del laser è impostato in base alla velocità media del flusso e all'ingrandimento dell'immagine. Si assume che le particelle traccianti, nel tempo fra le due illuminazioni, si muovano con la medesima velocità locale del flusso. La luce riflessa dalle particelle traccianti viene registrata tramite lenti di alta qualità o su un singolo negativo fotografico o su due separati fotogrammi su uno speciale sensore CCD (*charge coupled device*, ossia dispositivo ad accoppiamento di carica).

Nel primo caso, dopo lo sviluppo, la registrazione fotografica PIV viene digitalizzata tramite uno scanner. Invece, usando un sensore CCD, il risultato viene direttamente immagazzinato in tempo reale nella memoria di un computer.

Per eseguire una stima quantitativa del campo di velocità, l'immagine digitale PIV viene suddivisa in piccole sottoregioni, denominate "aree d'interrogazione". Per ognuna di esse, il vettore spostamento delle particelle traccianti fra le due immagini illuminate, viene determinato tramite mezzi statistici (auto-correlazione e cross-correlazione).

Si assume, infatti, che tutte le particelle entro un'area d'interrogazione si siano spostate omogeneamente nel tempo fra le due illuminazioni e quindi un unico vettore descriva il comportamento di tutta la regione. Noto il vettore spostamento, in base al tempo intercorrente fra le due immagini e all'ingrandimento dell'immagine rispetto all'oggetto reale, viene calcolata la proiezione del vettore velocità del flusso locale nel piano della lamina di luce (vettore velocità a due componenti).

Il processo d'interrogazione viene ripetuto per tutte le aree d'interrogazione della registrazione PIV. Con le moderne videocamere CCD è possibile acquisire più di 100 registrazioni PIV al minuto. Il calcolo di una registrazione PIV di un campo di velocità con 3600 vettori velocità istantanei (in dipendenza dalle dimensioni della registrazione e dall'area d'interrogazione), è dell'ordine di pochi secondi con i computer standard attualmente sul mercato. Qualora invece sia richiesta un'ancora più rapida disponibilità dei dati per un monitoraggio online del flusso, processori hardware dedicati sono commercialmente disponibili: essi realizzano tali calcoli in una frazione di secondo.

3.1.3. Peculiarità della tecnica

Illustriamo brevemente i tratti distintivi di questa innovativa tecnica, per capirne meglio usi e potenzialità.

Misura di velocità non intrusiva.

A differenza delle tecniche di misura delle velocità di flussi che impiegano sonde (come tubi di pressione o UVP), la tecnica PIV, essendo una tecnica ottica, lavora in modo non intrusivo. Questo ne consente l'applicazione anche in flussi ad alta velocità, o in strati limite vicino alle pareti, dove il flusso potrebbe essere disturbato dalla presenza delle sonde.

Misura di velocità indiretta.

La PIV misura la velocità di un elemento fluido indirettamente, misurando la velocità di particelle traccianti entro il flusso, le quali, nella maggior parte delle applicazioni sono state aggiunte al flusso prima che l'esperimento iniziasse. Talvolta per i flussi bifase le particelle necessarie sono già presenti nel fluido ed eventualmente se ne aggiungono altre.

La necessità di impiegare particelle traccianti per la misura della velocità del flusso richiede di capire attentamente per ogni esperimento se le particelle seguiranno fedelmente il moto degli elementi fluidi, almeno al grado richiesto dagli obiettivi dell'indagine. Piccole particelle seguiranno meglio il flusso.

Tecnica a pieno campo.

La PIV è una tecnica che consente di registrare immagini di una superficie del campo di flusso in una grande varietà di applicazioni in mezzi liquidi e gassosi, per estrarre informazioni di velocità. Questa caratteristica è unica della tecnica PIV. Ad eccezione della DGV (Doppler Global Velocimetry), tecnica innovativa particolarmente appropriata per flussi d'aria ad elevata velocità, tutte le altre tecniche di misura della velocità consentono soltanto la misura della velocità del flusso in un singolo punto, anche se spesso con una elevata risoluzione temporale. Con la PIV la risoluzione spaziale è alta, mentre la risoluzione

temporale (frequenza dei fotogrammi di registrazione) è limitata a causa di restrizioni tecniche. Queste caratteristiche vanno tenute presenti se si confrontano i risultati ottenuti dalla PIV con quelli ottenuti con le tecniche tradizionali. L'acquisizione di immagini istantanee e un'elevata risoluzione spaziale consentono alla PIV di indagare strutture spaziali anche in campi di flusso non stazionario.

Illuminazione.

Per applicazioni in flussi di gas è richiesta una sorgente di luce ad elevata potenza affinché la luce riflessa dalle piccole particelle traccianti sia in grado di esporre il film fotografico o il sensore video. Comunque, la necessità di utilizzare particelle più grandi per la loro migliore efficienza nel riflettere la luce è in contrasto con la necessità di avere particelle le più piccole possibili per seguire fedelmente il flusso. Nella maggior parte delle applicazioni deve essere trovato un compromesso. Nei flussi liquidi si possono di solito accettare particelle più grandi che riflettano più luce: in questo modo si possono impiegare sorgenti di luce di potenza considerevolmente più ridotta.

Durata dell'impulso di luce.

La durata dell'impulso laser che illumina le particelle deve essere abbastanza breve da congelare il movimento delle particelle durante l'esposizione, per evitare che queste lascino scie.

Sfasamento temporale fra gli impulsi di luce.

Lo sfasamento temporale fra gli impulsi di luce deve essere abbastanza lungo da riuscire a determinare lo spostamento fra le immagini delle particelle traccianti e abbastanza breve da evitare che particelle con una componente di velocità fuori dal piano abbandonino la lamina di luce fra le successive illuminazioni.

Numero di componenti del vettore velocità.

Nella PIV standard, a causa dell'illuminazione su un piano del campo di moto, possono essere determinate solo due componenti del vettore velocità. Il limite principale della tecnica PIV si riscontra, quindi, nelle misure di flussi fortemente tridimensionali; in tal caso, infatti, essendo presente anche la componente del flusso ortogonale al piano di misura, la PIV oltre a non essere in grado di misurare detta componente, può fornire grossi errori nella valutazione delle componenti di velocità nel piano di misura a causa degli errori prospettici indotti. Esistono tuttavia dei metodi per estrarre la terza componente del vettore velocità, sempre lavorando su una lamina piana (Nese, 2004). E' infatti possibile un'estensione del volume di osservazione tramite tecniche olografiche (PIV 3D), oppure con altri metodi, come realizzare diverse lamine di luce parallele in un volume.

Estensione nel tempo.

Con telecamere che lavorano in maniera ripetitiva, è possibile registrare sequenze temporali di registrazioni PIV. Comunque, dal momento che la frequenza di ripetizione dei laser pulsati e delle telecamere è limitata, non è possibile registrare abbastanza rapidamente, come sarebbe richiesto per analizzare alcuni fenomeni periodici in flussi che hanno una frequenza più elevata di quella di pulsazione del laser.

Dimensione dell'area d'interrogazione.

La dimensione di un'area d'interrogazione dovrebbe essere sufficientemente piccola affinché i gradienti di velocità non abbiano un effetto significativo sui risultati. Inoltre essa determina il numero di vettori velocità indipendenti e di conseguenza la massima risoluzione spaziale della mappa di velocità che può essere ottenuta per una data risoluzione spaziale dei sensori impiegati per la registrazione.

Ripetibilità delle valutazioni.

Nella PIV tutte le informazioni sul campo di velocità del flusso sono registrate all'istante di misurazione. Quindi si ottengono informazioni istantanee che possono essere mediate per ottenere un campo di moto medio, in caso di flusso stazionario.

Inoltre, le informazioni sul campo di velocità del flusso, completamente contenute nelle registrazioni PIV, possono essere usate in un secondo tempo in modi molto diversi da quelli per cui erano state fatte, senza la necessità di ripetere l'esperimento.

3.1.4. Sorgenti di Luce: laser

Il laser, acronimo dell'inglese Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione), è largamente utilizzato nelle tecniche PIV per la sua capacità di emettere luce monocromatica, coerente e con una grande densità di energia, che può essere facilmente concentrata in un sottile fascio di luce per illuminare e registrare le particelle traccianti senza aberrazioni cromatiche. Tre sono gli elementi principali costituenti un laser: il "materiale attivo", il sistema di pompaggio ed il risonatore ottico. Il materiale reattivo è costituito generalmente da gas atomico o molecolare, da un semiconduttore o da un materiale solido. Il sistema di pompaggio eccita il materiale attivo per mezzo di energia chimica o elettromagnetica. Il risonatore ottico, generalmente costituito da una serie di specchi, ha la funzione di amplificare la radiazione emessa dal materiale attivo.

I laser più diffusi nelle misurazioni con tecnica PIV sono quelli a stato solido come il laser a Rubino ed il laser a Nd:YAG, che sfrutta come materiale attivo un cristallo di ittrio e alluminio (YAG) drogato al neodimio ($\text{Nd:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$).

3.1.5. Strumenti e tecniche di registrazione delle immagini

Nel primo stadio dello sviluppo della tecnica PIV si faceva ricorso principalmente a tecniche di registrazione fotografica. I progressi fatti recentemente nel campo dell'elettronica hanno permesso di realizzare metodi di registrazione digitali, i quali hanno numerosi vantaggi rispetto a quelli ottici tra i quali l'immediata visualizzazione delle immagini e l'eliminazione dei processi di stampa. In questo paragrafo saranno analizzate soltanto le tecniche di acquisizione digitali, in particolare l'attenzione sarà focalizzata sui sensori allo stato solido poiché sono quelli maggiormente utilizzati dai centri di ricerca. Il sensore elettronico allo stato solido più diffuso è il CCD il quale converte l'energia luminosa incidente sotto forma di fotoni in carica elettrica disponibile sotto forma di elettroni. Quando si parla di sensori CCD, in genere si parla di un array di CCD singoli disposti lungo una riga o sotto forma di una matrice rettangolare. Il CCD individuale si chiama pixel la cui dimensione fisica è dell'ordine di $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$.

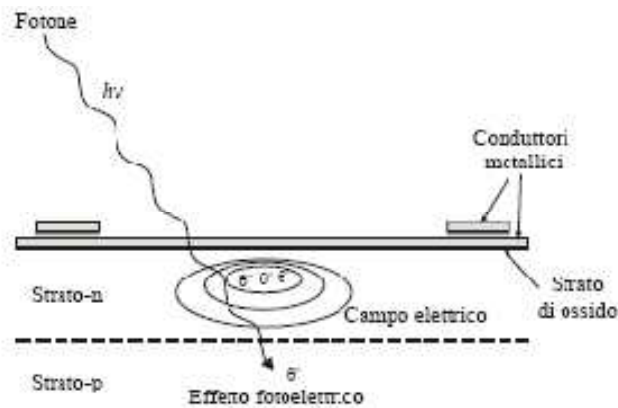


Figura 3.2 Modello semplificato di un pixel.

Il principio di funzionamento è mostrato schematicamente in Figura 3.2; il CCD è costruito su di un substrato semiconduttivo, con conduttori metallici sulla superficie, uno strato di ossido isolante, uno strato semiconduttore di tipo n (anodo) ed un semiconduttore di tipo p (catodo) al di sotto (giunzione PN). Una piccola differenza di potenziale applicata tra i conduttori metallici e lo strato di tipo p genera un campo elettrico all'interno del semiconduttore. Il valore minimo del campo elettrico che si forma al di sotto del centro del

pixel è associato ad una vacanza di elettroni ed è detto buca di potenziale. Quando un fotone di una certa lunghezza d'onda colpisce la giunzione PN, si genera una coppia vacanza-elettrone e il fenomeno è detto effetto fotoelettrico. Mentre la vacanza, portatrice di carica positiva, è assorbita nello strato p, l'elettrone per effetto del campo elettrico migra verso la buca di potenziale, dove viene immagazzinato. Gli elettroni continuano ad accumularsi per tutta la durata dell'esposizione alla luce. La capacità di immagazzinare elettroni è limitata e varia tra 10000 e 100000 elettroni per pixel. Quando questo valore massimo viene superato si ha sovraesposizione e gli elettroni eccedenti tendono a migrare verso i pixel adiacenti provocando il *blooming* dell'immagine, ossia compaiono degli aloni luminosi con delle striature lineari. I moderni CCD adottano dispositivi anti-blooming che catturano la carica in eccesso per mezzo di conduttori. Un altro parametro importante per un CCD è il *fattore di riempimento* o apertura che è definito come il rapporto tra l'area otticamente sensibile e quella totale del sensore. Il suo valore può oscillare dal 15% al 100%, a seconda del sensore. Il motivo principale della limitata apertura è dovuto alla superficie opaca costituita dai conduttori che generano la buca di potenziale e dalle zone rivestite per immagazzinare la carica prima della lettura. Per aumentare il fattore di riempimento si può rimuovere lo strato posteriore sino a ridurlo a qualche decina di μm , in modo da poter esporre il sensore dal lato posteriore. Poiché questo procedimento è abbastanza costoso, spesso si preferisce disporre delle lenti davanti al sensore in modo da raccogliere una maggiore quantità di luce (in tal modo l'apertura aumenta di un fattore pari a tre).

Come tutte le apparecchiature elettroniche, anche il pixel di un CCD è soggetto a rumore elettronico. La maggiore fonte di rumore è costituita dagli effetti termici che generano una coppia elettrone-vacanza. Il tasso di generazione di queste coppie è pressoché costante, di conseguenza è possibile eliminarla sottraendo un valore costante al voltaggio in uscita. La corrente di fondo ha però una fluttuazione nel tempo che a sua volta è causa di rumore. Poiché la fluttuazione aumenta con la temperatura, è indispensabile raffreddare il sensore.

Altre caratteristiche di un pixel, inoltre, sono la sensibilità, la linearità e il range dinamico. La *sensibilità* del pixel è definita dal rapporto tra il numero di elettroni immagazzinati ed il numero di fotoni incidenti e si misura in carica immagazzinata per intensità di luce incidente. Tale valore dipende dall'apertura e dallo spessore dell'area sensibile e cambia notevolmente con la lunghezza d'onda della luce incidente. Per quanto riguarda la *linearità*, poiché ogni elettrone si aggiunge linearmente alla carica immagazzinata, il voltaggio in uscita è linearmente proporzionale alla carica stessa. Piccole non-linearità sono dovute principalmente alla sovraesposizione o alla bassa qualità degli amplificatori in uscita; gli scostamenti dal

comportamento lineare, però, non eccedono l'1%. Infine, si definisce *range dinamico* di un CCD il rapporto tra la capacità massima di accumulazione ed il rumore di fondo e, vista la dipendenza di quest'ultimo dalla temperatura, aumenta al decrescere della temperatura. A temperatura ambiente il range dinamico è di 100-200 livelli di grigio (7-8 bit/pixel) mentre, raffreddando il sensore, si possono ottenere fino a 65000 livelli di grigio (16 bit/pixel).

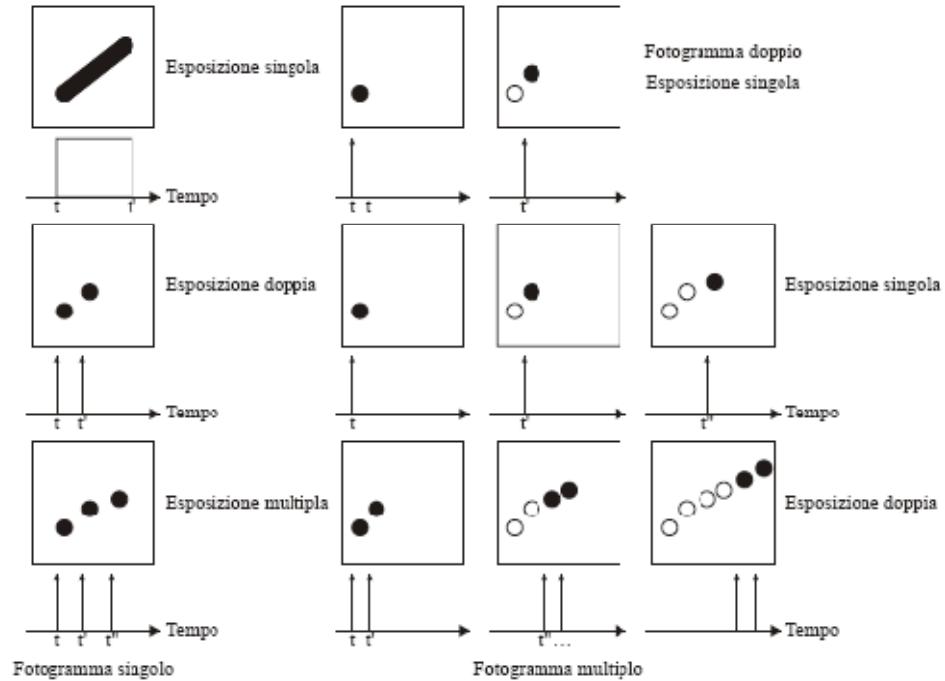


Figura 3.3 Schema delle principali tecniche di registrazione di immagini PIV.

I modi di registrazione delle immagini PIV si distinguono in due categorie: la prima è costituita dai metodi che catturano le immagini del flusso su di un solo fotogramma, mentre nella seconda categoria ogni immagine del flusso, corrispondente a un singolo impulso del laser, è registrata su un fotogramma distinto. Dette categorie, entrambe mostrate in Figura 3.3, possono avere esposizione singola, doppia o multipla. Il metodo con singolo fotogramma ed esposizione multipla, oltre a rendere meno agevole il calcolo dello spostamento, non fornisce informazioni sull'ordine temporale dei due impulsi generando la cosiddetta *ambiguità direzionale* del vettore spostamento.

In generale, i parametri che indirizzano la scelta verso un metodo piuttosto che un altro sono: la risoluzione spaziale e temporale del campo di moto, la risoluzione delle fluttuazioni di velocità, l'intervallo di tempo tra le misure PIV singole e, naturalmente, il costo e la disponibilità di apparecchiature in laboratorio.

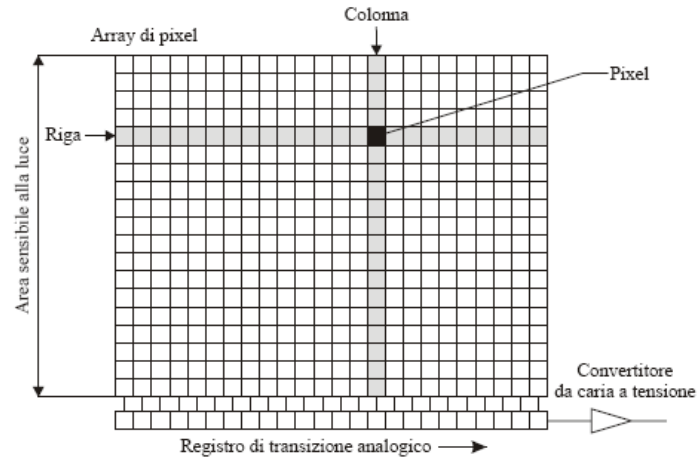


Figura 3.4 Geometria di un sensore CCD.

In Figura 3.4 è mostrata la geometria tipica di un sensore CCD in cui i pixel individuali sono raggruppati in un array rettangolare in modo da creare una regione sensibile alla luce. A differenza dell'indirizzamento della memoria del computer che è causale, l'informazione contenuta in ciascun pixel deve essere trasmessa in maniera sequenziale in due fasi. Nella prima fase, successiva all'esposizione, la carica accumulata è trasferita verticalmente, una riga per volta, a un registro di transizione analogico schermato dalla radiazione luminosa e collocato sul bordo inferiore del sensore. Ogni riga, attraverso un convertitore da carica a differenza di potenziale, è convertita pixel per pixel in un vettore di tensioni che, insieme ad impulsi di sincronizzazione, costituisce il segnale di uscita del sensore. A seconda del tipo di sensore, inoltre, la lettura del segnale può avvenire in maniera sequenziale (progressiva) oppure interlacciata (vale a dire prima le righe dispari e poi le pari).

Un sensore CCD classico a fotogramma pieno è quello mostrato in Figura 3.4: il processo di registrazione avviene nella maniera appena descritta mentre la modalità di lettura è di tipo interlacciato. Questo tipo di sensore è caratterizzato da fattori di riempimento che possono raggiungere il 100% ed ha il grosso vantaggio di essere disponibile in array di grandi dimensioni (7000 x 5000 pixel). Questo CCD ha però qualche grosso svantaggio. Innanzitutto, per ottenere range dinamici elevati e bassi rumori di lettura la frequenza di acquisizione deve essere mantenuta bassa (anche minore di 1 Hz). Un secondo problema è causato dal fatto che il sensore rimane attivo durante la lettura, e questo, comportando la cattura di altra luce, produce delle macchie verticali nell'immagine finale. Inoltre, se la velocità da misurare non è sufficientemente bassa, non è possibile eseguire un'acquisizione con singola esposizione.

3.1.6. Metodi di valutazione digitale

Lo scopo principale dei metodi di valutazione consiste nel determinare lo spostamento di gruppi di particelle. Di solito, per determinare la traslazione temporale o spaziale di due segnali, si utilizzano tecniche di correlazione. Si può quindi calcolare una funzione di correlazione o direttamente nel dominio dello spazio, oppure indirettamente, calcolando in successione le trasformate di Fourier, il prodotto complesso coniugato nel dominio della frequenza e la trasformata inversa del risultato. In Figura 3.6(a) è rappresentato il diagramma di flusso del metodo di autocorrelazione completamente digitale, utilizzato nel caso di registrazioni con fotogramma singolo e doppia esposizione. L'immagine PIV viene suddivisa in finestre di interrogazioni più piccole, per ognuna delle quali sono calcolati la funzione di autocorrelazione e lo spostamento, che corrisponde al picco nella Figura 3.5. Il calcolo della funzione avviene nel dominio della frequenza per mezzo di algoritmi efficienti (Fast Fourier Transformation, FFT). Come mostrato in Figura 3.5, la funzione di autocorrelazione presenta tre picchi principali: un picco centrale dovuto alla correlazione delle immagini delle particelle con se stesse, e due *picchi di spostamento* sui lati opposti del picco centrale che sono dovuti alla correlazione delle immagini delle particelle della prima esposizione con quelle della seconda e viceversa. Lo spessore dei picchi dipende dalla dimensione del diametro delle particelle e, se queste ultime sono presenti in numero sufficiente, detti picchi si ergeranno tra i picchi molto più bassi del rumore di fondo casuale. Poiché non è possibile distinguere tra i due picchi simmetrici secondari, sarà presente un'ambiguità direzionale che generalmente viene rimossa con una traslazione dell'immagine tra la prima e la seconda esposizione.

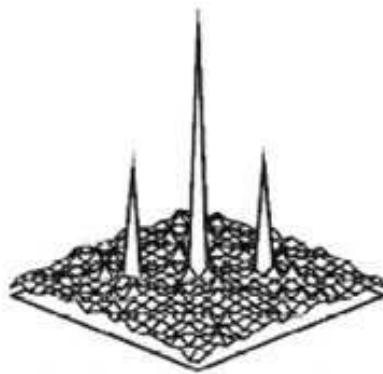


Figura 3.5 Mappa della funzione di autocorrelazione bidimensionale, sul piano verticale è rappresentata la funzione di autocorrelazione R .

Se il sistema di acquisizione consente l'impiego di registrazioni con doppio fotogramma ed esposizione singola, il calcolo dello spostamento si esegue utilizzando la funzione di cross-

correlazione tra due finestre d'interrogazione (Figura 3.6(b)). In questo caso, il picco nella funzione è unico e, pertanto, non è presente il problema dell'ambiguità direzionale. Il calcolo della funzione di cross-correlazione è fatto numericamente con un calcolatore utilizzando algoritmi FFT. Nelle applicazioni ad alta risoluzione di immagine, però, è molto difficile ottenere due esposizioni su fotogrammi diversi. Ciò accade nel caso della PIV fotografica, in cui, per utilizzare le tecniche con cross-correlazione, è necessario digitalizzare le registrazioni (Figura 3.6(c)). Le finestre d'interrogazione, allora, possono essere scelte di dimensione diversa e leggermente sfasate l'una rispetto all'altra in modo da compensare le perdite di correlazione dovute allo spostamento delle particelle.

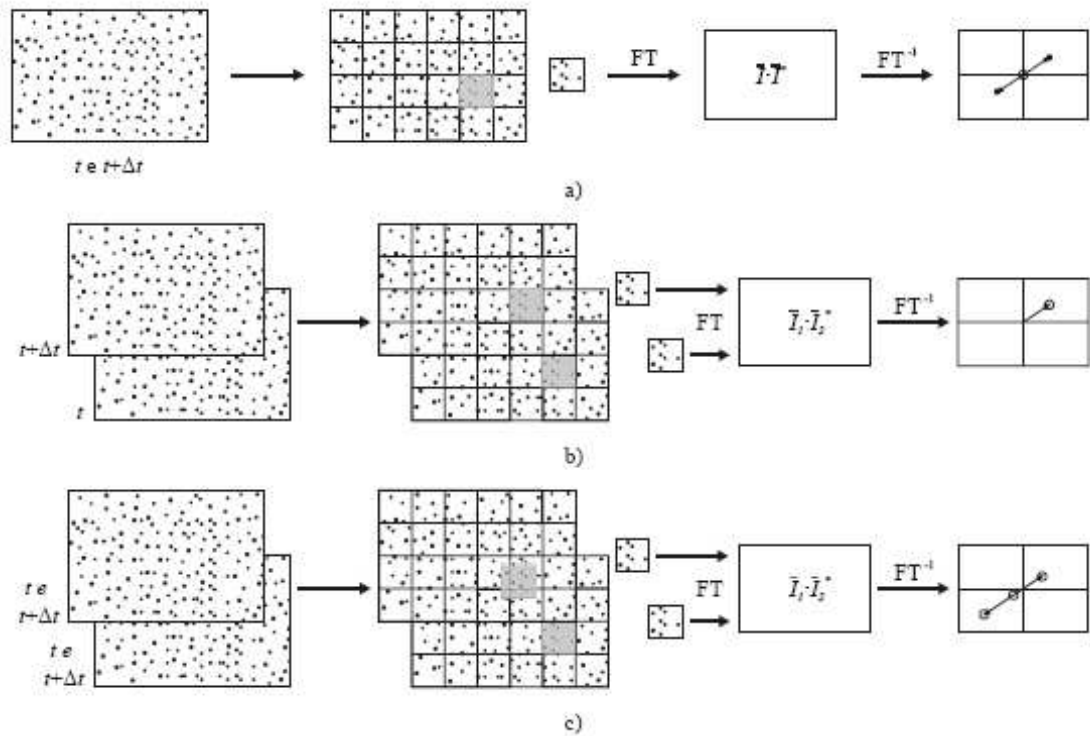


Figura 3.6 Metodi di valutazione delle immagini PIV: a) metodo con autocorrelazione completamente digitale; b) metodo con cross-correlazione digitale nel caso di fotogramma doppio e singola esposizione; c) metodo con cross-correlazione digitale nel caso di fotogramma singolo e doppia esposizione.

In questo paragrafo verrà descritto il metodo basato sulla cross-correlazione con fotogramma doppio e singola esposizione, essendo questo il metodo utilizzato per le misure realizzate nel presente lavoro di tesi. Si assume di avere a disposizione una coppia di immagini contenenti le particelle registrate da un fascio di luce con metodo PIV tradizionale. La seconda immagine è registrata dopo un breve intervallo di tempo nel quale le particelle si sono spostate insieme al fluido. La coppia di immagini fornisce il campo di spostamento i cui

vettori sono individuati analizzando il movimento di un gruppo di particelle localizzato. Come mostrato in Figura 3.7, ciò è ottenuto estraendo dall'immagine un piccolo campione (finestra d'interrogazione) ed analizzandolo con metodi statistici.

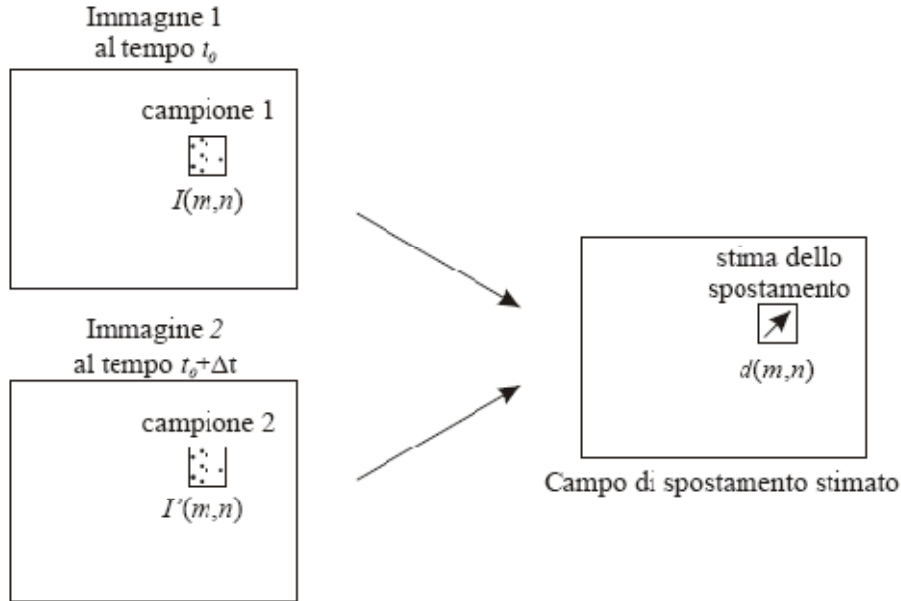


Figura 3.7 Schema del calcolo del campo di spostamento per PIV con doppio fotogramma e singola esposizione.

Dal punto di vista dell'elaborazione, la prima immagine si può considerare come l'ingresso di un sistema che fornisce in uscita la seconda immagine della coppia. La funzione di trasferimento del sistema converte l'immagine in ingresso I in quella di uscita I' ed è costituita da una traslazione d e dall'aggiunta del rumore N (Figura 3.8). Note le due immagini I ed I' , lo scopo del metodo di valutazione consiste nella stima del campo di spostamento mediante l'utilizzo di strumenti statistici eliminando gli effetti del rumore. Si ricerca una similitudine tra le immagini in senso statistico utilizzando la funzione di cross-correlazione discreta data da:

$$R_{II'}(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} I(i, j) I'(i + x, j + y) \quad 3.1$$

Le variabili I ed I' sono i campioni estratti dalle immagini delle due esposizioni. Il campione I è traslato sul campione I' senza estendersi oltre i bordi di quest'ultimo. Per ciascun valore della traslazione (x, y) , la somma dei prodotti delle intensità di tutti i pixel sovrapposti fornisce un valore della funzione di mutua correlazione $R_{II'}(x, y)$. Il valore

massimo nel piano di correlazione può essere utilizzato come stima dello spostamento delle particelle del campione.

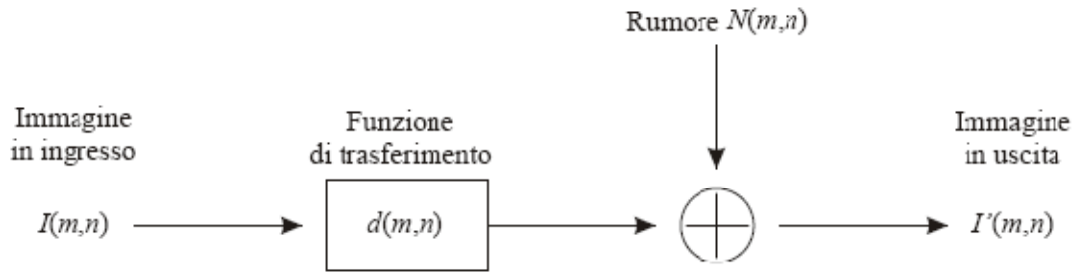


Figura 3.8 Modello di elaborazione di un segnale digitale lineare applicato al caso di due fotogrammi successivi di immagini PIV di particelle traccianti.

Nella cross-correlazione, il numero di moltiplicazioni per il calcolo di ogni valore della correlazione aumenta in proporzione all'area d'interrogazione. Per questo motivo è necessario ridurre sufficientemente le dimensioni delle finestre. L'incremento quadratico del numero di moltiplicazioni con le dimensioni del campione impone un notevole sforzo computazionale. Poiché, inoltre, i vettori spostamento su ciascuna immagine sono migliaia, ci si rende subito conto che è necessario uno strumento di calcolo più efficiente.

In alternativa alla cross-correlazione diretta è possibile calcolare la funzione di cross-correlazione con una moltiplicazione tra complessi e coniugati nel dominio di Fourier, ossia:

$$R_{II'} = \hat{I}\hat{I}'^* \quad 3.2$$

in cui \hat{I} ed \hat{I}'^* sono le trasformate di Fourier delle funzioni I ed I' rispettivamente. Nella pratica la trasformata di Fourier per dati discreti è ottenuta utilizzando gli algoritmi FFT, che riducono il numero di operazioni. Pertanto, il laborioso processo di correlazione bidimensionale dato dall'equazione 3.1 può essere ridotto calcolando due trasformate di Fourier (FFT) bidimensionali su campioni delle immagini di uguali dimensioni e, successivamente, eseguendo la moltiplicazione complessa coniugata dei coefficienti di Fourier ottenuti. Si calcola quindi la trasformata di Fourier del risultato. Rispetto alla correlazione diretta il numero di operazioni si riduce. Un'ulteriore riduzione del numero di operazioni può essere ottenuta tenendo conto delle proprietà di simmetria della trasformata di Fourier. In Figura 3.9 è riportato lo schema dell'implementazione descritta.

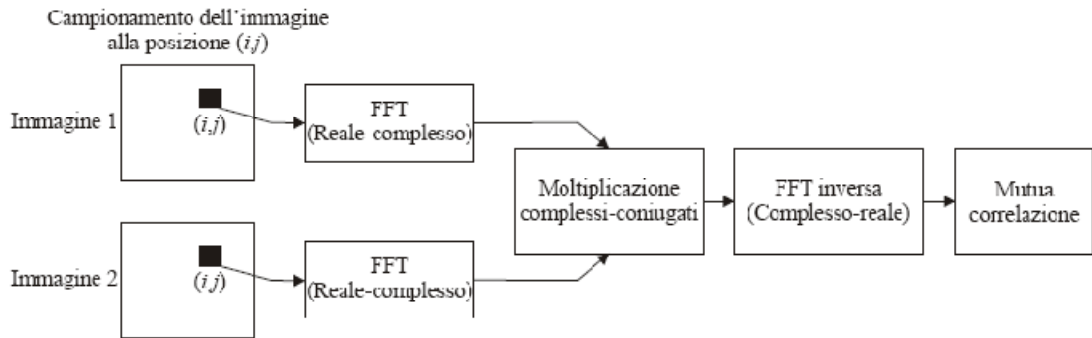


Figura 3.9 Implementazione della cross-correlazione utilizzando la trasformata di Fourier.

L'utilizzo di FFT bidimensionali per il calcolo della cross-correlazione presenta alcuni problemi che devono essere affrontati al fine di ottenere risultati affidabili. Possono essere presenti degli errori di bordo, che possono essere corretti con tecniche avanzate di finestratura, ma ciò può comportare un peso non uniforme dei dati ed il conseguente slittamento del vettore spostamento. Un altro problema risiede nel fatto che la trasformata di Fourier si estende dall'infinito negativo a quello positivo, mentre nella pratica viene calcolata su un dominio finito. Per risolvere il problema normalmente si utilizzano artifici quali la finestratura.

Infine, per aumentare il valore del rapporto segnale-rumore e la risoluzione spaziale è possibile ricorrere a tecniche d'interrogazione avanzate. Per quanto riguarda il rapporto segnale-rumore, un aumento si ottiene sfasando le finestre di una quantità pari allo spostamento previsto mentre, per quanto attiene alla risoluzione spaziale, un incremento si può realizzare con una riduzione graduale delle dimensioni delle aree d'interrogazione (Nese, 2004).

3.2 La tecnica Large Scale Particle Image Velocimetry

Recentemente, il metodo PIV standard è stato applicato, apportandone alcune modifiche, a misure di velocità su grandi scale, dando così origine al metodo chiamato Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).

In Figura 3.10 è mostrato uno schema di funzionamento della tecnica LSPIV. Per la registrazione delle immagini si usa una fotocamera CCD (Charge Coupled device), posta preferibilmente con un angolo di 90° rispetto alla superficie. La distanza e l'angolo tra la macchina fotografica e il piano varia molto da un'applicazione all'altra. Mentre le misure sul campo possono essere eseguite utilizzando la luce naturale, solitamente è necessaria un'adeguata illuminazione artificiale quando si eseguono misure all'interno del laboratorio (Fujita et al, 1998).

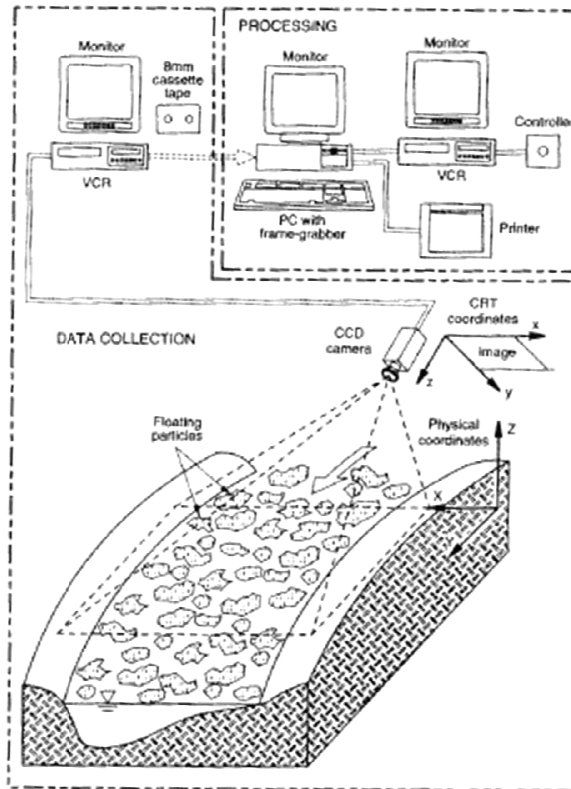


Figura 3.10 Rappresentazione schematica della tecnica LSPIV.

Un PC viene utilizzato per processare e salvare le immagini. Un software specifico è poi utilizzato per catalogare e analizzare le immagini fino all'ottenimento della mappa vettoriale finale.

La Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) combina i concetti della PIV convenzionale con ulteriori procedure studiate per risolvere i problemi specifici che comporta la registrazione delle immagini nelle condizioni di campo e comunque su vaste superfici. Ci sono due differenze fondamentali tra la tecnica PIV e la LSPIV. In primo luogo, la LSPIV è una tecnica di superficie che copre campi considerevolmente più grandi rispetto alla PIV convenzionale; ad esempio, sono state condotte con successo misure di velocità su superfici che si estendono fino a 45.000 m² (Fujita et al, 1998). In secondo luogo, la LSPIV utilizza dispositivi di illuminazione e attrezzature video per registrare le immagini digitali della superficie poco costose rispetto a quelle utilizzate dalla PIV, addirittura spesso è sufficiente anche solo la luce naturale (Meselhe et al, 2004).

Le misurazioni LSPIV includono le seguenti quattro fasi (Figura 3.11):

- disseminare una area ben illuminata del campo di moto di interesse con particelle che traccino con precisione il campo di moto, ma non interferiscano in modo significativo con esso.
- registrare le immagini della superficie con una risoluzione temporale adeguata;
- analizzare le immagini registrate con strumenti statistici per stimare lo spostamento delle particelle tra immagini consecutive;
- stimare il campo di velocità sull'intera area analizzata.

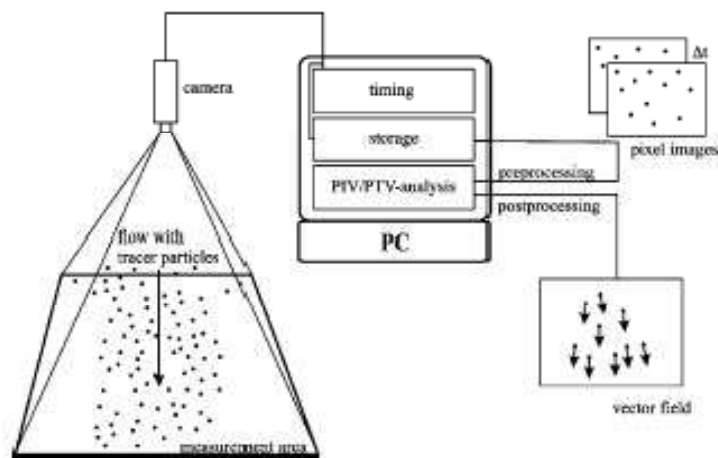


Figura 3.11 Schema di un sistema LSPIV.

Grazie al vantaggio della sua natura di tecnica a grande scala e la sua adattabilità, la LSPIV è utilizzata per l'analisi di una vasta gamma di fenomeni. Il metodo è, per esempio, adatto ad analizzare il flusso intorno a strutture idrauliche, anche nei casi in cui è presente

carico solido di fondo. Un'ulteriore rilevante capacità della tecnica LSPIV è la stima accurata che riesce ad eseguire anche a basse velocità. Se lo spostamento è osservato per un intervallo sufficientemente lungo, non ci sono praticamente limiti inferiori per i valori di velocità. Dantec Dynamics riporta come valori più bassi qualche $\mu\text{m/s}$ (Dantec Dynamics, 2002).

La LSPIV è una tecnica efficace e potente per la misura della velocità della superficie libera di fiumi e canali, estrae le informazioni qualitative e quantitative con ragionevole precisione, in modo rapido ed efficiente, ed è uno dei metodi di misura più utilizzati tra le tecniche esistenti (Fujita e Nakashima, 1999).

Mentre l'immagine e gli algoritmi di elaborazione dei dati sono simili a quelli usati nella PIV convenzionale, sono necessari degli adeguamenti per l'illuminazione, le particelle utilizzate e la pre-elaborazione delle immagini registrate. Rispetto alle applicazioni standard per PIV dove le misurazioni sono effettuate nell'ambito del corpo idrico con una luce laser, le misure LSPIV sono relativamente semplici in quanto non è necessario l'utilizzo del laser. In questo caso, infatti, il piano di misura è dato dalla superficie libera, il che significa che per l'illuminazione possono essere utilizzate le luci standard, a condizione che la superficie dell'acqua non sia disturbata dal moto ondoso (Weitbrecht et al, 2002).

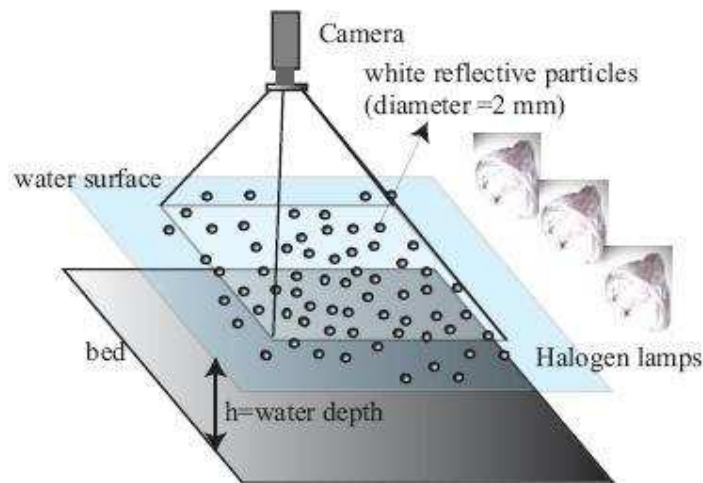


Figura 3.12 Rappresentazione del sistema LSPIV (Albayrak e Lemmin, 2007).

Usando la LSPIV è possibile ricavare solo velocità di superficie, tuttavia la conoscenza di tali velocità si è dimostrata utile in molti casi, come per esempio negli shallow flows. Inoltre, con l'aggiunta di un'ulteriore quinta fase alle quattro fasi presentate in precedenza, il campo delle velocità calcolato sulla superficie libera associato alla batimetria del fiume e a determinate ipotesi idrauliche sui profili di velocità verticali, conduce alla stima della portata

in qualsiasi condizione di flusso (Hauet et al, 2006). Infatti, Bradley et al. (2002) hanno utilizzato la LSPIV a Clear Creek (Iowa), un canale profondo 0,2 m e largo 5,7 m e hanno dimostrato che tale tecnica ha permesso una buona stima della portata (0,187m³/s con LSPIV, 0,192 (+ 6,4%) m³/s con un misuratore di portata).

Studi su una scala così ampia a volte richiedono che la camera debba essere montata con un angolo obliquo rispetto alla superficie liquida, con conseguente distorsione delle immagini PIV. Le fotografie devono quindi essere corrette in vista della successiva analisi vettoriale.

3.2.1. Le particelle traccianti

Indipendentemente dalla natura del fenomeno indagato, le particelle traccianti devono essere costituite da sostanze chimicamente inerti al fluido in esame e devono rispettare, per ovvi motivi di sicurezza, le condizioni di non tossicità e non corrosività. Oltre a questi vincoli, la scelta delle particelle traccianti è fortemente influenzata dal fatto che, dovendo fornire informazioni sul flusso, è indispensabile che seguano le medesime leggi di moto del fluido. Pertanto, esse devono avere proprietà tali da rendere trascurabile l'effetto delle forze cui sono sottoposte, in particolare la forza di gravità. Se si indicano con U_p la velocità delle particelle traccianti e con U quella della corrente, l'errore che si commette, detto errore di scorrimento, è definito come:

$$\varepsilon = \frac{|U_p| - |U|}{|U|} \quad 3.3$$

Le misure dei campi di velocità in aree di grandi dimensioni con elevata risoluzione spaziale e temporale sono spesso difficili, a causa della distribuzione non uniforme delle particelle sulla superficie dell'acqua. Per risolvere questo problema può, ad esempio, essere montato un distributore di particelle a monte della zona dove devono essere compiute le misurazioni (Weitbrecht et al, 2002). Questo sarà in grado di inseminare in modo omogeneo la superficie.

La parte principale del distributore è un pennello a rullo, che viene azionato da un motore a corrente alternata. La velocità del pennello può essere continuamente variata tra 0 e 5 giri al minuto per controllare il tasso di rilascio di particelle. La spazzola assicura una distribuzione delle particelle uguale su tutta l'area. Le particelle traccianti sono contenute in un container dietro il pennello. Un vibratore pneumatico è installato sul contenitore per garantire un approvvigionamento costante di particelle. Il vibratore pneumatico scuote la parete metallica

del contenitore con circa 6000 oscillazioni al minuto. La forza e il numero di oscillazioni possono essere adattati a seconda del materiale.

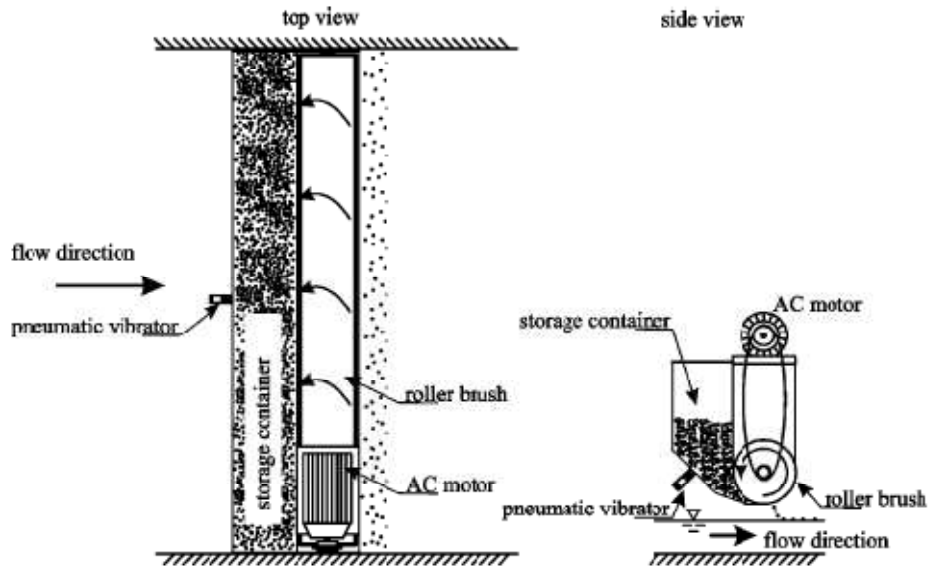


Figura 3.13 Distributore di particelle traccianti.

Un secondo problema riguarda la tendenza delle particelle ad agglomerarsi. Questo fenomeno porta ad una distribuzione disomogenea delle particelle sulla superficie liquida. È quindi fondamentale scegliere in modo accurato il materiale del tracciante.

Per misurare la velocità sulla superficie, le particelle traccianti devono galleggiare sulla superficie stessa e quindi il materiale deve essere più leggero dell'acqua. Tuttavia, particelle troppo leggere possono essere influenzate da flusso d'aria sopra la superficie dell'acqua. Nella Tabella 3.1 sono elencate le proprietà dei materiali utilizzati solitamente negli esperimenti. Tutti questi traccianti galleggiano sulla superficie dell'acqua. Il polistirolo si è dimostrato essere troppo leggero: il flusso d'aria sopra la superficie influenzava molto le particelle galleggianti. Il polietilene (PE) e polipropilene (PP) hanno una densità di $0,9 \text{ g/cm}^3$, che si è mostrata adeguata per l'utilizzo in tale tecnica.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
material	Polystyrene	coal	wood	expanded clay	PE	PP
form	sphere	die	sphere	sphere	cylinder	cylinder
diameter [mm]	2	1-5	4	1-2	2-3	2-3
density [g/cm ³]	0.04	0.50	0.50	0.73	0.90	0.90
resistance to air flow	-	+	+	+	+	+
avoidance of agglomeration	-	-	o	-	-	o
low cost	o	+	-	+	+	+
durability	+	o	-	+	+	+

- poor, o acceptable, + good.

Tabella 3.1 Proprietà di diversi materiali usati come traccianti (Weitbrecht et al, 2002).

Un altro punto importante è la dimensione delle particelle: per ottenere una precisa rappresentazione del moto di fluido, le particelle devono essere grandi abbastanza per essere efficacemente rilevate dalla camera e per avere un'adeguata diffusione della luce incidente, ma devono anche essere piccole e leggere abbastanza per galleggiare sul superficie dell'acqua e per seguirne i suoi movimenti (Meselhe et al, 2004). Le dimensioni delle particelle da utilizzare, quindi, sono il risultato di un compromesso tra le due caratteristiche. Raffel et al.(1998) suggeriscono di utilizzare particelle che risultino avere sull'immagine un diametro maggiore di 1,5 pixel. Però particelle troppo grandi possono avere il problema di non seguire il flusso a causa di forze inerziali, quindi, un buon compromesso è dato utilizzando particelle con dimensioni da 2 a 5 pixel.

Oltre alle caratteristiche meccaniche del tracciante sono molto importanti anche le sue caratteristiche ottiche, in quanto, per migliorare l'affidabilità della misura è necessario avere immagini ad elevato contrasto che risultano in un elevato rapporto segnale/rumore. Poiché l'intensità luminosa delle immagini delle particelle e di conseguenza il contrasto nelle immagini PIV è direttamente proporzionale al potere di diffusione della luce, risulta più efficace ed economico aumentare l'intensità luminosa delle immagini scegliendo particelle con un potere riflettente più elevato. In generale, si può affermare che l'intensità della luce diffusa dalle particelle è funzione del rapporto tra l'indice di rifrazione delle particelle e quello del mezzo circostante, delle dimensioni, della forma e dell'orientazione delle particelle, della polarizzazione e dell'angolo di osservazione. Per particelle sferiche con un diametro maggiore della lunghezza d'onda della luce incidente, si può utilizzare la teoria di Mie sulla diffusione della luce (*scattering*). La Figura 3.14 (Raffel et al., 1998) mostra la distribuzione polare dell'intensità luminosa della luce diffusa da particelle di olio di diametro differente in aria alla lunghezza d'onda $\lambda = 532 \text{ nm}$. L'intensità è diagrammata in scala logaritmica ed è

rappresentata in modo che due cerchi adiacenti differiscano di un fattore pari a 100. La diffusione alla Mie può essere caratterizzata da un diametro normalizzato, q , definito come:

$$q = \frac{\pi d_p}{\lambda} \quad 3.4$$

dove d_p è il diametro della particella. Per valori crescenti di q il rapporto tra l'intensità della luce diffusa in avanti rispetto a quella diffusa indietro aumenta rapidamente.

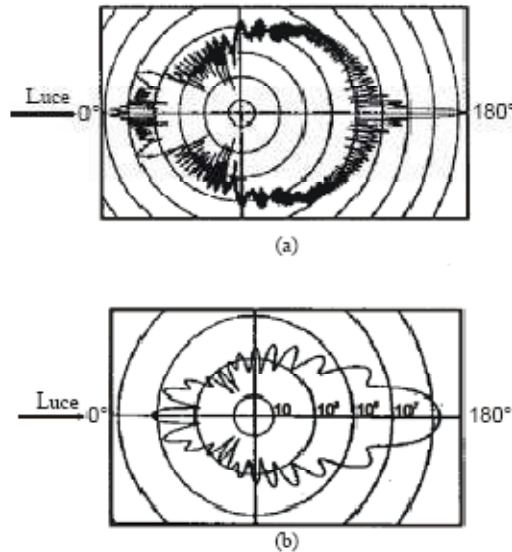


Figura 3.14 Distribuzione polare dell'intensità della luce diffusa da particelle di olio in aria per diversi diametri e per una lunghezza d'onda di 532 nm secondo la teoria di Mie. (a) Diametro pari a 10 μm (b) Diametro pari a 1 μm .

L'intensità della luce diffusa cresce con il diametro della particella, però al crescere di q cresce rapidamente anche il numero dei massimi e minimi. Ciò può creare qualche problema nelle tecniche che, a partire dall'intensità dei pixels dell'immagine, calcolano la componente di velocità ortogonale al piano di misura analizzando la posizione delle particelle in un fascio di luce con profilo di intensità noto. L'intensità media cresce bruscamente con q^2 , mentre, l'efficienza della diffusione dipende fortemente dal rapporto tra l'indice di rifrazione delle particelle e quello del mezzo. Poiché l'indice di rifrazione dell'acqua è molto più alto rispetto a quello dell'aria, a parità di dimensione delle particelle la diffusione della luce riflessa nell'aria è almeno un ordine di grandezza superiore a quello dell'acqua. Per tale ragione per esperimenti condotti in acqua le particelle devono essere più grandi, cosa resa possibile dal fatto che l'acqua ha una densità maggiore dell'aria. In Figura 3.15 (Raffel et al., 1998) è

mostrata, per λ pari a 532nm , l'intensità della luce diffusa da particelle di vetro in acqua per diversi valori del diametro.

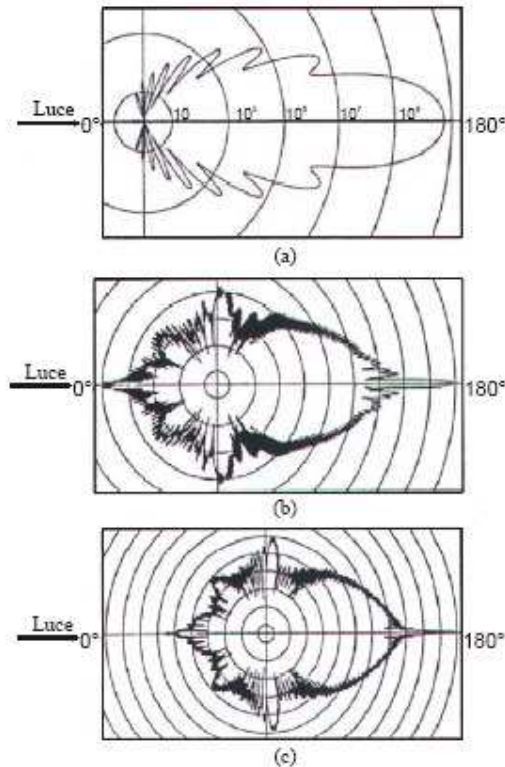


Figura 3.15 Distribuzione polare dell'intensità della luce diffusa da particelle di vetro in acqua per diversi diametri e per una lunghezza d'onda di 532 nm secondo la teoria di Mie. (a) $1\ \mu\text{m}$; (b) $10\ \mu\text{m}$; (c) $30\ \mu\text{m}$.

Dai diagrammi di diffusione di Mie si può vedere che l'intensità della radiazione incidente non è bloccata dalle particelle, ma è dispersa in ogni direzione. Le particelle traccianti sono pertanto illuminate oltre che dalla luce diretta anche dalla luce diffusa dal gran numero di particelle presenti nel flusso e ciò contribuisce ad aumentare l'illuminazione di ogni singola particella. Si può aumentare l'efficienza della diffusione non solo incrementandone le dimensioni, ma anche aumentandone la densità. Due però sono i problemi che limitano l'utilizzo di flussi ad alta densità: il primo è legato all'aumento del rumore di fondo derivante dalla maggiore densità; il secondo è dovuto al fatto che, utilizzando particelle di diverse dimensioni, non è sicuro che il numero di particelle visibili aumenti semplicemente aumentando quelle di dimensioni più grandi. Poiché le immagini delle particelle più grandi dominano chiaramente l'analisi del campo, diventerebbe difficile fare stime accurate sulle dimensioni effettive delle particelle e sul corrispondente errore di scorrimento.

3.2.2. La trasformazione delle immagini

La distorsione causata dalle lenti e le distorsioni di prospettiva sono due fattori che dovrebbero essere affrontati quando vengono registrate immagini su grandi dimensioni. La distorsione della lente è inevitabile per una determinata fotocamera ottica, mentre la distorsione prospettica è direttamente correlata alla grandezza dell'angolo tra l'asse ottico della camera e il piano del campo di moto dell'immagine (Meselhe et al, 2004). Per eseguire la trasformazione, si può utilizzare una trasformazione geometrica applicata sulle immagini (Fujita et al, 1998). In sostanza, i due sistemi di coordinate, quello della macchina (cathode-ray tube o CRT) (x, y, z) e le coordinate fisiche (X, Y, Z) (Figura 3.10) sono correlate attraverso una matrice di trasformazione. E' da notare che le coordinate fisiche sono scelte in modo che l'asse Z sia verticale e il piano XY orizzontale. L'equazione di trasformazione dalle coordinate CRT alle coordinate fisiche è:

$$X = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_4x + b_5y + 1} \quad 3.5$$

$$Y = \frac{b_6x + b_7y + b_8}{b_4x + b_5y + 1} \quad 3.6$$

Dove b_i sono i coefficienti della trasformazione determinati con il metodo dei minimi quadrati utilizzando N coppie di punti di coordinate note $(x_1, y_1), (X_1, Y_1) \dots (x_N, y_N), (X_N, Y_N)$. I coefficienti della trasformazione possono essere ottenuti risolvendo l'equazione:

$$TB = Z \quad 3.7$$

Dove:

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & -x_1X_1 & -y_1Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_N & y_N & 1 & -x_NX_N & -y_NY_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -x_1Y_1 & -y_1X_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & -x_NY_N & -y_NX_N & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_8]^T \text{ e } Z = [X_1, X_2, \dots, X_N, Y_1, Y_2, \dots, Y_N]^T$$

La relazione tra le coordinate fisiche e CRT è mostrata in Figura 3.16, si dispone sull'area da indagare un oggetto target e si vede come la griglia di dimensioni ΔX e ΔY si modifica

nell'immagine distorta acquisita dalla fotocamera. In questo modo si ricavano i coefficienti della trasformazione.

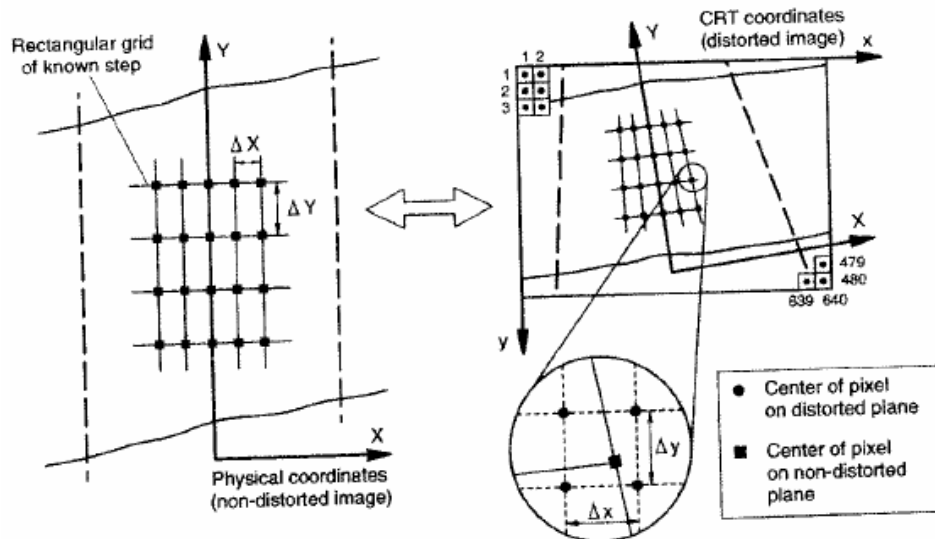


Figura 3.16 Procedura per la correzione delle immagini distorte.

3.2.3. La precisione del sistema di misura

Prove di utilizzo di particelle di diverse dimensioni hanno mostrato che il valore minimo del diametro delle particelle deve essere almeno 1,5 pixel al fine di evitare effetti di pick-locking. Raffel et al. (1998) hanno dimostrato che la concentrazione di particelle influenza la probabilità di individuare lo spostamento valido così come l'incertezza di misura. Prove con diverse concentrazioni di particelle hanno mostrato che il numero di particelle in ogni area d'interrogazione dovrebbe essere superiore a cinque. Tests per determinare l'influenza dello spostamento delle particelle hanno mostrato che lo spostamento delle particelle massimo tra due immagini consecutive dovrebbe essere inferiore al 50% della area d'interrogazione per ottenere risultati ottimali. Nei casi di elevata velocità del flusso la macchina fotografica deve essere utilizzata in modalità doppio otturatore con illuminazione stroboscopica. Se il range di velocità del flusso è troppo ampio, devono essere utilizzati strumenti aggiuntivi, come la funzione adattiva multipass. I risultati sono molto sensibili a diversi parametri di pre e post-elaborazione, quindi, per ogni setup sperimentale, devono essere regolati con attenzione tali parametri e le condizioni esistenti come la velocità del flusso, la dimensione del piano di misura e l'illuminazione.

3.3 Applicazione della tecnica LSPIV per fiumi e dighe

L'ingegneria fluviale è spesso legata ad evoluzioni del flusso e/o della geometria del canale. Modelli fisici dei fiumi sono utilizzati per analizzare ad esempio il livello dell'acqua, i confini delle aree inondate, le velocità nella sezione trasversale. I modelli indicano anche le potenziali zone di deposizione dei sedimenti così come le zone poco profonde pericolose per il passaggio delle navi. La maggior parte delle tecniche esistenti per lo studio del moto di un fiume sono tecniche di misurazione puntuali e forniscono informazioni circoscritte. La tecnica basata sull'utilizzo delle immagini è un nuovo metodo per la caratterizzazione del campo di moto in grado di determinare in modo efficiente le due componenti di velocità sulla superficie libera (Fujita e Nakashima, 1999).

Il metodo non-intrusivo LSPIV può essere implementato nel corso delle prove con carico di fondo, dove l'uso di altre tecniche di misurazione spesso non è possibile (Bieri et al, 2009). Particolare è il caso delle shallow water (acque basse) che si possono trovare nei fiumi o in zone costiere e in cui i processi dominanti sono bidimensionali. Infatti, le dimensioni orizzontali sono superiori rispetto alla dimensione verticale e quindi il processo è principalmente bidimensionale. Le proprietà fondamentali dell'intero flusso possono quindi essere ben rappresentate dalla misura della velocità di superficie.

3.3.1. Applicazione nell'ingegneria fluviale

3.3.1.1. Caso studio 1: il fiume Rodano a Visp (Svizzera)

Il caso di studio riguarda una soglia laterale per il controllo delle tracimazioni del Rodano in caso di eventi di piena importanti. La chiusa si trova nel fiume Rodano a Visp (Svizzera). Le prove LSPIV sono state eseguite per esaminare le prestazioni dello sbarramento, progettato numericamente. Inoltre, sono stati studiati il flusso di superficie in sezioni diverse e alle confluenze del fiume. Le misure del flusso di superficie sono state condotte su diverse sezioni del modello fisico (scala 1:50) utilizzando una portata con un periodo di ritorno di 100 anni. Due sono state le zone di misura scelte (Figura 3.17): la zona 1 contiene la confluenza del Balschiederbach con il fiume Rodano. L'afflusso laterale è di circa $35 \text{ m}^3/\text{s}$; la zona 2 mostra la zona a valle della soglia, che è caratterizzata da una serie di pennelli posizionati sul lato sinistro del fiume.

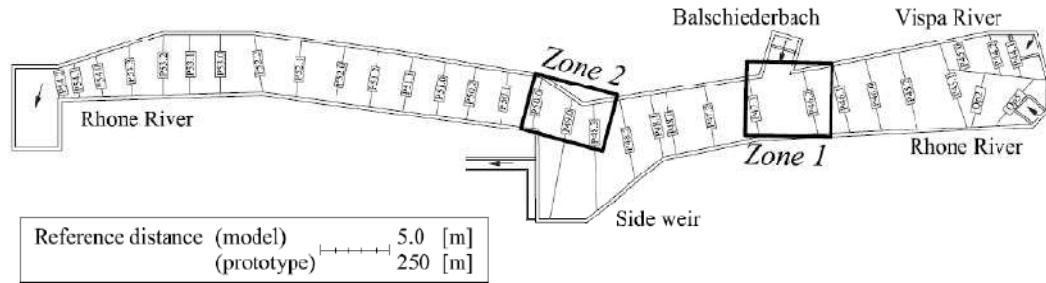


Figura 3.17 Esperimenti condotti sul fiume Rodano a Visp.

Il campo di moto della zona 1 (Figura 3.18 a sinistra) mostra l'effetto della confluenza del Baltschiederbach con il fiume Rodano. L'afflusso laterale conduce a una ritenuta nella parte immediatamente a monte del fiume principale e quindi alla deposizione dei sedimenti localizzata nel centro del fiume dove si hanno velocità minori. Ciò porta a una separazione del flusso sui due lati destro e sinistro rispetto al deposito di sedimenti stesso. A valle del punto di confluenza, la distribuzione di velocità in superficie diventa di nuovo uniforme. Le misurazioni LSPIV effettuate nella zona 2 (Figura 3.18 a destra) rivelano l'impatto della contrazione dovuta ai pennelli. Le velocità a valle della contrazione sono più uniformi. Nella zona compresa tra i pennelli, le velocità più alte (4,3 m/s nel prototipo) sono rilevate al bordo dei frangiflutti. Come risultato, non si ha sedimentazione (Bieri et al, 2009).

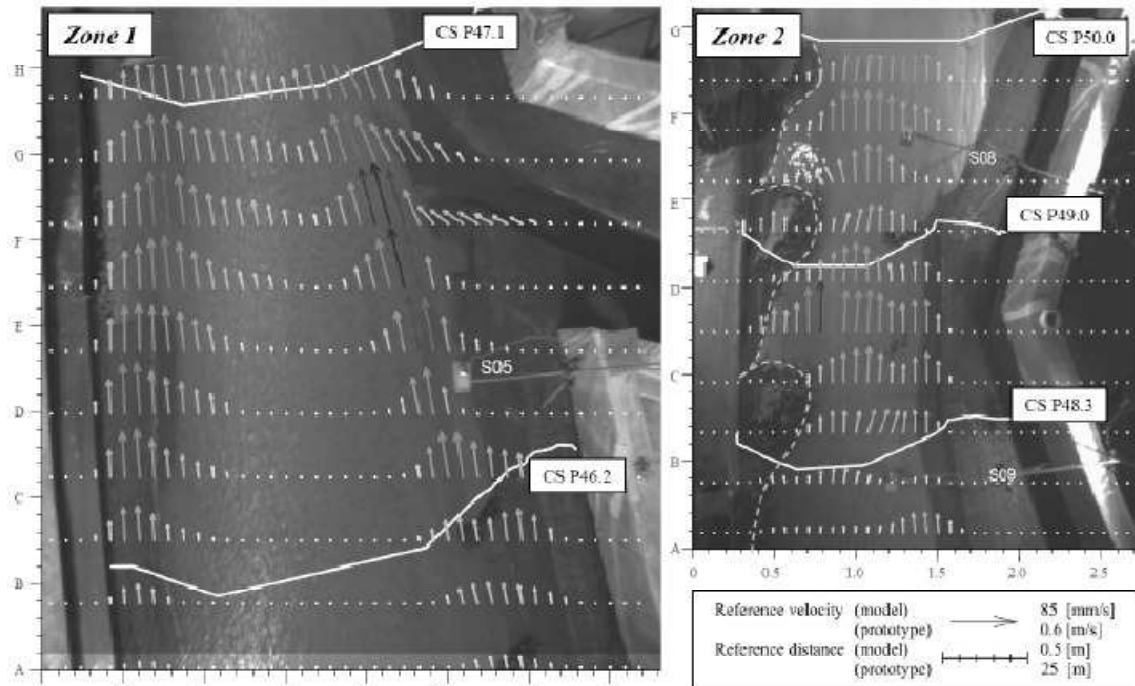


Figura 3.18 Vista del flusso superficiale nella zona 1 (a sinistra) e 2 (a destra) per una portata con $T_R = 100$ anni.

3.3.1.2. *Caso studio 2: dinamica fluviale tra due pennelli*

Un ulteriore esempio di applicazione della tecnica LSPIV in ambito fluviale è fornito da (Weitbrecht et al, 2002). Il metodo è stato utilizzato per analizzare la dinamica del flusso nella zona di miscelazione tra il flusso principale di un fiume e la zona di acqua ferma che si crea tra due pennelli successivi. Il flusso in questo caso è quasi bidimensionale a causa di un elevato rapporto tra larghezza e profondità idrica. Questo fatto ci permette di utilizzare il metodo proposto per misurare solo le velocità di superficie per caratterizzare il flusso.

Per modellizzare la situazione si sono eseguiti esperimenti utilizzando un canale lungo 20 m e largo 1,82 m con la profondità dell'acqua pari a $h = 0,046$ m. I pennelli realizzati erano lunghi 0,5 m e la distanza tra un pennello e l'altro pari a 1,25 m come si può vedere dalla Figura 3.19.

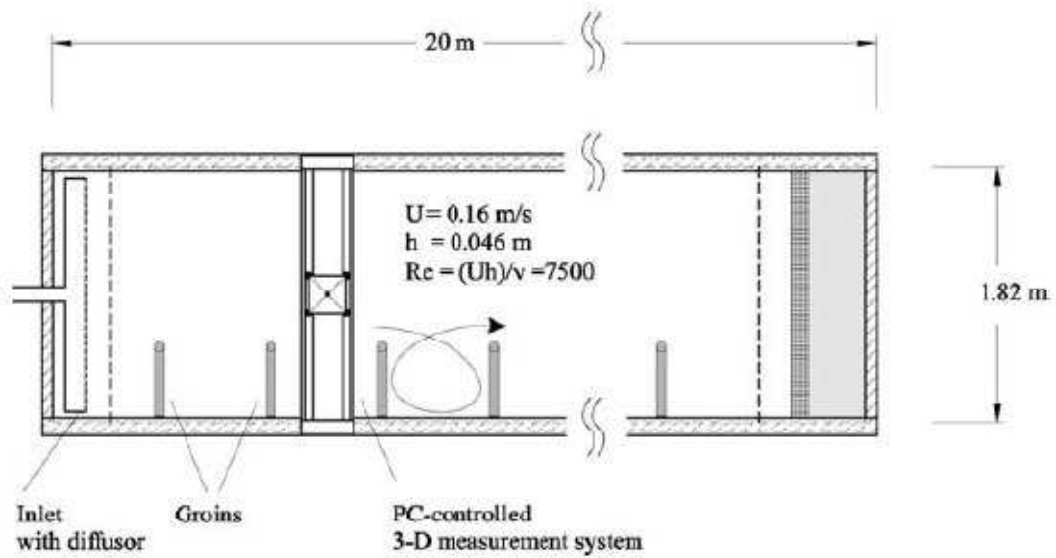


Figura 3.19 Vista schematica del set-up sperimentale.

Il flusso di acqua nella zona morta è caratterizzato da lenti movimenti di ricircolo (Figura 3.20) formato da un sistema di due vortici separati. Un vortice di grandi dimensioni nel centro della zona morta domina il flusso, mentre un piccolo vortice, che ruota molto più lentamente del primo, si trova in un angolo a monte. Tra il flusso principale nel fiume e la zona morta si sviluppa uno strato di miscelazione (mixing layer).

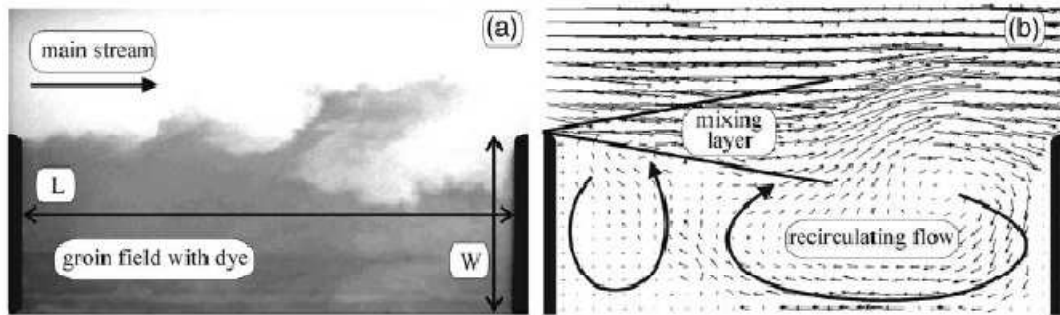


Figura 3.20 Dinamica del flusso tra due pennelli e il corso idrico principale. (a) Vista sul campo (b) campo della velocità misurato con la LSPIV.

Tracciando le streamlines, cioè le linee sempre tangenti al vettore velocità in ogni punto del campo di moto, si possono visualizzare i due vortici (Figura 3.21a). La componente media della velocità u può essere utilizzata per caratterizzare lo stato di miscelazione e l'evoluzione dello stesso tra i due pennelli. Inoltre si possono utilizzare i dati delle velocità per una caratterizzazione del moto turbolento e per calcolare il campo di vorticosità.

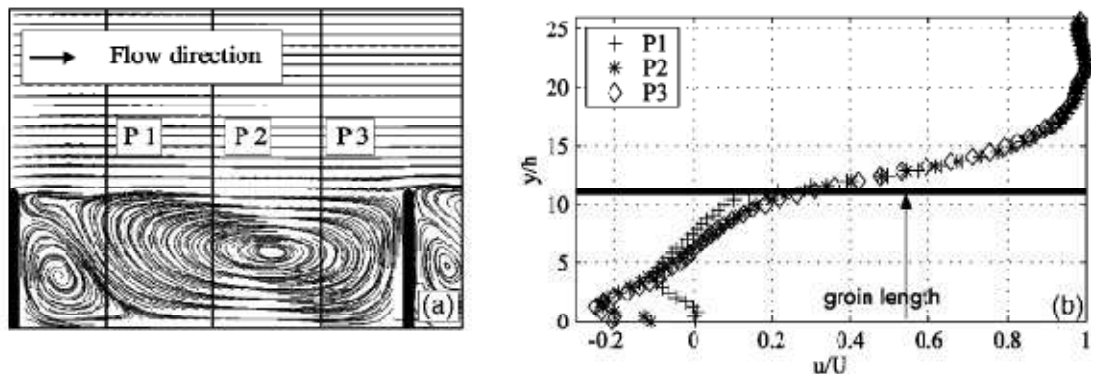


Figura 3.21 Proprietà del flusso (a) Linee di flusso nella zona tra i due pennelli (b) Profilo di velocità in tre differenti sezioni normalizzato con la profondità dell'acqua h e la velocità del fiume U .

3.3.1.3. Caso studio 3: il fiume Nagara in Giappone

Lo stesso studio è stato eseguito direttamente sul campo da Fujita (1999) che ha utilizzato la tecnica LSPIV per monitorare il flusso tra cinque pennelli consecutivi sul fiume Nagara in Giappone. La distanza tra i pennelli, la loro lunghezza e larghezza sono di circa 30 m, 16 m e 8 m, rispettivamente. La portata nel giorno di osservazione era di circa $100 \text{ m}^3/\text{s}$. L'uso di questo nuovo metodo ha portato a una completa descrizione delle caratteristiche del flusso sulla superficie libera per questa situazione.

Le immagini del fiume sono state registrate usando una tradizionale fotocamera impostata sulla riva del fiume. Una funzione di mappatura tra le coordinate fisiche (X, Y) e le coordinate (x, y) della telecamera è stata utilizzata per correggere la distorsione dell'immagine (Fujita et al, 1997). I campi di velocità sono stati ottenuti attraverso un algoritmo standard PIV con cross-correlazione delle immagini separate.

Nell'esperimento, il flusso superficiale del fiume è stato visualizzato per mezzo di piccoli traccianti distribuiti uniformemente sul campo. I traccianti utilizzati sono stati pezzi realizzati in amido di mais grandi 5 cm che sono in grado di seguire con precisione il flusso senza essere influenzati dall'azione del vento. Il materiale tracciante è atossico, facilmente dissolvibile in acqua e bio-degradabile.

Quando si applica la tecnica in condizioni di campo è praticamente impossibile la diffusione simultanea delle particelle traccianti sull'intera superficie analizzata. Quindi, sono necessari i cambiamenti nella fase di elaborazione delle immagini. L'idea di base che si usa per ottenere il campo di velocità medio sull'intera area usando la procedura descritta sopra è quella di sovrapporre i campi vettoriali ottenuti separatamente per la zona immaginata in cui sono presenti le particelle traccianti. A tal fine, prima della trasformazione è impostato un adeguato livello di soglia, indicato come Cr , che permette di distinguere le aree inseminate correttamente dalle altre. L'elaborazione PIV è applicata solo alle zone in cui è presente il tracciante. In particolare, nel caso in esame la trasformazione PIV è stata applicata solo alle immagini in cui oltre il dieci per cento dei pixel avevano intensità luminosa maggiore di Cr .

Fujita ha analizzato circa cinquecento immagini consecutive e tale analisi ha dato un migliaio di vettori velocità che descrivono qualitativamente e quantitativamente il flusso in ogni intercapedine dei pennelli. La dimensione dell'area d'interrogazione utilizzata per la correlazione è stata 31 x 31 pixel; i vettori errati sono stati corretti utilizzando l'algoritmo proposto da Fujita e Kaizu (1995).

Si è constatato che il flusso tra i pennelli presenta caratteristiche completamente diverse per ogni intercapedine. L'analisi della distribuzione della velocità sulla superficie libera ha permesso l'identificazione di vortici, un'indicazione della presenza di flusso tridimensionale nel corpo del flusso.

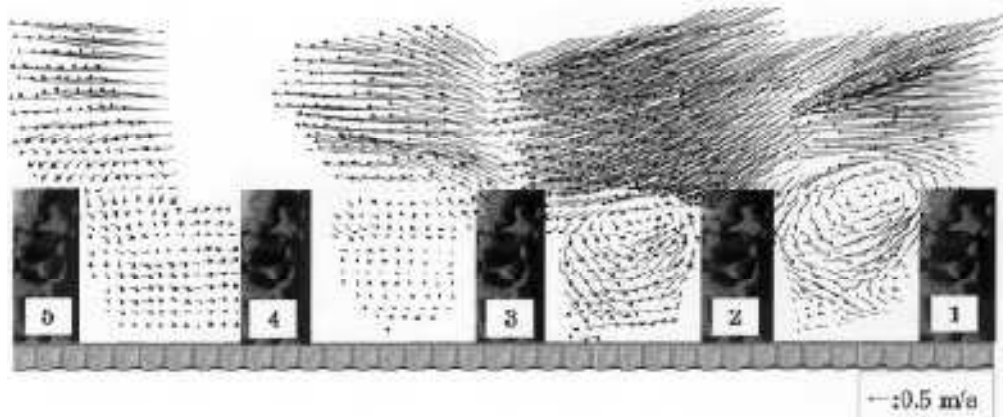


Figura 3.22 Campo di velocità media ottenuto attraverso l'analisi LSPIV.

In Figura 3.23 è presentata la distribuzione della vorticosità tra i pennelli 1, 2 e 3. La distribuzione mostra una regione di grandi vorticosità vicino al centro dell'area di ricircolo a monte del secondo pennello. Questi vortici non si trovano nella zona a valle. Questa scoperta suggerisce la generazione di un vortice forzato tra le punte dei pennelli e non all'interno delle intercapedini.

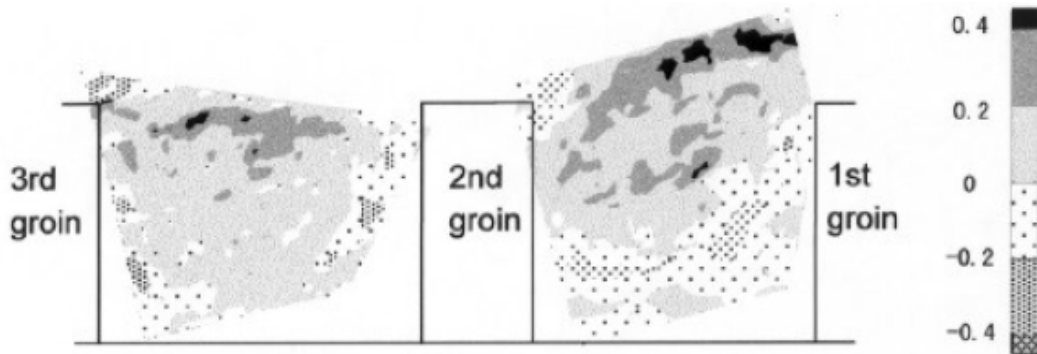


Figura 3.23 Distribuzione della vorticosità (unità: 1/s).

3.3.1.4. Caso studio 4: misura della portata di piena

Fujita et al. (1998), inoltre, ha utilizzato tale tecnica sul campo per il monitoraggio della velocità del fiume Yodo (Giappone) durante la piena del 1993. Una conoscenza accurata del campo di moto durante una piena è di fondamentale importanza per gli idrologi e geomorfologi ma durante le piene è molto difficile poter ottenere misure del flusso e il monitoraggio dell'intero evento è molto complicato. Durante le analisi, è stata utilizzata una camera posta vicino alle rive del fiume, le immagini registrate erano di 512 x 512 pixel e coprivano un'area di 140 x 320 m. Per la cross-correlazione è stata utilizzata un'area d'interrogazione di 25 x 25 pixel e un intervallo di tempo tra le immagini di 1 secondo.

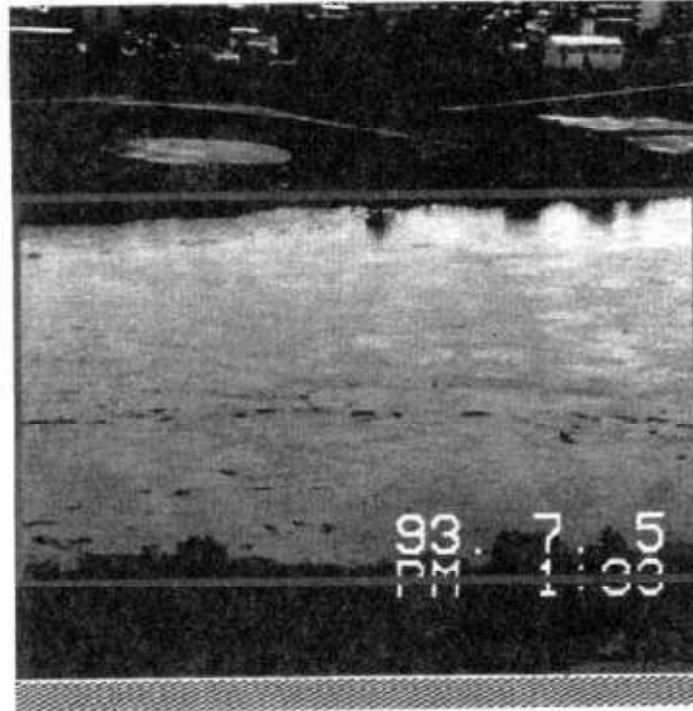


Figura 3.24 Immagine del fiume Yodo durante la piena del 1993.

Come si può vedere in Figura 3.25, la velocità ha raggiunto valori massimi di 4 m/s.

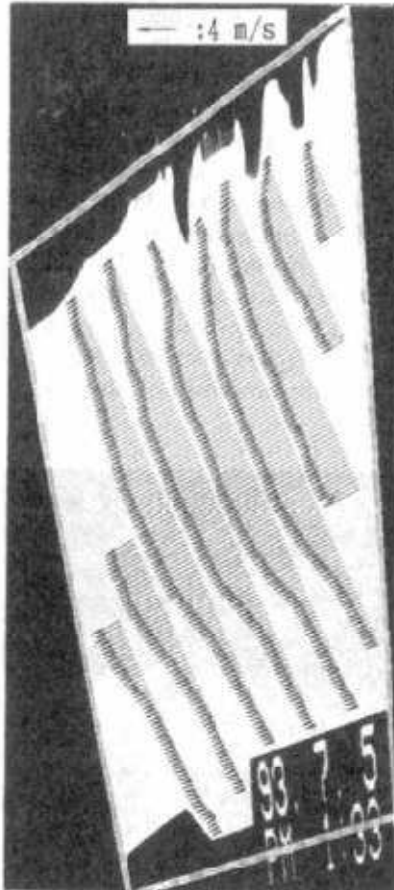


Figura 3.25 Velocità media calcolata con la LSPIV in una sezione del fiume Yodo durante la piena.

Gli autori hanno osservato una buona rappresentazione della distribuzione di velocità e anche la stima della portata era in accordo (entro 3%) con una stima eseguita in una stazione di misura. I risultati, quindi, mostrano che la tecnica LSPIV funziona bene sia per la determinazione del campo delle velocità che per il calcolo della portata associato ad esso anche durante eventi estremi.

La tecnica di immagini è l'ideale per fare misurazioni a basso costo, così da consentire non solo la misura della portata di piena, ma tutta l'evoluzione della piena stessa. Inoltre è un metodo molto efficace che agisce quando è impossibile ottenere misure con i metodi tradizionali. I principali problemi che si scontrano con l'applicazione di LSPIV per monitoraggio le alluvioni sono due:

- la dimensione molto importante della zona di interesse da registrare; le golene fluviali, infatti, sono in genere aree di diversi ettari, il che significa che si otterrà una bassa risoluzione delle immagini.

- la carenza di illuminazione e di particelle insemi nanti. Le alluvioni avvengono, infatti, soprattutto durante i periodi di pioggia, cioè con tempo nuvoloso e scarsa illuminazione naturale. Inoltre, la pioggia può distruggere le particelle traccianti dando origine a errori nel calcolo della velocità di superficie.

L'attrezzatura utilizzata è semplice, leggera e poco costosa, e può essere montato sopra la superficie del fiume (Fujita et al, 1998). Nonostante i problemi presentati, quindi, ci sono molti aspetti della misurazione della portata tramite la LSPIV che rendono interessante il suo utilizzo.

3.3.2. Applicazione nelle costruzioni idrauliche: il caso della diga di Les Gloriettes

La modellazione fisica in questo campo è utilizzata per studiare l'influenza delle strutture idrauliche, quali prese e sfioratori sul campo di moto. Questi elementi, soprattutto se sono sommersi, influiscono sul flusso in tre dimensioni. Tuttavia la LSPIV permette l'analisi di diversi aspetti della interazione fluido-struttura. Studiando prese d'acqua, possono essere individuate zone in cui si ha flusso stagnante o presenza di vortici. In questo caso, l'assenza di deflusso superficiale limita la durata del test a causa dell'accumulo delle particelle. I test con il metodo LSPIV aiutano soprattutto a valutare sfioratori di superficie presenti nelle dighe. La conoscenza dei modelli di flusso di superficie permette la valutazione di campi di moto accelerato, celle di circolazione, e possibili zone con rischio di cavitazione elevato.

La diga di Les Gloriettes è situata nei Pirenei vicino Gèdre (Francia) sul fiume Gave d'Estaubé. Il sistema di allontanamento attuale è costituito da quattro scarichi di superficie con una capacità totale di $80 \text{ m}^3/\text{s}$ al livello massimo di funzionamento. Per un periodo di 1000 anni di ritorno, è stata calcolata una portata di picco di $150 \text{ m}^3/\text{s}$, quindi il deficit di capacità di scarico è di $70 \text{ m}^3/\text{s}$. Per eliminare il rischio di overflow, si è progettata una chiusa (PKW piano-key-weir) che sarà realizzata sulla sponda destra della diga. Due progetti differenti sono stati esaminati per mezzo di un modello fisico (scala 1:30), tenendo conto delle condizioni geometriche ed idrauliche. La tecnica di misura LSPIV è stata utilizzata per descrivere le condizioni di flusso dei due scarichi di superficie. L'obiettivo era analizzare se i due sfioratori lavorassero in modo indipendente uno dall'altro. Per entrambi i modelli PKW sono stati eseguiti test con una portata totale di $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

In laboratorio, la parte destra della diga ad arco con i canali di scarico esistenti e la riva adiacente sono modellate in un serbatoio di $4 \times 4 \times 1 \text{ m}$ (vedi Figura 3.26). L'acqua entra dal lato opposto. Un sistema di alimentazione a rotazione ha permesso una continua

alimentazione di particelle durante le prove. La telecamera fissa copriva interamente tutta la larghezza della parte a valle del serbatoio. I risultati ottenuti con la tecnica LSPIV sono stati confrontati con le misure realizzate a livello locale mediante misurazioni UVP (Ultrasound Velocity Profiler, tecnica descritta nel cap. 8).

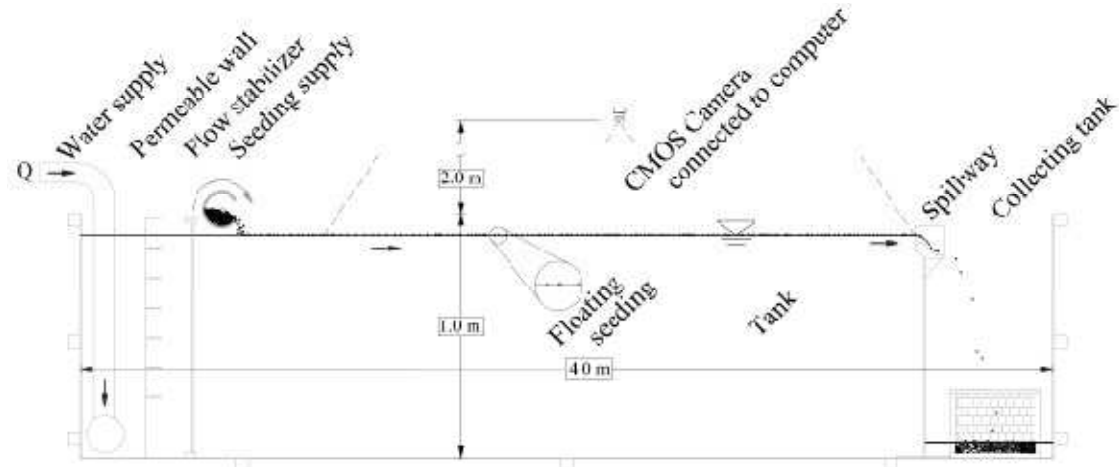


Figura 3.26 Set-up sperimentale del modello di Les Gloriettes.

Dagli esperimenti sono emerse velocità superficiali elevate (di circa 0,5 m/s) come si può vedere da Figura 3.27 in alto. Lo scaricatore di superficie esistente è principalmente fornito dal flusso proveniente dalla sinistra del serbatoio. Nella parte destra e centrale del bacino, le velocità sono ridotte. Ciò indica la presenza di un flusso di fondo che scorre nei pressi della diga vicino alle due chiuse a sinistra. L'introduzione della PKW (vedi Figura 3.27 in basso) porta ad una riduzione dei vettori velocità. Circa il 60% della larghezza del serbatoio rifornisce le tre chiuse esistenti. La linea di separazione indicata rivela la modalità di funzionamento indipendente dei due sfioratori e conferma l'efficacia della progettazione idraulica.

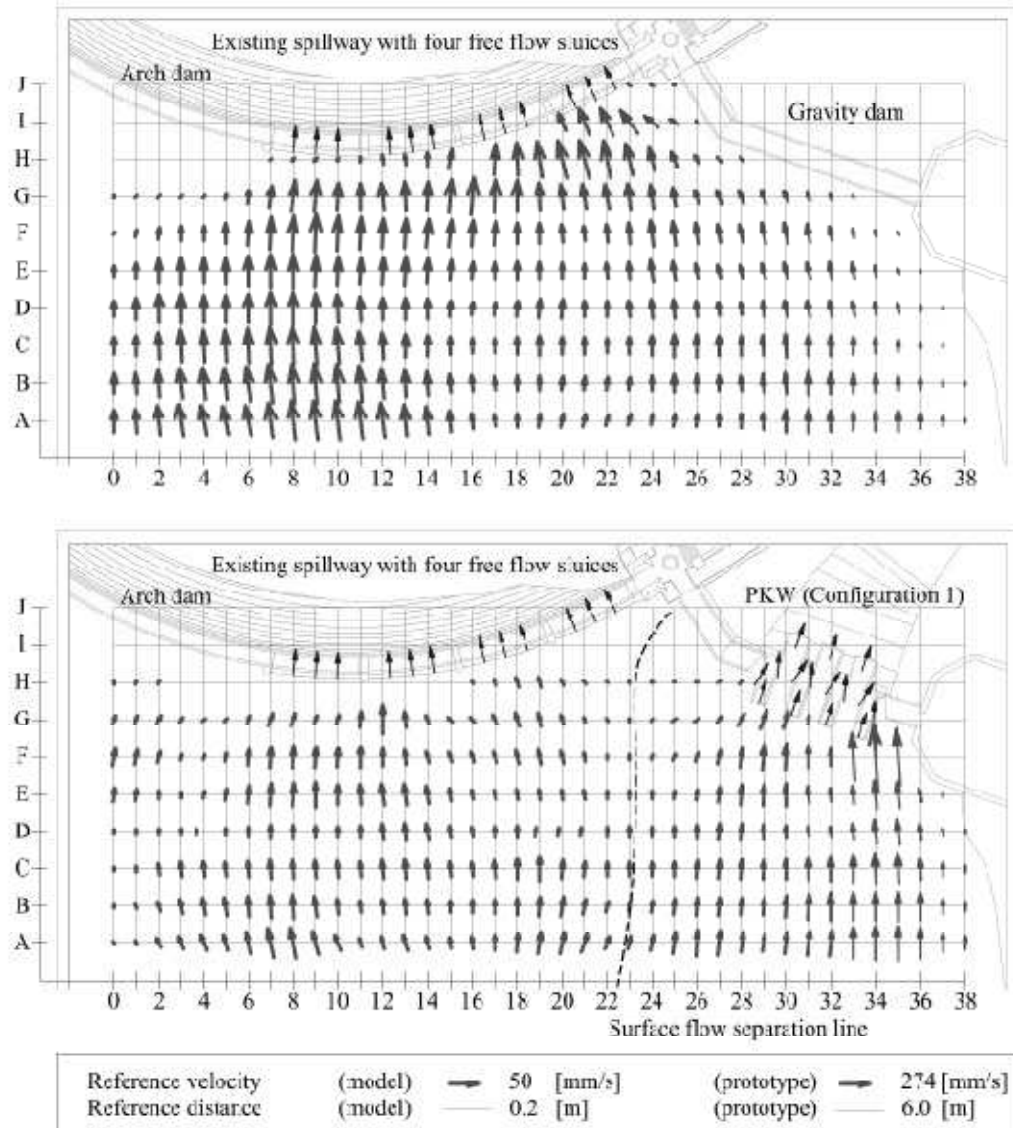


Figura 3.27 Campo di moto iniziale (sopra) e in presenza dello scarico di superficie (sotto) per una portata di 150 m³/s.

Capitolo 4. Esperimenti

4.1 Set-up sperimentale

Gli esperimenti oggetto di questa tesi sono stati eseguiti nel laboratorio di costruzioni idrauliche (LCH) nella Scuola Politecnica Federale di Losanna (EPFL) dall'ing. Camnasio, in seguito ai primi esperimenti condotti dall'ing. Kantoush sulla medesima apparecchiatura sperimentale (Kantoush, 2008). Questo studio sperimentale è stato eseguito al fine di valutare le caratteristiche del campo di moto che si sviluppa in un serbatoio rettangolare a fondo piatto e liscio, in PVC, di dimensioni orizzontali variabili e con profondità bassa ($h = 0,2$ m), dotato sia di un canale d'entrata, che di una bocca d'uscita (entrambi di larghezza pari a $b = 0,25$ m e di profondità $h = 0,2$ m) posti simmetricamente al centro del lato di monte e di valle. Una vista schematica del serbatoio è mostrata in Figura 4.1:

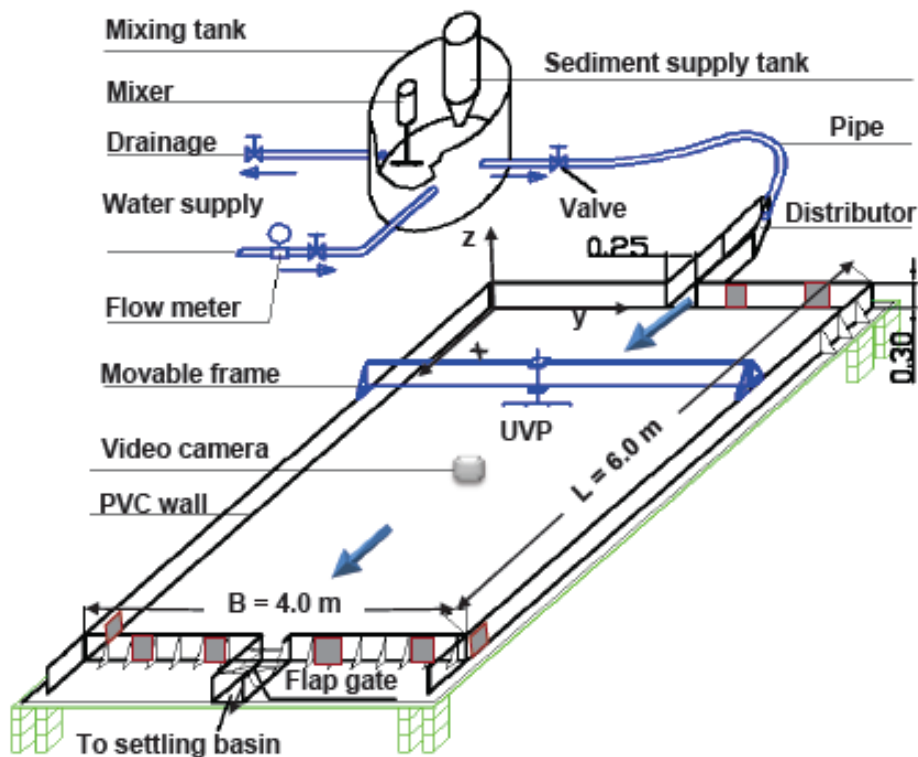


Figura 4.1 Vista schematica del set-up sperimentale (Kantoush, 2008).

Dal canale d'ingresso è immessa una portata costante pari a $Q = 7$ l/s, questo significa che il numero di Froude e il numero di Reynolds nel canale di entrata risultano pari a $Fr_{in} = 0,1$

$Re_{in} = 112000$. Le espressioni utilizzate per il calcolo di questi due parametri sono le seguenti (Chanson, 1999):

$$Re_{in} = \frac{4V_{in}h}{\nu} \quad 4.1$$

$$Fr_{in} = \frac{V_{in}}{\sqrt{gh}} \quad 4.2$$

dove:

V_{in} è la velocità media d'ingresso [m/s];

h è l'altezza del canale d'ingresso [m];

ν è la viscosità cinematica dell'acqua [Pa·s].

Il valore di Re_{in} risulta superiore a 2000 e quindi corrisponde a un moto turbolento.

L'utilizzo di un serbatoio di profondità molto ridotta ($h = 0,20$ m), rispetto alle altre due dimensioni, permette di classificare il campo di moto come uno shallow flow. Con questo termine si vuole indicare un flusso idraulico a pelo libero prevalentemente orizzontale, dove la dimensione verticale è piccola rispetto a quelle orizzontali. Il presente studio quindi si concentrerà proprio su questa classe di correnti a pelo libero. Per ricavare quindi in laboratorio un modello corretto di shallow water è necessario che il flusso abbia un numero di Reynolds molto alto ed un numero di Froude molto basso. Il flusso che si svilupperà nel serbatoio sarà quindi un flusso bidimensionale caratterizzato da moto turbolento.

Una paratoia situata alla fine del canale d'uscita regola il livello h del serbatoio. Le pareti del serbatoio permettono di eseguire le indagini con differenti configurazioni geometriche del serbatoio, semplicemente cambiandone la lunghezza L e la larghezza B . Entrambi i canali possono essere spostati in diverse posizioni lungo le pareti di monte e valle del serbatoio, al fine di realizzare configurazioni geometriche aventi posizioni asimmetriche dei canali d'ingresso e di uscita.

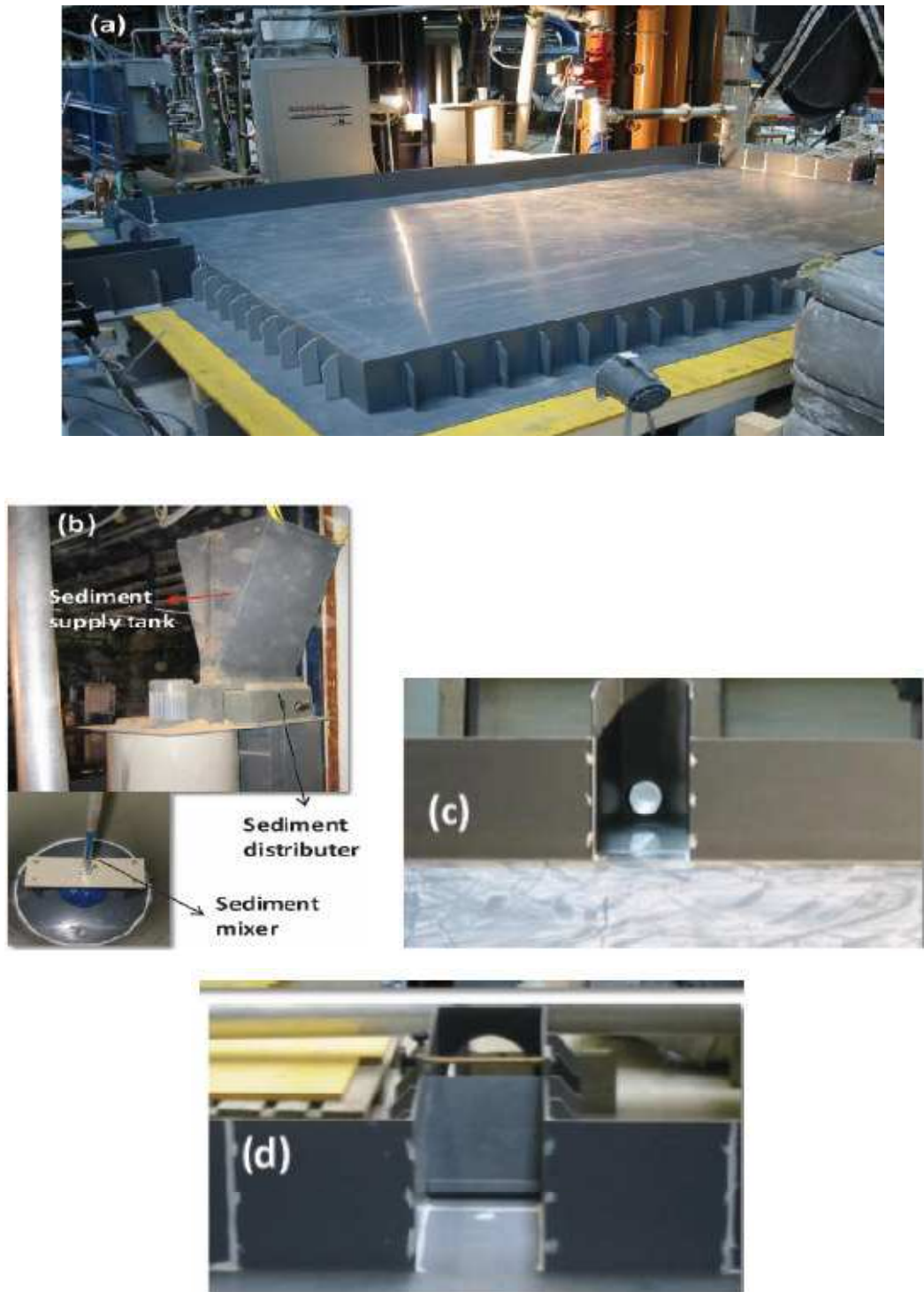


Figura 4.2 Foto di alcuni impianti sperimentali (a) Visione generale del serbatoio rettangolare (b) Contenitore di sedimenti e miscelatore (c) Canaletta d’entrata (d) Canaletta d’uscita con le paratoie che regolano il livello dell’acqua.

Un serbatoio di sedimenti (il sediments supply tank, presentato in Figura 4.2b) è montato sopra il serbatoio di miscelazione (mixing tank). Il serbatoio di miscelazione è dotato di un mixer a elica in grado di miscelare omogeneamente i sedimenti, che cadono dal contenitore

soprastante nel miscelatore, con l'acqua. Il serbatoio dei sedimenti è collegato a un dispositivo vibrante a velocità variabile per il controllo del rilascio degli stessi. La miscela acqua-sedimenti viene scaricata per gravità nel serbatoio rettangolare attraverso un tubo flessibile con un diametro di 0,10 m.

Il serbatoio è collegato al circuito idraulico del laboratorio, in modo che l'acqua giunga al serbatoio tramite un condotto in pressione.

La geometria del serbatoio viene espressa attraverso due parametri dimensionali:

- Aspect Ratio $AR = \frac{L}{B}$, detto anche length to width ratio
- Expansion Ratio $ER = \frac{B}{b}$

Dove L è la lunghezza del serbatoio, B la larghezza e b la larghezza del canale d'entrata e di uscita. Il primo parametro serve a descrivere l'influenza di una variazione della lunghezza del serbatoio L rapportata alla larghezza B , mentre il secondo serve a descrivere come evolve il campo di moto al variare della sola larghezza. È bene sottolineare, infatti, che nelle seguenti indagini il valore di b è costante, quindi l'expansion ratio dipende esclusivamente dalla larghezza B . L'utilizzo di parametri adimensionali servirà ad estendere i risultati anche a geometrie di dimensioni differenti, ma caratterizzate dagli stessi valori di aspect ratio ed expansion ratio.

Il fluido proveniente dal canale d'ingresso, immettendosi nel serbatoio, dove inizialmente è contenuta acqua in quiete, dà origine a strutture turbolente di grande scala, detti eddies, che formeranno le cosiddette zone di ricircolo. A seconda della geometria della vasca però, queste strutture sono differenti. È possibile infatti osservare, per alcune configurazioni geometriche, un campo di velocità simmetrico rispetto all'asse centrale del serbatoio, con la formazione di due grandi vortici, mentre per altre configurazioni geometriche, si ha la presenza di un solo vortice di dimensioni maggiori che determina un campo di velocità asimmetrico, nonostante sia le bocche d'entrata e di uscita siano simmetriche rispetto all'asse longitudinale del serbatoio. La dipendenza del campo di moto dai parametri geometrici adimensionali sarà oggetto dei successivi paragrafi.

4.2 Configurazione e dimensioni delle geometrie investigate

Kantoush (2008) fu il primo ad interessarsi dello studio del campo di moto di un fluido all'interno di un serbatoio di acque basse con dimensioni variabili, cercando di individuare quali fossero le configurazioni geometriche che garantissero un andamento simmetrico e quali un andamento asimmetrico del campo di moto stesso.

Poiché Kantoush aveva dimostrato, tramite le misure sperimentali eseguite sullo stesso impianto sperimentale, che si possono sviluppare diversi tipi di campi di flusso in un bacino rettangolare a seconda delle sue caratteristiche geometriche, e in particolare che si può sviluppare un campo di flusso asimmetrico nonostante la simmetria tra la posizione di ingresso e uscita del canale, nella successiva ricerca di Camnasio (Camnasio et al, 2010) si è deciso di approfondire lo studio dell'influenza della geometria del serbatoio sul campo di moto. In particolare, è stata studiata l'influenza combinata dei due parametri geometrici adimensionali AR e ER.

Mentre i precedenti esperimenti di Kantoush riguardavano soltanto un numero limitato di combinazioni (Figura 4.3) di questi due parametri adimensionali, la ricerca eseguita da Camnasio ha esaminato tutte le possibili combinazioni di ER e AR che possono essere realizzate con l'apparato sperimentale attuale, al fine di ottenere un quadro più completo sull'influenza combinata di ER e AR sulla tipologia campo di flusso. Negli esperimenti eseguiti da Camnasio, sono state studiate 30 configurazioni diverse, come si può vedere in Tabella 4.1.

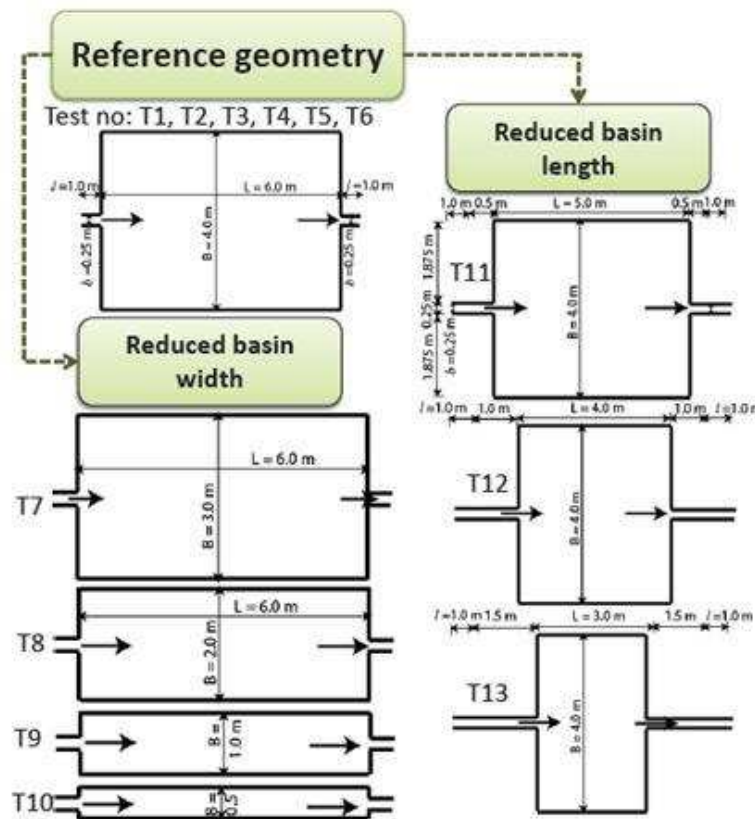


Figura 4.3 Geometrie del serbatoio studiate da Kantoush.

n°	L [m]	B [m]
1*	6	4
2*	6	1
3	6	0,9
4	6	0,8
5	6	0,7
6	6	0,6
7*	6	0,5
8	5,8	4
9	5,5	4
10	5,3	4
11*	5	4
12	5	3
13	5	2
14	5	0,4
15*	4	4
16	4	3

n°	L [m]	B [m]
17	4	2
18	4	1
19	4	0,4
20	3	4
21*	3	3
22	3	2
23	3	1,5
24	3	0,5
25	2,5	2
26	2,08	1
27	2	1,4
28	1,5	1,5
29	1	0,4
30	1,6	4

Tabella 4.1 Configurazioni del serbatoio analizzate da Camnasio (con asterisco per quelle analizzate anche da Kantoush).

4.3 Condizioni sperimentali riguardanti la modellazione fisica

Il modello fisico realizzato in laboratorio si basa sul prototipo di una diga costruita lungo il fiume Rodano ed è stato costruito sulla base della teoria della similitudine, in particolare sulla similitudine del numero di Froude. Nei fenomeni a superficie libera, infatti, sono trascurabili gli effetti di comprimibilità (n° di Ma) e gli effetti della tensione superficiale (n° di We). Non si può ovviamente eliminare la gravità dalla lista dei parametri di controllo, quindi, in tali condizioni è a priori impossibile soddisfare l'eguaglianza di Fr e Re come richiesto dalla condizione sufficiente di similitudine. Poiché gli effetti della gravità sono in genere preponderanti si sceglie di soddisfare la:

$$Fr_{\text{modello}} = Fr_{\text{prototipo}} (\lambda_{Fr} = 1)$$

salvo verificare che gli effetti delle distorsioni su Re siano trascurabili (autosimilitudine), o comunque limitati. Fissata dunque la scala geometrica e mantenuto invariato il fluido, seguono le scale di tutte le altre grandezze (Franzetti et al):

scala geometrica del modello	$\lambda_L = \lambda$ ($\Rightarrow \lambda_{Area} = \lambda^2; \lambda_{Volumi} = \lambda^3$)
stesso fluido nel prototipo e nel modello	$\lambda_\rho = 1$ ($\lambda_\mu = 1$) (l'effetto di μ non viene considerato)
gravità costante	$\lambda_g = 1$



similitudine di Froude: $\lambda_{Fr} = 1$

scabrezze	$\lambda_r = \lambda$	
velocità	$\lambda_v = \lambda^{1/2}$	
accelerazioni	$\lambda_a = 1$	($\lambda_a = \lambda_{gravità} = 1$)
portate	$\lambda_Q = \lambda^{5/2}$	
tempi	$\lambda_t = \lambda^{1/2}$	
forze	$\lambda_F = \lambda^3$	
pressioni	$\lambda_p = \lambda$	
cadente (adimensionale:)	$\lambda_j = 1$	
Reynolds	$\lambda_{Re} = \lambda^{3/2}$	
Weber ($s_m = s_p$)	$\lambda_{We} = \lambda^2$	

In questo caso, il modello è stato costruito con un fattore di scala λ pari a 50 (Kantoush et al, 2006). Si riportano i valori utilizzati:

	prototipo	modello
Lunghezza L [m]	300	6
Larghezza B [m]	200	4
Profondità h [m]	7,6-15,2	0,2
Portata Q [m ³ /s]	5	0,007
Diametro sedimenti [mm]	0,07	89*10 ⁻³
Concentrazione sedimenti C _s [g/l]	4	2

Tabella 4.2 Valori caratteristici del prototipo e del modello in scala 1:50.

Dalla scala delle velocità e la legge di Stokes, si ottiene il rapporto tra i diametri dei sedimenti per il modello e per il prototipo:

$$\lambda_{v_{ss}} = \frac{v_{ss_p}}{v_{ss_m}} = \lambda_v = 7.07 = \frac{g \cdot (\rho_{s_p} - \rho) \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu} = \frac{(\rho_{s_p} - \rho) \cdot d_p^2}{(\rho_{s_m} - \rho) \cdot d_m^2} \cdot \frac{g \cdot (\rho_{s_m} - \rho) \cdot d_m^2}{18 \cdot \mu}$$

Il rapporto tra la concentrazione di sedimenti in sospensione e la loro densità si ottiene assumendo che la concentrazione volumetrica sia la stessa per il modello e il prototipo¹:

$$C_{vol} = \frac{C_m}{\rho_{sm}} = \frac{C_p}{\rho_{sp}}$$

4.4 Tecniche di misura

Diversi parametri sono stati misurati durante gli esperimenti di Camnasio: le velocità, lo spessore del deposito di sedimenti, la concentrazione dei sedimenti in ingresso e in uscita, il livello dell'acqua nel bacino e la portata. Le velocità sono state misurate con le tecniche LSPIV e UVP, la concentrazione con un turbidimetro e il livello dell'acqua monitorato con un'asta idrometrica.

La tecnica UVP sarà descritta in modo preciso nel Capitolo 8, qui descriviamo solamente gli strumenti necessari per la LSPIV.

Per registrare le immagini è stata utilizzata una fotocamera digitale fissata sopra il bacino in modo da coprire un'area di 4,0 m per 5,3 m, quindi nel caso della configurazione più lunga, mancava una lunghezza di 0,7 m a monte per coprire l'intero bacino. Le immagini registrate sono state sistematicamente trasformate per eliminare le distorsioni ottiche delle lenti utilizzando un programma ad hoc realizzato in MATLAB e poi elaborate utilizzando il software FlowManager distribuito da Dantec Dynamics. L'inseminazione del fluido è stata ottenuta per mezzo di particelle di plastica bianca aventi un diametro medio di 3,4 mm e un peso specifico di 960 kg/m³. Sono state utilizzate quattro lampade alogene poste attorno al serbatoio, in modo da illuminare le particelle senza però creare dannosi riflessi di luce sulla superficie. Per le misure di campo con scarsa illuminazione della superficie o un'insufficiente inseminazione, l'accuratezza delle immagini può essere drasticamente ridotta e può portare a valori di velocità non corretti. Spesso, quindi, è stato necessario ripetere degli esperimenti poiché la presenza di riflessi, ombre o una densità troppo bassa delle particelle non consentivano un'analisi delle immagini corretta. La luce dispersa ha consentito la registrazione delle loro posizioni in due istanti successivi per mezzo di una CMOS fotocamera SMX-155, 1.3 megapixel, con interfaccia USB2.0 e frame rate up massimo di 33 FPS.

¹ Dalla 1st EPFL Doctoral Conference in Mechanics: Advances in modern aspects of mechanics, 19th February 2010, Lausanne, Switzerland.

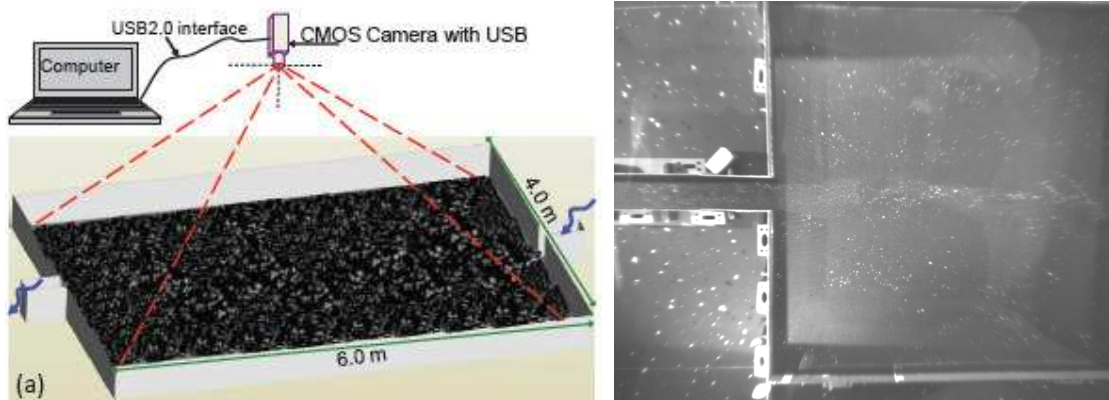


Figura 4.4 Schema dell'installazione per la tecnica LSPIV e esempio di immagine ricavata dalla fotocamera.

Per la misura della concentrazione dei sedimenti sono stati installati due turbidimetri SOLITAX sc nel canale d'ingresso e di sbocco. La torbidità è una misura ottica dell'impurità dell'acqua causata dalla diffusione della luce da parte della particelle in sospensione. I valori di concentrazione sono stati ottenuti direttamente dai valori di torbidità ottenuti con le misurazioni attraverso una relazione ricavata in laboratorio per i sedimenti prescelti. Tale relazione, infatti, dipende dalle proprietà del sedimento e dell'acqua, sarà quindi specifica per ogni esperimento. La relazione è stata ricavata inserendo la sonda in sospensione nell'acqua e coprendo un range di valori di concentrazioni di sedimenti che vanno 0,1 e 10 g tra / l.

4.5 Analisi con acqua pulita

L'obiettivo del test con acqua limpida era quello di definire ed identificare i tipi di campo di moto che si sviluppano in diverse configurazioni geometriche del serbatoio, e realizzare mappe 2D di velocità su tutta la superficie del serbatoio (mappe vettoriali, streamlines). Il campo di velocità è stato misurato mediante la tecnica LSPIV e UVP, secondo la seguente procedura: è stata innanzitutto avviata la pompa, quindi il serbatoio è stato riempito con acqua pulita e il livello dell'acqua ha raggiunto la profondità voluta grazie alla regolazione di una paratoia presente nel canale di uscita, fino a che non è stato raggiunto lo stato stazionario. Il raggiungimento dello stato stazionario è stato monitorato attraverso la lettura del valore di portata indicata da un misuratore elettromagnetico e dalla lettura del livello dell'acqua sopra la cresta della paratoia.

I parametri idraulici, mantenuti costanti per tutti gli esperimenti, sono mostrati in Tabella 4.3:

Q [l/s]	7
h [m]	0,2
Re _{in}	112000
Fr _{in}	0,1

Tabella 4.3 Parametri idraulici degli esperimenti

Per tutti gli esperimenti, dopo aver riempito il bacino e dopo aver raggiunto uno stato di campo di moto stabile, sono state distribuite le particelle sulla superficie dell'acqua ed è stata eseguita la registrazione LSPIV per circa tre minuti. Sono state eseguite più registrazioni delle medesime geometrie per monitorare la stazionarietà delle grandi strutture vorticose e per ottenere delle buone sequenze di immagini sia per quanto riguarda l'illuminazione sia per quanto riguarda la distribuzione delle particelle.

Durante gli esperimenti sono stati raccolti i seguenti dati: il numero di frames per secondo, il tempo di esposizione della macchina, le dimensioni del serbatoio in pixel e metri e i frames raccolti. A partire da questi dati, si sono ricavati il Δt e la durata dell'esperimento.

Test n°	Freq. [MHz]	FPS [N°]	Exposure time [ms]	Delta t micro Sec (Δt in μs)	WxH [pixels]	capture every ... frames	durata ex [sec]	frames raccolti	L [m]	B [m]
21_10_09ex1	12	9,00	78,68	36485	1220x964	1	222,22	2000	5,30	4,00
21_10_09ex6	12	8,50	28,41	101135,33	1280x982	1	235,29	2000	5,50	4,00

Tabella 4.4 Dati raccolti durante gli esperimenti.

4.6 Analisi con acqua e sedimenti

Per questo tipo di esperimenti, è stata studiata solo la configurazione avente una lunghezza di 4,5 m e una larghezza fissa di 4 m. Ciò che è stato cambiato tra un esperimento e l'altro è stata la posizione del canale di ingresso e uscita del serbatoio. I parametri idraulici quali portata e profondità dell'acqua sono stati mantenuti costanti per tutti gli esperimenti (Tabella 4.3).

È stata scelta questa configurazione poiché caratterizzata da un campo stabile, quindi si può analizzare come la posizione asimmetrica del canale d'ingresso o di uscita è in grado di causare un'asimmetria nel campo di moto. In primo luogo, è stato eseguito un test con sedimenti per la geometria di riferimento con posizione del canale d'ingresso e d'uscita simmetrica. Poi, la posizione dei canali è stata spostata, in modo da formare altre tre configurazioni, come mostrato in Figura 4.5:

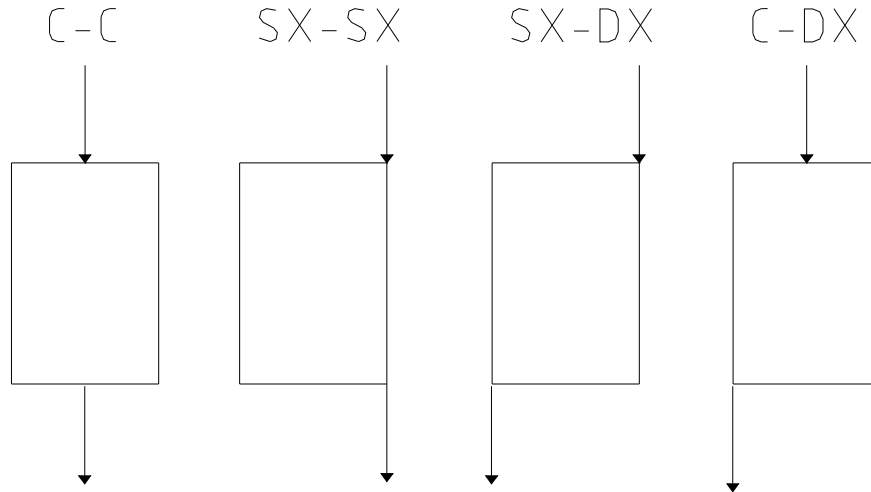


Figura 4.5 Configurazioni dei canali di ingresso e uscita negli esperimenti: a) C - C; b) SX - SX c) SX - DX d) C - DX

Le configurazioni del serbatoio sono:

- C - C: questa è la configurazione simmetrica di riferimento, avente il canale l'ingresso e di uscita posti al centro delle pareti di monte e valle;
- SX - SX: questa configurazione ha sia il canale d'ingresso che quello d'uscita collocato vicino alla lato sinistro del serbatoio. In particolare, il canale a monte è collocato ad una distanza di 110,5 centimetri dal serbatoio di sinistra, mentre il canale di sbocco è collocato ad una distanza di 77 centimetri dal serbatoio di sinistra;
- SX - DX: questa configurazione ha il canale di ingresso posto vicino il lato sinistro del serbatoio, mentre il canale di scarico è collocato vicino all'angolo opposto;
- C - DX: in questo caso il canale di ingresso è posto al centro del bordo a monte, mentre il canale di uscita è in un angolo del lato a valle.

I sedimenti scelti per gli esperimenti sono stati gusci di noci tritati che erano trasportati in sospensione; la scelta è ricaduta su tale materiale per diverse ragioni: innanzitutto, è un materiale facile da miscelare; inoltre, essi producono una distribuzione omogenea completa nel serbatoio di miscelazione e su tutta la superficie del bacino. La concentrazione di solidi nella miscela è stata misurata in continuo durante la prova per mezzo di un misuratore di torbidità. La distribuzione granulometrica del materiale è stata determinata con uno strumento laser Particle Sizer (Analysette 22) ed è illustrata in Figura 4.6.

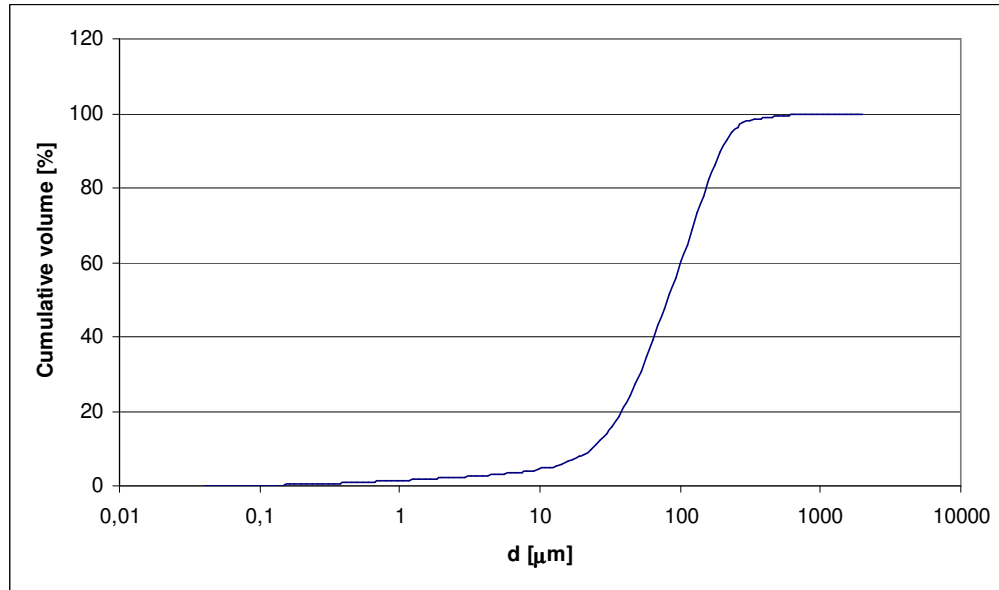


Figura 4.6 Curva granulometrica del materiale selezionato (gusci di noci frantumati).

Le particelle hanno un diametro d_{50} pari a 89 μm . Questo materiale organico è caratterizzato da una densità $\rho_s = 1450 \text{ kg/m}^3$, cosicché può essere trasportato da acqua come carico sospeso. La velocità di sedimentazione riferita al d_{50} è pari a $v_s = 2,2 \text{ mm/s}$ in base alla legge di Stokes:

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \quad 4.3$$

Dove

g è l'accelerazione di gravità;

ρ_s è la densità delle particelle solida;

ρ è la densità dell'acqua;

d è il diametro della particella;

μ è la viscosità dinamica dell'acqua a 20°C, pari a $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Va ricordato che la legge di Stokes è valida rigorosamente solo per la sedimentazione di una particella sferica in acqua ferma, mentre nel caso di una particella in un flusso turbolento, a rigore le forze turbolente influenzano la velocità di sedimentazione. Inoltre, al fine di prendere in considerazione l'influenza della forma reale della particella sulla velocità di sedimentazione, dovrebbe essere applicato un fattore di forma. Quindi, la velocità calcolata deve essere considerata solo come una velocità di riferimento, che dà un'idea dell'ordine di grandezza del fenomeno, e non la velocità effettiva della particella.

La concentrazione media dei sedimenti in sospensione è stata di 2 g/l, che corrisponde a una portata solida di 50 kg/h ed è stata monitorata sia nel canale d'ingresso sia nel canale d'uscita tramite due torbidimetri (Camnasio et al, 2010). Le prove con i sedimenti sono state eseguite secondo la seguente procedura:

- La pompa è stata avviata, la valvola del tubo di alimentazione è stata aperta, il serbatoio è stato riempito con acqua pulita e il livello dell'acqua è stato regolato alla profondità voluta dalla paratoia posta sul canale di uscita, fino a che è stato raggiunto lo stato stazionario.
- Sono stati accesi i torbidimetri.
- Il motore del propulsore nel serbatoio di miscelazione è stato avviato, il serbatoio di alimentazione dei sedimenti è stato riempito dai sedimenti, l'apertura sul fondo del serbatoio di alimentazione è stata aperta in modo che i sedimenti cominciarono a cadere nel serbatoio di miscelazione.
- Quando la miscela di acqua e sedimenti è giunta al canale d'ingresso, il cronometro è stato avviato e il test è incominciato.
- Il serbatoio di alimentazione è stato mantenuto pieno durante la sperimentazione, in modo da assicurare una portata solida di 50 kg/h.
- Dopo due ore di sperimentazione, l'esperimento è stato stoppato ed è stato misurato lo spessore dei sedimenti depositati sul fondo del serbatoio dal laser BAUMER. Dopo la misurazione, il sistema idraulico e la fornitura dei sedimenti sono ripresi, come descritto prima, regolando il clapet, al fine di mantenere la profondità dell'acqua al valore desiderato.
- Durante l'esperimento, miscela acqua-sedimenti è stata campionata, sia in entrata ed in uscita del canale, per un totale di tre campionamenti durante tutte le quattro ore di durata dell'esperimento.
- Alla fine della sperimentazione (durata totale di quattro ore), dopo l'arresto del sistema come descritto prima, è stato misurato di nuovo dal laser lo spessore dei sedimenti depositati sul fondo del serbatoio.

Le velocità nel serbatoio sono state misurate con la tecnica LSPIV e UVP prima e dopo l'esperimento, al fine di valutare se i depositi di sedimenti influenzino in qualche modo il campo di moto e il trattamento dei dati acquisiti tramite la tecnica LSPIV in modo da produrre mappe dei campi di moto costituisce l'oggetto di questa tesi.

Capitolo 5. Flowmanager

5.1 Il software

Il software utilizzato per l'elaborazione delle immagini è il software FlowManager 4.71.05, distribuito da Dantec Dynamics. La principale area di attività dell'azienda è lo sviluppo e la vendita di sistemi di misura integrati per la diagnostica e la ricerca nella meccanica dei fluidi, meccanica dei solidi, analisi di spray e tecnologia di combustione. I programmi prodotti dall'azienda sono utilizzati per ottenere i dati sulle proprietà fisiche di aria, gas, liquidi e materiali solidi; questi comprendono i dati di misurazione quantitative della velocità, turbolenza e dimensione delle particelle, concentrazione, temperatura, tensione, stress e vibrazioni.

FlowManager è un database che cataloga i dati registrati, il set-up e la configurazione sperimentale e permette l'analisi delle immagini acquisite. Oltre a funzionare come una banca dati, il software FlowManager può controllare anche il processore FlowMap, che permette l'acquisizione delle immagini e controlla i cinque stadi del processo di acquisizione dei dati nella PIV: distribuzione delle particelle, illuminazione, registrazione, processamento e analisi del campo di moto.

5.2 La pre-elaborazione delle immagini

Prima di analizzare le immagini con questo software, però, è necessario eliminare la distorsione ottica causata dalla camera. Tale distorsione viene eliminata con una routine di MATLAB ad hoc. Nella Figura 5.1 si può vedere come vengono modificate le immagini al termine del processo di eliminazione della distorsione: si vede come i lati del serbatoio diventano rettilinei dopo il processo ma si perde una parte dell'immagine (di questo se ne terrà conto nella fase della scalatura a dimensioni reali).

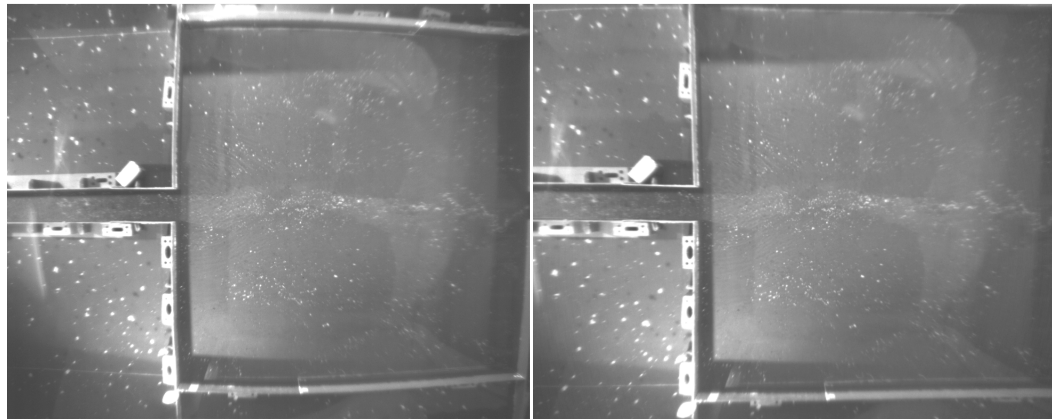


Figura 5.1 Immagine distorta e indistorta.

5.3 L'elaborazione delle immagini

Il software FlowManager processa le immagini caricate dal PC tramite l'applicazione di algoritmi di auto o cross-correlazione, trasformandole in mappe vettoriali di velocità (vector map) come rappresentato in Figura 5.2.

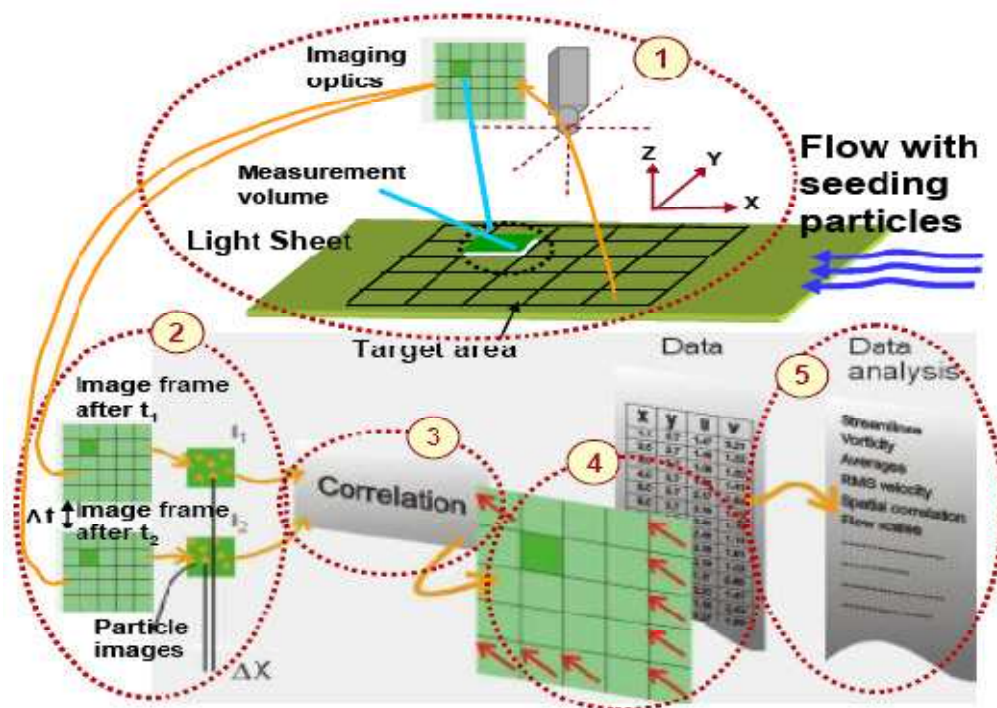


Figura 5.2 Fasi della tecnica PIV (Dantec Dynamics).

L'immagine restituita dalla fotocamera è suddivisa in un certo numero di zone chiamate aree d'interrogazione (interrogation area) e all'interno di ciascuna di queste aree si esegue la

correlazione tra la prima e la seconda immagine per stimare uno spostamento medio. Ciò richiede la presenza all'interno di tali aree d'interrogazione di un certo numero di particelle per produrre risultati affidabili. Dividendo per il tempo intercorso tra l'acquisizione delle due immagini, i vettori spostamento sono convertiti in una mappa di vettori velocità. Possono essere usate due tecniche diverse di correlazione: l'auto-correlazione e la cross-correlazione. Nella maggior parte dei casi, la cross-correlazione è una tecnica di analisi superiore all'autocorrelazione. L'utilizzo della cross-correlazione è diventata una possibilità in tempi relativamente recenti nella tecnica PIV e così nel sistema FlowManager sono disponibili entrambi i metodi. E' fondamentale, quindi, dare come dato iniziale l'intervallo intercorrente fra l'acquisizione di due immagini successive, che viene definito una volta settata la camera utilizzata negli esperimenti. Questo è possibile nella finestra View Setup: si configura la camera utilizzata (smx 155), il laser (in questo caso non si è utilizzato nessun laser, quindi viene configurato un laser nullo). Nella scheda Acquisition control si deve inserire il tempo Δt di acquisizione delle immagini, calcolato attraverso la seguente formula:

$$\Delta t = \frac{1 - t_{exp} FPS}{FPS - 1} \quad 5.1$$

dove

t_{exp} è l'exposure time, cioè il tempo di esposizione delle immagini

FPS rappresenta il numero di frames al secondo.

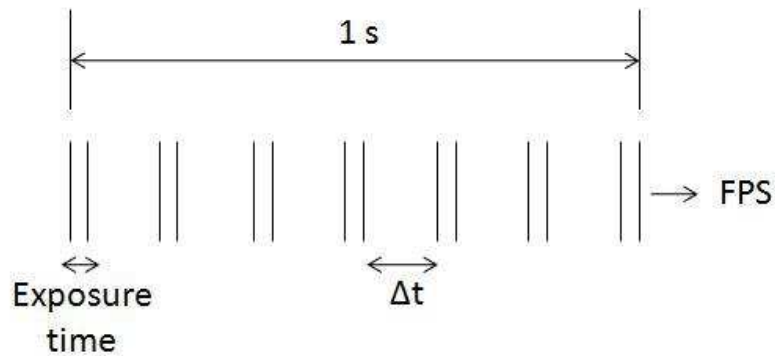


Figura 5.3 Rappresentazione della formula utilizzata per il calcolo di Δt .

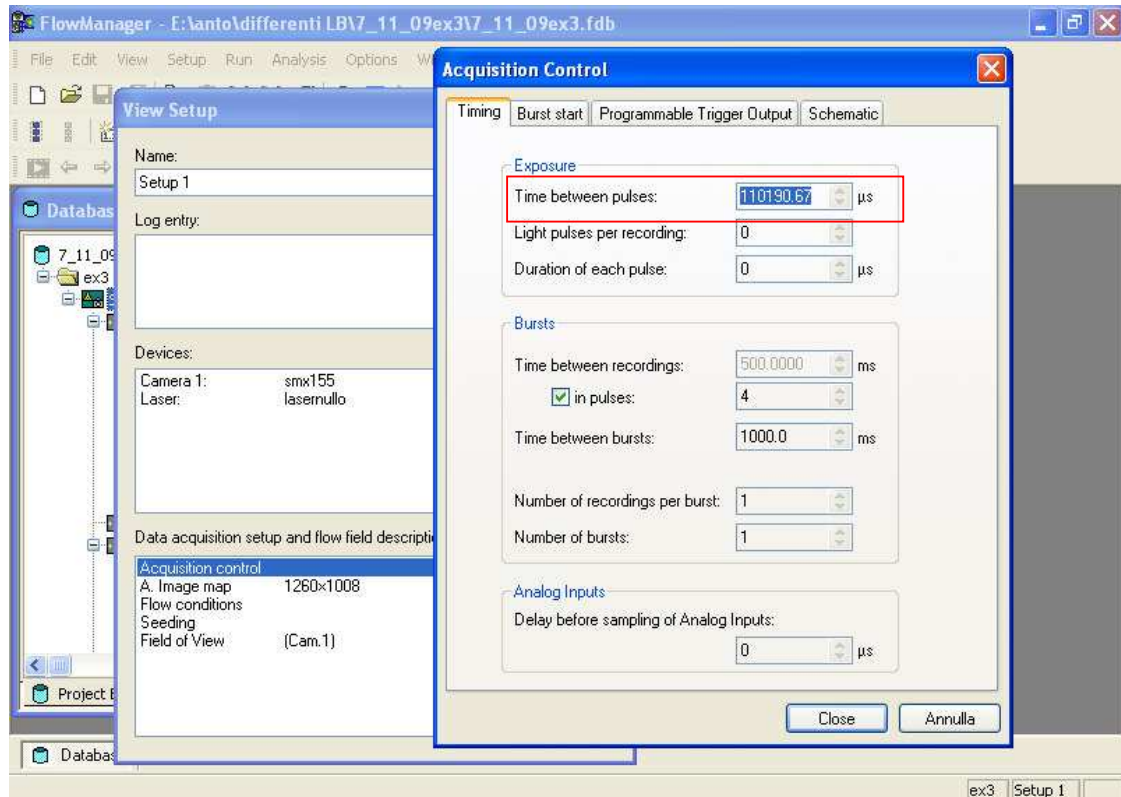


Figura 5.4 Finestra View Setup e Acquisition control.

5.4 Il sistema di coordinate

FlowManager utilizza un sistema di coordinate cartesiano XY tale che l'asse X punti verso destra e l'asse Y punti positivo verso l'alto. L'origine (0,0) è nell'angolo in basso a sinistra dell'area, come si può osservare nella figura seguente:

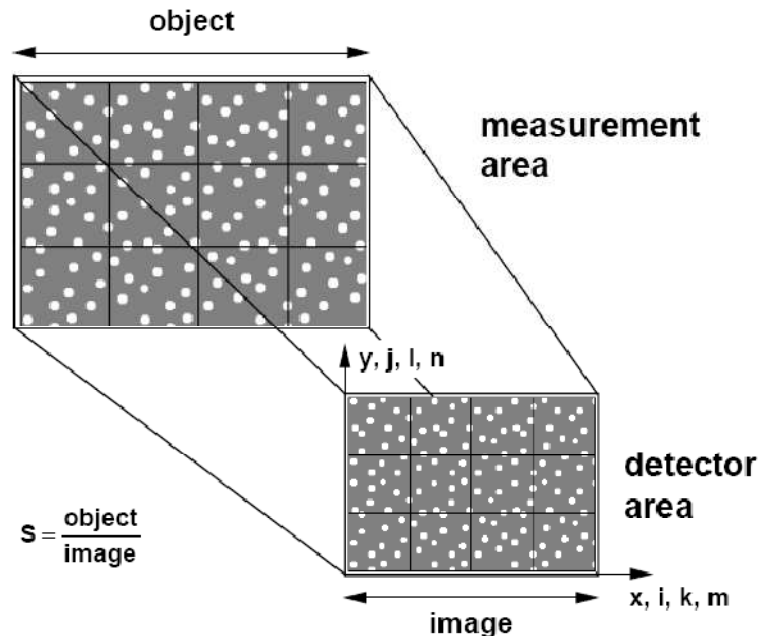


Figura 5.5 Sistema di coordinate usato dal software FlowManager.

In tutti i calcoli sono utilizzati i pixel come unità di misura, ma si può ottenere il risultato finale in metri utilizzando il fattore di scala S dato dal rapporto tra le dimensioni lineari dell'oggetto e la risoluzione in pixel dell'immagine.

La dimensione massima fotografabile negli esperimenti qui presentati era di 5320 mm, che corrisponde a 1280 pixel, in questo caso, quindi, il fattore di scala è quindi $S = 4,156$.

Tale fattore di scala è definito nella finestra di dialogo field of view (Figura 5.6). Ciò che deve inserire l'utente sono le dimensioni reali dell'oggetto riprese dalla camera nel campo object, S sarà calcolato automaticamente dal software in base alle impostazioni relative alla fotocamera definite nel pannello devices del view setup:

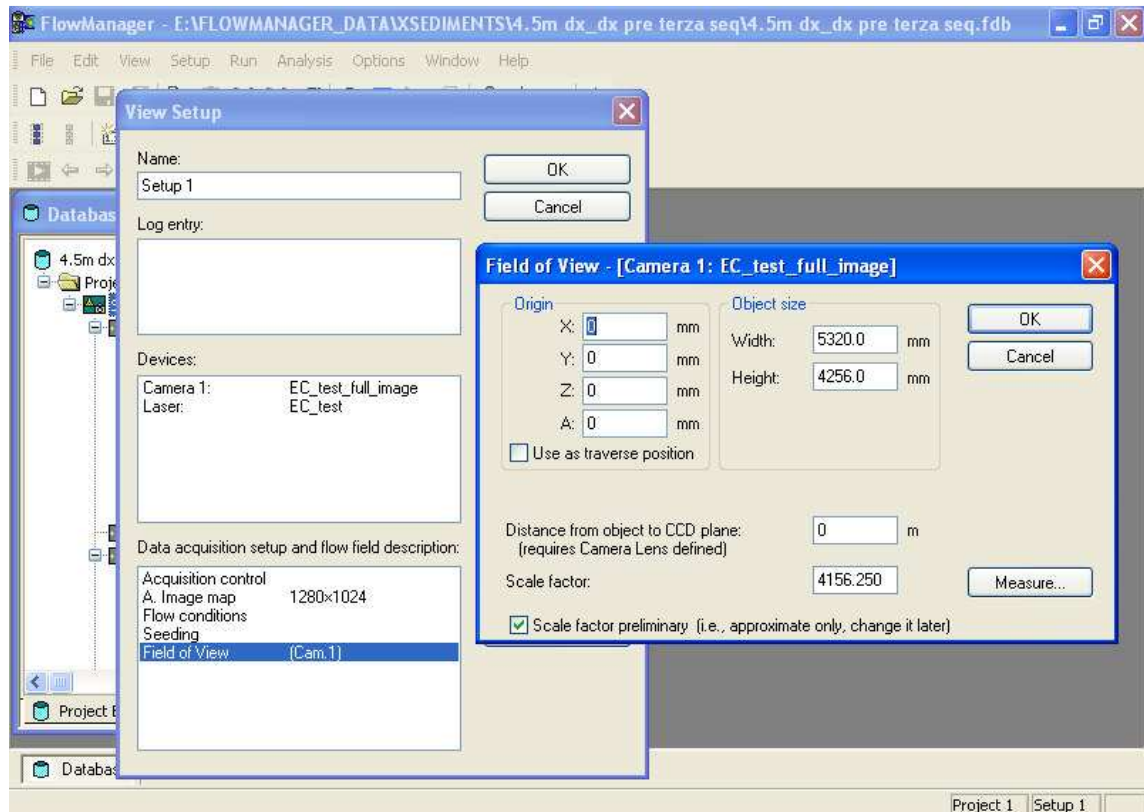


Figura 5.6 Finestra di dialogo Field of View in cui è specificato il fattore di scala.

5.5 Cross-correlazione

Come già spiegato nel paragrafo 3.1.6, nella tecnica PIV si effettua la correlazione di due immagini in modo sequenziale. All'interno un'area d'interrogazione è possibile calcolare uno spostamento medio osservando le particelle presenti nell'area stessa e nella sua omologa nella seconda immagine campionata.

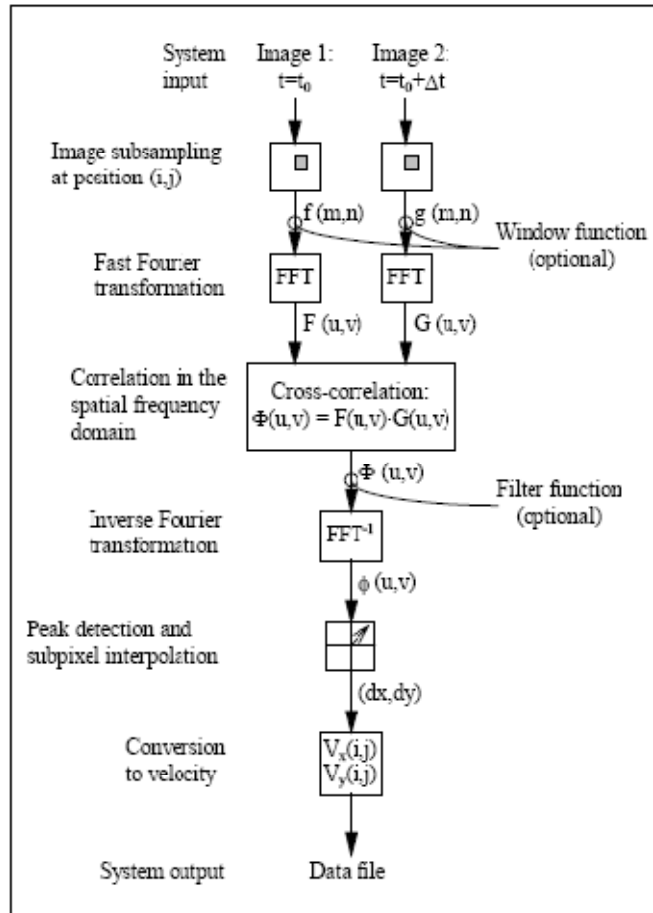


Figura 5.7 Schema del processo di elaborazione PIV.

Il metodo utilizzato per valutare la funzione di spostamento è la tecnica statistica della cross-correlazione. Si osserva una cross-correlazione elevata quando molte particelle si abbinano con le loro corrispondenti presenti nella seconda immagine. Le particelle che entrano o escono dall'area d'interrogazione tra la prima e la seconda immagine non contribuiscono alla correlazione poiché la posizione iniziale o finale della particella è sconosciuta. Nella tecnica PIV questo fenomeno è spesso definito come "loss of pairs" o "signal drop-out".

Un altro parametro importante che influenza il rapporto segnale-rumore è il numero di particelle all'interno di ciascuna area d'interrogazione. Con un gran numero di particelle ci saranno molte correlazioni che assicurano un rapporto segnale-rumore elevato. Con un numero minore di particelle all'interno della zona d'interrogazione, il rapporto segnale-rumore diminuisce; in generale un minimo di cinque particelle a regione è consigliato per ottenere risultati ragionevoli utilizzando la tecnica della cross-correlazione (Dantec Dynamics, 2000).

5.5.1. Densità delle particelle

Sia che si utilizzi l'auto o la cross-correlazione, ci sarà correlazione casuale tra la posizione iniziale di alcune particelle e la posizione finale di altre. Queste correlazioni random possono essere considerate rumore e per impedire che siano dominanti rispetto al segnale veritiero, ci devono essere coppie di particelle in ogni regione tali che il segnale sia superiore al rumore. Correlazioni reali e random sono mostrate in situazioni diverse nella figura seguente:

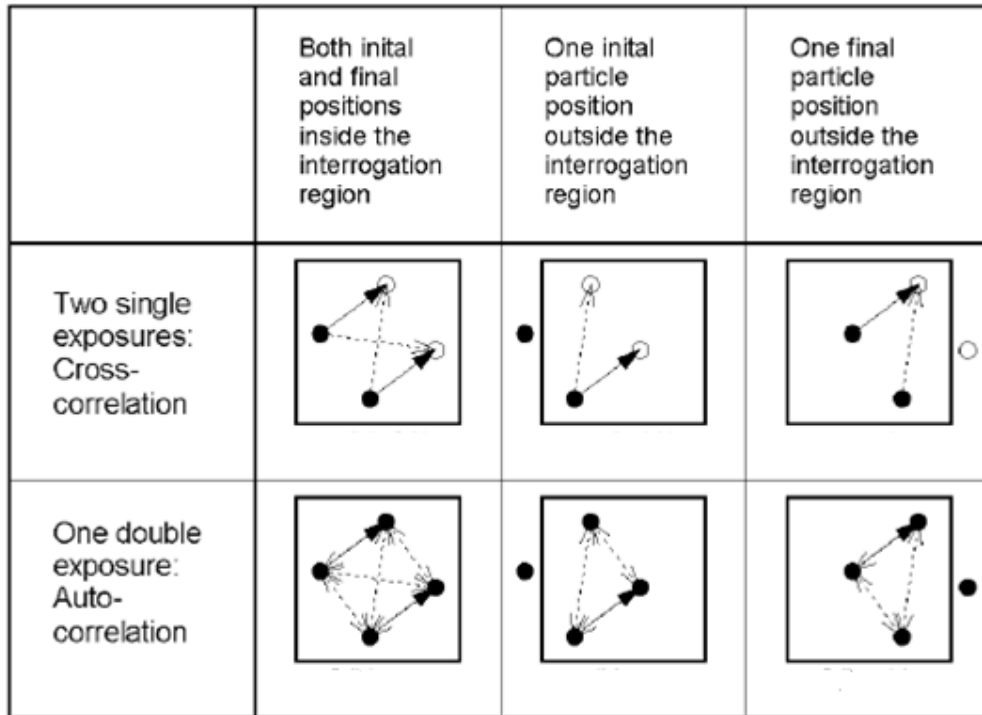


Figura 5.8 Correlazione vera e casuale, con e senza loss of pairs. (lo spostamento corretto è mostrato con frecce piene, mentre la correlazione errata è indicata con frecce tratteggiate).

Tutte e sei le illustrazioni sopra mostrano le stesse due particelle, ma sono state registrate in modo diverso, e le particelle sono anche state posizionate in modo diverso rispetto ai limiti della zona d'interrogazione. I tre esempi più in alto sono stati registrati come due esposizioni separate su singoli frames della macchina, permettendo l'identificazione delle posizioni iniziali e finali delle particelle. Le posizioni delle particelle iniziali sono indicate come punti neri, mentre le posizioni finali sono rappresentate da cerchi bianchi. I tre esempi in basso sono stati registrati sullo stesso frames, ed è quindi impossibile dire quali siano le posizioni iniziali e finali delle particelle. Tutte le posizioni delle particelle sono quindi indicate come punti neri. Nei due esempi più a sinistra, la posizione iniziale e finale delle

particelle è all'interno dell'area d'interrogazione, mentre nei rimanenti quattro esempi, una delle due posizioni si trova al fuori della zona d'interrogazione. I quattro esempi più a destra dimostrano il fenomeno "loss of pairs", in cui la posizione iniziale o finale particella si perde perché è al di fuori dell'area d'interrogazione. In tutti questi esempi, il vettore spostamento corretto viene ad essere solo uno tra una serie di egualmente probabili candidati, e non è possibile dire quale sia quello giusto. Nell'esempio in basso a sinistra sia la posizione iniziale sia quella finale delle particelle sono all'interno dell'area di d'interrogazione, ma la registrazione è stata effettuata con una doppia esposizione dello stesso frames. Si hanno in questo modo molte correlazioni casuali e anche in questo caso è impossibile dire quale correlazione sia quella giusta.

5.5.2. Calcolo della velocità

La risoluzione spaziale fondamentale della velocità nella PIV è determinata dalla dimensione dell'area d'interrogazione. Questa è data da:

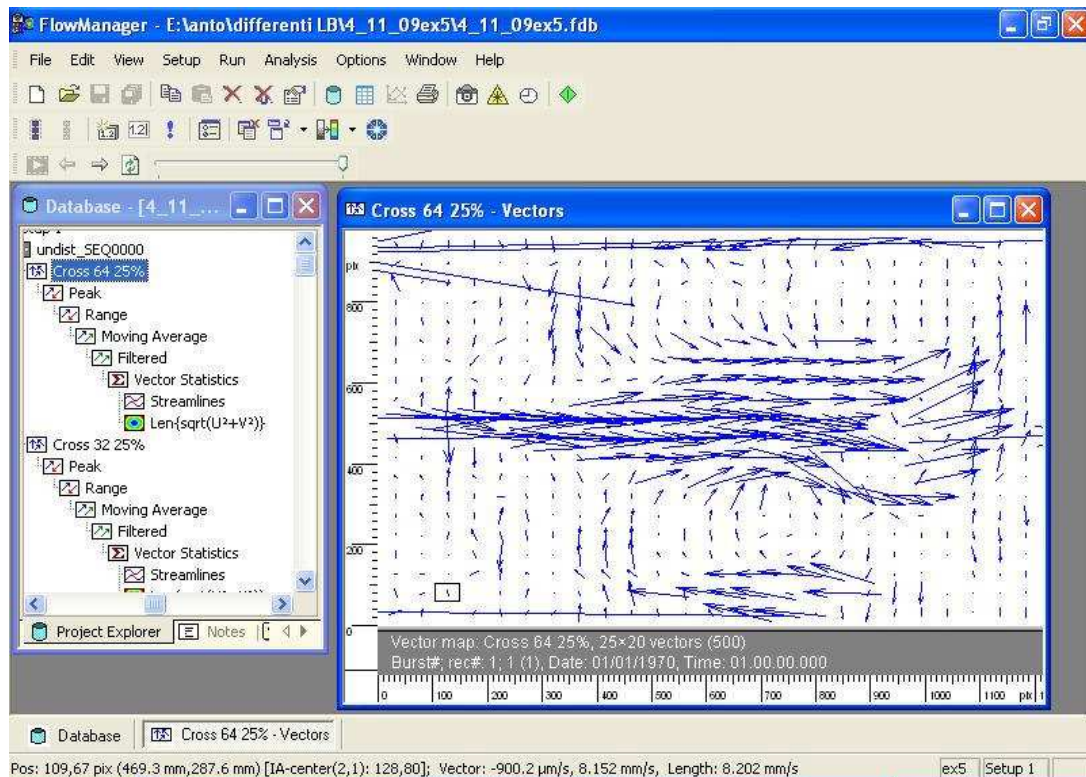
- il fattore di scala S .
- la dimensione dell'area d'interrogazione in pixel.
- la distanza tra i pixel sul CCD-chip (pixel pitch).

Il fattore di scala è determinato dal set-up sperimentale, e il pixel pitch è una proprietà fissa della macchina fotografica. L'unico parametro variabile che rimane è la dimensione dell'area d'interrogazione, che può essere scelta come 16×16 , 32×32 , 64×64 o 128×128 pixel. Quando si seleziona la dimensione dell'area d'interrogazione, devono essere presi in considerazione diversi aspetti:

- per ottenere un rapporto segnale/rumore buono, la velocità del flusso all'interno dell'area d'interrogazione dovrebbe essere essenzialmente omogenea, il che implica che l'area d'interrogazione dovrebbe essere la più piccola possibile, pur continuando a soddisfare il requisito di un minimo di 5 particelle per area d'interrogazione.
- la gamma dei valori di velocità misurata aumenta all'aumentare delle dimensioni delle aree d'interrogazione. Per mantenere un'elevata precisione di misura, lo spostamento massimo della particella tra le immagini successive deve essere inferiore a $\frac{1}{4}$ della dimensione dell'area d'interrogazione, ad esempio, 16 pixel per una pixel area 64×64 . Invece, lo spostamento misurabile è di circa 2-3

pixels se si utilizza l'auto-correlazione, mentre è più piccolo di 1 pixel se si utilizza la cross-correlazione. Questo indica che l'area d'interrogazione dovrebbe essere più grande possibile per ottenere il maggior range dinamico possibile.

Si deve quindi raggiungere un compromesso tra la risoluzione spaziale e il range di velocità misurabile. Quando si selezionano le dimensioni dell'area d'interrogazione, si dovrebbe tenere in considerazione anche il fatto che il tempo richiesto per l'elaborazione aumenta all'aumentare della dimensione scelta. Generalmente nella cross-correlazione si usa un'area di 32 x 32 per ottenere prestazioni ottimali. Di seguito si riportano due diverse analisi eseguite sulla configurazione del serbatoio 5 x 4 m utilizzando un'area di 64 x 64 e 32 x 32. Si vede come il numero di vettori calcolati aumenta al diminuire delle dimensioni dell'area d'interrogazione.



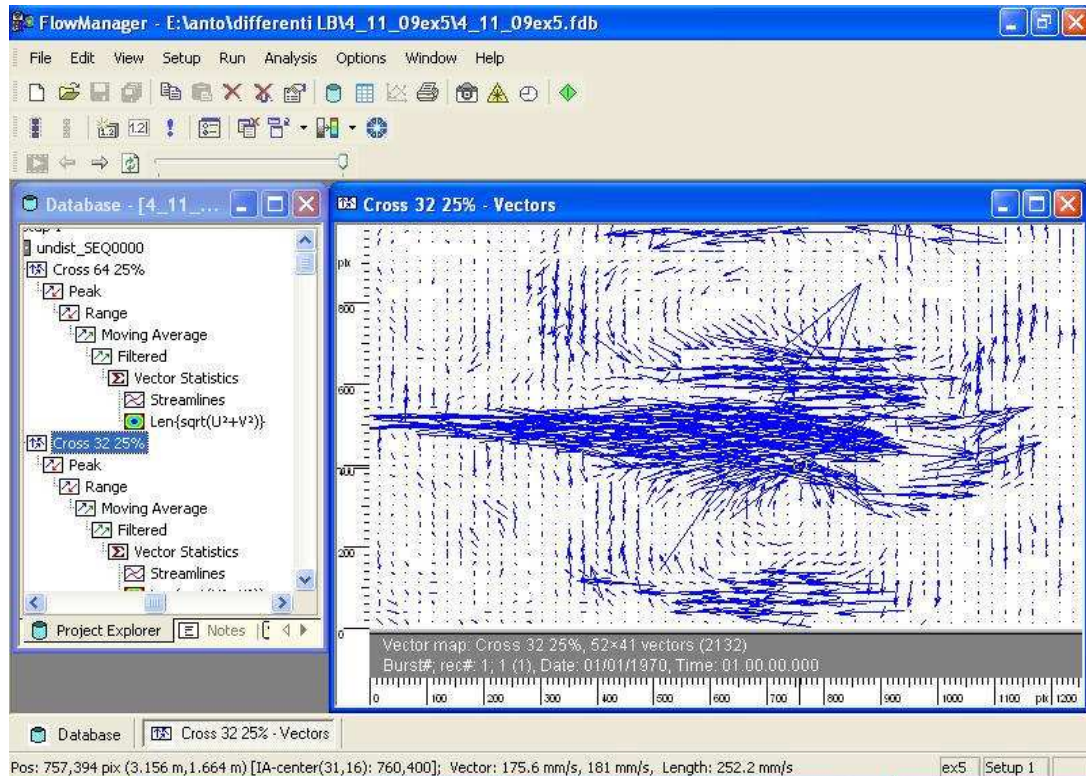


Figura 5.9 Risultato della cross-correlazione sulla configurazione 5 x 4 m utilizzando un'area d'interrogazione rispettivamente di 64 x 64 e 32 x 32pixel. Il numero totale di vettori nel primo caso è 500, nel secondo 2132.

5.5.3. Window functions

Come si può vedere dalla Figura 5.7, nella cross-correlazione può essere utilizzata una funzione detta window function. Tale funzione serve per ridurre il rumore ciclico, che provoca una diminuzione del rapporto segnale-rumore, causato da particelle, dette particelle fantasma, presenti sui bordi dell'interrogation area.

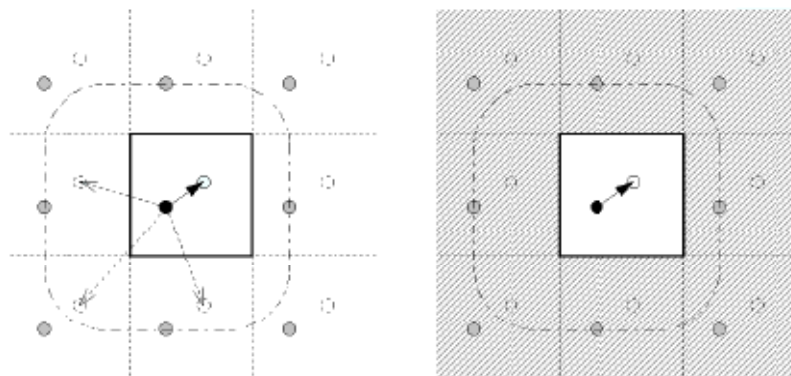


Figura 5.10 Nella figura a sinistra si vede la correlazione con particelle fantasma che viene eliminata con l'utilizzo di window functions.

Queste finestre sono implementate come funzioni peso in cui l'intensità di ogni pixel è moltiplicata per 0 o 1 in funzione della posizione del pixel all'interno dell'area. Esse agiscono come un filtro all'algoritmo di cross-correlazione e permettono di eliminare le particelle presenti vicino ai bordi dell'area. L'utilizzo delle window functions è richiesto solo se si utilizzano aree d'interrogazione di dimensioni elevate (maggiori o uguali a 64 x 64 pixel); nella presente analisi, è stata sempre utilizzata una cross-correlazione con aree di 32 x 32 pixel e quindi non sono mai state utilizzate.

5.5.4. Filtri

Anche i filtri agiscono come funzioni peso $W(u, v)$ e possono essere applicati in modo opzionale nella cross-correlazione per incrementare il rapporto segnale-rumore eliminando o abbassando il rumore di fondo.

Il filtro No-DC è definito dalla seguente funzione peso:

$$W(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{per } (u, v) = (0, 0) \\ 1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove (u, v) sono le coordinate nel dominio della frequenza.

Il filtro Low-Pass è definito da:

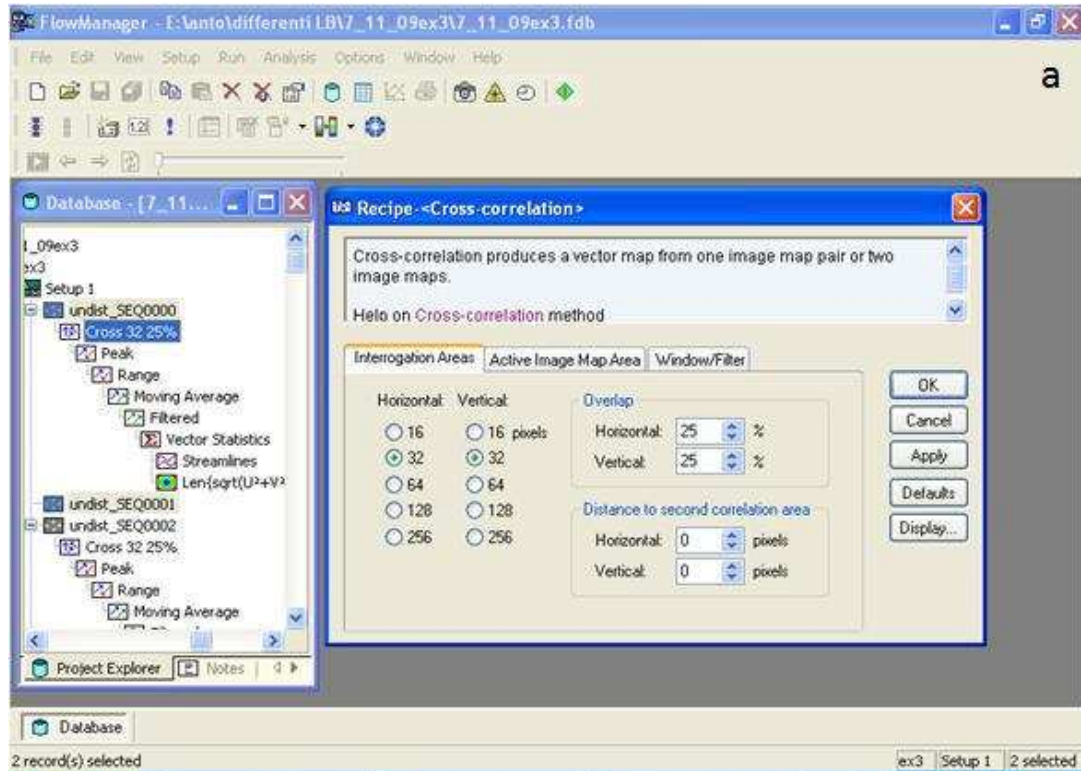
$$W(u, v) = \begin{cases} 0 & \text{per } (u, v) = (0, 0) \\ \exp\left(-k^2 \frac{u^2 + v^2}{UV}\right) & \text{altrimenti} \end{cases}$$

dove si deve specificare il parametro k , che può assumere i seguenti valori: 3, 4 o 5. Nella presente tesi è stato utilizzato il filtro Low-Pass con parametro k pari a 3.

Concludendo, nella finestra di dialogo che si presenta per avviare la cross-correlazione l'utente può scegliere:

- le dimensioni dell'area di interrogazione
- l'overlap, ossia un sovracampionamento che produce più vettori nel campo di moto (in queste elaborazioni si è sempre utilizzato un overlap del 25%).

- la dimensione effettiva dell'immagine da analizzare (Figura 5.11b); infatti l'area da studiare doveva essere ridotta opportunamente in base alle dimensioni del serbatoio
- la window function
- la funzione filtro



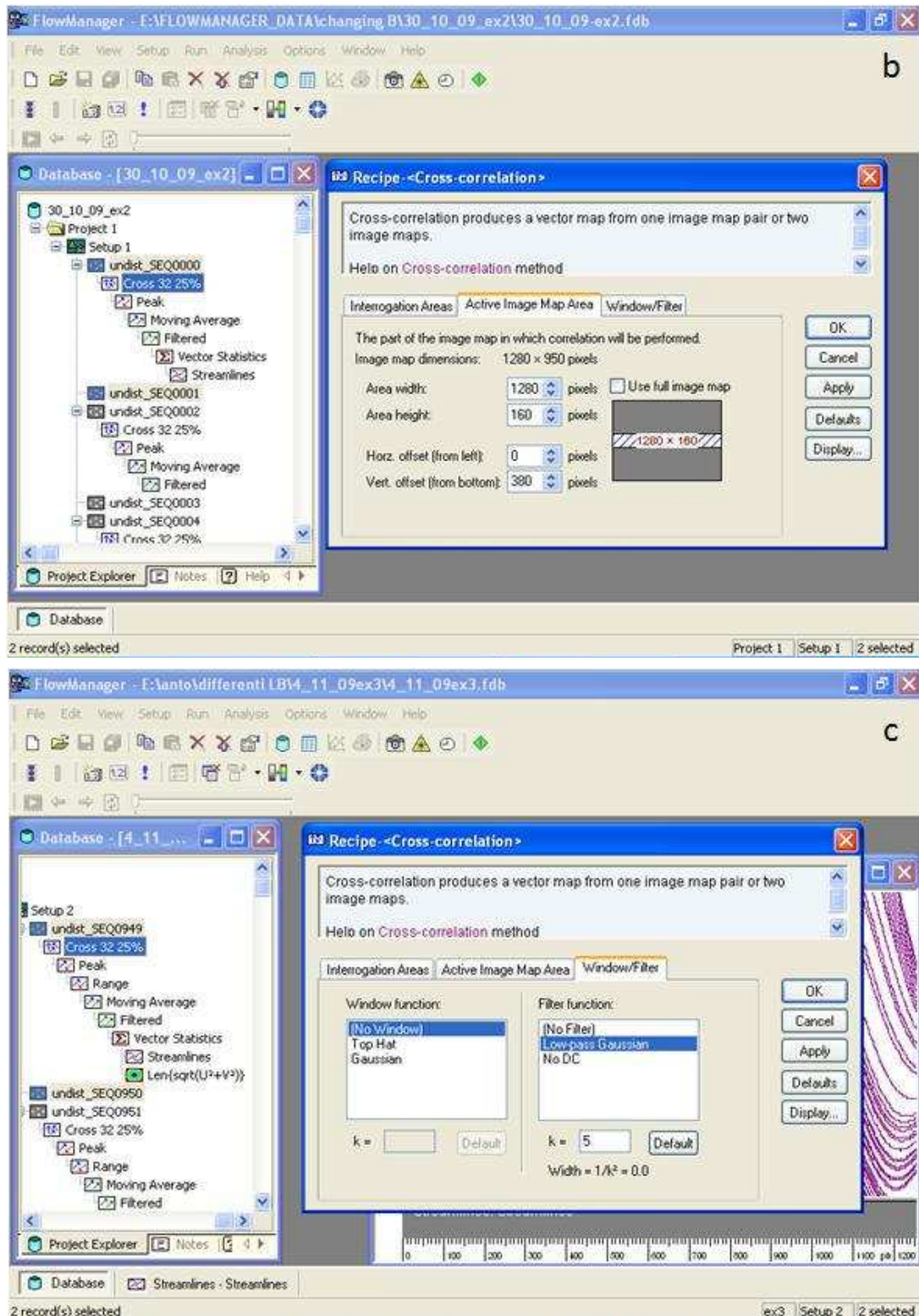


Figura 5.11 Schede della finestra della cross-correlazione in cui vengono indicate (a) le dimensioni dell'area di interrogazione e l'overlap; (b) le dimensioni effettive della vasca e (c) l'utilizzo di window functions o filtri.

5.6 Metodi di validazione

Una volta ottenuta una prima mappa vettoriale grezza che deriva dalla cross-correlazione, è necessario applicare dei metodi di validazione. Questi sono utilizzati per rimuovere i cosiddetti outliers, cioè vettori errati calcolati tramite la cross-correlazione. Il software FlowManager ha diversi metodi di validazione basati su algoritmi matematici:

- Peak validation
- Range validation
- Moving average validation
- Average filter
- Validazione manuale
- Masking

Di seguito si riporta la descrizione dei primi quattro metodi che sono stati utilizzati per la validazione delle immagini nella presente tesi. Per quanto riguarda gli ultimi due, si è ritenuto non necessario il loro utilizzo in quanto la validazione manuale non è raccomandata dato che è considerata un metodo soggettivo e il masking serve ad eliminare le aree che non contengono alcun vettore, problema che nel nostro caso non si è mai verificato.

Il risultato di tali analisi può essere di due tipi:

- vector rejected: i vettori considerati outliers sono semplicemente eliminati (questo avviene nella peak e range validation)
- vector substituted: i vettori considerati errati vengono sostituiti, basandosi sui valori dei vettori circostanti al vettore eliminato (moving average validation).

Tali metodi possono essere “combinati”, cioè utilizzati uno di seguito all’altro; generalmente la validazione dei vettori singoli (peak e range) viene eseguita prima della validazione sull’intero campo (moving average, filter), quindi i metodi citati sopra sono stati utilizzati in cascata, in particolare si è usato: peak, range, moving average e filter. L’output finale ottenuto è una mappa vettoriale.

5.6.1. Peak validation

Questo metodo valida o elimina vettori singoli basandosi sul valore delle altezze dei picchi nel piano della correlazione. Il processore individua e confronta il picco più alto e il secondo picco nel piano della correlazione secondo il seguente criterio:

$$\frac{\text{Highest peak}}{\text{Second highest peak}} \geq k$$

Questo criterio è noto come criterio di rilevabilità e nella letteratura si ritrova che un buon valore di k è pari a 1,2 (Keane e Adrian, 1992).

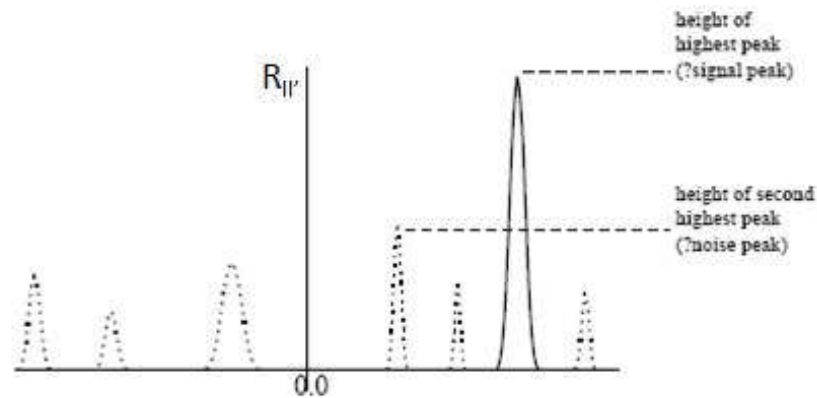


Figura 5.12 Piano della correlazione che mostra il picco più elevato e il secondo picco più alto.

Nella finestra di dialogo che si presenta, quindi, è richiesto il minimo rapporto k tra il picco più alto e il secondo picco più alto. Come si può vedere in Figura 5.12, il picco più alto è il segnale mentre il secondo picco è il rumore, quindi se il rapporto segnale-rumore è minore di una certa soglia, indicata da k , il vettore verrà cancellato.

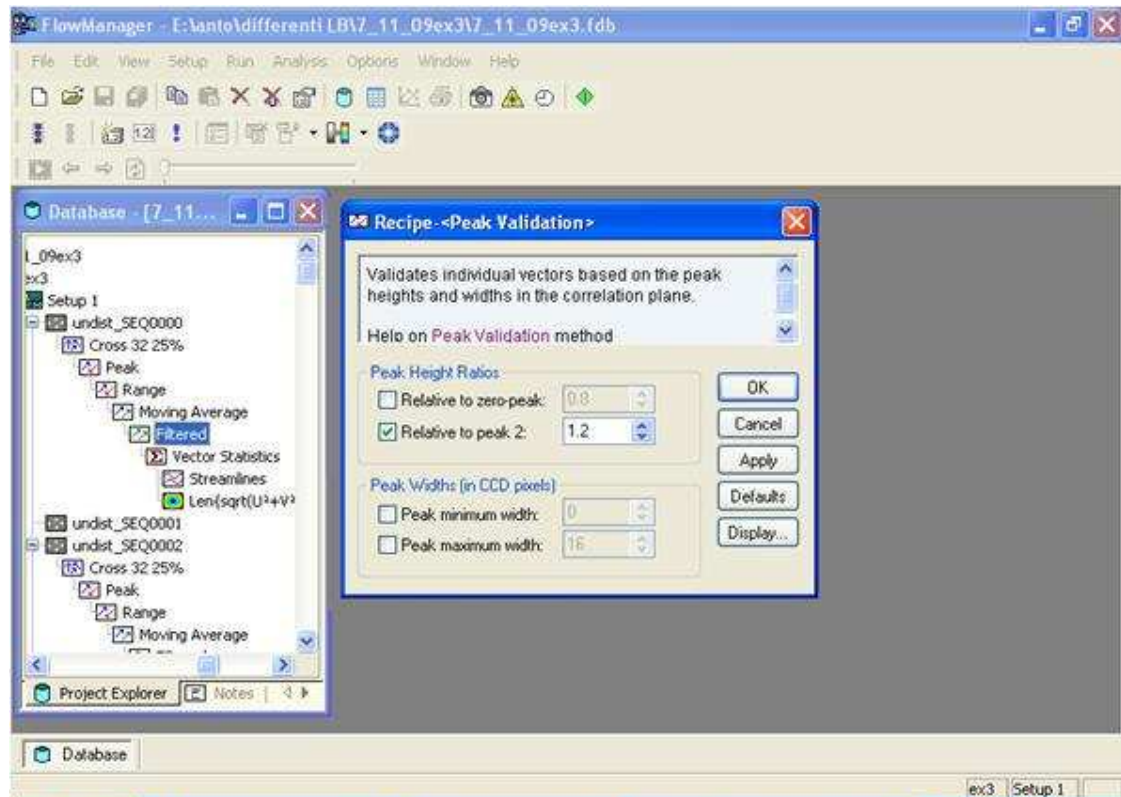


Figura 5.13 Finestra della peak validation.

5.6.2. Range validation

Questo metodo elimina i vettori velocità che sono esterni a un certo range prefissato di valori, decisi dall'utente in base a considerazioni generali sul campo di moto. Tale metodo si basa sul confronto:

$$velocità\ minima \leq \|V\| \leq velocità\ massima$$

dove $\|V\| = \sqrt{u^2 + v^2}$.

Se il vettore rispetta i vincoli è considerato valido, altrimenti è eliminato. L'utente deve solo inserire i valori di velocità minima e massima che sono gli estremi dell'intervallo per la verifica. Nel presente lavoro, sono stati sempre utilizzati valori di velocità minima pari a $2 \cdot 10^5$ m/s e massima pari a 0,15 m/s, che risulta la velocità dell'acqua nel canale di ingresso.

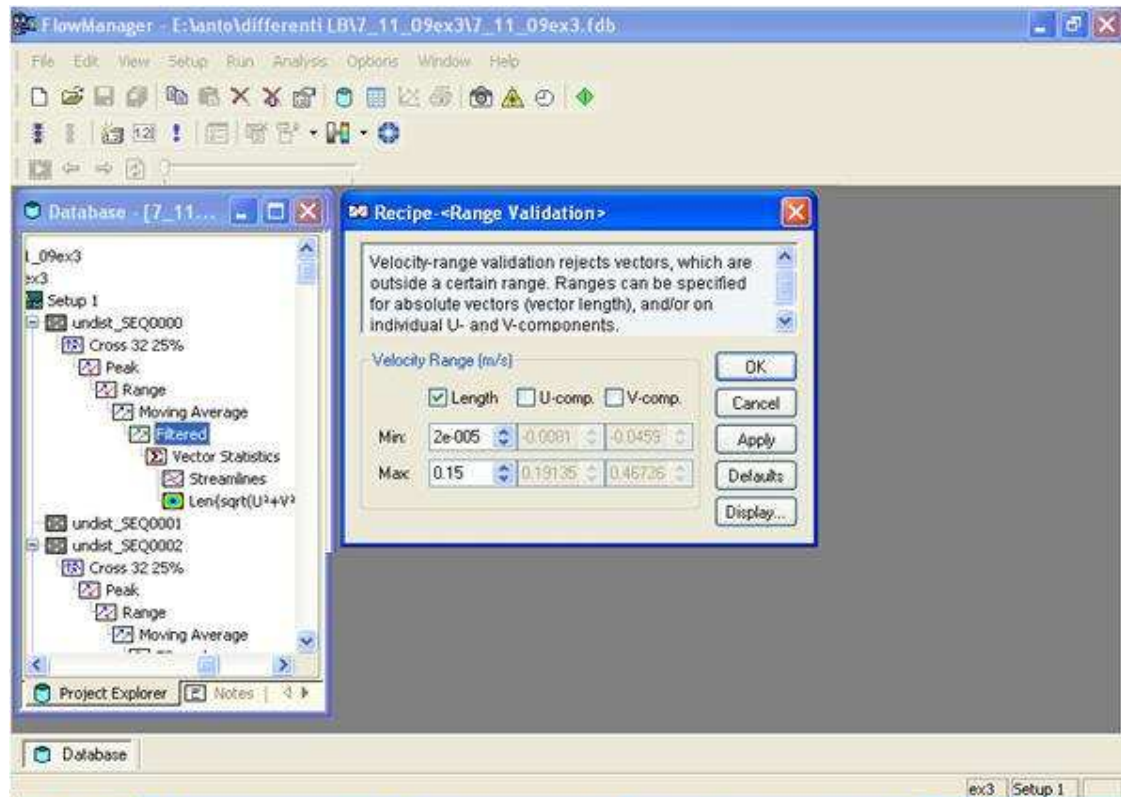


Figura 5.14 Finestra della range validation.

5.6.3. Moving Average Validation

Tale metodo di validazione si basa sul confronto tra il vettore che si deve validare e la media dei vettori presenti nell'intorno del vettore stesso. Se il vettore viene eliminato, esso è sostituito con un vettore stimato basandosi sui valori dei vettori circostanti. Per utilizzare questo metodo, quindi, si assume implicitamente che il campo di moto sia continuo. La finestra scelta per tale metodo è un quadrato all'interno del quale viene calcolata la media dei vettori che poi sarà confrontata con il vettore che si sta considerando nella posizione (x, y) . La media è calcolata con la seguente formula:

$$\bar{V}(x, y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=x-\frac{n-1}{2}}^{x+\frac{n-1}{2}} \sum_{j=y-\frac{n-1}{2}}^{y+\frac{n-1}{2}} V(i, j)$$

Dove m e n sono le dimensioni della finestra scelta per il confronto. Il vettore è eliminato se

$$\|V(x, y) - \bar{V}(x, y)\| > k$$

Dove la norma è data dalla seguente espressione:

$$\|V(x, y) - \bar{V}(x, y)\| = \sqrt{(u(x, y) - \bar{u}(x, y))^2 + (v(x, y) - \bar{v}(x, y))^2}$$

L'idea che sta dietro a tale metodo è che il campo della velocità cambia gradualmente quindi non c'è molta differenza tra un vettore e i vettori circostanti. Se invece un vettore calcolato risulta molto diverso dai vettori circostanti allora sarà considerato un outliers e quindi eliminato e sostituito con un altro vettore. Il numero k non è un dato noto. Esso è dato da:

$$k = \alpha \max \|V(x, y) - \bar{V}(x, y)\|$$

dove α è un numero compreso tra 0 e 1 chiamato fattore di accettabilità.

Se α fosse posto pari a 1, tutti i vettori sarebbero considerati corretti, al contrario se α fosse posto pari a 0 tutti sarebbero eliminati. Il range ottimale di α solitamente utilizzato è 0,01 - 0,1; più tale valore è basso e più vettori saranno cancellati e sostituiti con il vettore medio $\bar{V}(x, y)$. Il metodo della moving average è un metodo iterativo e, in generale, più iterazioni vengono eseguite e migliore sarà il risultato finale.

Il software permette di scegliere la grandezza dell'area in cui viene eseguita la media mobile, solitamente 3x3 o 5x5 pixel, il fattore di accettabilità α e il numero di iterazioni. Inoltre è possibile scegliere tra diverse alternative:

- sostituire i vettori invalidati: in questo caso i vettori eliminati saranno sostituiti con il vettore medio calcolato all'interno dell'area definita in precedenza;
- non sostituire i vettori invalidati dalle precedenti validazioni: se è selezionata questa voce, solo i vettori eliminati con questo metodo di validazione saranno sostituiti, mentre quelli eliminati in precedenza rimarranno considerati non validi;
- valida sui bordi: in questo caso saranno valutati anche i vettori sui bordi i quali non hanno però intorno un'area completa e quindi potrebbero essere erroneamente ritenuti sbagliati.

Il metodo di validazione a media mobile assume una certa continuità del campo della velocità, quindi se in una regione ci fosse un cambiamento improvviso dei valori del vettore velocità, tale metodo non ne terrà conto, cancellando un vettore che invece è corretto.

L'uso di una sovrapposizione (overlap) durante l'elaborazione delle immagini in mappe vettoriali di velocità impedirà questo tipo di errori in quanto il sovracampionamento "liscerà" il campo stesso e così ci sarà un graduale cambiamento tra vettori vicini (Host e McCluskey, 1994).

Per il trattamento delle immagini qui presentato sono stati adottati i valori in Figura 5.15.

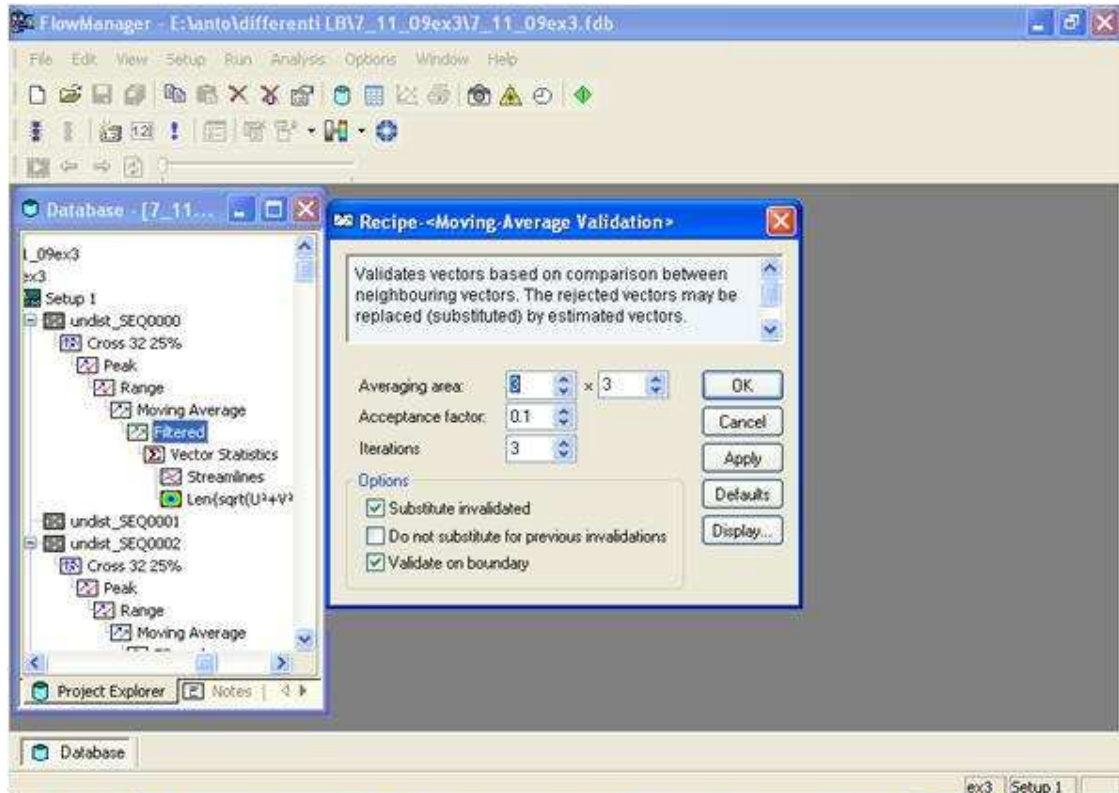


Figura 5.15 Finestra moving average validation.

5.6.4. Average Filter

I vettori in una mappa vettoriale possono essere soggetti a rumore, il quale può dar luogo a piccoli errori nel modulo e direzione dei vettori stessi. Per ridurre gli effetti del rumore, è possibile applicare un filtro. Questo metodo di calcolo modifica un vettore in un determinato punto prendendo in considerazione i vettori in prossimità di esso. Normalmente, un filtro usa solo vettori validati dalle precedenti analisi, ma è possibile anche prendere in considerazione i vettori eliminati. Lo scopo dell'applicazione del filtro è sostanzialmente di ridurre il rumore, soprattutto in vista delle future derivazioni che saranno eseguite sulla mappa vettoriale (per esempio le mappe di vorticosità) che possono amplificare gli errori presenti. In FlowManager è implementato il filtro a media mobile (moving average filter) che sostituisce ogni vettore

con la media pesata dei vettori in un intorno definito dall'utente tramite una finestra di dimensioni specifiche, solitamente pari a 3x3 pixel.

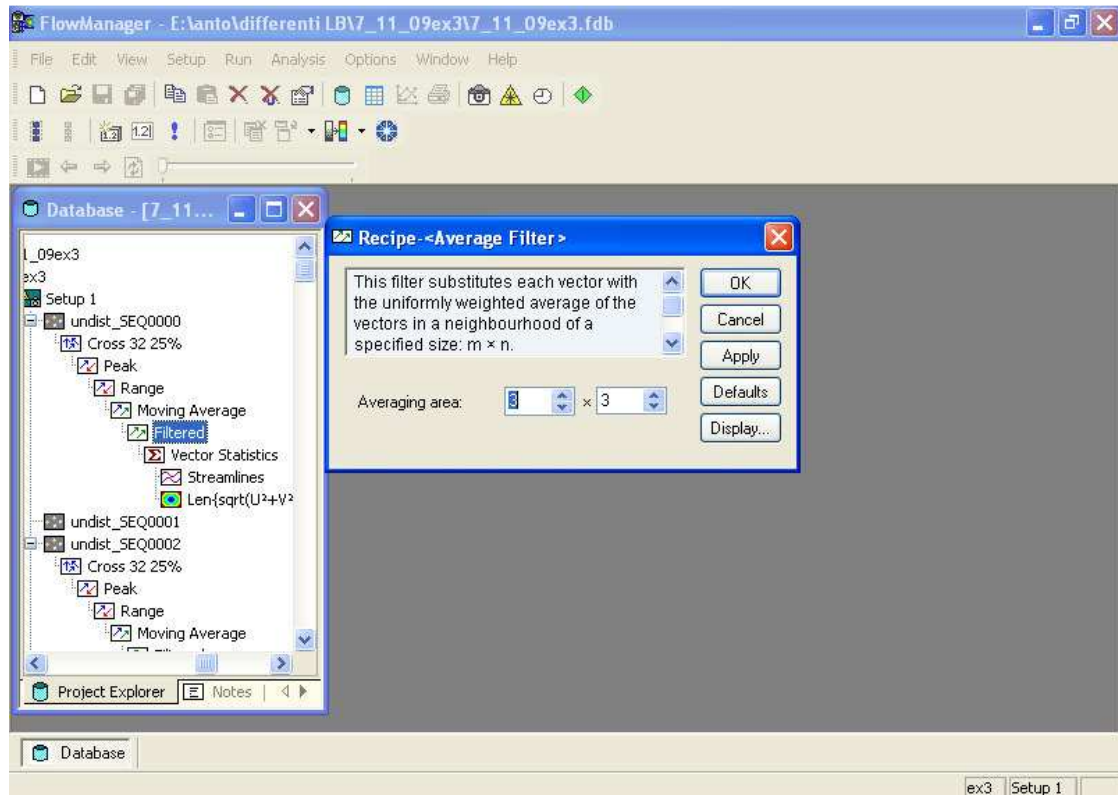


Figura 5.16 Finestra average filter.

5.7 Metodi di derivazione

La categoria chiamata “metodi di derivazione” è utilizzata per estrarre, quantificare e rendere visibili caratteristiche del campo di moto che non sono immediatamente evidenti dalla mappa vettoriale. Esempi di grandezze derivate sono la vorticosità e le linee di flusso. La derivazione può essere applicata direttamente sui dati misurati (cioè sulla mappa vettoriale risultante dalla cross-correlazione) o sui dati misurati validati attraverso i metodi sopra descritti. L'output può essere una mappa vettoriale, una mappa scalare (ad esempio nel caso della mappa della vorticosità) o una serie di curve (streamlines).

Nel presente lavoro di tesi si è utilizzato unicamente tale metodo per ottenere le streamlines relative al campo medio di velocità, che rappresentano quelle linee sempre tangenti al vettore velocità in ogni punto del campo di moto. Sono definite dalla seguente equazione differenziale:

$$udy = vdx$$

Esse rappresentano il percorso che una particella seguirebbe se il flusso fosse costante nel tempo e bidimensionale. La finestra di dialogo che si presenta all'utente permette di definire alcuni parametri grafici relativi alla visualizzazione delle linee di flusso:

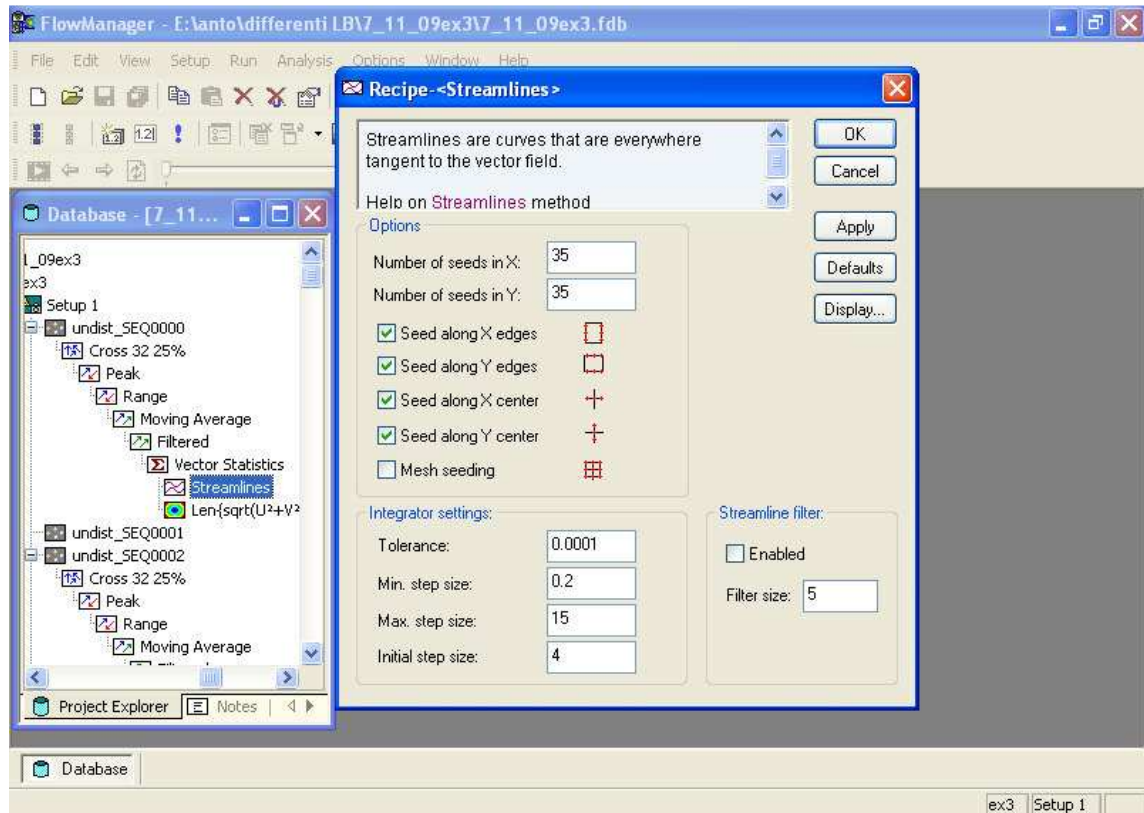


Figura 5.17 Finestra streamlines.

5.8 Esempio di analisi

Si riporta un esempio delle analisi eseguite con il software Flowmanager per la configurazione $L = 4$ m e $B = 3$ m. Una volta creato il setup per la nuova configurazione inserendo i dati relativi all'intervallo di tempo tra le immagini e alle impostazioni della fotocamera, e caricate tutte le immagini nel database, è stata eseguita la cross-correlazione tra coppie di immagini con aree d'interrogazione 32×32 pixel e overlap 25%, senza utilizzare windows functions, con un filtro low pass ($k = 3$). Si riporta la mappa risultante:

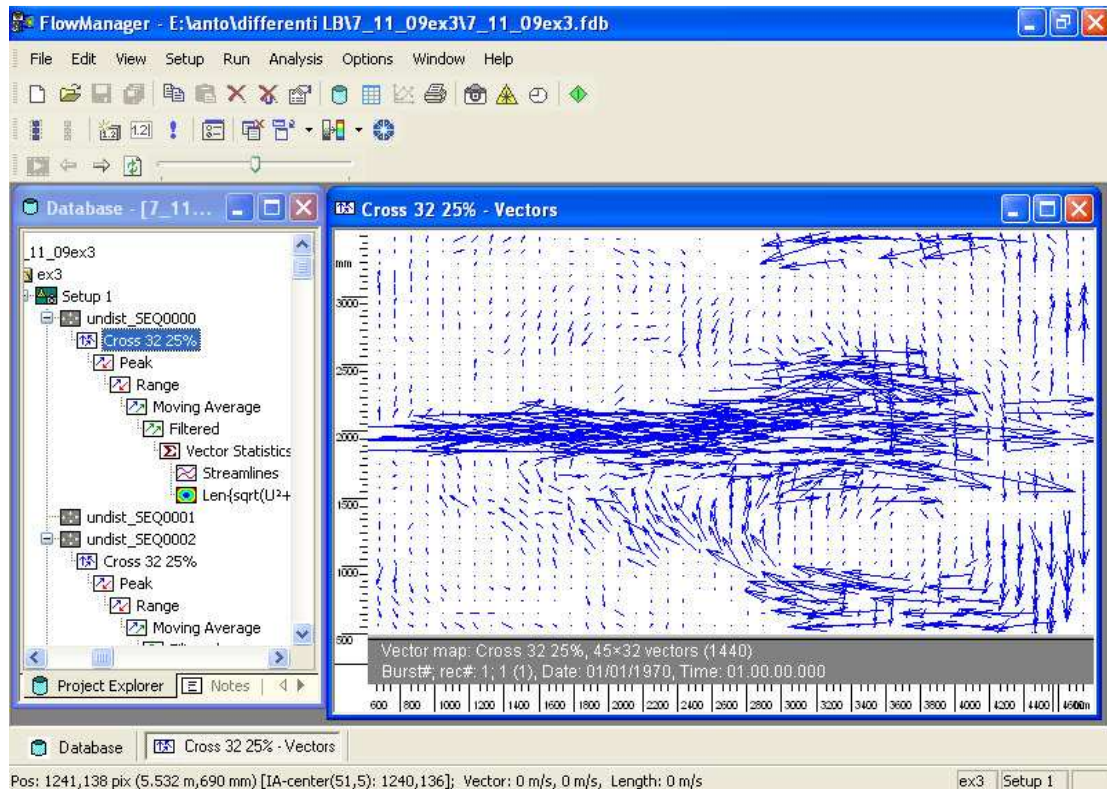


Figura 5.18 Risultato della cross-correlazione sulla configurazione 4 x 3 m.

Successivamente sono stati eseguiti in cascata i metodi di validazione. Dopo aver eseguito la peak validation (con fattore 1,2) e la range validation, con i valori limite descritti in precedenza, erano stati eliminati 320 vettori. In seguito, è stata eseguita la moving average validation con averaging area 3 x 3 pixel, fattore di accettabilità 0,1 e 3 iterazioni andando a rimpiazzare i vettori scartati, successivamente è stato applicato un filtro 3 x 3.

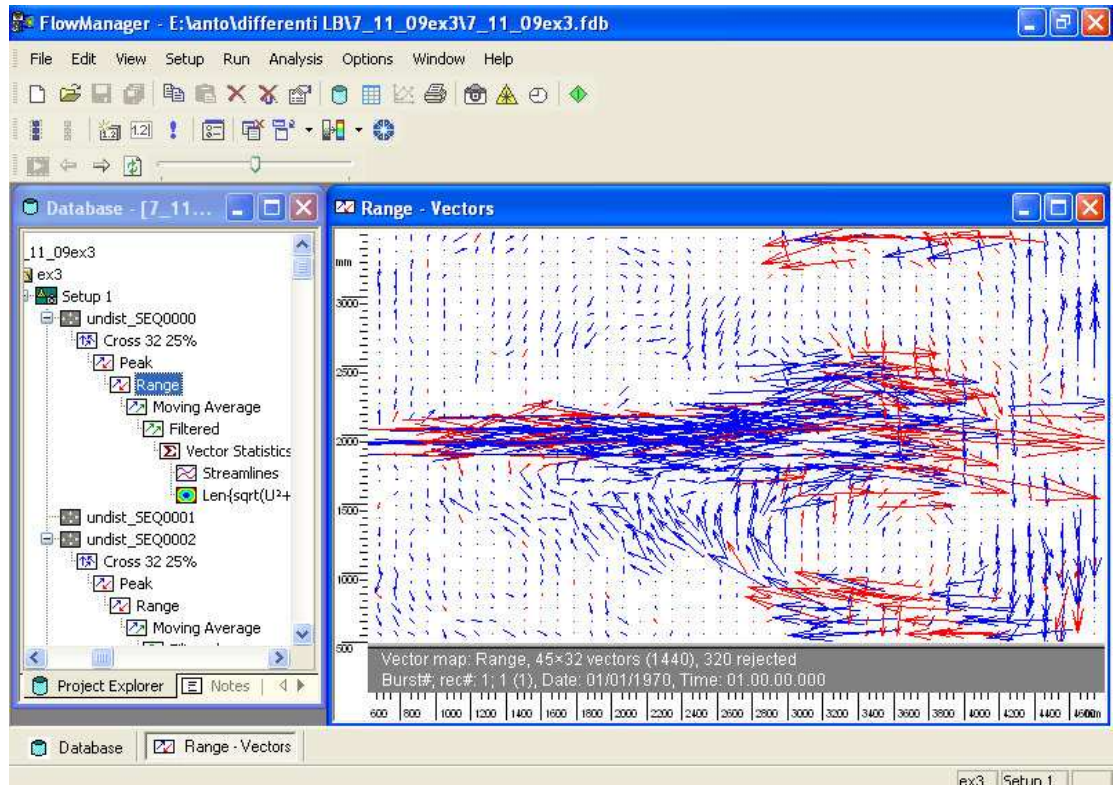
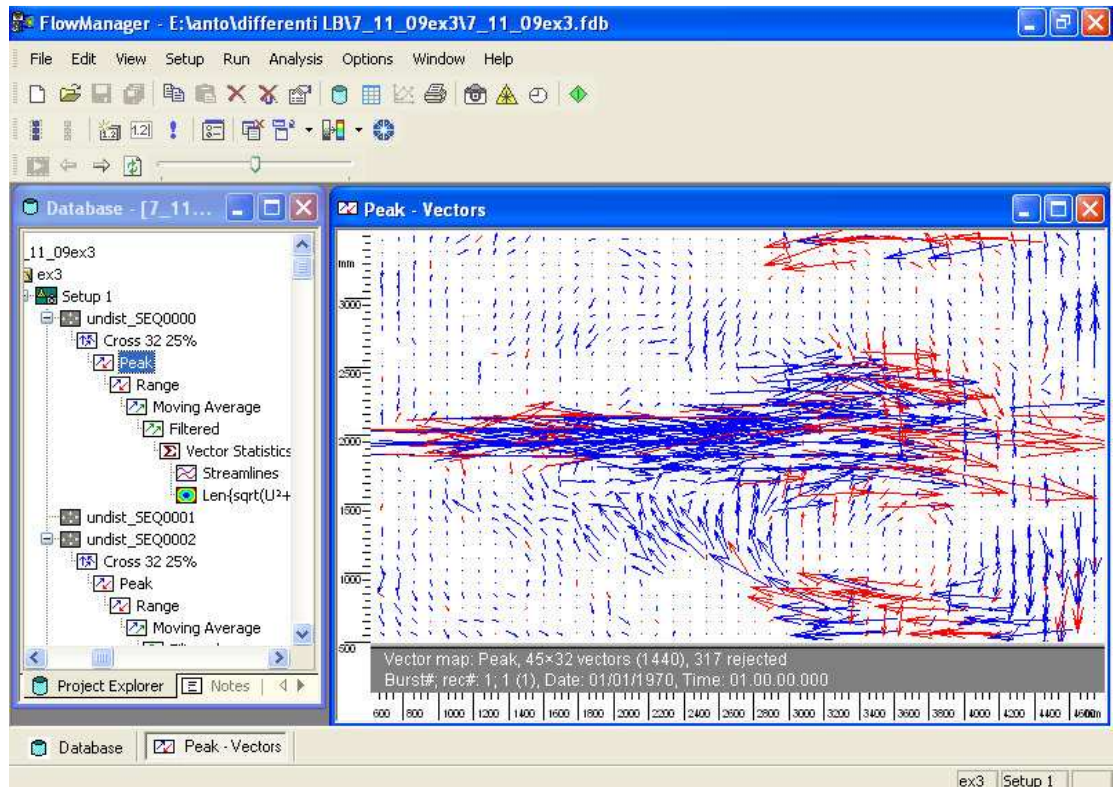


Figura 5.19 Risultato della peak e range validation sulla configurazione 4 x 3 m. In rosso i vettori eliminati.

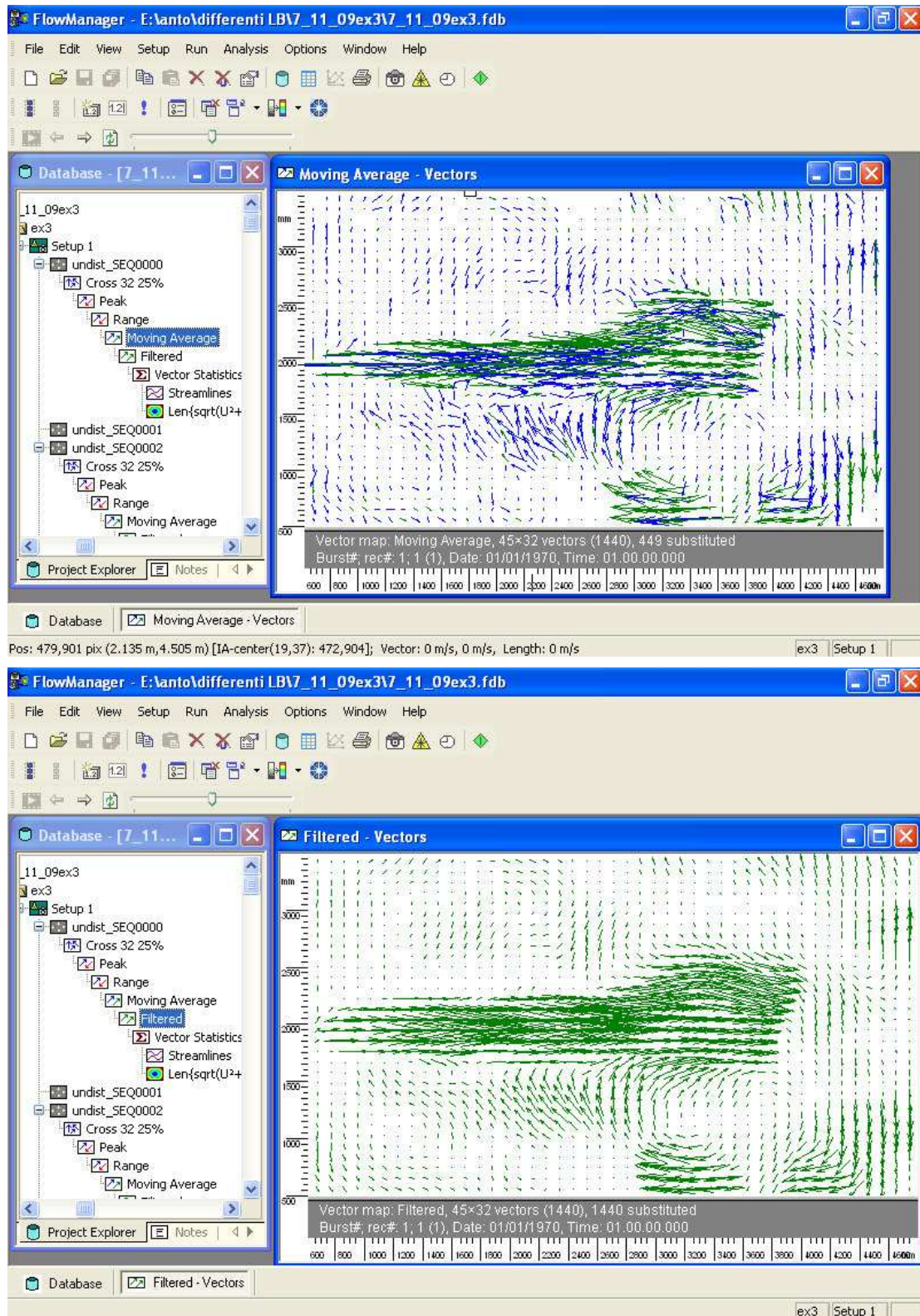


Figura 5.20 Risultato dell'applicazione della moving average e del filtro sulla configurazione 4 x 3 m.

Una volta eseguita l'elaborazione delle immagini a coppie (per la maggior parte degli esperimenti erano state raccolte 1500-2000 immagini, quindi le coppie analizzate 750-1000), si esegue la media di tutte le mappe istantanee attraverso il comando vector statistics. Tale comando permette di calcolare la velocità media, la deviazione standard e la varianza. Il campo di velocità medio finale risultante è il seguente:

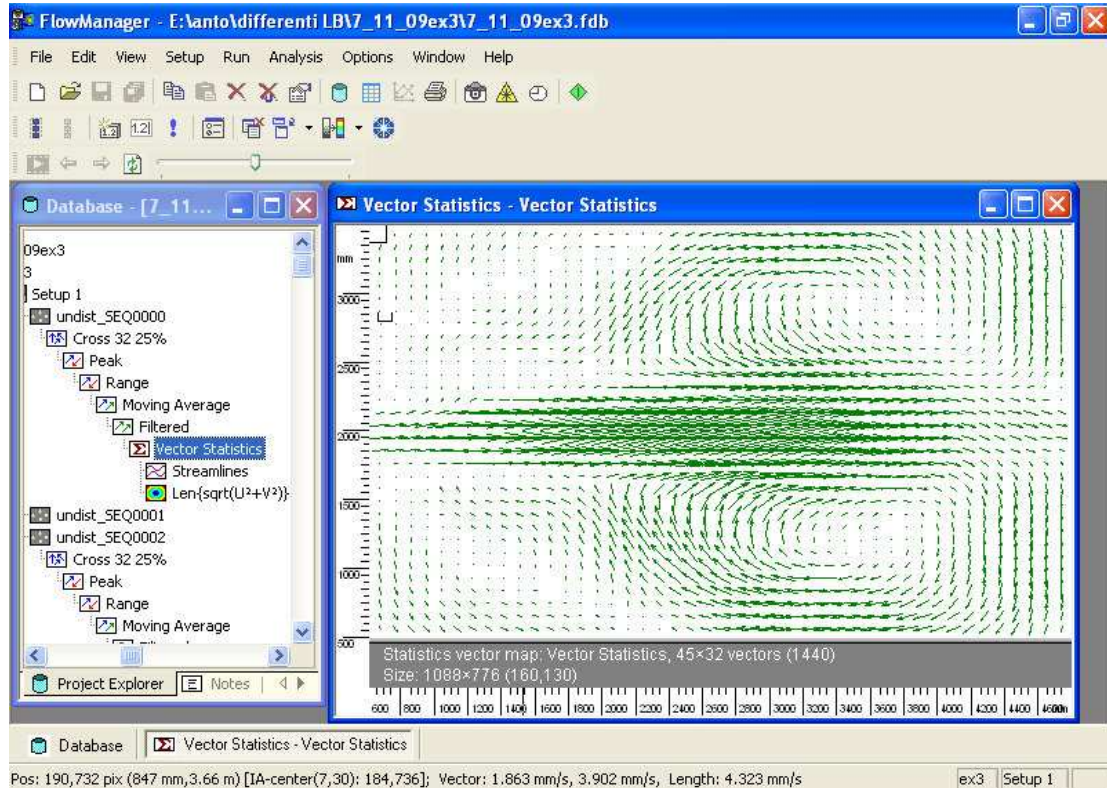


Figura 5.21 Risultato finale sulla configurazione 4 x 3 m.

Si possono riconoscere due vortici simmetrici più piccoli all'ingresso del serbatoio e due più grandi a valle, come risulta più evidente dalla mappa relativa alle linee di flusso:

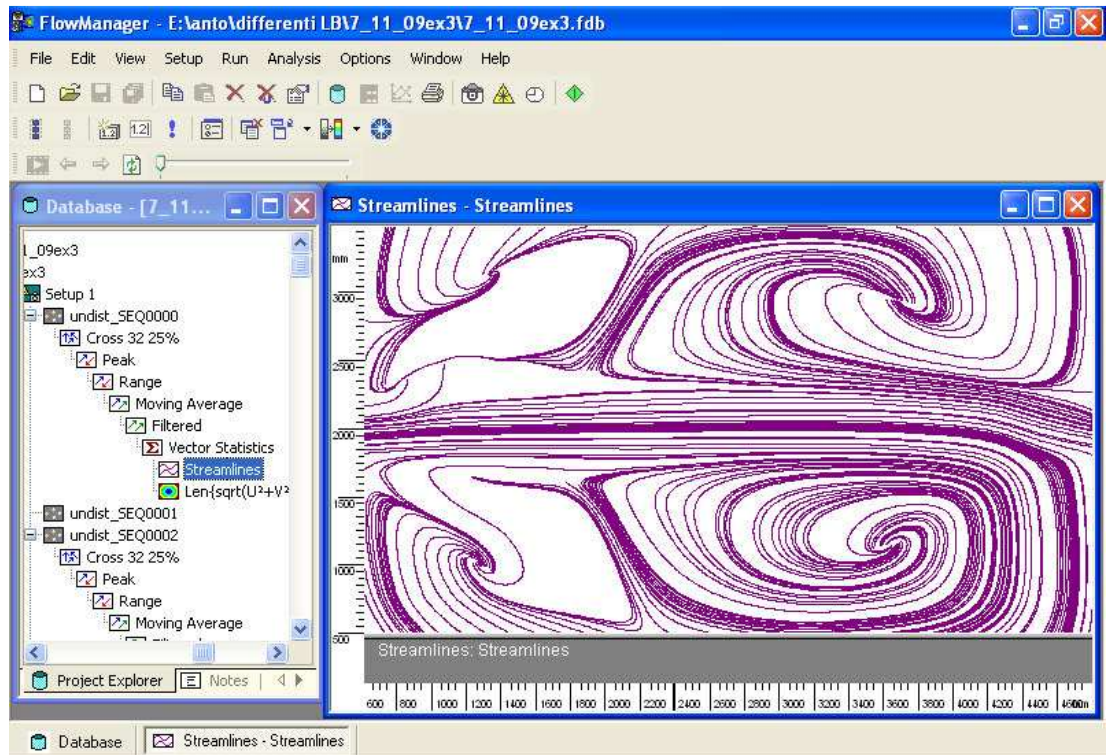


Figura 5.22 Linee di flusso ottenute dal campo di velocità.

Tutti i risultati ottenuti sono disponibili in formato numerico ed esportabili per eseguire successive elaborazioni.

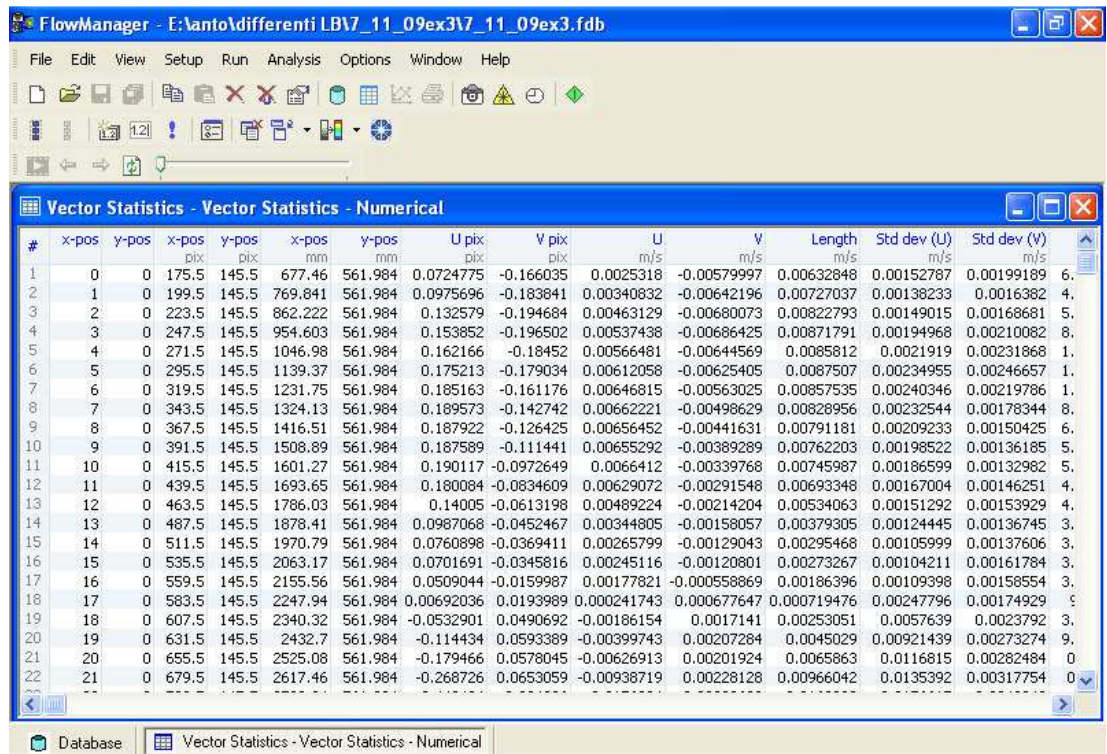


Figura 5.23 Campo di moto in formato numerico; nella tabella sono indicate le coordinate x, y in pixel e mm, le componenti della velocità U e V in m/s, la velocità totale e la deviazione standard.

Capitolo 6. Risultati dei test con acqua pulita

Una volta analizzate le immagini con il software FlowManager e ottenuta la mappa vettoriale del campo di moto in forma numerica, sono stati utilizzati due diversi software per la visualizzazione del campo stesso e delle streamlines. In questa trattazione saranno presentate, per ogni geometria, una serie di mappe che hanno il compito di rappresentare l'andamento del campo di moto.

In particolare sono state elaborate per ogni configurazione:

- La mappa vettoriale
- La mappa delle linee di flusso (streamlines)

Per realizzare la prima mappa, è stato utilizzato il programma SURFER 8. Per la seconda si è utilizzato il programma TECPLOT 9.0. Entrambi i programmi rielaborano i dati in entrata, forniti su fogli Excel preparati in modo specifico per ciascun programma.

6.1 Software utilizzati per l'analisi del campo di moto

6.1.1. Il software Surfer 8

Surfer è un software che permette di convertire dati in forma matriciale nei seguenti tipi di mappe: contour, vector, image. Una mappa creata può poi essere poi personalizzata in tutti i suoi elementi al fine di arrivare al risultato desiderato.

Per sviluppare una mappa vettoriale, Surfer deve poter disporre, oltre al modulo della velocità, anche della sua direzione e del verso. I dati in ingresso saranno quindi le componenti (u, v) del vettore associati a specifiche coordinate x e y . Si riporta un esempio del foglio Excel utilizzato per l'elaborazione in Figura 6.1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	
1	x-pos []	y-pos []	x-pos [pix]	y-pos [pix]	x-pos [mm]	y-pos [mm]	x giuste [m]	y giuste [m]	U pix [pix]	V pix [pix]	U [m/s]	V [m/s]	Length [m/s]	Std dev (U) [m/s]	Std dev (V) [m/s]	Sum(V)
2	0	0	445,5	495,5	2090,63	2325	0	0	3,59327	0,0272157	0,160696	0,00121712	0,1607	0,0269301	0,00352086	
3	1	0	469,5	495,5	2203,13	2325	0,1125	0	3,63245	0,0261448	0,162448	0,00116923	0,162452	0,02098	0,00304382	
4	2	0	493,5	495,5	2315,62	2325	0,22499	0	3,6882	0,0248423	0,164941	0,00111098	0,164945	0,0143391	0,00288931	
5	3	0	517,5	495,5	2428,12	2325	0,33749	0	3,70012	0,0254603	0,165474	0,00113862	0,165478	0,0125408	0,00310807	
6	4	0	541,5	495,5	2540,63	2325	0,45	0	3,67681	0,0251805	0,164432	0,0011261	0,164436	0,0113028	0,00337108	
7	5	0	565,5	495,5	2653,13	2325	0,5625	0	3,62166	0,0253175	0,161965	0,00113223	0,161969	0,0105662	0,00357865	
8	6	0	589,5	495,5	2765,63	2325	0,675	0	3,52192	0,0229684	0,157505	0,00102717	0,157508	0,011029	0,00357494	
9	7	0	613,5	495,5	2878,12	2325	0,78749	0	3,39662	0,0226006	0,151901	0,00101073	0,151905	0,0122718	0,0037153	
10	8	0	637,5	495,5	2990,62	2325	0,89999	0	3,27584	0,0238523	0,1465	0,00106671	0,146504	0,0148524	0,00418315	
11	9	0	661,5	495,5	3103,13	2325	1,0125	0	3,21945	0,0250098	0,143978	0,00111847	0,143982	0,017316	0,00485529	
12	0	1	445,5	519,5	2090,63	2437,5	0	0,1125	3,67787	0,0187904	0,164479	0,000840329	0,164481	0,0224527	0,00309251	
13	1	1	469,5	519,5	2203,13	2437,5	0,1125	0,1125	3,7177	0,0168565	0,166261	0,000753843	0,166262	0,0174818	0,00270594	
14	2	1	493,5	519,5	2315,62	2437,5	0,22499	0,1125	3,77427	0,0154744	0,16879	0,000692033	0,168792	0,0117758	0,00265813	
15	3	1	517,5	519,5	2428,12	2437,5	0,33749	0,1125	3,78782	0,0155488	0,169396	0,000695361	0,169398	0,0102946	0,00291978	
16	4	1	541,5	519,5	2540,63	2437,5	0,45	0,1125	3,75977	0,0155247	0,168142	0,000694285	0,168143	0,00947033	0,00323344	
17	5	1	565,5	519,5	2653,13	2437,5	0,5625	0,1125	3,70089	0,0137598	0,165509	0,000615356	0,16551	0,00906907	0,00338071	
18	6	1	589,5	519,5	2765,63	2437,5	0,675	0,1125	3,60067	0,0108093	0,161027	0,000483405	0,161027	0,00955238	0,0033443	
19	7	1	613,5	519,5	2878,12	2437,5	0,78749	0,1125	3,47669	0,00861987	0,155482	0,000385492	0,155483	0,0107059	0,00346601	
20	8	1	637,5	519,5	2990,62	2437,5	0,89999	0,1125	3,35445	0,00695266	0,150015	0,000310932	0,150016	0,0131555	0,00400265	
21	9	1	661,5	519,5	3103,13	2437,5	1,0125	0,1125	3,29387	0,00570382	0,147306	0,000255082	0,147306	0,0154535	0,0047159	
22	0	2	445,5	543,5	2090,63	2550	0	0,225	3,7699	0,00948505	0,168595	0,000424184	0,168595	0,0203787	0,003021	
23	1	2	469,5	543,5	2203,13	2550	0,1125	0,225	3,81235	0,00696555	0,170493	0,000311506	0,170494	0,0154591	0,00262021	
24	2	2	493,5	543,5	2315,62	2550	0,22499	0,225	3,87065	0,00458999	0,173101	0,00020527	0,173101	0,00992789	0,00256288	
25	3	2	517,5	543,5	2428,12	2550	0,33749	0,225	3,88896	0,00402504	0,173919	0,000180005	0,173919	0,00848036	0,00281078	

Figura 6.1 Foglio excel utilizzato per l'elaborazione in Surfer.

In primo luogo è necessario creare per ciascuna componente un file grid, ovvero la griglia dei valori puntuali. Attraverso l'opzione GRID-DATA, è possibile associare ad ogni punto di coordinate x, y, i relativi valori di u e di v. Ogni grid è quindi la rappresentazione di una funzione $Z = Z(x, y)$. In particolare i due grid rappresentano le due funzioni: $u = u(x, y)$ e $v = v(x, y)$. Questi due grid saranno i punti di partenza dell'elaborazione grafica successiva. Attraverso l'opzione MAP, VECTOR MAP, NEW 2GRID VECTOR MAP, i due grid vengono assemblati e il programma procede formando in ciascuno dei punti della griglia il vettore velocità $V(x, y) = \sqrt{u(x, y)^2 + v(x, y)^2}$. Automaticamente Surfer presenta la mappa vettoriale, il cui layout grafico potrà essere modificato attraverso la barra degli strumenti.

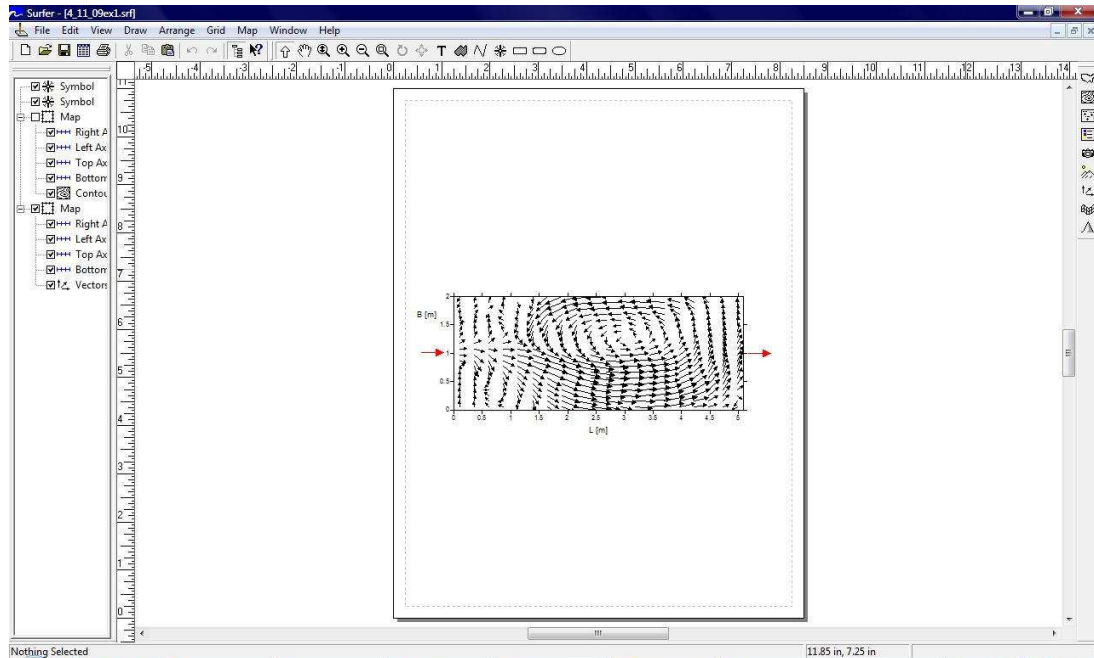


Figura 6.2 Rappresentazione della mappa vettoriale in Surfer.

6.1.2. Il software TECPLOT 9.0

Il programma TECPLOT è stato utilizzato per rappresentare le linee di flusso. Queste sono le linee tangenti a tutti i vettori velocità nei vari punti. Il programma perciò deve creare preliminarmente una mappa vettoriale. È quindi necessario considerare il modulo, la direzione e il verso della velocità. I dati in ingresso sono quindi le due componenti u e v e i rispettivi punti di coordinate x e y . Il foglio Excel di ogni configurazione del serbatoio deve essere caratterizzato solo dalle colonne indicanti le coordinate dei punti indagati e le componenti di velocità in quei punti. Tuttavia, affinché il foglio di calcolo possa essere compatibile con TECPLOT, è necessario che sia in formato txt.

0.00	0.00	0.01	0.00
0.00	0.10	0.01	0.00
0.00	0.20	0.01	0.00
0.00	0.30	0.01	0.00
0.00	0.40	0.01	0.00
0.10	0.00	0.01	0.00
0.10	0.10	0.01	0.00
0.10	0.20	0.01	0.00
0.10	0.30	0.01	0.00
0.10	0.40	0.01	0.00
0.20	0.00	0.01	0.00
0.20	0.10	0.01	0.00
0.20	0.20	0.01	0.00
0.20	0.30	0.01	0.00
0.20	0.40	0.01	0.00
0.30	0.00	0.01	0.00
0.30	0.10	0.01	0.00
0.30	0.20	0.01	0.00
0.30	0.30	0.01	0.00
0.30	0.40	0.01	0.00
0.40	0.00	0.01	0.00
0.40	0.10	0.01	0.00
0.40	0.20	0.01	0.00
0.40	0.30	0.01	0.00
0.40	0.40	0.01	0.00
0.50	0.00	0.01	0.00
0.50	0.10	0.01	0.00
0.50	0.20	0.01	0.00
0.50	0.30	0.01	0.00
0.50	0.40	0.01	0.00
0.60	0.00	0.01	0.00
0.60	0.10	0.01	0.00
0.60	0.20	0.01	0.00
0.60	0.30	0.01	0.00
0.60	0.40	0.01	0.00
0.70	0.00	0.01	0.00
0.70	0.10	0.01	0.00
0.70	0.20	0.01	0.00
0.70	0.30	0.01	0.00
0.70	0.40	0.01	0.00
0.80	0.00	0.01	0.00
0.80	0.10	0.01	0.00
0.80	0.20	0.01	0.00
0.80	0.30	0.01	0.00
0.80	0.40	0.01	0.00
0.90	0.00	0.02	0.00
0.90	0.10	0.02	0.00
0.90	0.20	0.02	0.00
0.90	0.30	0.02	0.00
0.90	0.40	0.01	0.00
1.00	0.00	0.02	0.00
1.00	0.10	0.02	0.00
1.00	0.20	0.03	0.00

Figura 6.3 Formato dei dati per l'utilizzo con il software Tecplot 9.0.

Una volta inseriti i dati, automaticamente il programma elabora la mappa vettoriale, all'interno del dominio di misura indagato. In seguito, è possibile procedere alla creazione “manuale” delle streamlines. Attraverso il comando “streamlines”, infatti, cliccando in corrispondenza di punti all'interno dell'area d'indagine, il programma traccia le linee di flusso passante per quei punti.

L'opzione Tool Details permette di modificare le caratteristiche grafiche delle streamlines, come ad esempio il colore e lo spessore. In alcuni casi presentati, le streamlines hanno un andamento simile ad una spirale, per terminare in un punto, anche se durante le indagini non si sono rilevati punti caratterizzati da velocità orizzontali nulle. Questo avviene verso il centro delle zone di ricircolo. In queste zone, infatti, il numero di vettori velocità rilevato non è sufficiente a definire in modo preciso l'andamento del flusso.

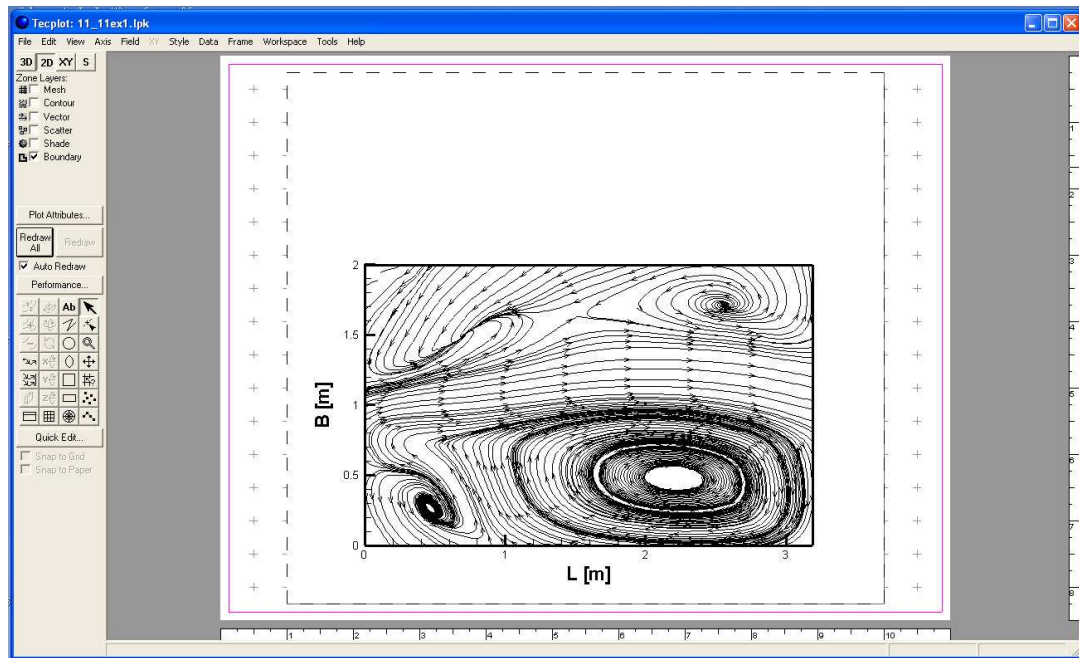


Figura 6.4 Rappresentazione delle streamlines realizzate con il programma Tecplot 9.0.

6.2 Streamlines e campi di moto vettoriali delle diverse configurazioni

L'andamento della corrente del fluido può assumere una configurazione simmetrica rispetto all'asse centrale del serbatoio, o asimmetrica, in base alla geometria del serbatoio stesso. Il primo obiettivo è stato quindi quello di ricercare per quali valori di $\frac{L}{B}$ e $\frac{B}{b}$ si avesse simmetria o asimmetria del campo di moto.

Il moto asimmetrico è il risultato dell'amplificazione a grande scala di piccoli disturbi trasversali nel profilo di velocità in prossimità della bocca d'entrata o di piccole imperfezioni nel serbatoio, a causa della sensibilità del fluido alle condizioni al contorno. Tale deviazione del campo di moto verso una configurazione asimmetrica avviene però solo per alcune configurazioni del serbatoio, mentre in altre il campo di moto resta simmetrico nonostante le piccole perturbazioni delle condizioni al contorno.

Mentre le indagini di Kantoush si sono interessate solo a poche configurazioni geometriche, Camnasio ha approfondito la ricerca ampliando il database e definendo la tipologia del flusso sulla base di $\frac{L}{B}$ e $\frac{B}{b}$.

Attraverso le mappe vettoriali e le linee di flusso è possibile descrivere il campo di moto e, quindi, individuare la configurazione esatta delle grandi strutture turbolente, costituite da

zone di ricircolo aventi asse verticale. In particolare gli esperimenti hanno permesso di individuare tre tipologie di campo di moto: asimmetrico, simmetrico e channel-like flow.

6.2.1. Campo di moto asimmetrico

Si presentano due diversi tipi di campo asimmetrico.

Asimmetrico A1. Dopo l'immissione del getto, il flusso principale dell'acqua devia verso un lato del serbatoio e poi prosegue verso il canale di uscita scorrendo lungo il muro laterale; nella regione centrale del serbatoio si forma una grande zona di ricircolo con un vortice stabile che occupa la maggior parte del serbatoio, al quale se ne aggiungono altri due di dimensioni più piccole negli angoli a monte del serbatoio. Questo particolare fenomeno di formazione di un campo asimmetrico in una geometria simmetrica è generalmente chiamato "effetto Coanda", ma una spiegazione completa delle ragioni della sua insorgenza non è ancora disponibile. Il getto centrale può essere deviato indifferentemente verso il lato sinistro o il lato destro, in base a piccole asimmetrie del flusso o della geometria in prossimità della bocca d'entrata.

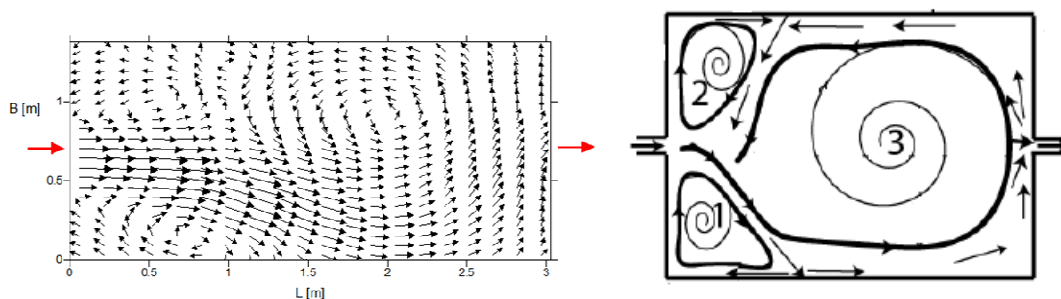


Figura 6.5 Rappresentazione del campo di moto asimmetrico A1.

Asimmetrico A2. Questa tipologia è caratterizzata da una piccola struttura turbolenta iniziale in prossimità dell'angolo del serbatoio vicino alla bocca d'entrata, dovuta alla deviazione del getto principale verso un lato come in A1, per poi proseguire con un andamento rettilineo del flusso, caratterizzato da vettori di velocità paralleli all'asse longitudinale.

L'idea di classificare il campo di moto asimmetrico in due tipologie ben distinte è di fondamentale importanza, dato che il comportamento del fluido risulta essere ben differente e soprattutto legato a particolari condizioni geometriche. Infatti, l'asimmetria A2 può essere considerata come una sorta di transizione da un moto asimmetrico A1 ad un moto di tipo channel-like flow, che verrà presentata in seguito.

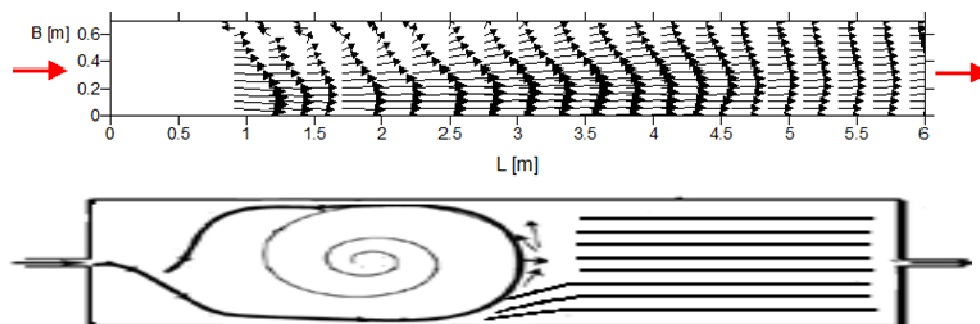


Figura 6.6 Rappresentazione del campo di moto asimmetrico A2.

6.2.2. Campo di moto simmetrico

Anche in questo caso, si riscontrano due diversi tipi di campi simmetrici.

Simmetrico S0. E' caratterizzato da un getto centrale con velocità più elevata rispetto al resto del serbatoio, che prosegue in modo rettilineo dall'ingresso verso l'uscita. Sia a destra sia a sinistra del getto centrale si hanno due grandi strutture turbolente simmetriche che ruotano in direzione opposta (quella a sinistra in verso antiorario, quella a destra in senso orario). Questa tipologia di campo di moto si verifica solo in geometrie del serbatoio con la lunghezza L pari o inferiore alla larghezza B, quindi per valori $0 < AR = \frac{L}{B} \leq 1$.

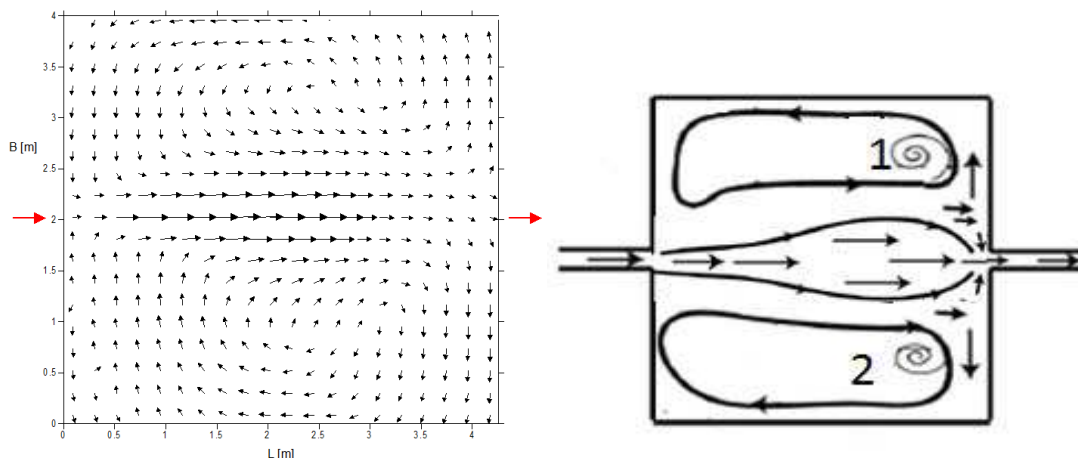


Figura 6.7 Rappresentazione del campo di moto simmetrico S0.

Simmetrico S1. E' caratterizzato da un getto principale centrale che prosegue in modo rettilineo dal canale d'entrata verso il canale d'uscita. Sia a destra sia a sinistra del getto centrale si hanno due grandi strutture turbolente simmetriche che ruotano in direzione opposta (quella a sinistra in verso antiorario, quella a destra in senso orario). Nei due angoli in

prossimità del canale di entrata si hanno altri due vortici simmetrici di dimensioni ridotte, che ruotano in senso opposto rispetto ai due principali posti a valle.

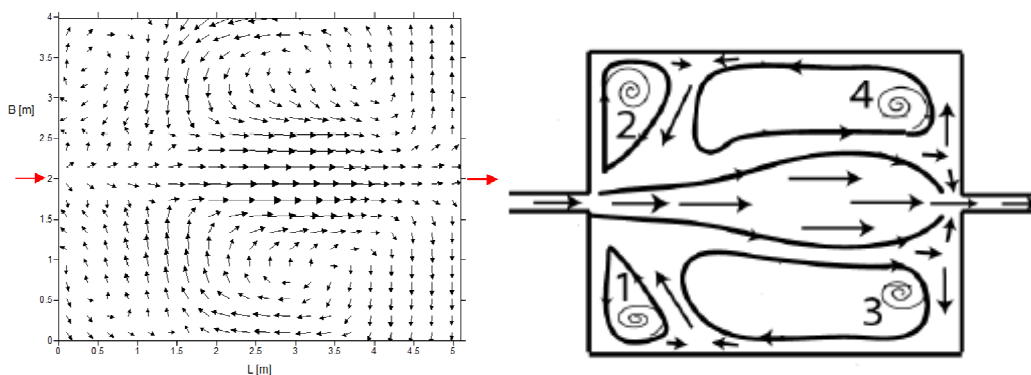


Figura 6.8 Rappresentazione del campo di moto simmetrico S1.

6.2.3. Channel-like flow (CH-L)

Quest'ultima tipologia è caratterizzata da velocità pressoché uniformi in tutto il serbatoio, allineate con l'asse longitudinale e dall'assenza di zone di ricircolo grandi, ad eccezione di due piccoli vortici su entrambi i lati in prossimità del canale d'ingresso. Questo campo di moto si sviluppa per le configurazioni del serbatoio in cui $\frac{B}{b}$ è molto piccola, quindi, il campo di moto lungo nella maggior parte del serbatoio è 1D, caratterizzato da una distribuzione uniforme e costante di velocità, simile al campo di moto che potrebbe essere trovato per un canale. Questo tipo di moto si ottiene per valori di $ER = \frac{B}{b} \leq 2$.

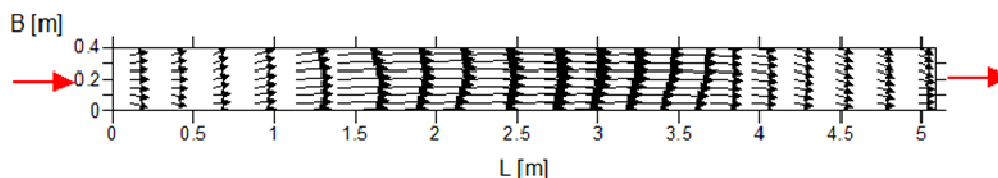


Figura 6.9 Rappresentazione del campo di moto channel like flow.

6.3 Classificazione del campo di moto

La Tabella 6.1 indica per quali geometrie si è individuata una simmetria S0, una simmetria S1, un'asimmetria A1 o un'asimmetria A2 sulla base degli esperimenti condotti con la tecnica LSPIV.

		L [m]												
		6	5,8	5,5	5,3	5	4	3	2,5	2,08	2	1,6	1,5	1
B [m]	4	A1	A1/S1	S1	S1	S1	S0	S0				S0		
	3					A1	S1	S0						
	2					A1	A1	S1	S1					
	1,5							A1					S1	
	1,4										S1			
	1	A1					A1			A1/S1				
	0,9	A2/A1												
	0,8	A2												
	0,7	A2												
	0,6	A2												
	0,5	CH-L						CH-L						
	0,4					CH-L	CH-L							CH-L

Tabella 6.1 Risultati delle analisi sul campo di moto all'interno del serbatoio.

In Figura 6.10 è rappresentato un grafico riassuntivo, in cui ogni punto rappresenta una specifica configurazione geometrica. In ascissa sono indicati il length – to – width ratio, mentre in ordinata l'expansion ratio. Il colore del punto distingue la tipologia di flusso.

Per un valore di expansion ratio pari a 16 si ha un elevato addensamento di punti. Queste, infatti, corrispondono a tutte le configurazioni di larghezza $B = 4$ m indagate con lunghezza del serbatoio variabile da 5 m a 6 m. Tali configurazioni sono state analizzate per individuare con precisione la lunghezza di transizione da campo di moto simmetrico a campo asimmetrico.

Possono essere identificate sul grafico quattro regioni corrispondenti a diversi tipi di campo di moto ed è possibile definire precisamente le linee di separazione tra le varie tipologie di campo di moto:

- regione di channel-like flow, caratterizzata da bassi valori di ER ($ER \leq 2$), corrispondente ad un serbatoio con $B = 0,5$ m o $B = 0,4$ m. in questo tipo di campo di moto il fluido risulta avere un moto essenzialmente monodimensionale, senza che si sviluppino grandi vortici laterali. Il channel-like Flow è una tipologia di campo di moto che si sviluppa per valori piccoli della larghezza del serbatoio, al massimo pari al doppio della canaletta di entrata. Al di sotto di $\frac{B}{b} = 2$ il valore di $\frac{L}{B}$ non risulta essere influente nella determinazione del campo di moto;
- la regione simmetrica del flusso, che può esistere solo per valori sufficientemente piccoli di AR. Il valore critico di AR in base al quale si può sviluppare un campo stabile simmetrico è funzione di ER, in particolare diminuisce con l'aumentare di esso. In questa regione, possono essere identificati

due sottoinsiemi: uno è formato dalle configurazioni di flusso con due vortici per $\frac{L}{B} \leq 1$, l'altro è costituito dalle configurazioni con quattro vortici ($\frac{L}{B} > 1$);

- la regione di flusso asimmetrico A1, caratterizzato da ER superiore a 2, e $AR \leq 6$;
- la regione di flusso asimmetrico A2, che si è riscontrato per geometrie lunghe e strette ($\frac{L}{B} > 6,5$); però sarebbero necessari più esperimenti per poter dire se si può avere questa configurazione anche per geometrie con $\frac{L}{B}$ minore.

I punti indicati dai triangoli rossi rappresentano due configurazioni geometriche ($L = 2,08$ m $B = 1$ m e $L = 5,8$ m $B = 4$ m) per le quali ripetendo gli esperimenti si sono verificati sia campi di moto simmetrici che asimmetrici a parità di condizioni sperimentali. Essi sono quindi due punti che rappresentano configurazioni geometriche caratterizzate da un campo di moto instabile, ovvero particolarmente sensibile a piccole perturbazioni che possono far evolvere il campo simmetrico in un campo di moto asimmetrico. La linea di separazione tra S1 e A1 sarà quindi una linea passante per questi due punti e verrà detta linea di transizione o d'instabilità. Tutti i punti appartenenti ad essa saranno rappresentativi di configurazioni geometriche caratterizzati da un campo di moto simmetrico ma instabile. Al di fuori di tale linea di separazione il campo di moto è stabile (o asimmetrica o simmetrica), quindi la tipologia di campo di moto non è sensibile a eventuali perturbazioni esterne.

Il punto rappresentato da un asterisco rosso (che rappresenta la configurazione $L = 6$ m; $B = 0,9$ m) è rappresentativo di una geometria nella quale si alternano asimmetrie A1 e asimmetrie A2 nei vari esperimenti. Si può quindi notare come anche in questo caso la transizione tra due tipologie di campo di moto possa essere caratterizzata da campi di moto instabili.

L'utilizzo di grandezze adimensionali per descrivere la geometria, è un modo per poter estendere queste conclusioni a geometrie di dimensioni anche molto differenti, ma caratterizzate dallo stesso valore di $\frac{L}{B}$ e $\frac{B}{b}$. Infatti, poiché dal punto di vista sperimentale sarebbe molto complesso e dispendioso condurre le medesime analisi su serbatoi di dimensioni molto maggiori, è ammesso considerare le configurazioni analizzate come rappresentative di una serie di infinite geometrie, accomunate dai medesimi length – to – width ratio ed expansion ratio, ma dimensionalmente differenti anche di diversi ordini di grandezza.

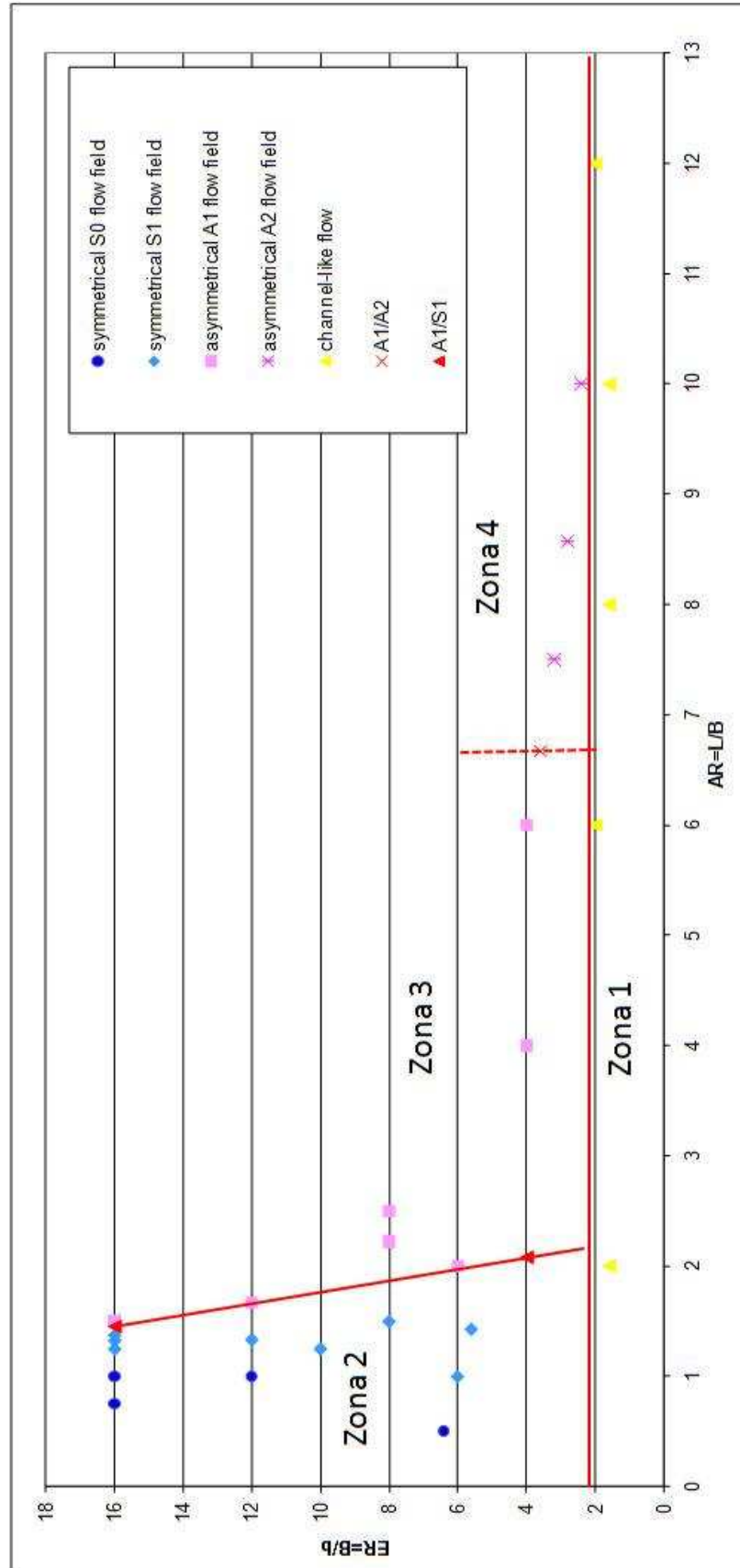


Figura 6.10 Grafico B/b-L/b delle configurazioni indagate tramite LSPIV.

Capitolo 7. Risultati dei test con sedimenti

Tutte le prove presentate nel Capitolo 6 riguardano diverse geometrie del serbatoio con il canale d'ingresso posto al centro della parete di monte, proprio di fronte al canale d'uscita, posto al centro del lato a valle. In questo capitolo sono presentati i risultati riguardanti lo studio dell'influenza della posizione dei canali d'ingresso e d'uscita sul campo di moto e sui sedimenti depositi. Anche in questo caso, l'analisi del campo di moto che si sviluppa all'interno del serbatoio è preliminare per indagare la sua influenza sul deposito dei sedimenti e quindi sulla trapping efficiency.

Le dimensioni del serbatoio scelte per questi test sono $L = 4,5$ m e $B = 4$ m. E' stata scelta questa configurazione poiché quando i canali sono posti simmetricamente al centro del lato di monte e di valle, si crea un campo di moto stabile, quindi si può analizzare come la posizione asimmetrica del canale d'ingresso o di uscita sia in grado di causare un'asimmetria nel campo di moto. In primo luogo, è stato eseguito un test con sedimenti per la geometria di riferimento con posizione del canale d'ingresso e d'uscita simmetrica. Poi, la posizione dei canali è stata spostata, in modo da formare altre tre configurazioni, come già mostrato in Figura 4.5, che si riporta nuovamente:

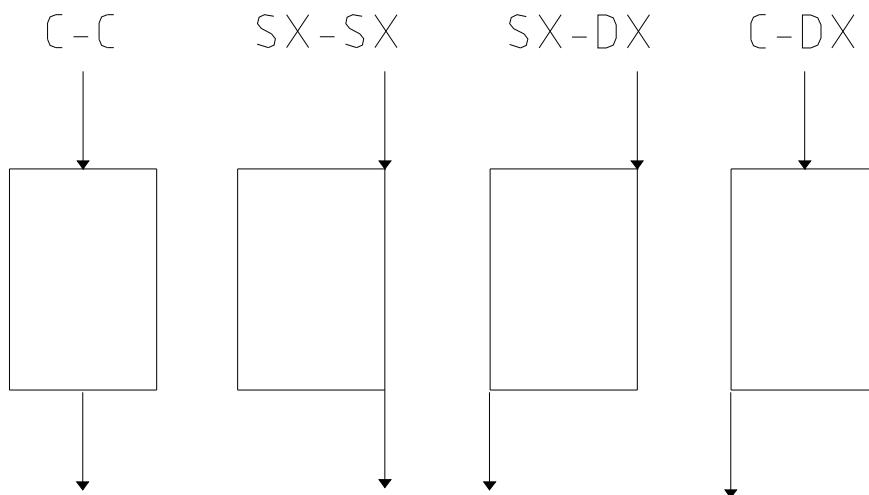


Figura 7.1 Configurazioni dei canali d'ingresso e uscita negli esperimenti: a) C - C; b) SX - SX c) SX - DX d) C - DX.

Sono stati eseguiti due test: uno prima dell'introduzione dei sedimenti (denominato pre), per verificare che tipo di campo di moto fosse presente, e il secondo dopo l'introduzione dei sedimenti (denominato post), per verificare come cambia il campo di moto in seguito all'introduzione dei sedimenti stessi, i quali formano dei depositi sul fondo di spessore massimo dell'ordine di 40 mm al termine di 4 ore di esperimenti (Camnasio et al, 2010).

La configurazione (a) pre e post è caratterizzata da un campo di moto simmetrico con un getto principale centrale che prosegue in modo rettilineo dal canale d'entrata verso il canale d'uscita. Nella configurazione pre, sia a destra sia a sinistra del getto centrale si hanno due grandi strutture turbolente simmetriche e nei due angoli in prossimità del canale di entrata si hanno altri due vortici simmetrici di dimensioni ridotte, che ruotano in senso opposto rispetto ai due principali posti a valle (configurazione simmetrica S1), mentre nella configurazione post si hanno solo i due vortici simmetrici più grandi (configurazione simmetrica S0).

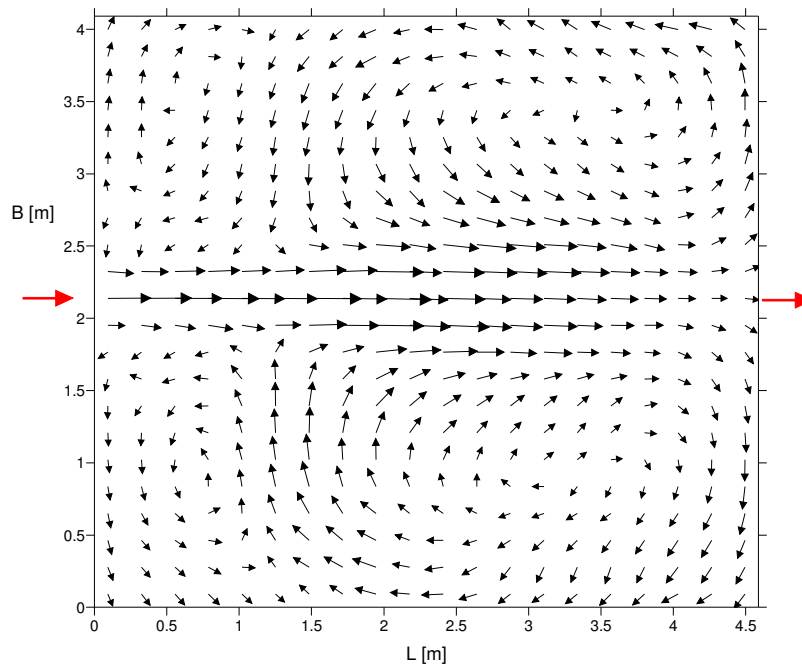


Figura 7.2 Campo di moto per la configurazione C – C pre.

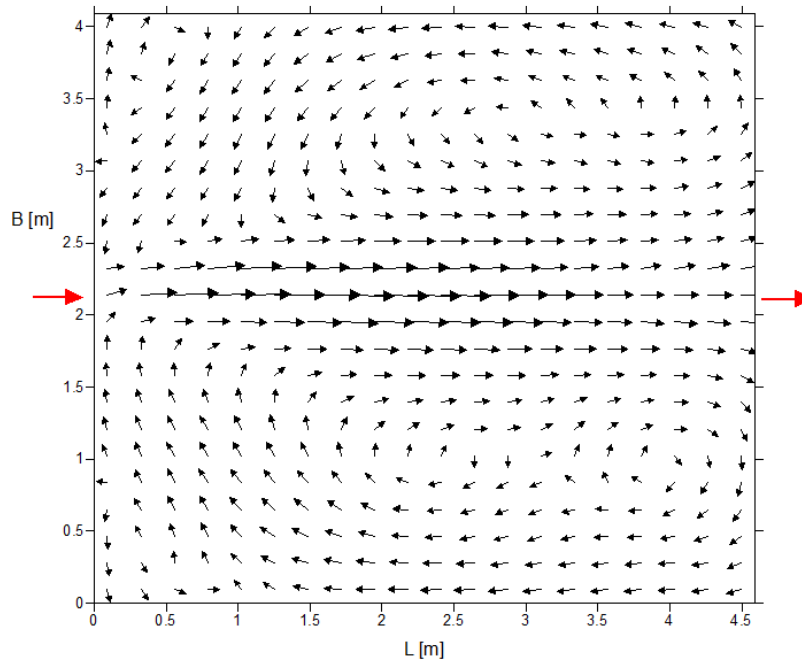


Figura 7.3 Campo di moto per la configurazione C – C post.

La configurazione (b) non presenta differenze tra l'esperimento con e senza sedimenti; il campo di moto che si crea nella vasca è sempre asimmetrico, con la formazione di un grande vortice al centro della vasca che ruota in senso orario e il getto principale deviato verso una parete.

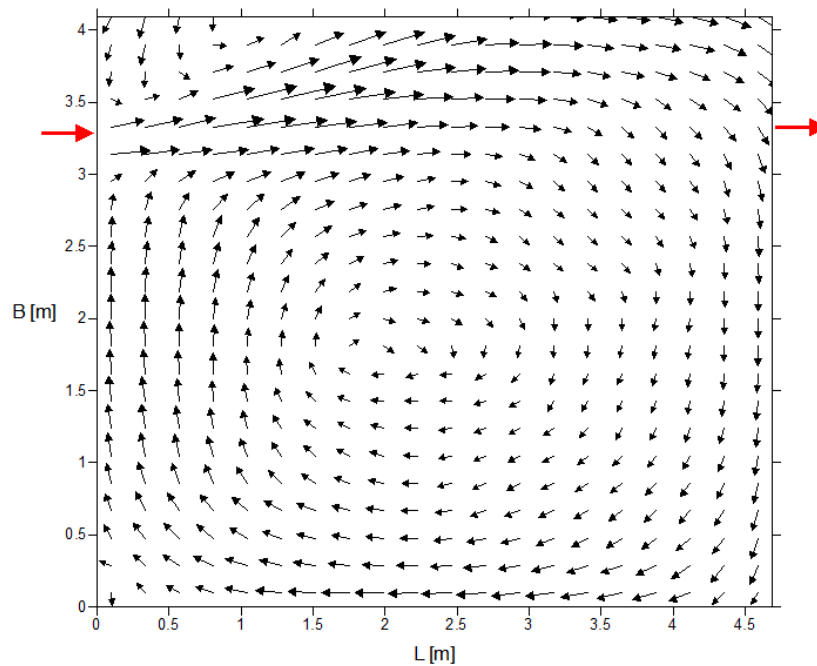


Figura 7.4 Campo di moto per la configurazione SX – SX pre.

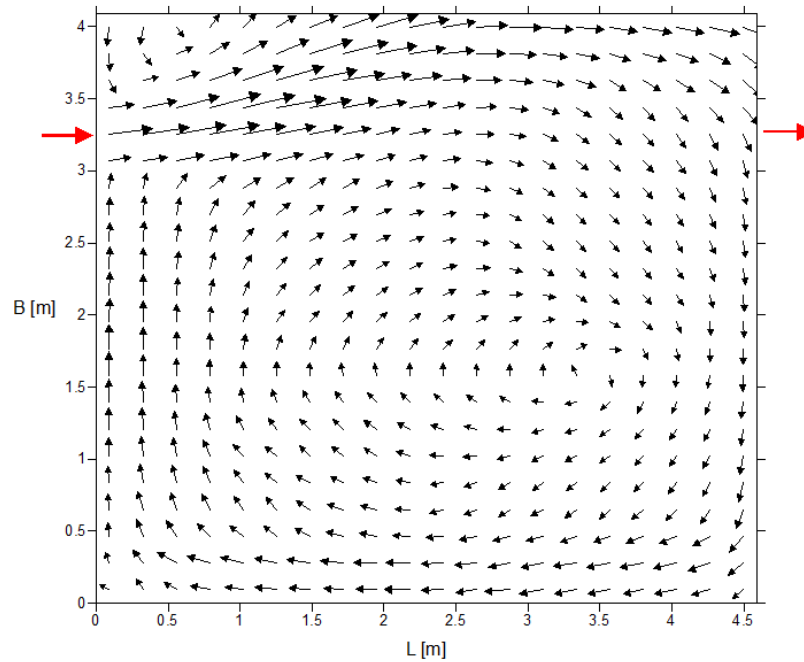


Figura 7.5 Campo di moto per la configurazione SX – SX post.

Per la configurazione (c) il campo di moto che si sviluppa durante i test con sedimenti è diverso da quello che si sviluppa durante le prove di acqua pulita. Per le prove con acqua limpida, infatti, il getto principale devia verso il lato del serbatoio più vicino al canale d'ingresso, poi prosegue nel serbatoio seguendo la parete sinistra e raggiunge alla fine il canale d'uscita. Una grande zona di ricircolo che ruota in senso orario si sviluppa nel centro del serbatoio. Al contrario, durante le prove effettuate con i sedimenti, già dopo trenta minuti i sedimenti depositati sul fondo creano una scabrezza sufficiente a deviare il getto principale verso il centro del serbatoio. Il getto principale segue una direzione orientata verso il canale di sbocco creando due zone di ricircolo ai due lati del getto stesso. Questo campo di moto rimane stabile per la restante parte dell'esperimento.

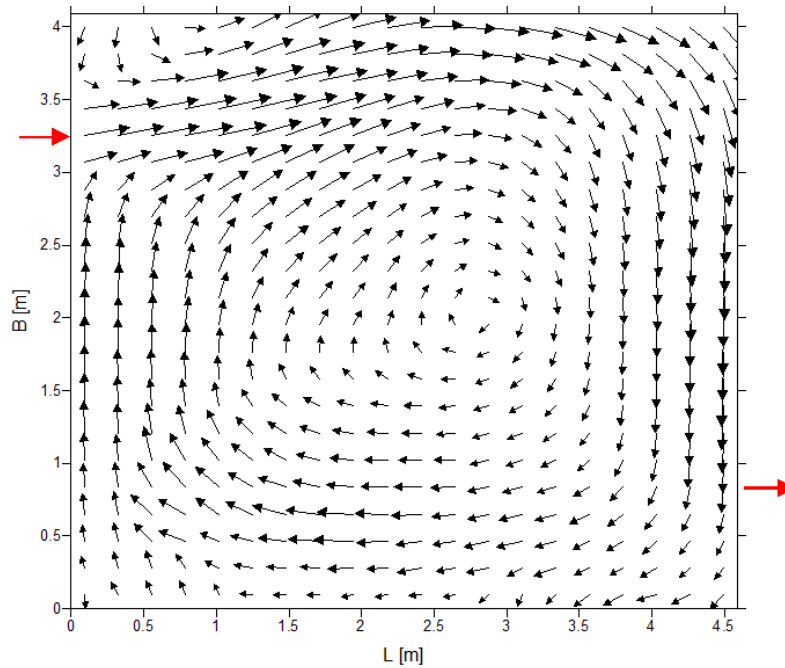


Figura 7.6 Campo di moto per la configurazione SX – DX pre.

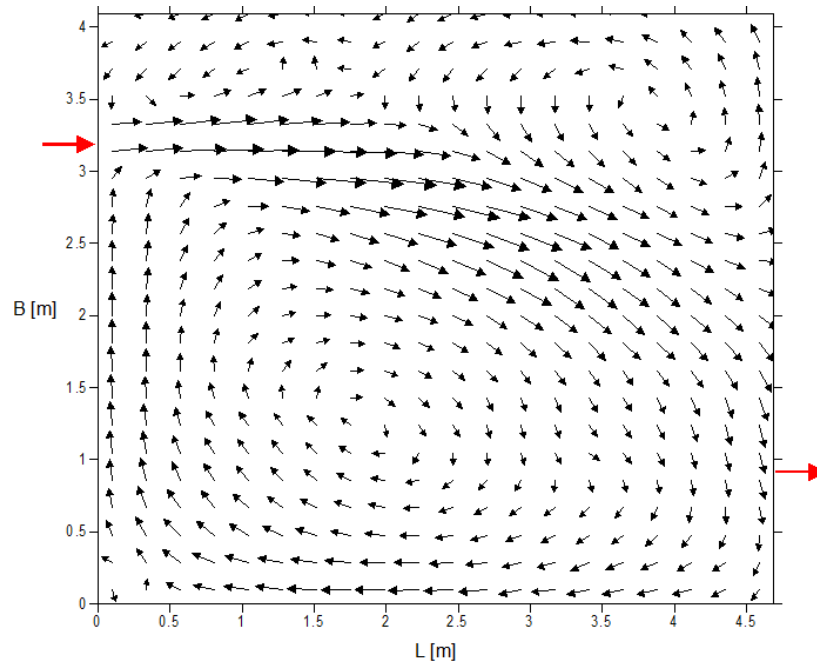


Figura 7.7 Campo di moto per la configurazione SX – DX post.

L'ultima configurazione (d) è quella intermedia per quanto riguarda la lontananza dei canali d'ingresso e d'uscita: il getto raggiunge direttamente l'uscita del bacino e due vortici di forme e dimensioni diverse si sviluppano su entrambi i lati del getto principale.

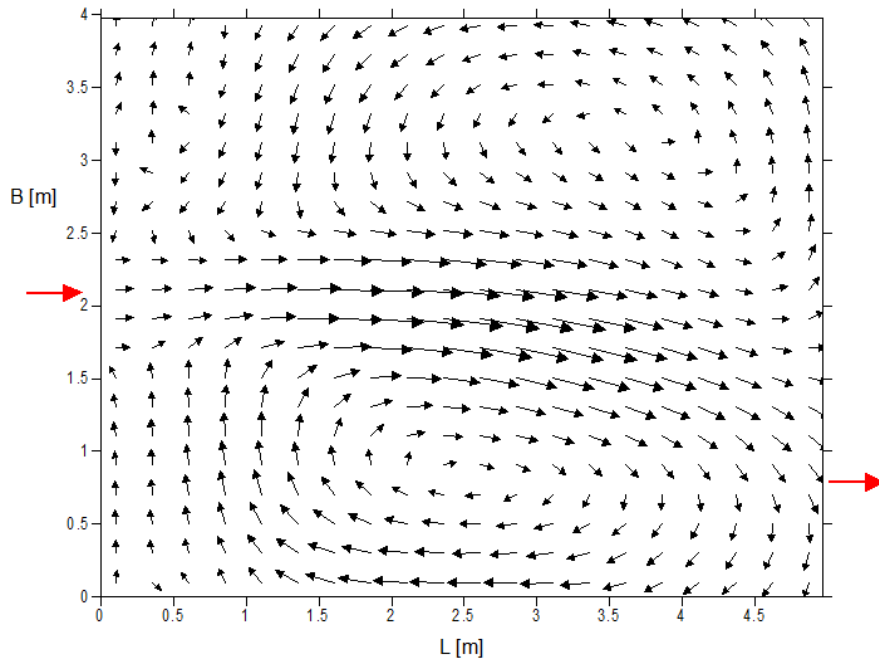


Figura 7.8 Campo di moto per la configurazione C – DX pre.

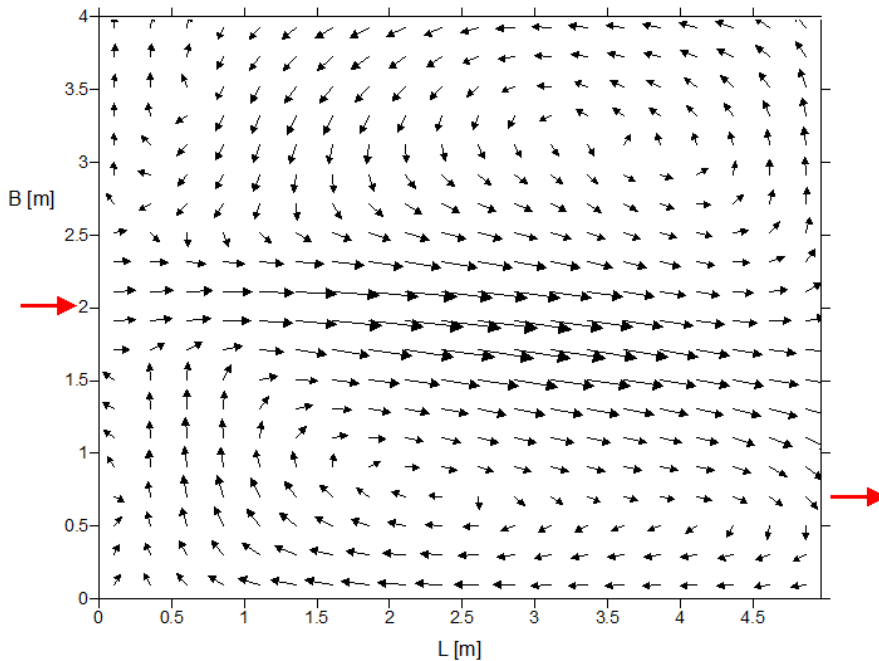


Figura 7.9 Campo di moto per la configurazione C – DX post.

In tutti i casi presentati, il getto d'acqua principale presenta, presso l'ingresso del serbatoio, i valori più alti di velocità, pari a 0,12 m/s (in Figura 7.10 è mostrato l'esempio della configurazione DX-DX). A valle, il getto d'acqua inizia il suo processo di miscelazione con l'acqua ferma del serbatoio e la velocità comincia a diminuire, la larghezza del getto principale aumenta e si sviluppano vortici e zone di ricircolo. Durante gli esperimenti si è

visto che lo spessore massimo di sedimenti depositi si ha lungo il getto principale e raggiunge un'altezza massima di circa 40 mm. Al contrario, in corrispondenza delle zone di ricircolo, che sono caratterizzate da basse velocità, i depositi di sedimenti hanno uno spessore inferiore (circa 10-20 mm) e una distribuzione più uniforme. La velocità di sedimentazione delle particelle è quindi sufficiente a far depositare i sedimenti lungo il getto principale.

Si è quindi visto dagli esperimenti come non solo la velocità del flusso influenza la deposizione dei sedimenti, ma i depositi stessi hanno un feedback sul campo di moto che si crea nel serbatoio, andando a modificare completamente, in alcuni casi, il campo di moto.

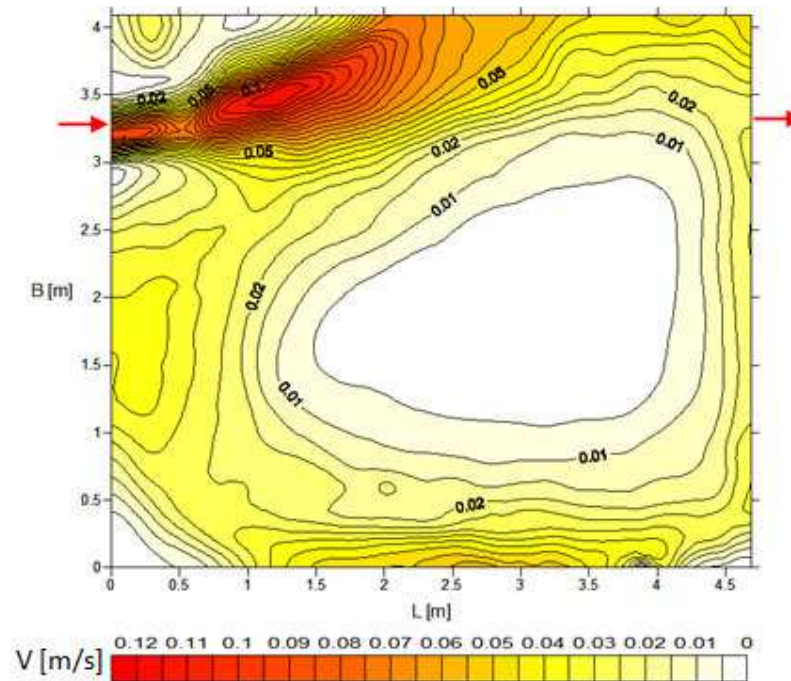


Figura 7.10 Mappa delle velocità per la configurazione DX-DX pre.

Capitolo 8. La tecnica UVP

Una volta analizzati i campi di moto che si sviluppano nel serbatoio per diverse configurazioni geometriche, si sono volute studiare alcune caratteristiche della turbolenza presente nel serbatoio. Per fare ciò, sono stati utilizzati i dati relativi ai valori di velocità ottenuti tramite misure UVP; questi risultano più precisi rispetto ai valori ottenuti con la tecnica LSPIV ed inoltre permettono un'analisi dettagliata, poiché si hanno a disposizione i valori istantanei della velocità in ogni punto di misura del serbatoio.

8.1 Descrizione della tecnica

L'UVP (Ultrasound Velocity Profiler) rappresenta un metodo per misurare un profilo istantaneo di velocità in un fluido in movimento lungo l'asse di un fascio di ultrasuoni emesso e successivamente ricevuto da una speciale sonda. La sonda determina il cambiamento di frequenza dovuto all'effetto doppler delle onde riflesse; tale riflessione è causata dallo scontro del fascio di ultrasuoni contro particelle solide in sospensione nel fluido.

Il sistema UVP è composto da diversi elementi funzionali: il trasduttore, l'hardware e il software. I trasduttori sono delle sonde inserite nel fluido che emettono una serie di fasci ultrasonori e ricevono le onde riflesse dalle particelle solide. L'hardware è un semplice personal computer collegato a un box, al quale sono collegate le sonde. Il box ha il compito di ricevere le informazioni provenienti dai trasduttori, calcolare istantaneamente le velocità e renderle disponibili all'utente attraverso un software. Il software è il programma che ha il compito di trattare e registrare i dati trasmessi dalle sonde, in particolare permette:

- la visualizzazione in tempo reale dei valori di velocità lungo il fascio ultrasonoro emesso;
- l'esecuzione di vari tipi di analisi post processing dei dati di velocità al termine di tutte le misure, attraverso diversi strumenti statistici;
- una mappatura completa del campo di moto nel caso di flussi bidimensionali in cui sono mostrati i vettori velocità nei punti indagati, ovvero quelli di intersezione tra due fasci ultrasonori emessi da trasduttori differenti.

I dati sono di facile esportazione e sono compatibili con Excel, attraverso il quale è possibile eseguire ulteriori trattamenti.

Il principio di funzionamento del sistema UVP può essere tradotto dalla Figura 8.1: l'informazione (doppler shift) è recepita dal trasduttore e acquisita dall'hardware, che la trasforma istantaneamente in valore di velocità attraverso il personal computer su cui è installato il software.

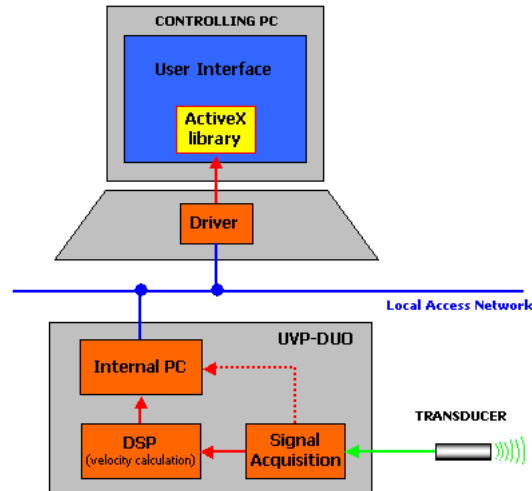


Figura 8.1 Grafico riassuntivo del principio di funzionamento del sistema UVP.

L'applicazione degli UVP dipende in modo rilevante dalle proprietà del fascio di ultrasuoni emesso.

Prima di descrivere i principi di funzionamento del sistema UVP verranno descritti brevemente l'impedenza acustica e il fenomeno su cui si basa il funzionamento delle sonde, vale a dire l'effetto Doppler.

8.1.1. Impedenza acustica

La velocità di propagazione di un'onda sonora dipende dalla densità e dalle proprietà elastiche del mezzo, in particolare è inversamente proporzionale alla densità. Ogni mezzo oppone una certa "resistenza" alla propagazione di un'onda sonora, detta "impedenza". L'impedenza rappresenta una proprietà caratteristica del mezzo in cui l'onda si propaga ed è direttamente proporzionale alla densità del materiale attraversato e alla velocità del suono. La sua unità di misura è il rayl (dal nome dello scienziato inglese Rayleigh al quale si devono le basi teoriche della fisica dei suoni). La formula per calcolarla è la seguente:

$$Z = \rho c \quad 8.1$$

dove

Z è l'impedenza acustica [rayl] ;

ρ è la densità $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

c è la velocità del suono nel mezzo $\left[\frac{m}{s}\right]$.

8.1.2. Effetto Doppler

L'effetto Doppler è un cambiamento apparente della frequenza di un'onda che viene percepito da un osservatore che si trova in movimento rispetto alla sorgente delle onde. Se una sorgente in movimento sta emettendo onde con una frequenza f_0 , allora un osservatore stazionario (rispetto al mezzo di trasmissione) percepirà le onde con una frequenza f data da:

$$f = f_0 \frac{v}{v - v_{r,s}} \quad 8.2$$

dove:

v è la velocità delle onde ultrasonore nel mezzo [m/s];

$v_{r,s}$ è la velocità relativa tra sorgente e ricevitore [m/s];

f_0 è la frequenza emessa dalla sonda [Hz];

f è la frequenza ricevuta dall'osservatore [Hz].

8.2 Principio di funzionamento

Le sonde UVP si comportano sia da emettitori che da ricevitori di raggi ultrasonori. Il fascio ultrasonoro non è continuo ma viene emesso con delle pulsazioni: viene emesso un burst ultrasonoro di breve durata, successivamente lo stesso trasduttore si pone in attesa dell'eco; dopo un certo intervallo di tempo il trasduttore emette un nuovo burst, e così via. Il segnale di ritorno contiene tre informazioni:

- la posizione dell'oggetto riflettente;
- la natura dell'oggetto riflettente (intensità dell'eco);
- la sua velocità lungo l'asse di misura (Doppler Shift: differenza fra la frequenza ricevuta ed emessa dalla sonda).

Il trasduttore emette un fascio di ultrasuoni che viaggia nel mezzo fluido lungo l'asse longitudinale della sonda. Quando l'onda colpisce una particella solida all'interno del fluido, viene riflessa. L'eco raggiunge il trasduttore dopo un intervallo di tempo t (tempo di ritardo), dato dalla seguente relazione:

$$t = \frac{2x}{c} \quad 8.3$$

dove:

t è il tempo di ritardo tra il segnale trasmesso e il segnale ricevuto [s];

x è la distanza tra le particelle colpite e il trasduttore [m];

c è la velocità del suono nel liquido [m/s].

Se però le particelle si stanno muovendo con una componente di velocità diversa da zero lungo l'asse del fascio ultrasonoro emessa, si ha l'effetto Doppler e la frequenza del segnale riflesso ricevuta dal trasduttore è diversa rispetto a quella emessa. Infatti si ha un doppio movimento relativo, poiché in una prima fase la particella solida è un ricevitore in movimento rispetto alla sorgente, mentre nella seconda fase la particella risulta essere un emettitore di onde riflesse in movimento rispetto al ricevitore fisso.

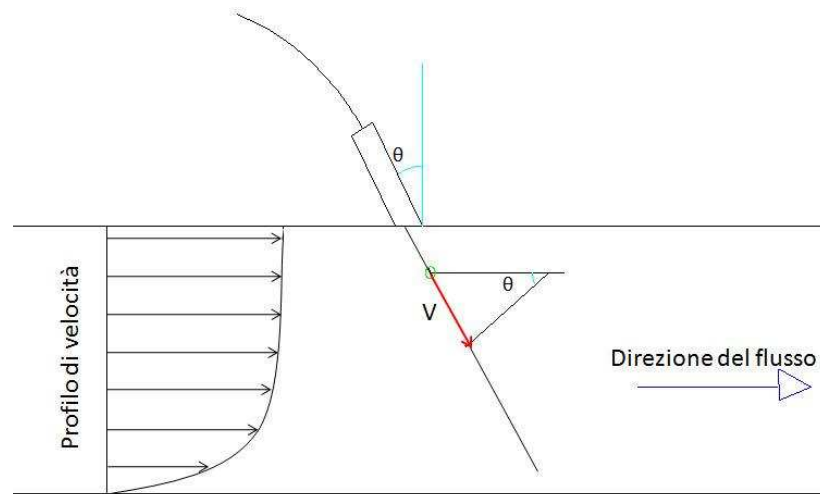


Figura 8.2 Rappresentazione schematica del sistema di misura in un flusso a superficie libera.

È possibile esprimere il valore del Doppler shift, ovvero la differenza tra la frequenza emessa e quella ricevuta:

$$\frac{v}{c} = \frac{f_d}{2f_0} \quad 8.4$$

dove:

f_0 è la frequenza delle sonde emesse [Hz] (di solito si usano valori di 2-4 MHz);

v è la velocità del fluido lungo la componente parallela all'asse longitudinale della sonda [m/s];

c è la velocità del suono nel liquido [m/s];

f_d è il Doppler shift (differenza tra la frequenza emessa e quella ricevuta) [Hz].

La velocità può essere quindi espressa come:

$$v = \frac{f_{dc}}{2f_0} \quad 8.5$$

Se il sistema UVP riesce a misurare il tempo di ritardo t e il Doppler shift è quindi possibile ottenere sia la posizione sia la velocità delle particelle lungo l'asse longitudinale del fascio ultrasonoro emesso.

Affinché le sonde possano rilevare la velocità in un punto, il fascio ultrasonoro deve essere riflesso; è quindi necessario che nel fluido siano presenti delle particelle solide con impedenza acustica diversa da quella del fluido. L'impedenza è direttamente proporzionale alla densità del materiale attraversato e alla velocità del suono. Maggiore è la differenza di impedenza tra fluido analizzato e particella, maggiore sarà la riflessione. Sarebbe necessario quindi che le particelle abbiano un'impedenza acustica maggiore dell'acqua, e quindi una maggior densità. Poiché però devono allo stesso tempo seguire l'andamento del fluido senza depositarsi sul fondo o galleggiare in prossimità del pelo libero, devono avere di conseguenza una densità prossima a quella dell'acqua in modo da essere trasportate perfettamente dalla corrente.

Le particelle utilizzate negli esperimenti qui presentati sono state bucce di noccioline macinate con un diametro medio dell'ordine di $80 \mu\text{m}$ e una densità abbastanza simile a quella dell'acqua, in modo da essere trasportate in sospensione.

Le misure ricavate dalle sonde sono quindi i valori di velocità delle particelle solide, tuttavia esse sono rappresentative del campo di moto del fluido poiché il loro moto rispecchia quello dell'acqua. I sedimenti asciutti vengono inseriti in un contenitore e successivamente immessi in una vasca, nella quale, tramite meccanismo rotatorio, vengono mischiati con l'acqua in modo uniforme, come accade negli esperimenti descritti al capitolo 7.

La velocità misurata da una sonda UVP è la componente della velocità del fluido lungo l'asse longitudinale della sonda stessa. Con un solo trasduttore è perciò possibile determinare solo una parte del campo di moto di un fluido, se questo si sviluppa in un piano o nello spazio. Con il termine Flow Mapping si intende la procedura attraverso la quale si ottiene la rappresentazione grafica effettiva del campo di moto, attraverso l'uso simultaneo di più trasduttori. Per determinare il vettore velocità in un punto, è necessario utilizzare due trasduttori non paralleli che misurano simultaneamente la velocità lungo due assi incidenti (Figura 8.3):

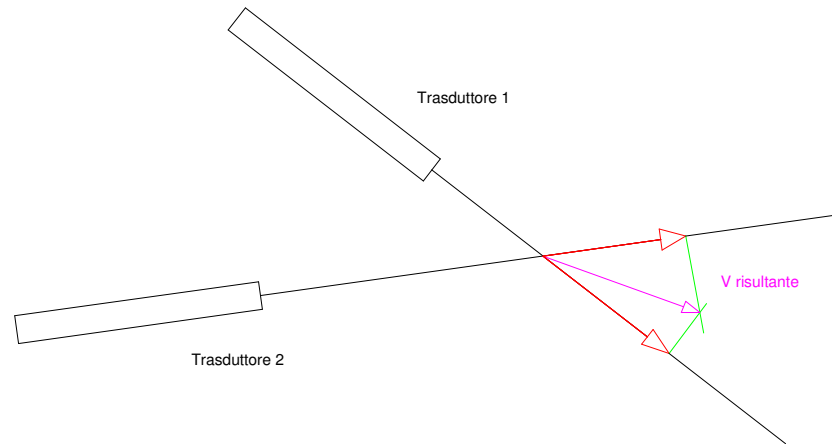


Figura 8.3 Il vettore risultante è dato dalla composizione vettoriale delle due componenti di velocità parallele all'asse di ultrasuoni emessi dalle sonde.

Ciascun trasduttore emette un fascio ultrasonoro e registra la componente della velocità in diversi punti lungo l'asse di emissione. Il non parallelismo delle sonde comporta l'intersezione dei due fasci di ultrasuoni in un punto. In questo punto d'intersezione sono quindi note due componenti del vettore velocità ed è possibile definire il vettore velocità risultante. Nel caso in cui le sonde siano ortogonali, inoltre, è possibile determinare il valore della velocità risultante semplicemente attraverso la formula del teorema di Pitagora $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ dove u e v sono le componenti nelle due direzioni (Metflow, 2000).

8.2.1. Disposizione delle sonde

Le sonde UVP, come già spiegato nel paragrafo precedente, misurano il valore della velocità lungo tutto l'asse del fascio di ultrasuoni emessi, fino ad una distanza funzione della velocità del fluido che si deve misurare. La relazione che lega la massima distanza d'indagine alla velocità del fluido è:

$$V_{range} = \frac{c^2}{4f_0 P_{max}} \quad 8.6$$

dove:

c è la velocità del suono, pari a 1480 m/s nell'acqua;

f_0 è la frequenza degli ultrasuoni, pari a 2 MHz per i trasduttori utilizzati;

V_{range} è l'intervallo di velocità massimo misurabile [m/s];

P_{max} è la massima distanza indagabile [m];

Nel nostro caso la massima velocità rilevabile è pari a $\pm 0,189$ m/s, a cui corrisponde una lunghezza massima d'indagine pari a 723 mm.

Per determinare il vettore velocità si dovrebbe disporre un numero elevato di sonde, tali per cui i punti d'intersezione dei fasci di ultrasuoni siano sufficienti per descrivere il campo di moto in tutto il serbatoio contemporaneamente. Questo, però, oltre ad essere molto dispendioso, sarebbe anche scomodo per l'esecuzione delle analisi, dato che le geometrie sono variabili. È stato necessario quindi procedere attraverso step di misurazioni: il serbatoio è stato diviso in un numero finito di zone, dette posizioni, nelle quali veniva inserita volta per volta la griglia formata da 8 sonde di UVP. In Figura 8.4 è presentata una schematizzazione della suddivisione della vasca, che mostra il numero di posizioni considerate.

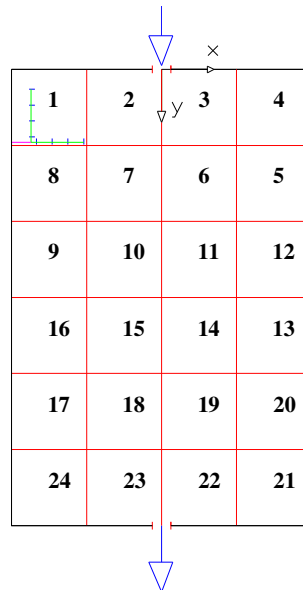


Figura 8.4 Rappresentazione della suddivisione del serbatoio 6 x 4 m nelle varie posizioni.

È stato possibile ricavare le componenti di velocità u (nella direzione x) e v (nella direzione y) in 16 punti all'interno di ciascuna posizione, utilizzando otto sonde, di cui quattro dirette secondo la direzione x e quattro in direzione y .

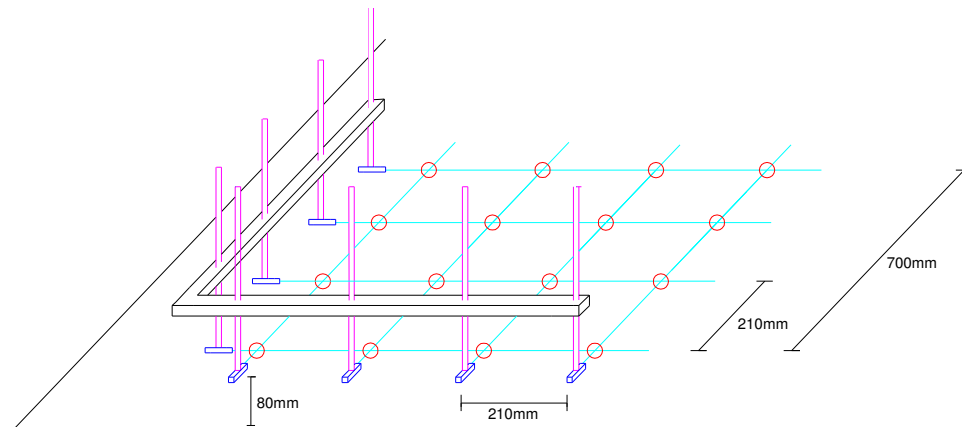


Figura 8.5 Disposizione delle sonde in una posizione.

Le linee azzurre in Figura 8.5 rappresentano i fasci di ultrasuoni emessi dalle sonde, i cerchi rossi evidenziano i punti d'intersezione dei vari fasci, nei quali sono stati calcolati i vettori velocità. Le otto sonde sono poste ad una profondità pari a 8 cm dal fondo del serbatoio, ossia al 40% della profondità massima. E' stato rilevato, infatti, che posizionando i trasduttori ad una profondità pari a circa la metà dell'altezza del serbatoio è possibile avere una buona approssimazione della componente orizzontale media della velocità. Le sonde sono sorrette da delle barre verticali, incastrate in un angolare metallico. Quest'ultimo è sorretto da una trave metallica, lunga come la larghezza del serbatoio; l'angolare può scorrere lungo la trave, spostandosi così in direzione x. La trave può invece scorrere sulle pareti del serbatoio, spostando così l'angolare in direzione y. In questo modo è possibile ricavare il campo di moto del fluido indagando progressivamente le varie posizioni. Tuttavia le sonde non riescono ad indagare tutto il serbatoio a causa di limitazioni pratiche nel posizionamento dell'angolare; di conseguenza il dominio di misura sarà inferiore all'intero serbatoio, in particolare in prossimità dei bordi non è stato possibile indagare circa 20-30 cm di serbatoio. (Carrara e Gervasoni, 2010).

8.2.2. Valori ottenuti dall'indagine

Il software registra il valore delle componenti di velocità in ogni punto indagato e li presenta in forma tabellare:

Map	Average Map		Table		Average Table		Transducers			
	X pos [mm]	Y pos [mm]	X velocity [mm/s]	Y velocity [mm/s]	X RMS [mm/s]	Y RMS [mm/s]	Transducer A	Distance A [mm]	Transducer B	Distance B [mm]
1	70	700	-13.8	-11.0	5.7	8.5	1	70.00	5	700.00
2	280	700	-3.4	-5.1	4.9	12.0	1	280.00	6	700.00
3	490	700	-6.7	-5.0	4.1	2.7	1	490.00	7	700.00
4	700	700	-0.8	13.3	6.5	40.8	1	700.00	8	700.00
5	70	490	-7.7	-18.4	3.8	9.8	2	70.00	5	490.00
6	280	490	-4.9	-25.0	3.8	24.2	2	280.00	6	490.00
7	490	490	-1.9	-6.9	4.0	18.0	2	490.00	7	490.00
8	700	490	5.6	2.1	6.5	29.3	2	700.00	8	490.00
9	70	280	5.6	-11.6	6.3	2.4	3	70.00	5	280.00
10	280	280	5.0	-9.8	3.1	8.7	3	280.00	6	280.00
11	490	280	8.3	-3.3	3.8	15.1	3	490.00	7	280.00
12	700	280	8.7	21.8	3.1	35.6	3	700.00	8	280.00
13	70	70	1.7	-10.9	4.6	1.2	4	70.00	5	70.00
14	280	70	0.0	-7.7	3.9	4.4	4	280.00	6	70.00
15	490	70	9.1	9.0	4.7	6.8	4	490.00	7	70.00
16	700	70	3.8	9.2	3.8	1.0	4	700.00	8	70.00

Figura 8.6 Tabella dei valori di velocità ottenuta con il software UVP.

Per ognuno dei 16 punti di una posizione, oltre alle coordinate delle sonde relative ad un sistema locale posto sul vertice dell'angolo metallico e alle componenti del vettore velocità, vengono indicati anche i relativi scarti quadratici medi e l'etichetta delle sonde usate per calcolare le componenti di V nel punto, le quali sono indicate da un numero da 1 a 8. Il modulo del vettore velocità non è fornito dal software, anche se è facile da ricavare attraverso la formula del teorema di Pitagora. Automaticamente il programma rielabora i dati creando una mappa vettoriale della posizione indagata.

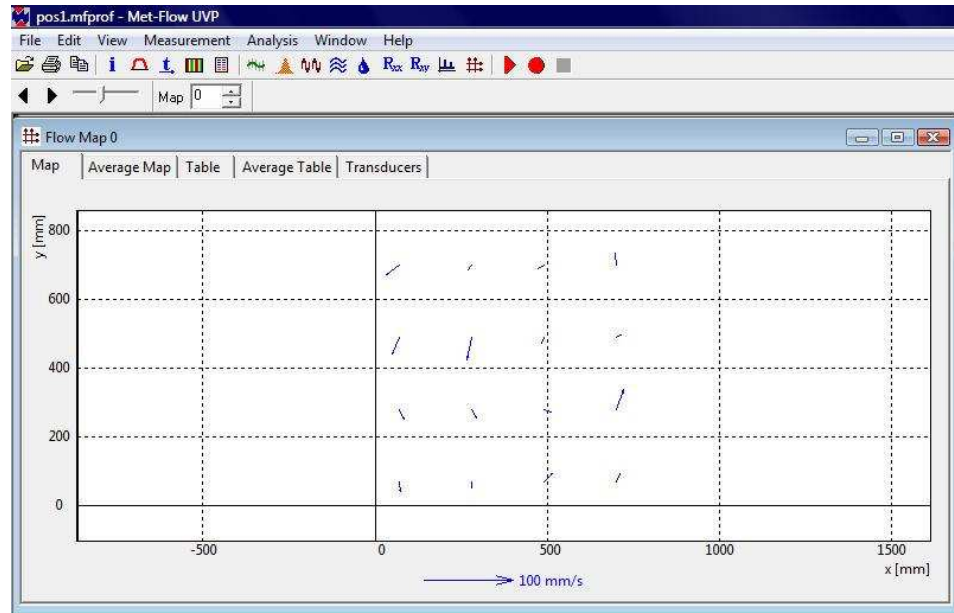


Figura 8.7 Mappa vettoriale in una posizione.

Ciascuna sonda in una posizione registra i valori istantanei di velocità in 15 mappe. La mappa media finale del campo di moto della posizione indagata viene ricavata mediando le 15 mappe istantanee relative al vettore velocità.

Capitolo 9. Studio della turbolenza

9.1 Trattazione teorica

Nel regime turbolento il campo di moto appare fortemente caotico, le particelle non seguono traiettorie ordinate ed il fluido risulta continuamente rimescolato da strutture vorticosi di diverse dimensioni. Ad esempio, in un condotto cilindrico, nel caso di moto laminare le traiettorie delle particelle di fluido sono rettilinee e il profilo di velocità è parabolico, mentre nel regime turbolento il fluido si muove in maniera disordinata con una velocità media di avanzamento pressoché costante sulla sezione ma con velocità istantanee delle particelle che variano da istante a istante. La transizione da flusso laminare a turbolento dipende dal valore del numero di Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad 9.1$$

dove:

V è la velocità,

D è il diametro del condotto;

ν è la viscosità cinematica dell'acqua.

Esiste un valore critico per cui al di sotto di questo il moto è laminare, al di sopra evolve gradualmente in turbolento. In linea generale, tale valore è pari a 2000 per condotti circolari di diametro D.

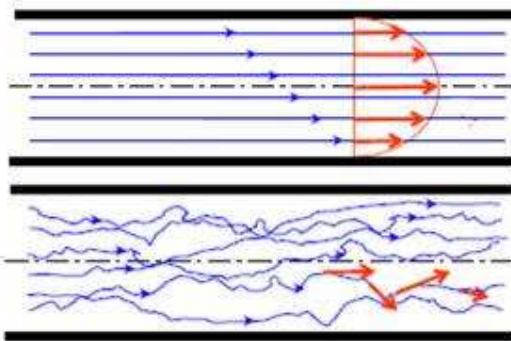


Figura 9.1 Rappresentazione del regime di moto laminare e turbolento.

Il campo di velocità è tridimensionale e varia rapidamente nel tempo e nello spazio. Il moto turbolento pertanto non è stazionario, né uniforme in senso stretto; si può parlare però di moto mediamente stazionario e uniforme, facendo riferimento alla velocità media. L'andamento temporale della velocità V può essere visto come la somma di un valore medio V_m , indipendente dal tempo, e di un valore fluttuante V' , a media nulla e variabile nel tempo:

$$V(t) = V_m + V'(t) \quad 9.2$$

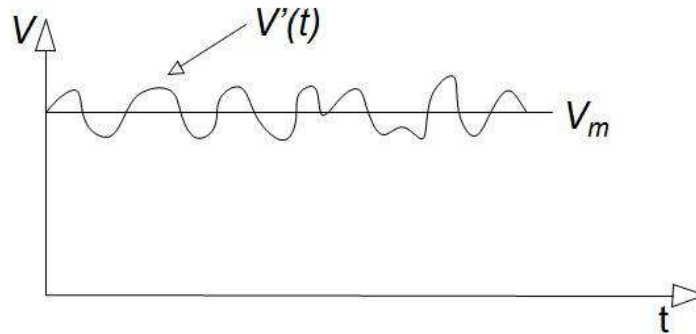


Figura 9.2 Andamento nel tempo della velocità.

La decomposizione appena vista può essere estesa a qualsiasi grandezza caratterizzante il campo idrodinamico, come pressione, sforzi, etc.

Il primo termine a secondo membro nell'eq. 9.2 è la media temporale della velocità sull'intervallo T :

$$V_m = \frac{1}{T} \int_0^T V dt \quad 9.3$$

La V' è detta componente di agitazione ed equivale allo scarto $V - V_m = V'$. Il suo valor medio è quindi nullo, come risulta dalla seguente equazione:

$$V' = \frac{1}{T} \int_0^T V' dt = \frac{1}{T} \int_0^T (V - V_m) dt = 0 \quad 9.4$$

È importante sottolineare che la V' rappresenta solo un moto di agitazione, determinando un semplice movimento irregolare delle particelle fluide, senza contribuire al trasporto della massa fluida, a cui contribuisce solo la V_m .

Un moto turbolento dovrebbe quindi a rigore essere considerato vario, poiché il campo di velocità è continuamente variabile nel tempo. Tuttavia si parlerà di moto permanente o uniforme nel caso turbolento, facendo riferimento alla velocità media.

È difficile dare una precisa definizione di turbolenza, piuttosto risulta di maggiore utilità elencare alcune caratteristiche dei moti turbolenti.

Irregolarità: la caratteristica più evidente dei flussi turbolenti è l'irregolarità temporale e spaziale presentata da tutte le grandezze (velocità, pressione, temperatura).

Diffusività: nei flussi turbolenti si riscontrano sempre scambi di quantità di moto, calore e massa molto vigorosi. La tendenza a diffondere nei flussi turbolenti è, infatti, molto maggiore rispetto a quelli laminari.

Scale spaziali e temporali del moto turbolento: nel regime turbolento il campo di moto appare fortemente disordinato e caotico e il fluido è completamente rimescolato da strutture vorticosi, le cui dimensioni variano in un ampio range di lunghezze. Osservando un flusso turbolento, si possono immediatamente notare complesse strutture rotazionali che rappresentano una peculiarità di tale regime e che vanno sotto il nome di vortici turbolenti. Essi sono alla base degli scambi energetici e possono avere dimensioni caratteristiche variabili. Tali vortici presentano, infatti, diverse scale spaziali e temporali. In particolare, i vortici più grossi o "macrovortici" sono caratterizzati da una lunghezza scala L_0 e da una velocità paragonabili a quelle del moto medio; essi sono responsabili di un forte rimescolamento del fluido ed il loro effetto complessivo è un aumento degli scambi di massa, quantità di moto ed energia. Da un punto di vista energetico, tali vortici sono alimentati dal flusso medio attraverso un fenomeno di *vortex stretching*. Questo è un meccanismo di trasferimento dell'energia dalle grandi alle piccole strutture turbolente che comporta la generazione di moti fluttuanti a scale via via decrescenti. Tali vortici, infatti, possono trasferire energia cinetica a vortici più piccoli e così via in un processo a catena finché non viene raggiunta una scala in cui tale energia meccanica viene dissipata in calore: questa è la scala dei piccoli vortici, detta scala di Kolmogorov. Il numero di Reynolds dei vortici di dimensioni maggiori è elevato, quindi essi sono regolati sostanzialmente da effetti inerziali, mentre gli effetti di natura viscosa possono essere trascurati. Per i vortici di piccola scala, invece, sono prevalenti gli effetti viscosi e quindi la turbolenza di piccola scala è dissipativa.

La risoluzione esatta per via numerica delle equazioni di Navier-Stokes di flussi turbolenti di interesse pratico è concettualmente possibile, ma attualmente impraticabile a causa della grande potenza di calcolo che sarebbe necessaria. Tuttavia in molte applicazioni non è richiesta la conoscenza dei valori istantanei del campo di moto, bensì dei corrispondenti valori medi temporali. Partendo dalle equazioni di Navier-Stokes, quindi, sostituendo le grandezze decomposte secondo l'equazione 9.2 ed eseguendo le medie temporali si perviene alle equazioni mediate di Reynolds (RANS), che associate all'equazione di continuità, formano un

sistema di quattro equazioni differenziali alle derivate parziali nello spazio e nel tempo, con 10 incognite:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial u_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial u_m}{\partial z} + \frac{\partial (u'u')_m}{\partial x} + \frac{\partial (u'v')_m}{\partial y} + \frac{\partial (u'w')_m}{\partial z} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial x} + F_{x,m} \\ \frac{\partial v_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial v_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial v_m}{\partial z} + \frac{\partial (v'u')_m}{\partial x} + \frac{\partial (v'v')_m}{\partial y} + \frac{\partial (v'w')_m}{\partial z} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial y} + F_{y,m} \\ \frac{\partial w_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial w_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial w_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial w_m}{\partial z} + \frac{\partial (w'u')_m}{\partial x} + \frac{\partial (w'v')_m}{\partial y} + \frac{\partial (w'w')_m}{\partial z} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_m}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_m}{\partial z} + F_{z,m} \\ \frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} = 0 \end{array} \right.$$

9.5

Dove $F_{i,m}$ sono le forze di massa note e alle quattro incognite delle equazioni di Navier-Stokes (u_m, v_m, w_m, p_m), si aggiungono le sei componenti del tensore degli sforzi turbolento:

$$\underline{\underline{\Phi}}_{Re} = \rho \begin{bmatrix} (u'u')_m & (u'v')_m & (u'w')_m \\ (v'u')_m & (v'v')_m & (v'w')_m \\ (w'u')_m & (w'v')_m & (w'w')_m \end{bmatrix}$$

9.6

Il problema risulta quindi indeterminato ed è necessario un modello di chiusura per la modellazione degli sforzi turbolenti. Tra i modelli più utilizzati c'è il modello k-ε.

9.2 Analisi della turbolenza nel serbatoio

I valori di velocità ottenuti tramite le misure UVP sono stati utilizzati per studiare alcune caratteristiche della turbolenza presente all'interno del serbatoio per diverse configurazioni geometriche.

In particolare, è stata eseguita l'analisi della turbolenza utilizzando una grandezza rappresentativa che potesse esprimere lo scostamento del valore della velocità V' dal valor medio V_m in ogni punto del dominio. La grandezza utilizzata è l'energia cinetica delle fluttuazioni, associata alle componenti fluttuanti di velocità. Avendo in ogni punto a disposizione 15 valori di velocità istantanea rilevata dalle sonde UVP, si è calcolato dapprima il valore medio V_m e le fluttuazioni V' . Successivamente è stato possibile determinare l'energia cinetica delle fluttuazioni per unità di massa:

$$E_{\text{flutt}} = \frac{1}{2} (V'^2)_m \quad 9.7$$

Dove $(V'^2)_m$ è la media dei quadrati di V' in un determinato punto.

Più elevati saranno gli scostamenti della velocità V' dal valor medio, maggiore sarà tale energia. Per poter evidenziare il contributo relativo di V' rispetto alla V_m , è stato necessario dividere l'energia delle fluttuazioni per l'energia cinetica media, la cui espressione è la seguente:

$$\overline{E_k} = \frac{1}{2} V_m^2 \quad 9.8$$

S'individua così l'energia cinetica delle fluttuazioni adimensionalizzata rispetto all'energia cinetica media per unità di massa, ed è espressa come:

$$E_{\text{flutt ADIM}} = \frac{(V'^2)_m}{V_m^2} \quad 9.9$$

dove

$(V'^2)_m$ è la media dei quadrati di V' di un determinato punto;

V_m^2 è il quadrato della V_m di un determinato punto.

Questa grandezza è rappresentativa della turbolenza in ogni punto del campo di moto. Attraverso questa grandezza è stato possibile sviluppare mappe che, attraverso curve di livello, evidenziano le zone caratterizzate da una maggior energia cinetica delle fluttuazioni adimensionalizzata, ovvero dove la V' assume valore più significativi rispetto alla V_m e quindi la turbolenza è più elevata.

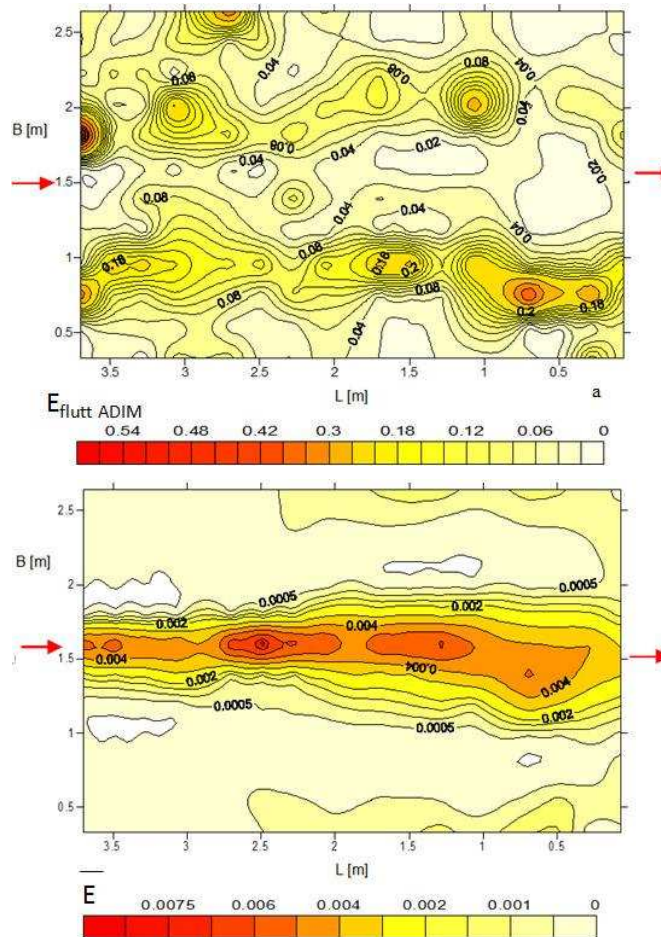


Figura 9.3 Mappa dell'energia cinetica adimensionalizzata (a) e dell'energia cinetica media (b) per la configurazione $L=4$, $B=3$ m.

Per la configurazione $L=4$ m, $B=3$ m (Figura 9.3) il campo di moto è simmetrico S1 e dalla mappa si può vedere come le zone soggette a maggior valore di $E_{\text{flutt ADIM}}$ sono quelle situate nelle zone di ricircolo, mentre in corrispondenza del getto principale l'energia cinetica adimensionalizzata risulta essere molto bassa (minore di 0,06). Per quanto riguarda invece l'energia cinetica media, direttamente proporzionale al quadrato della velocità, questa è massima in corrispondenza del getto principale, dove raggiunge il valore massimo di 0,008 J/kg, mentre nelle zone di ricircolo, dove i valori di velocità sono minori, è inferiore a 0,001 J/kg. La distribuzione dell'energia cinetica adimensionalizzata è approssimativamente simmetrica rispetto al getto centrale, in cui si ha un'elevata energia cinetica media. Tale energia fornita dal getto centrale e diffusa dalla turbolenza di grande scala, alimenta i vortici e si esaurisce, trasformandosi così in energia cinetica associata alle componenti fluttuanti di velocità.

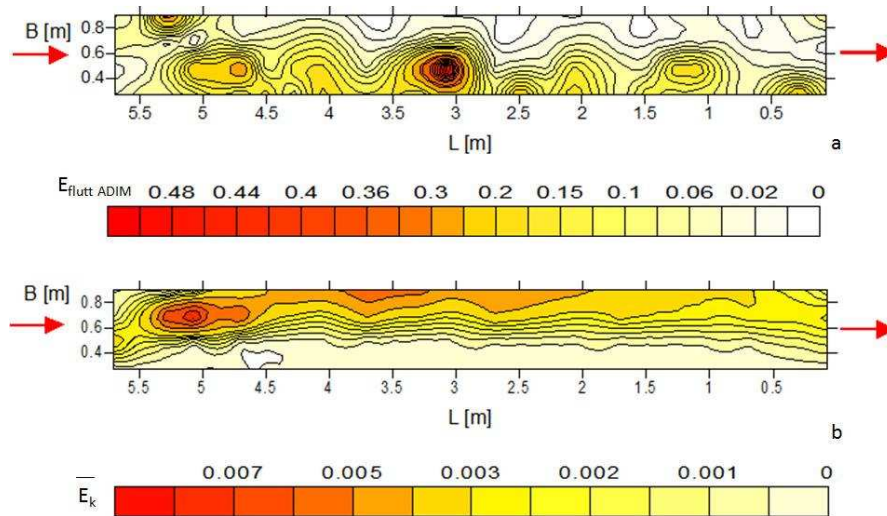


Figura 9.4 Mappa dell'energia cinetica adimensionalizzata (a) e dell'energia cinetica media (b) per la configurazione $L=6$, $B=1$ m.

Anche per la configurazione $L=6$ m, $B=1$ m (Figura 9.4), in cui il campo di moto è asimmetrico A1, è possibile osservare come l'energia cinetica adimensionalizzata sia massima dove ci sono i vortici (con valore massimo 0,48) mentre nel getto principale questa grandezza è compresa tra 0 e 0,02.

Per quanto riguarda invece l'energia cinetica media si ha l'esatto contrario: questa è massima in corrispondenza del getto principale, dove raggiunge il valore di 0,007 J/kg, mentre nelle zone di ricircolo risulta essere inferiore a 0,001 J/kg, come per la configurazione 4x3 m.

Si ritrovano gli stessi risultati nella configurazione $L=4$ m, $B=2$ m (Figura 9.5), anch'essa asimmetrica A1, dove si vede chiaramente che l'energia cinetica adimensionalizzata raggiunge i valori massimi (pari a 0,32) nel grande vortice centrale e nel vortice più piccolo all'inizio della vasca, che sono le zone caratterizzate da più turbolenza. L'energia cinetica media, invece, segue l'andamento del getto principale con valore massimo 0,008 J/kg.

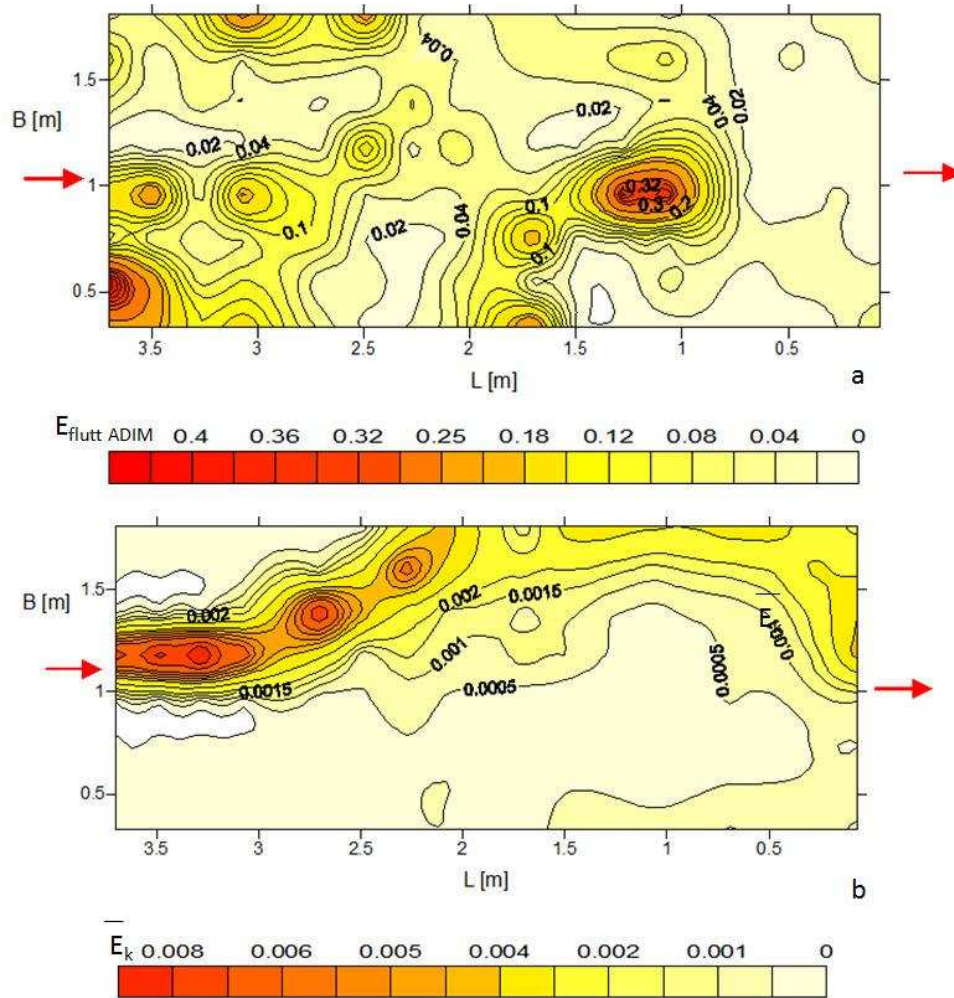


Figura 9.5 Mappa dell'energia cinetica adimensionalizzata (a) e dell'energia cinetica media (b) per la configurazione L=4, B=2 m.

Si è eseguita un'ulteriore analisi con lo scopo di verificare se ci fossero delle differenze tra le energie cinetiche caratteristiche dei diversi campi di moto. Si è dapprima calcolata l'energia cinetica media totale:

$$\overline{E_{ktot}} = \int_A \overline{E_k} dA$$

dove A è la superficie del serbatoio.

Poiché ovviamente a serbatoi più grandi corrispondono energie cinetiche totali maggiori, si è calcolata l'energia cinetica media per unità di area del serbatoio. I risultati sono i seguenti:

L	B	Tipologia	$E_{k\ tot} [J/kg]$	Area [m ²]	$E_{k\ tot}/A [J/kg \cdot m^2]$
6	4	A1	0,015	17,16	0,0009
5,8	4	S1/A1	0,015	17,16	0,0009
5,3	4	S1	0,017	15,42	0,0011
5	4	S1	0,012	14,63	0,0008
3	4	S0	0,008	8,31	0,0009
4	3	S1	0,010	8,31	0,0012
4	2	A1	0,007	5,37	0,0012
4	1	A1	0,005	2,29	0,0023
6	1	A1	0,006	3,54	0,0018
6	0,75	A2	0,004	2,36	0,0016
6	0,6	A2	0,006	2,36	0,0026

Tabella 9.1 Energia cinetica media totale ed energia cinetica per unità di superficie.

Come si può vedere dalla tabella 9.1, non emergono differenze nei valori di $E_{k\ tot}$ specifica tra le diverse tipologie di campi di moto, ma c'è una differenza sostanziale tra le configurazioni aventi un'area maggiore di 10 m², e le configurazioni aventi un'area minore di 5 m².

Dall'analisi del campo di moto si è visto che il getto principale ha le stesse velocità, e quindi energia cinetica, in tutte le configurazioni, con velocità maggiori all'imbocco del serbatoio (pari a 0,14 m/s) e poi decrescenti.

Le configurazioni “piccole”, però, hanno un'energia cinetica per unità di area più elevata rispetto alle altre. Questo può essere spiegato nel seguente modo: nelle configurazioni “piccole”, dove la larghezza è al massimo pari a 1 m, c'è poca acqua che rimane ferma nel serbatoio in quanto buona parte è investita dal getto principale e ha velocità elevate, quindi si hanno energie cinetiche specifiche maggiori, con valori pari a 0,0015-0,002 J/kg·m². Al contrario, nelle configurazioni “grandi”, sia simmetriche sia asimmetriche, ampie zone del serbatoio (le zone di ricircolo) sono caratterizzate da acqua quasi ferma con velocità molto basse e il valore totale dell'energia cinetica specifica diminuisce di conseguenza; si hanno così valori di energia cinetica per unità di area pari a 0,0008-0,0009 J/kg·m².

Capitolo 10. Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi si è studiata l'influenza di due parametri geometrici adimensionali sull'andamento del campo di moto all'interno di un serbatoio rettangolare di dimensioni variabili con posizione simmetrica del canale d'ingresso e d'uscita. È essenziale poter capire, infatti, quali tipologie di campo di moto e che tipo di strutture turbolente possono svilupparsi per determinate configurazioni geometriche perché queste determinano e condizionano i fenomeni di trasporto dei sedimenti e definiscono le zone del bacino soggette maggiormente ad erosione o deposito.

Le analisi sono state eseguite mediante la tecnica LSPIV, una tecnica non intrusiva che permette di misurare la distribuzione delle velocità sulla superficie liquida illuminata da un'opportuna sorgente luminosa tramite la ricostruzione dello spostamento di particelle che galleggiano sulla superficie, tra due istanti di tempo opportunamente definiti. La misura non avviene in maniera diretta ma è necessaria la presenza di particelle traccianti. Il processo di iniezione, in particolare, costituisce una fase estremamente critica nella quale è necessario tener conto sia delle caratteristiche fluido-meccaniche delle particelle in relazione al fluido da misurare che della loro concentrazione. La precisione della misura è, infatti, sensibilmente condizionata dalla necessità di utilizzare particelle traccianti con caratteristiche tali da riuscire a seguire fedelmente il flusso. Inoltre, in fase di iniezione, è necessario garantire una distribuzione omogenea delle particelle, la cui concentrazione deve essere regolata in funzione della dimensione minima delle strutture del flusso che si vogliono risolvere. L'illuminazione si è dimostrata essere la componente più importante al fine di ottenere un'alta qualità delle immagini. L'intensità luminosa deve essere omogenea su tutto il bacino, altrimenti i riflessi e le ombre portano a una stima errata del vettore velocità.

Per poter estendere i risultati a geometrie dimensionalmente differenti anche di diversi ordini di grandezza sono stati utilizzati i parametri adimensionali length – to – width ratio $\frac{L}{B}$ ed expansion ratio $\frac{B}{b}$. Le indagini eseguite con acqua chiara hanno permesso di capire che la geometria del bacino influenza il comportamento delle strutture turbolente; in base ai valori dei parametri, infatti, il campo di moto 2D all'interno del serbatoio rettangolare può assumere diverse configurazioni, in particolare è possibile distinguere:

- Simmetria S0;

- Simmetria S1;
- Asimmetria A1;
- Asimmetria A2;
- Channel-like Flow (CH-L)

Tutti i risultati ottenuti si riferiscono a determinate condizioni al contorno geometriche ed idrauliche mantenute costanti durante gli esperimenti:

- portata in ingresso costante e pari a 7 l/s;
- altezza d'acqua nel serbatoio pari a 0,2 m;
- geometria simmetrica rispetto all' asse longitudinale;
- fondo liscio e piatto;

Il passaggio da comportamento simmetrico ad asimmetrico è caratterizzato dalla presenza di una fascia di transizione, detta di instabilità, in cui il campo di moto di natura simmetrica può assumere un comportamento asimmetrico se soggetto a piccole perturbazioni, come piccole asimmetrie del getto in entrata o nella geometria del serbatoio.

Il channel-like flow, invece, è un campo di moto che si sviluppa solo per valori di $\frac{B}{b} \leq 2$ ed è indipendente dalla lunghezza del serbatoio.

Non solo i parametri geometrici come lunghezza e larghezza influenzano il campo di moto, ma anche la posizione dei canali d'ingresso e d'uscita ha una conseguenza sul tipo di campo di moto che si può creare all'interno del serbatoio.

Rispetto agli esperimenti con acqua pulita, il comportamento del flusso nel bacino cambia in presenza di sedimenti trasportati in sospensione. Subito dopo l'inizio degli esperimenti, una quantità seppur esigua di depositi lungo il getto principale è in grado di modificare, per alcune configurazioni geometriche, il campo di moto. Si è potuto quindi vedere come non solo la velocità del flusso influenza la deposizione dei sedimenti, ma i depositi stessi hanno un feedback sul campo di moto creato.

Infine, un'analisi della distribuzione dell'energia cinetica delle componenti di fluttuazione adimensionalizzata e dell'energia cinetica media in tutto il serbatoio, ha permesso di individuare come nelle zone di ricircolo si abbia un valore elevato di $E_{flutt ADIM}$, quindi si concentra una maggior turbolenza a causa di un maggior peso della V' rispetto alla V_m , mentre lungo il getto principale l'energia cinetica adimensionalizzata è molto bassa. Analizzando poi i valori di energia cinetica per unità di area, non si sono riscontrate, come ci si immaginava, differenze tra i campi di moto simmetrici o asimmetrici, ma solo una differenza tra le configurazioni “grandi” e “piccole”.

Ulteriori ricerche future potranno riguardare l'influenza delle condizioni idrauliche sulla tipologia del campo di moto che si instaura nel serbatoio. Per quanto riguarda il problema della sedimentazione e gestione dei bacini artificiali, maggiori ricerche si potranno eseguire utilizzando diversi sedimenti o una diversa concentrazione al fine di indagare l'effetto della granulometria e della concentrazione e verificare se la trapping efficiency varia al variare delle configurazioni, in modo da scoprire se esiste una configurazione ottimale che minimizza l'accumulo di sedimenti. Inoltre, si può studiare l'influenza delle condizioni idrauliche sulla deposizione dei sedimenti.

Questa ricerca sugli effetti della geometria dei serbatoi sulla tipologia del campo di moto può essere un primo passo nello sviluppo di nuova procedura per controllare o prevenire la sedimentazione di materiale trasportato in sospensione nei bacini artificiali. Come già spiegato nel capitolo 2, infatti, la sedimentazione può provocare una serie di problemi sia a monte delle dighe sia a valle ed è necessaria un'attenta politica di gestione che miri a salvaguardare la risorsa idrica invasata. In Italia, a partire dal 2004, è in vigore il D.M. 30/6 che riguarda la redazione del progetto di gestione degli invasi che definisce le misure di prevenzione e tutela dei corpi idrici e prescrive che venga assicurato il "mantenimento ed il graduale ripristino della capacità utile degli invasi" attribuendo precise responsabilità al gestore per eventuali danni causati da un'errata gestione. L'acqua non è un prodotto commerciale al pari degli altri, ma un patrimonio da ereditare che va protetto e preservato in relazione ad ogni attività che si fonda sull'utilizzo di tale risorsa, in modo da impedirne un ulteriore deterioramento, anzi proteggendo e migliorando lo stato degli ecosistemi acquatici e terrestri.

Ringraziamenti

Il lavoro di laurea, trattando un argomento per me molto interessante, mi ha fin dal primo momento affascinato, permettendomi di conoscere una realtà tanto complessa quanto sconosciuta.

Ringrazio innanzitutto il relatore, il Prof. Enrico Maria Orsi.

Un grazie particolare all'Ing. Erica Camnasio, che mi seguì proficuamente dall'inizio alla fine.

Grazie a mamma e Cinzia, che durante questi anni di studio mi sono sempre state vicine.

Un grazie speciale a Robi, che ha vissuto con me l'intero percorso iniziato 5 anni fa al Politecnico di Milano, condividendo, durante questo mio cammino universitario, sia le mie difficoltà sia le mie gioie.

Grazie a tutti i miei familiari, ai miei compagni di università, alle mie amiche Babila, Ambra, Linda e Martina e a tutti i miei amici di Busto e Rho.

Grazie agli amici dell'Alta Scuola Politecnica: Ele, Silvia, Mylene, Nadia, Leo, Vinc, Albert, Dome, Dome, Enrico, Francesco, Elisa, Paola, Ricky, Matteo, Carlo, Fra, Nicola, Dario e Diego con cui ho vissuto due anni speciali.

Indice delle figure

Figura 2.1 Foto di due dighe sul fiume Lech in Germania.	8
Figura 2.2 Profilo di concentrazione lungo la verticale.	10
Figura 2.3 Classificazione dei sedimenti per modalità di trasporto.	12
Figura 2.4 Schematica rappresentazione del trasporto di sedimenti (Fan e Morris, 1997).	12
Figura 2.5 Schematizzazione del fenomeno dell'interrimento.	13
Figura 2.6 Profili longitudinali di deposizione dei sedimenti negli invasi artificiali.	16
Figura 2.7 Zone di deposizione in un invaso artificiale.	17
Figura 2.8 Rappresentazione della linea di thalweg.	20
Figura 3.1 Tipico apparato sperimentale per la Particle Image Velocimetry in una galleria del vento.	24
Figura 3.2 Modello semplificato di un pixel.	28
Figura 3.3 Schema delle principali tecniche di registrazione di immagini PIV.	30
Figura 3.4 Geometria di un sensore CCD.	31
Figura 3.5 Mappa della funzione di autocorrelazione bidimensionale, sul piano verticale è rappresentata la funzione di autocorrelazione R.	32
Figura 3.6 Metodi di valutazione delle immagini PIV: a) metodo con autocorrelazione completamente digitale; b) metodo con cross-correlazione digitale nel caso di fotogramma doppio e singola esposizione; c) metodo con cross-correlazione digitale nel caso di fotogramma singolo e doppia esposizione.	33
Figura 3.7 Schema del calcolo del campo di spostamento per PIV con doppio fotogramma e singola esposizione.	34
Figura 3.8 Modello di elaborazione di un segnale digitale lineare applicato al caso di due fotogrammi successivi di immagini PIV di particelle traccianti.	35
Figura 3.9 Implementazione della cross-correlazione utilizzando la trasformata di Fourier.	36
Figura 3.10 Rappresentazione schematica della tecnica LSPIV.	37
Figura 3.11 Schema di un sistema LSPIV.	38
Figura 3.12 Rappresentazione del sistema LSPIV (Albayrak e Lemmin, 2007).	39
Figura 3.13 Distributore di particelle traccianti.	41

Figura 3.14 Distribuzione polare dell'intensità della luce diffusa da particelle di olio in aria per diversi diametri e per una lunghezza d'onda di 532 nm secondo la teoria di Mie. (a) Diametro pari a 10 μm (b) Diametro pari a 1 μm .	43
Figura 3.15 Distribuzione polare dell'intensità della luce diffusa da particelle di vetro in acqua per diversi diametri e per una lunghezza d'onda di 532 nm secondo la teoria di Mie. (a) 1 μm ; (b) 10 μm ; (c) 30 μm .	44
Figura 3.16 Procedura per la correzione delle immagini distorte.	46
Figura 3.17 Esperimenti condotti sul fiume Rodano a Visp.	48
Figura 3.18 Vista del flusso superficiale nella zona 1 (a sinistra) e 2 (a destra) per una portata con $T_R = 100$ anni.	48
Figura 3.19 Vista schematica del set-up sperimentale.	49
Figura 3.20 Dinamica del flusso tra due pennelli e il corso idrico principale. (a) Vista sul campo (b) campo della velocità misurato con la LSPIV.	50
Figura 3.21 Proprietà del flusso (a) Linee di flusso nella zona tra i due pennelli (b) Profilo di velocità in tre differenti sezioni normalizzato con la profondità dell'acqua h e la velocità del fiume U .	50
Figura 3.22 Campo di velocità media ottenuto attraverso l'analisi LSPIV.	52
Figura 3.23 Distribuzione della vorticosità (unità: 1/s).	52
Figura 3.24 Immagine del fiume Yodo durante la piena del 1993.	53
Figura 3.25 Velocità media calcolata con la LSPIV in una sezione del fiume Yodo durante la piena.	54
Figura 3.26 Set-up sperimentale del modello di Les Gloriettes.	56
Figura 3.27 Campo di moto iniziale (sopra) e in presenza dello scarico di superficie (sotto) per una portata di 150 m^3/s .	57
Figura 4.1 Vista schematica del set-up sperimentale (Kantoush, 2008).	58
Figura 4.2 Foto di alcuni impianti sperimentali (a) Visione generale del serbatoio rettangolare (b) Contenitore di sedimenti e miscelatore (c) Canaletta d'entrata (d) Canaletta d'uscita con le paratoie che regolano il livello dell'acqua.	60
Figura 4.3 Geometrie del serbatoio studiate da Kantoush.	62
Figura 4.4 Schema dell'installazione per la tecnica LSPIV e esempio di immagine ricavata dalla fotocamera.	66
Figura 4.5 Configurazioni dei canali di ingresso e uscita negli esperimenti: a) C - C; b) SX - SX c) SX - DX d) C - DX	68

Figura 4.6 Curva granulometrica del materiale selezionato (gusci di noci frantumati).	69
Figura 5.1 Immagine distorta e indistorta.	72
Figura 5.2 Fasi della tecnica PIV (Dantec Dynamics).	72
Figura 5.3 Rappresentazione della formula utilizzata per il calcolo di Δt .	73
Figura 5.4 Finestra View Setup e Acquisition control.	74
Figura 5.5 Sistema di coordinate usato dal software FlowManager.	75
Figura 5.6 Finestra di dialogo Field of View in cui è specificato il fattore di scala.	76
Figura 5.7 Schema del processo di elaborazione PIV.	77
Figura 5.8 Correlazione vera e casuale, con e senza loss of pairs. (lo spostamento corretto è mostrato con frecce piene, mentre la correlazione errata è indicata con frecce tratteggiate).	78
Figura 5.9 Risultato della cross-correlazione sulla configurazione 5 x 4 m utilizzando un'area d'interrogazione rispettivamente di 64 x 64 e 32 x 32pixel. Il numero totale di vettori nel primo caso è 500, nel secondo 2132.	81
Figura 5.10 Nella figura a sinistra si vede la correlazione con particelle fantasma che viene eliminata con l'utilizzo di window functions.	81
Figura 5.11 Schede della finestra della cross-correlazione in cui vengono indicate (a) le dimensioni dell'area di interrogazione e l'overlap; (b) le dimensioni effettive della vasca e (c) l'utilizzo di window functions o filtri.	84
Figura 5.12 Piano della correlazione che mostra il picco più elevato e il secondo picco più alto.	86
Figura 5.13 Finestra della peak validation.	87
Figura 5.14 Finestra della range validation.	88
Figura 5.15 Finestra moving average validation.	90
Figura 5.16 Finestra average filter.	91
Figura 5.17 Finestra streamlines.	92
Figura 5.18 Risultato della cross-correlazione sulla configurazione 4 x 3 m.	93
Figura 5.19 Risultato della peak e range validation sulla configurazione 4 x 3 m. In rosso i vettori eliminati	94
Figura 5.20 Risultato dell'applicazione della moving average e del filtro sulla configurazione 4 x 3 m.	95
Figura 5.21 Risultato finale sulla configurazione 4 x 3 m.	96
Figura 5.22 Linee di flusso ottenute dal campo di velocità.	97

Figura 5.23 Campo di moto in formato numerico; nella tabella sono indicate le coordinate x, y in pixel e mm, le componenti della velocità U e V in m/s, la velocità totale e la deviazione standard.	97
Figura 6.1 Foglio excel utilizzato per l'elaborazione in Surfer.	99
Figura 6.2 Rappresentazione della mappa vettoriale in Surfer.	100
Figura 6.3 Formato dei dati per l'utilizzo con il software Tecplot 9.0.	101
Figura 6.4 Rappresentazione delle streamlines realizzate con il programma Tecplot 9.0.	102
Figura 6.5 Rappresentazione del campo di moto asimmetrico A1.	103
Figura 6.6 Rappresentazione del campo di moto asimmetrico A2.	104
Figura 6.7 Rappresentazione del campo di moto simmetrico S0.	104
Figura 6.8 Rappresentazione del campo di moto simmetrico S1.	105
Figura 6.9 Rappresentazione del campo di moto channel like flow.	105
Figura 6.10 Grafico B/b-L/b delle configurazioni indagate tramite LSPIV.	108
Figura 7.1 Configurazioni dei canali d'ingresso e uscita negli esperimenti: a) C - C; b) SX - SX c) SX - DX d) C - DX.	109
Figura 7.2 Campo di moto per la configurazione C - C pre.	110
Figura 7.3 Campo di moto per la configurazione C - C post.	111
Figura 7.4 Campo di moto per la configurazione SX - SX pre.	111
Figura 7.5 Campo di moto per la configurazione SX - SX post.	112
Figura 7.6 Campo di moto per la configurazione SX - DX pre.	113
Figura 7.7 Campo di moto per la configurazione SX - DX post.	113
Figura 7.8 Campo di moto per la configurazione C - DX pre.	114
Figura 7.9 Campo di moto per la configurazione C - DX post.	114
Figura 7.10 Mappa delle velocità per la configurazione DX-DX pre.	115
Figura 8.1 Grafico riassuntivo del principio di funzionamento del sistema UVP.	117
Figura 8.2 Rappresentazione schematica del sistema di misura in un flusso a superficie libera.	119
Figura 8.3 Il vettore risultante è dato dalla composizione vettoriale delle due componenti di velocità parallele all'asse di ultrasuoni emessi dalle sonde.	121
Figura 8.4 Rappresentazione della suddivisione del serbatoio 6 x 4 m nelle varie posizioni.	122
Figura 8.5 Disposizione delle sonde in una posizione.	122
Figura 8.6 Tabella dei valori di velocità ottenuta con il software UVP.	123
Figura 8.7 Mappa vettoriale in una posizione.	124
Figura 9.1 Rappresentazione del regime di moto laminare e turbolento.	125

Figura 9.2 Andamento nel tempo della velocità.	126
Figura 9.3 Mappa dell'energia cinetica adimensionalizzata (a) e dell'energia cinetica media (b) per la configurazione $L=4$, $B=3$ m.	130
Figura 9.4 Mappa dell'energia cinetica adimensionalizzata (a) e dell'energia cinetica media (b) per la configurazione $L=6$, $B=1$ m.	131
Figura 9.5 Mappa dell'energia cinetica adimensionalizzata (a) e dell'energia cinetica media (b) per la configurazione $L=4$, $B=2$ m.	132

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 Proprietà di diversi materiali usati come traccianti (Weitbrecht et al, 2002).	42
Tabella 4.1 Configurazioni del serbatoio analizzate da Camnasio (con asterisco per quelle analizzate anche da Kantoush).	63
Tabella 4.2 Valori caratteristici del prototipo e del modello in scala 1:50.	64
Tabella 4.3 Parametri idraulici degli esperimenti	67
Tabella 4.4 Dati raccolti durante gli esperimenti.	67
Tabella 6.1 Risultati delle analisi sul campo di moto all'interno del serbatoio.	106
Tabella 9.1 Energia cinetica media totale ed energia cinetica per unità di superficie.	133

Bibliografia

Albayrak, I., e Lemmin, U. (2007). Large scale PIV-measurements on the water surface of turbulent open channel flow. 18ème Congrès Français de Mécanique, 27-31/10 Grenoble.

Bieri, M., Jenzer Althaus, J., Kantoush, S. A., e Boillat, J. (2009). Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering. 33rd IAHR Congress "Water Engineering for a Sustainable Environment", 9-14/8 Vancouver, Canada.

Bradley, A., Kruger, A., Meselhe, E., e Muste, M. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water Resources Research* 38 (12), 1315 .

Buscarnera, C., e Celenza, A. (2008). La sedimentazione nei bacini artificiali: fenomenologia del problema e metodologie di soluzione. Tesi di Laurea. Politecnico di Milano.

Camnasio, E., De Cesare, G., e Kantoush, S. (2010). Flow field and sediment deposition in a rectangular shallow reservoir with non symmetric inlet and outlet configuration. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, 7-8/4 Gothenburg, Sweden.

Camnasio, E., Orsi, E., e Schleiss, A. (2010). Experimental study of velocity fields in rectangular shallow reservoirs. Submitted to JRH .

Carrara, S., e Gervasoni, L. (2010). Caratterizzazione del campo di moto in un serbatoio di acque basse rettangolare a dimensioni variabili. Tesi di laurea. Politecnico di Milano.

Chanson, J. (1999). *The hydraulic of open channel flow: an introduction*. Elsevier, Butterworth Heinemann.

Citrini, D. e Nosedà, G. (2002). *Idraulica*. Casa Editrice Ambrosiana, seconda edizione.

Dantec Dynamics (2002). *Working principles of PIV*. Educational Slideshow Presentation.

Dantec Dynamics (2000). *Flowmanager software and introduction to PIV instrumentation*. Software User's Guide. Denmark.

Dewals, B.J., Kantoush, S.A., Erpicum, S., Piroton, M. e Schleiss, A.J. (2008). Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environ Fluid Mech* 8, 31–54.

Franzetti, S., Guadagnini, A., e Ballio, F. (s.d.). Corso di Idraulica 2: appunti di similitudine e modelli.

Franzetti S., Guadagnini A., Ballio F. (1999). Appunti di trasporto solido. Corso di idraulica II, Politecnico di Milano.

Fujita, I., e Kaizu, T. (1995). Correction method of erroneous vectors in PIV. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, Vol.2 , pp.173-185.

Fujita, I., e Nakashima. (1999). Image based technique for river monitoring. *IAHR Congress Proceedings* .

Fujita, I., Ava, S., e Deguchi, T. (1997). Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle. *Proceedings XXVII congress of IAHR, Theme B, I , 227-232*. San Francisco, CA.

Fujita, I., Muste, M., e Kruger, A. (1998). Large-scale PIV for flow analysis in hydraulic applications. vol. 36, pp. 397–414.

Garofalo, E., e Granata, T. (2005). Raccolta di dati, rilievi in campo e monitoraggio di parametri chimico-fisici di un invaso reale sottoposto a rilasci di acqua e sedimenti. *Rapporto Ricerca di Sistema CESI, Progetto IDRO* .

Hauet, A., Creutin, J., Belleudy, P., Muste, M., e Krajewski, W. (2006). Discharge measurement using Large Scale PIV under varied flow conditions – Recent results, accuracy and perspectives. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, 6-8/9 Lisbon, Portugal*.

Host, A., e McCluskey, D. (1994). On the Accuracy and Reliability of PIV measurements. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Applications of Laser Techniques to Flow Measurements* . Lisbon.

Kantoush, S.A. (2008). *Experimental Study on the Influence of the Geometry of the Shallow Reservoir on Flow Patterns and Sedimentation by Suspended Sediments*. EPFL Thesis. Laboratory of Hydraulic Constructions, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

Kantoush, S.A., Bollaert, E., Boillat, J., e Schleiss, A. (2006). Experimental study of suspended sediment transport and deposition in a rectangular shallow reservoir. *River Flow*.

Kantoush, S.A., Bollaert, E., Boillat, J., e Schleiss, A. (2006). Sedimentation process in shallow reservoir comparison of numerical and experimental simulations. *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering, 10-13/9 Philadelphia, USA*.

Kantoush, S.A., De Cesare, G., Boillat, J.L. e Schleiss A.J. (2008). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modeling. *Flow Measurement and Instrumentation* 19, 139–144.

Kantoush, S. A. e Schleiss, A. J. Large-Scale PIV Surface Flow measurements in Shallow Basins with Different Geometries.

Keane, R., e Adrian, R. (1992). Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied Scientific Research*, vol. 49, 191-215.

Lucarelli, C., Righetti, M., Serafini, M., e Toffolo, M. (2006). Uso accoppiato di modelli di simulazione numerica ed analisi sedimentologiche per la valutazione del trasporto di sedimenti in un lago. XXX° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 11-16/9 Roma.

Meselhe, E. A., Peeva, T., e Muste, M. (2004). Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130.

Metflow. (2000). UVP Monitor – Model UVP-XW. Users guide. Metflow SA. Lausanne, Switzerland.

Moler, C. (2009). Experiments with MATLAB. Electronic edition: The MathWorks, Available at <http://www.mathworks.com/moler>.

Molino, B. (2004). Interrimento e recupero di capacità degli invasi artificiali. D.I.F.A. Università degli Studi della Basilicata.

Morris, G. L. e Fan, J. (1997). *Reservoir sedimentation Handbook. Design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use.* McGraw Hill, New York.

Motta, D., Pacheco, R., e Baroni, F. (2006). Approccio metodologico e numerico per l'elaborazione del piano di gestione di un invaso. XXX° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 11-16/9 Roma.

Muste, M., Kim, W. e Fulford, J. (2008). Developments in hydrometric technology: new and emerging instruments for mapping river hydrodynamics.

Navai, A. T. (2005). Acoustic Particle Image Velocimetry Development and Applications. Tesi di Dottorato. Submitted in Fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy

Nese, F. (2004). Sviluppi nelle tecniche PIV stereoscopiche Errori di allineamento ed applicazioni allo studio termo-fluidodinamico di un getto che si immette in un flusso trasversale. Tesi di Dottorato in Ingegneria Aerospaziale, Navale e della qualità. Facoltà di Ingegneria Università degli studi di Napoli "Federico II".

Raffel, M., Willert, C., e Kompenhans, J. (1998). *Particle image velocimetry: A practical guide.* Springer. New York.

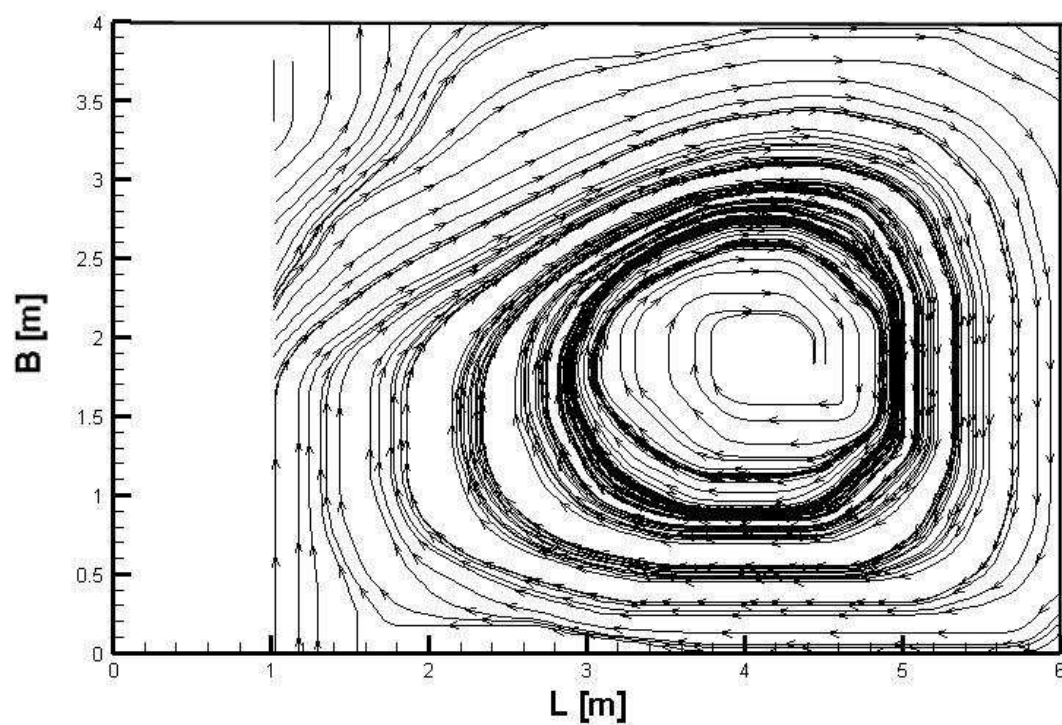
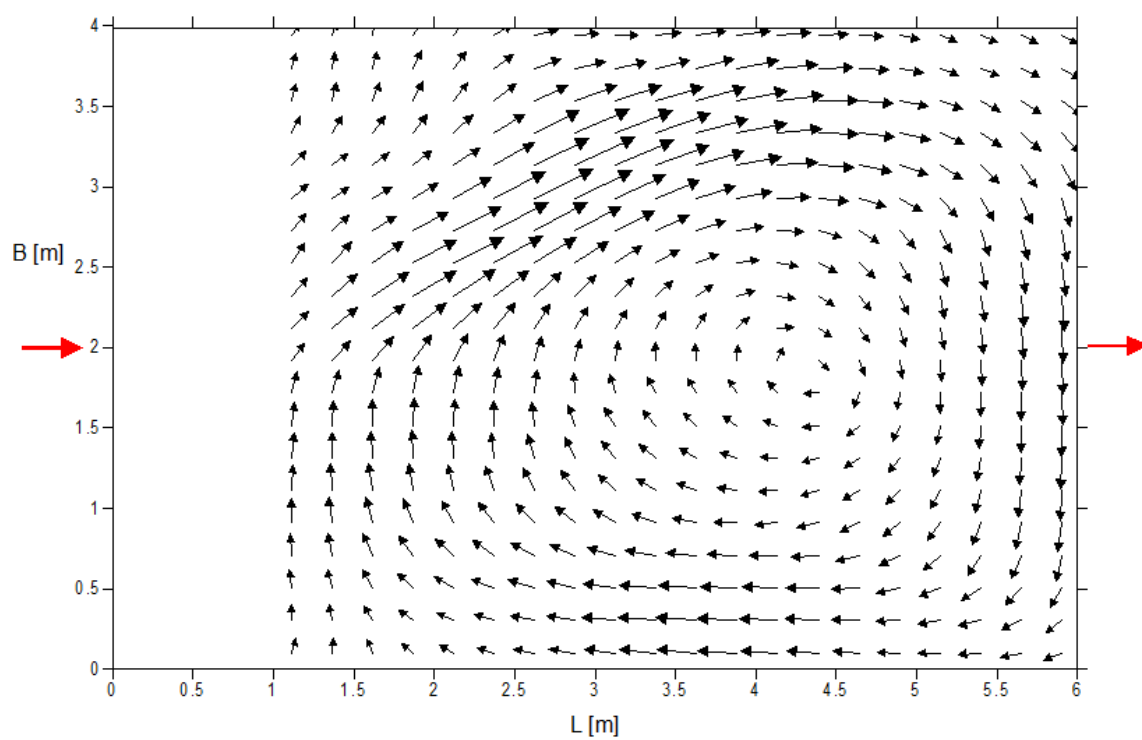
Riva, M., Guadagnini, A., e Ballio, F. (s.d.). Moti turbolenti. Dispense del corso di Meccanica dei Fluidi, Politecnico di Milano.

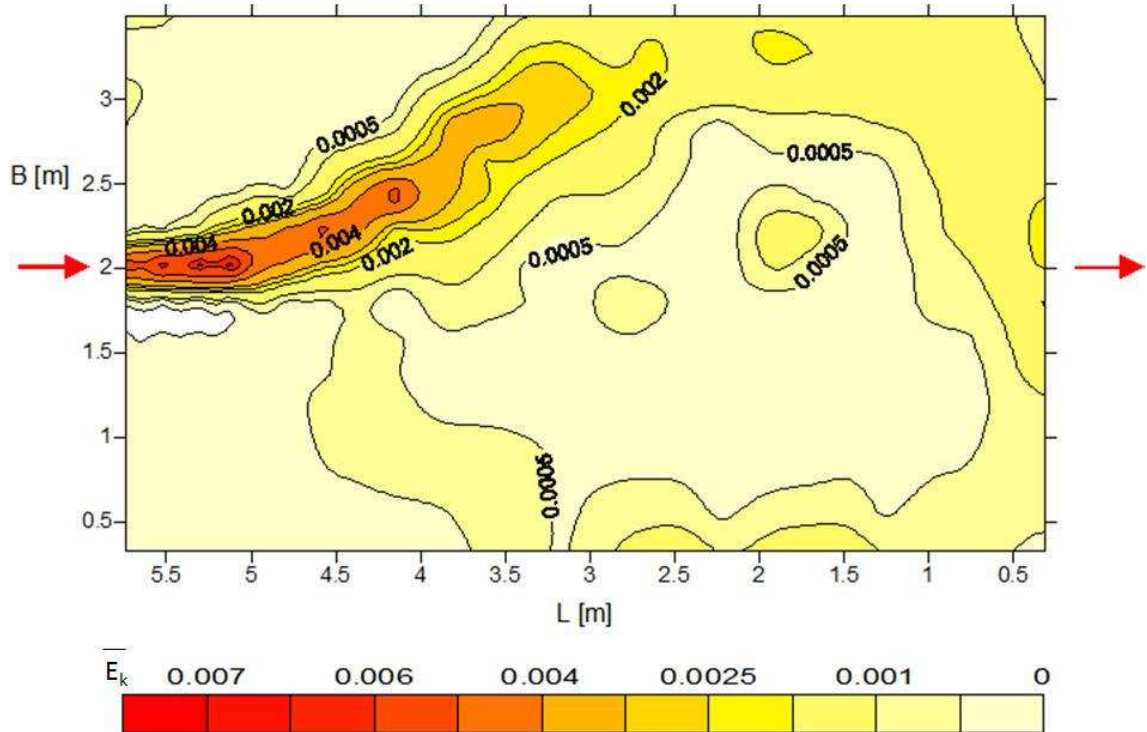
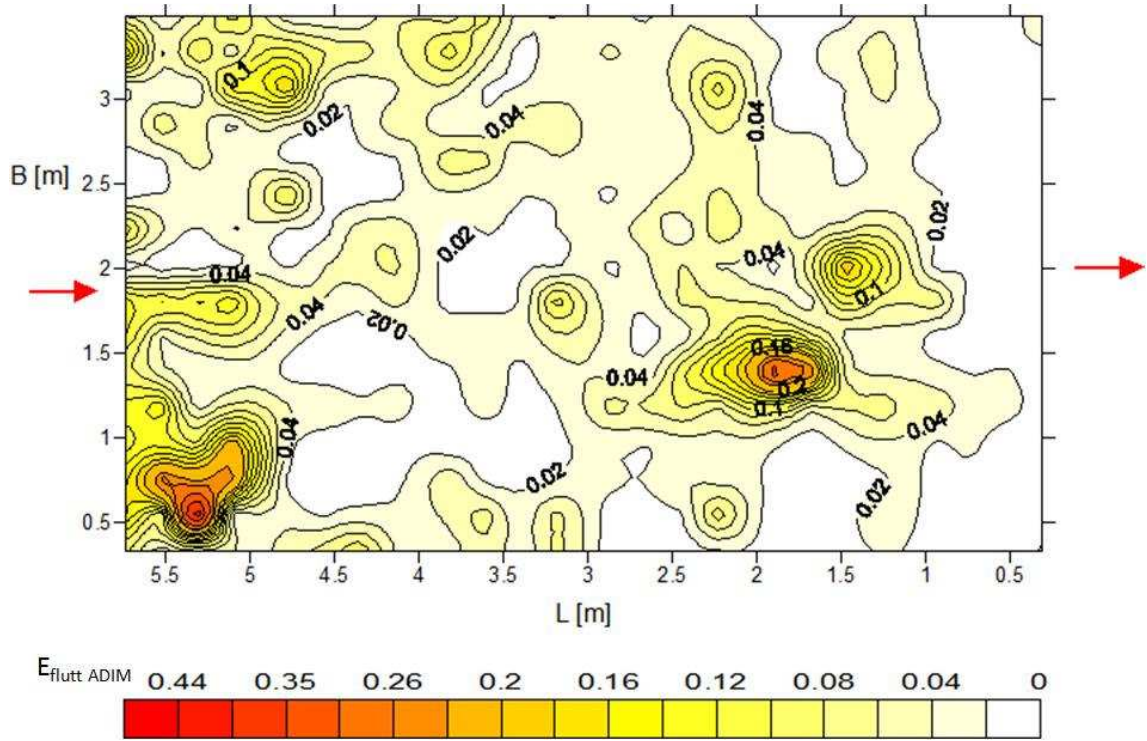
Versteeg, H.K e Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method.

Weitbrecht, V., Kuhn, G., e Jirka, G. (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation* (13), 237–245.

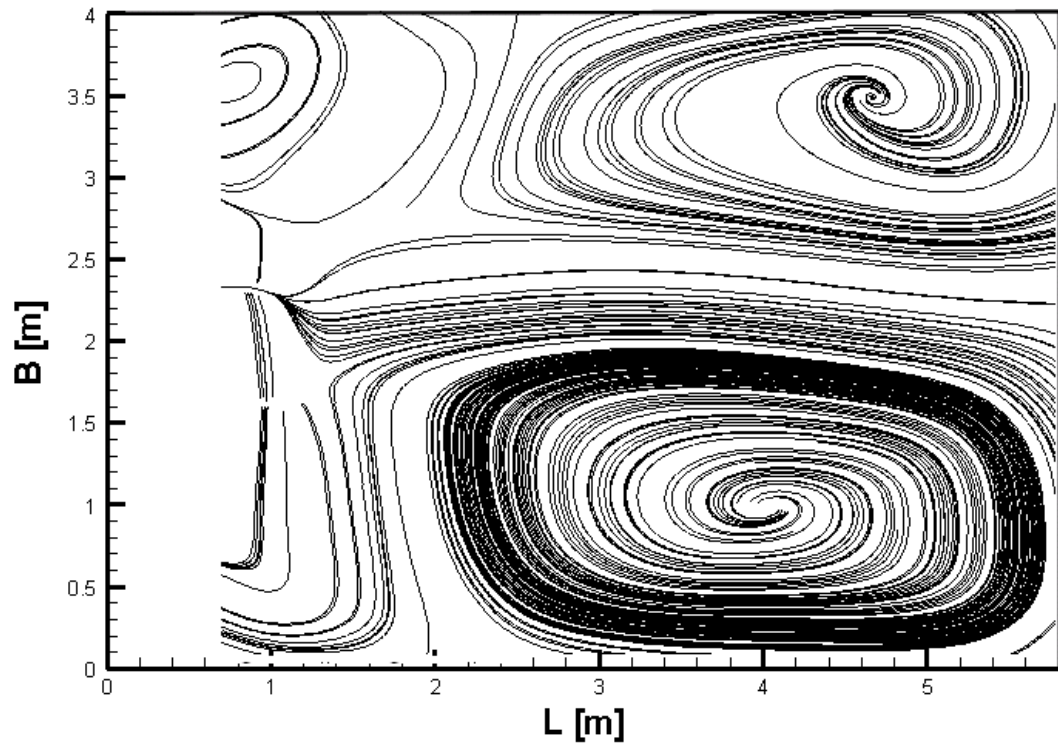
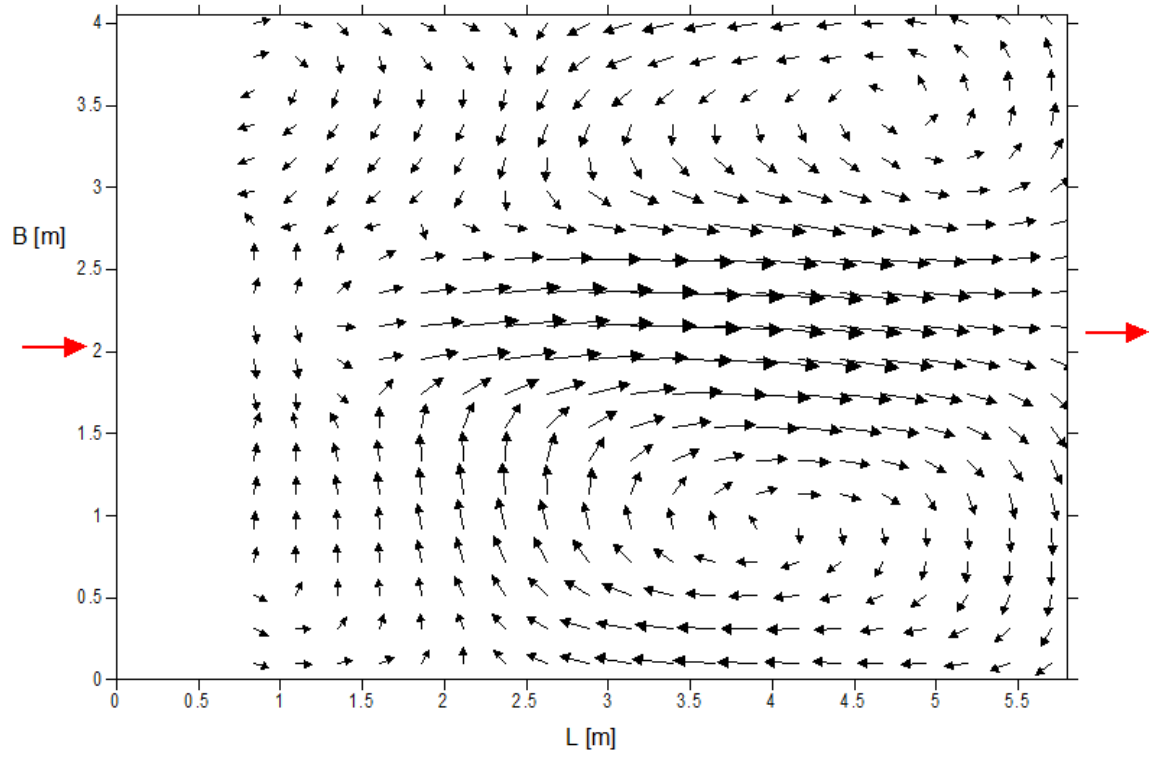
Fascicolo delle mappe

$L = 6 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

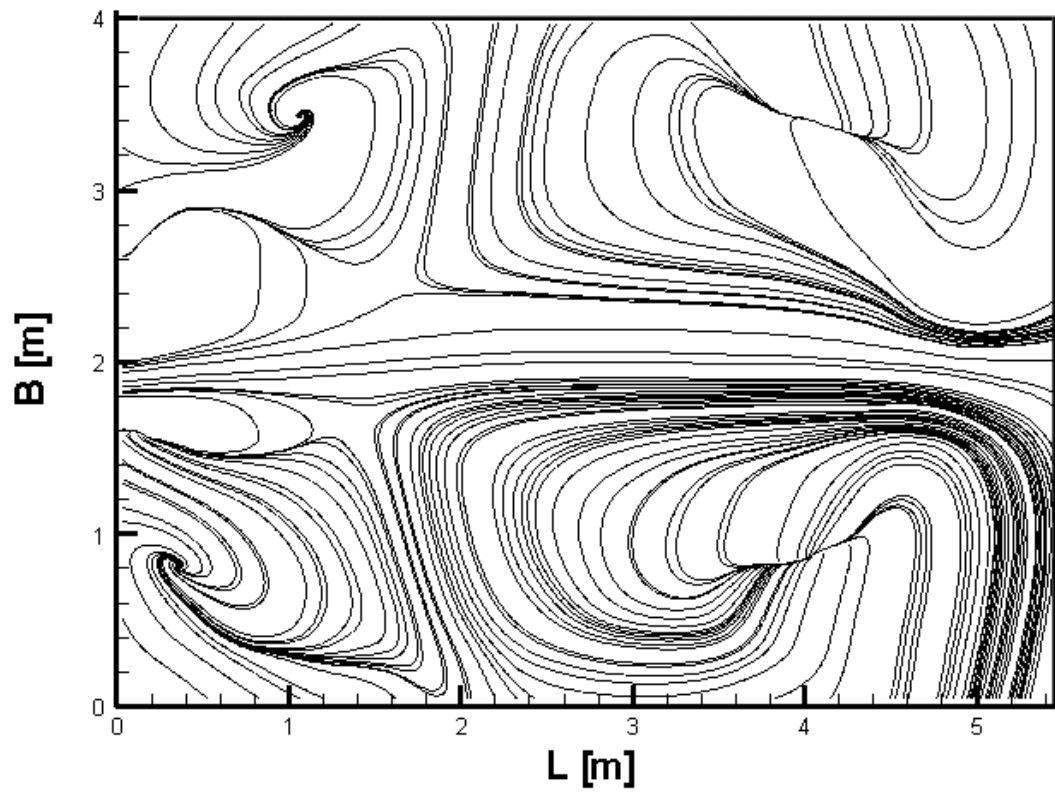
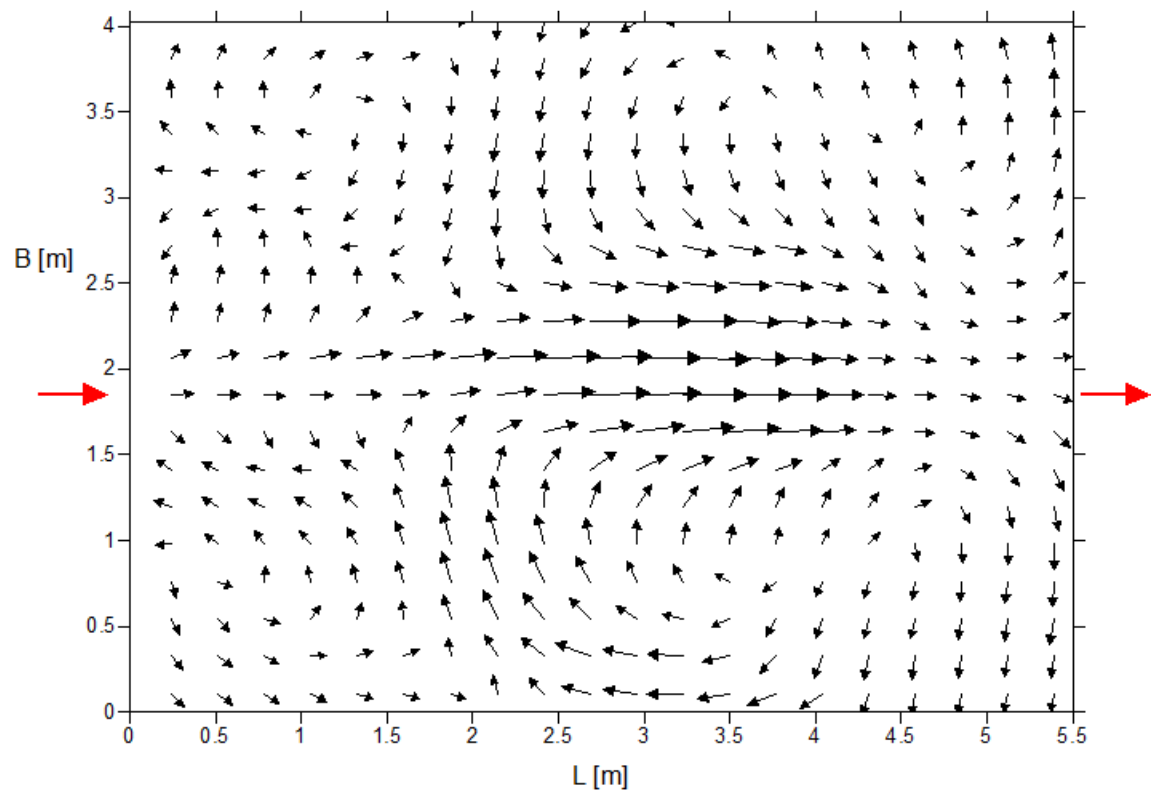




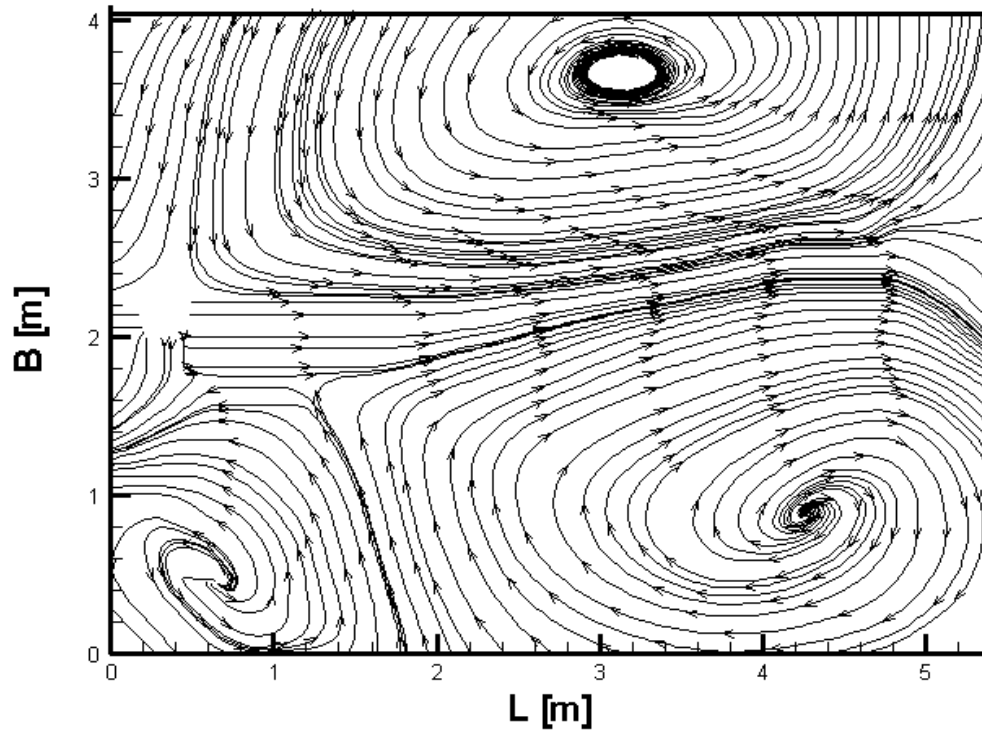
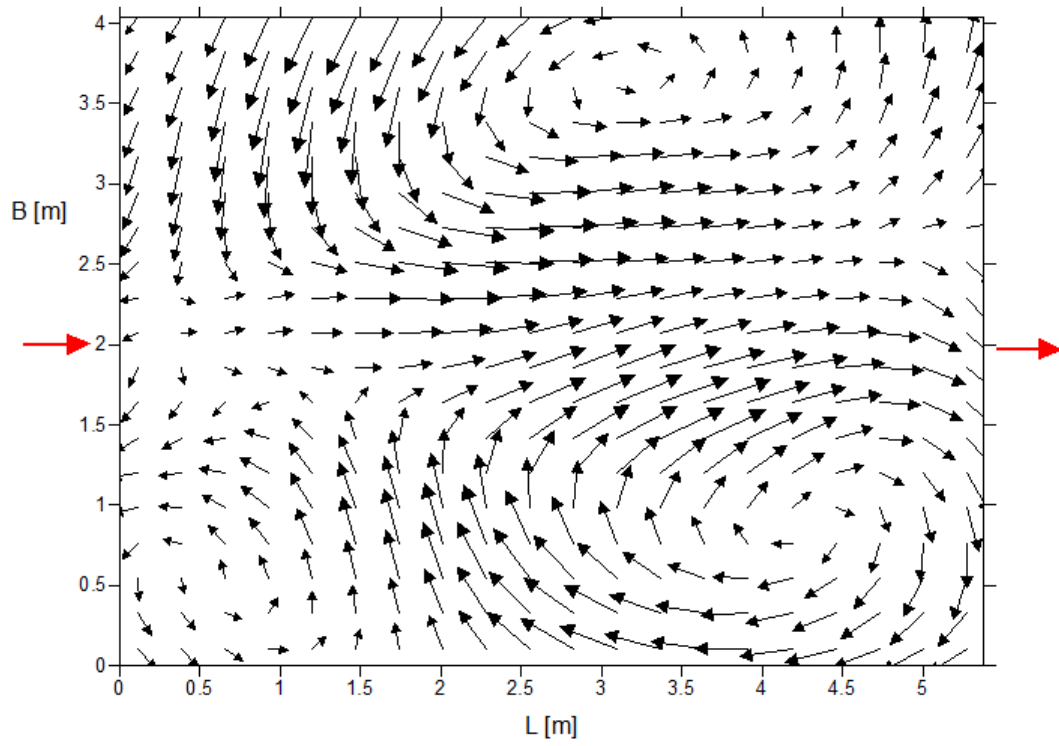
$L = 5,8 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

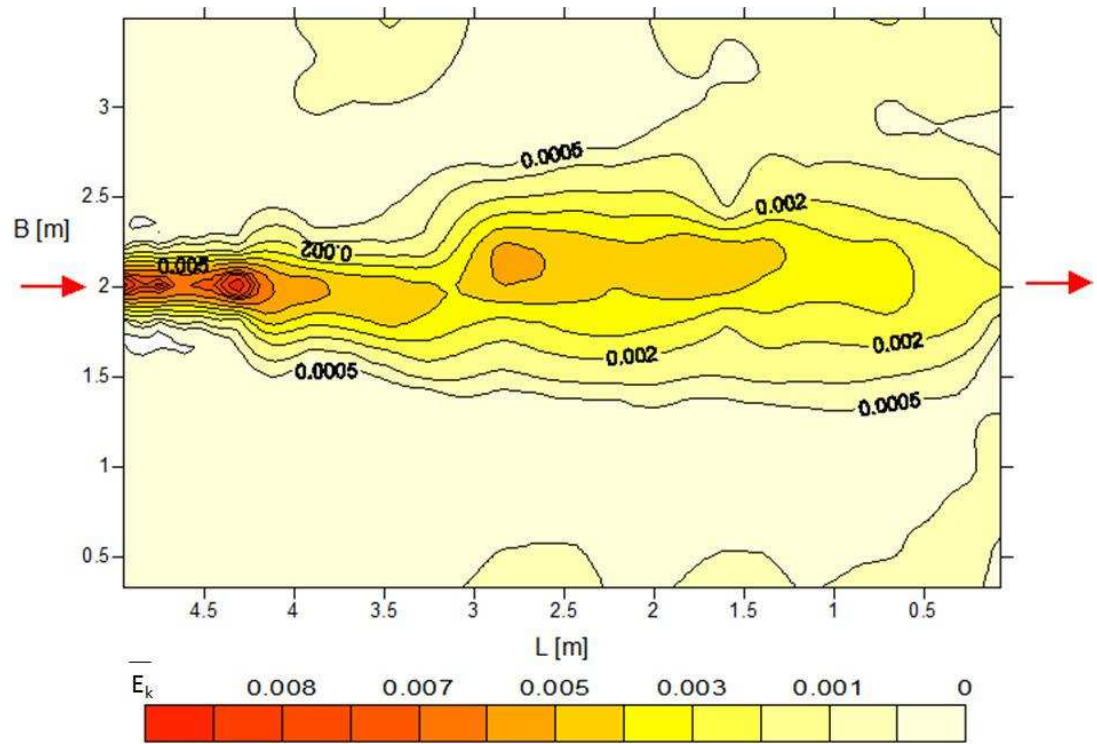
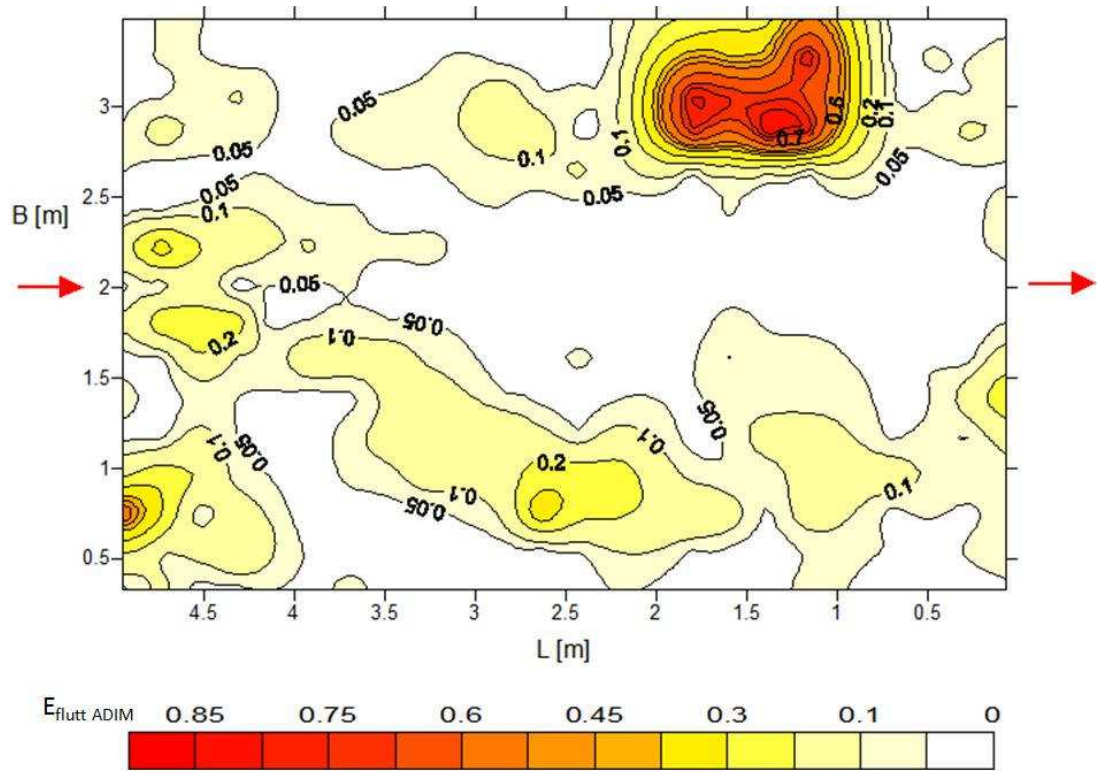


$L = 5,5 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

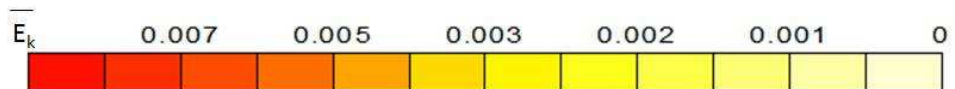
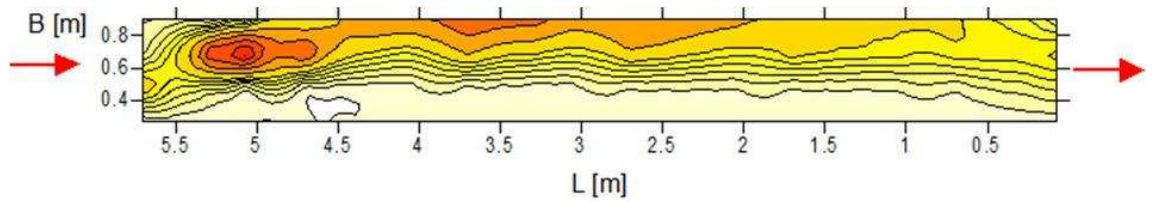
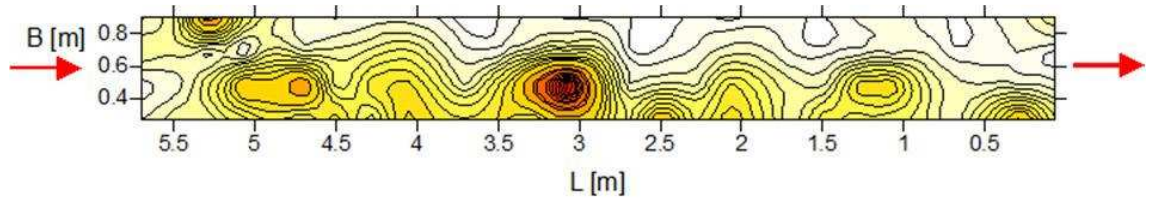
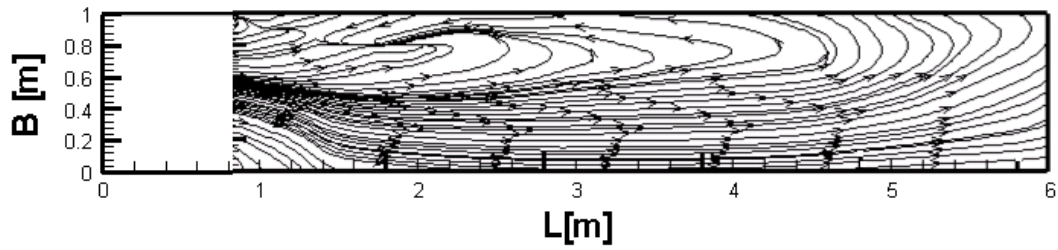
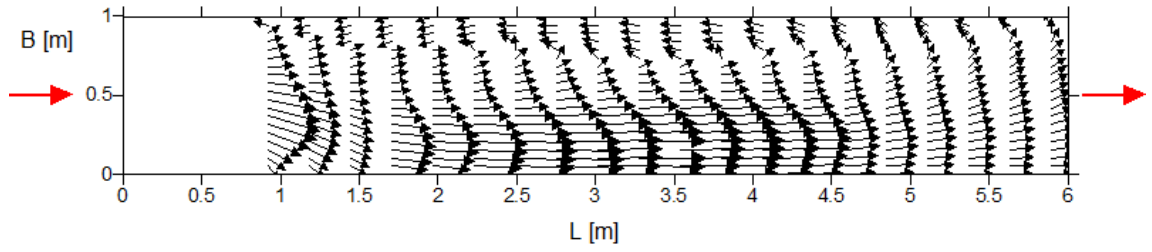


$L = 5,3 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

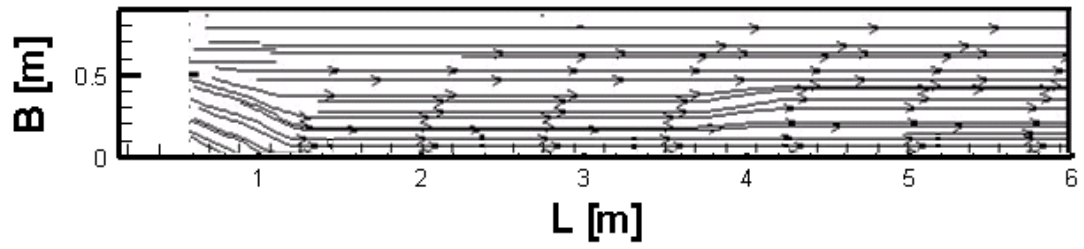
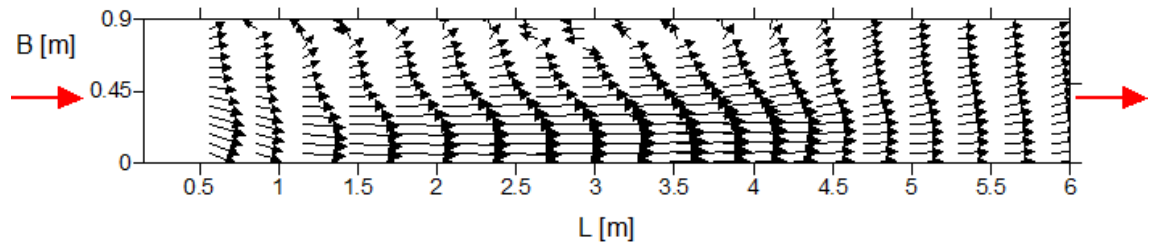




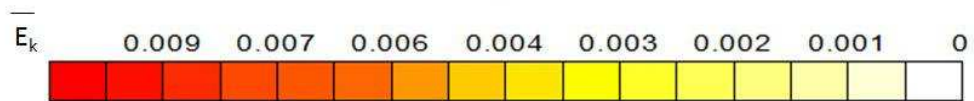
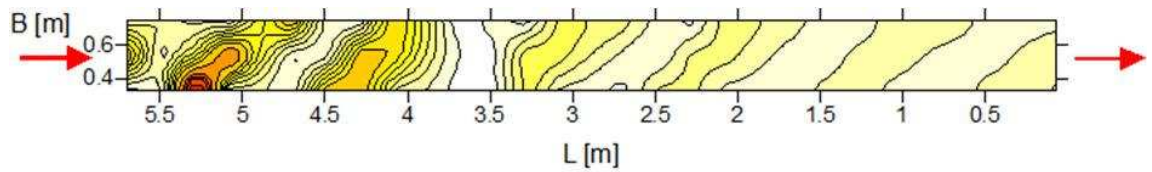
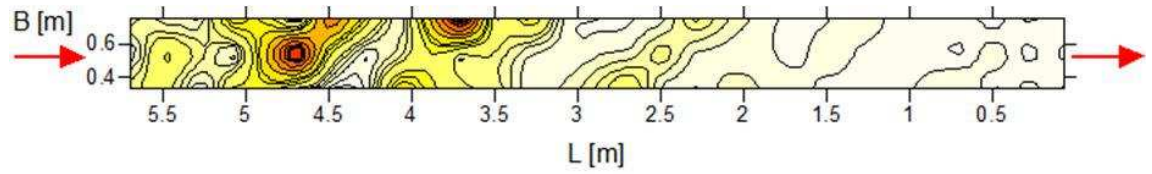
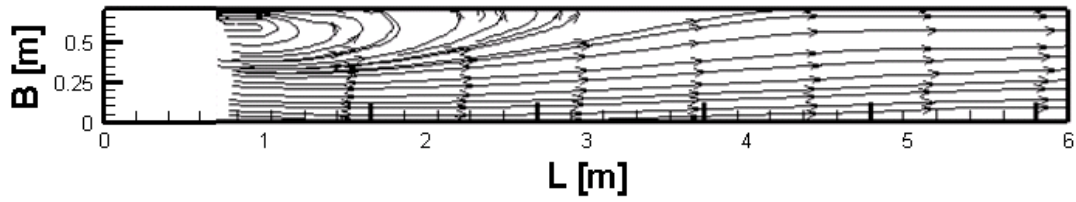
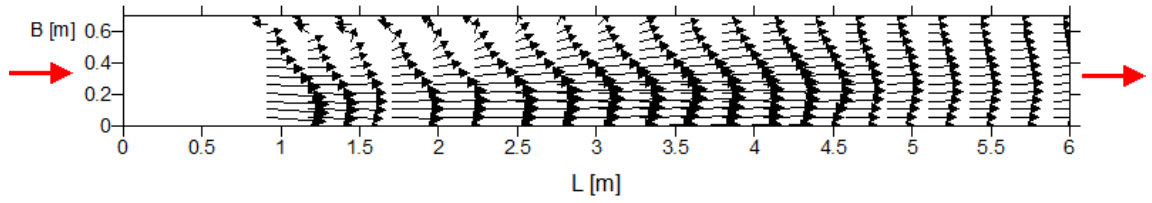
$L = 6 \text{ m}$ $B = 1 \text{ m}$



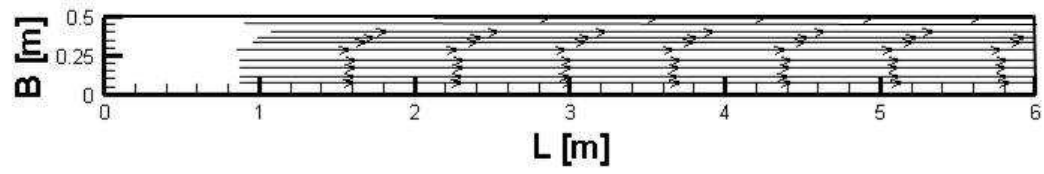
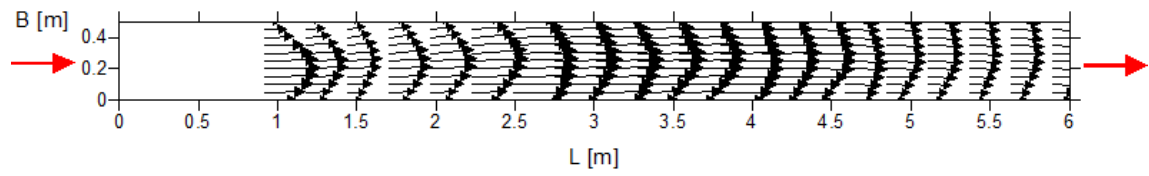
L = 6 m B = 0,9 m



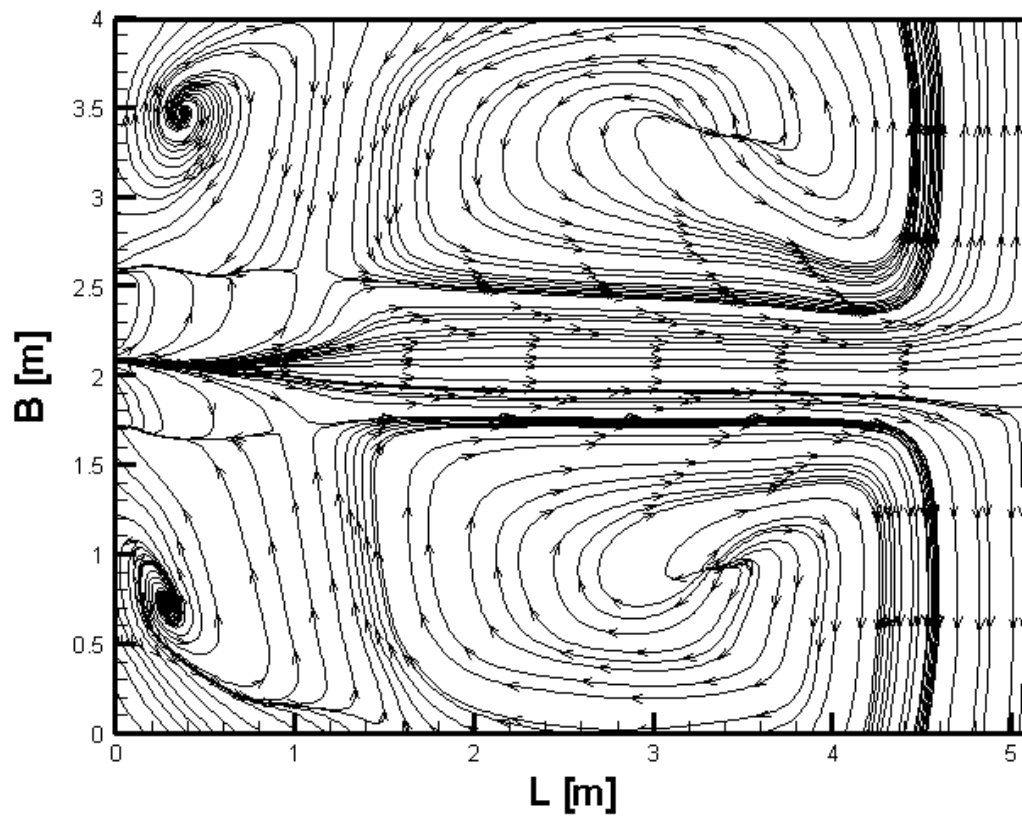
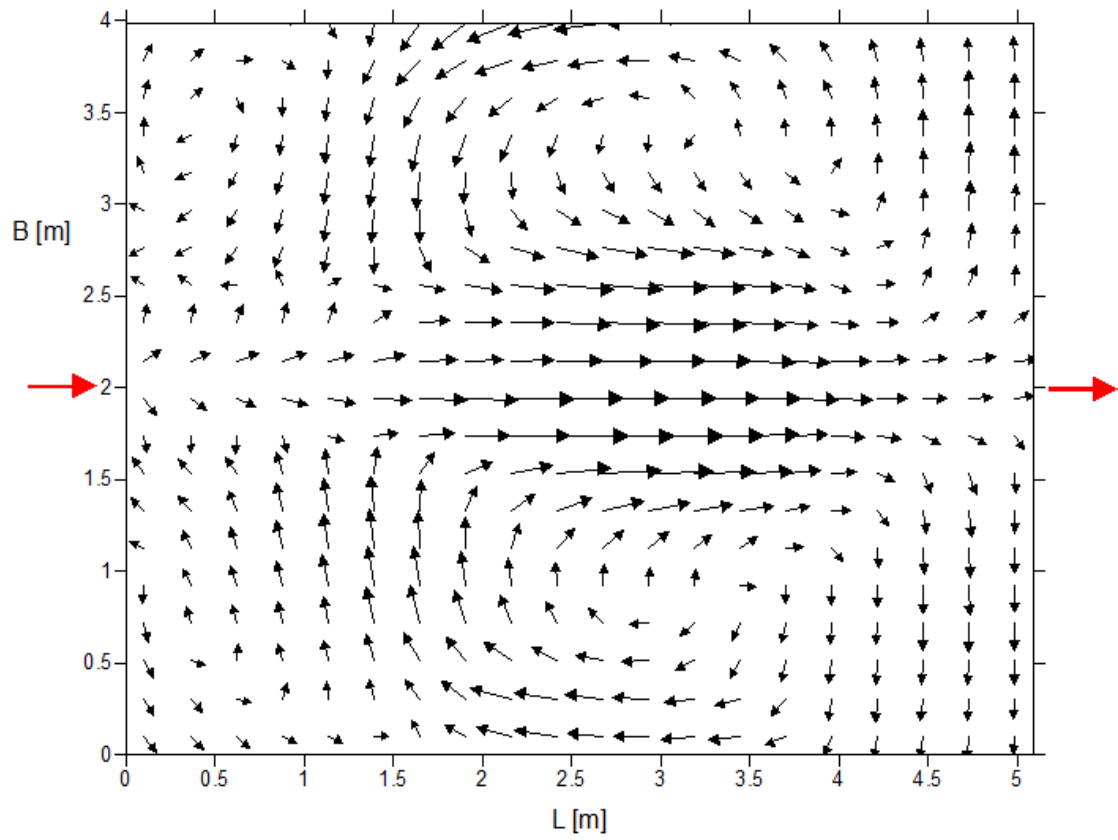
$L = 6 \text{ m}$ $B = 0,7 \text{ m}$

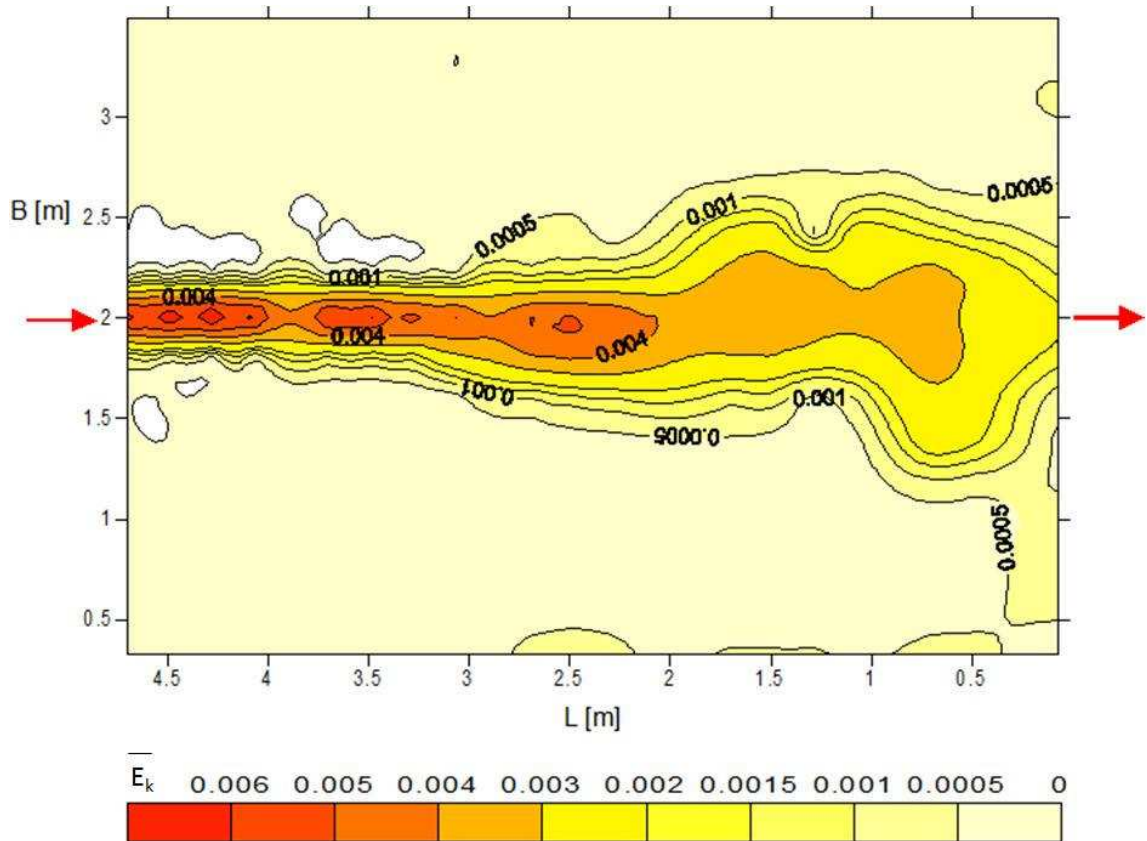
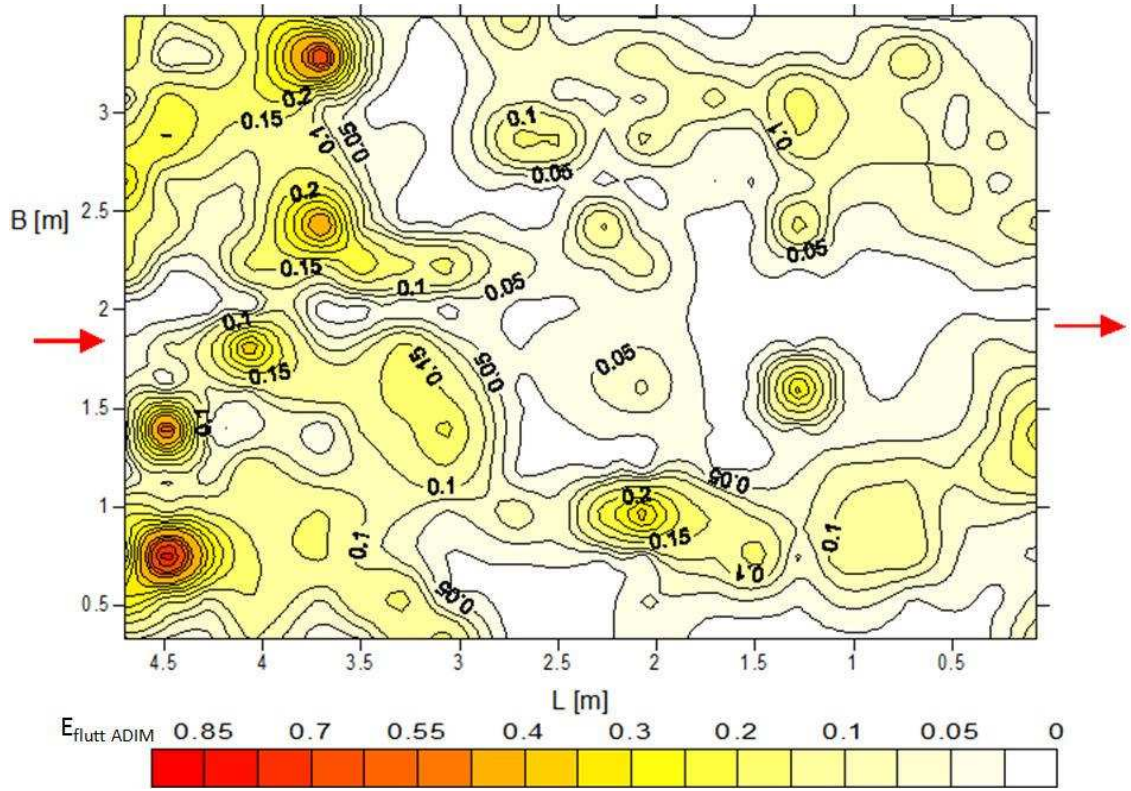


$L = 6 \text{ m}$ $B = 0,5 \text{ m}$

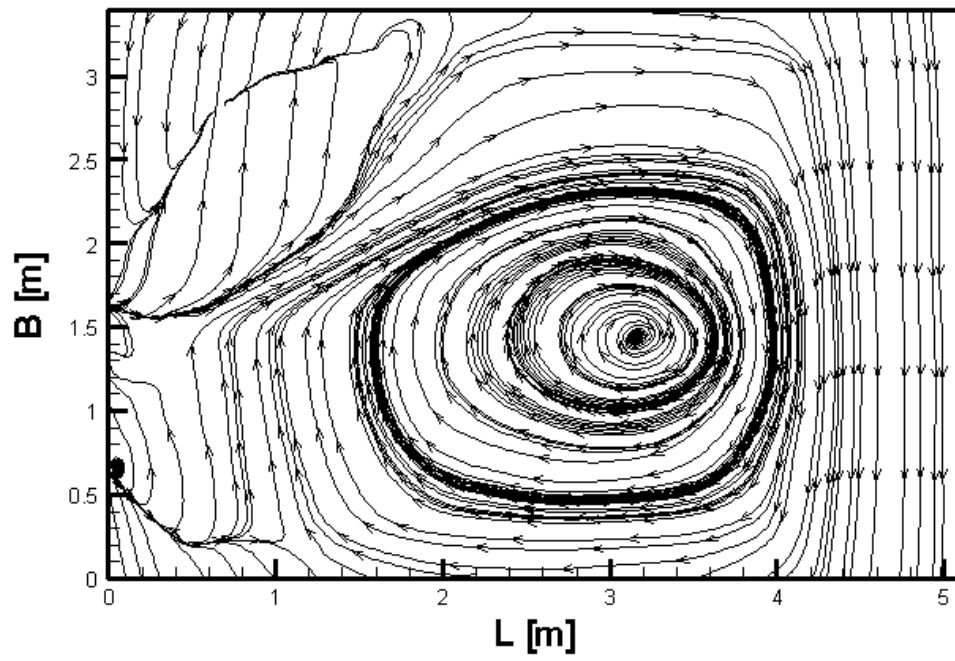
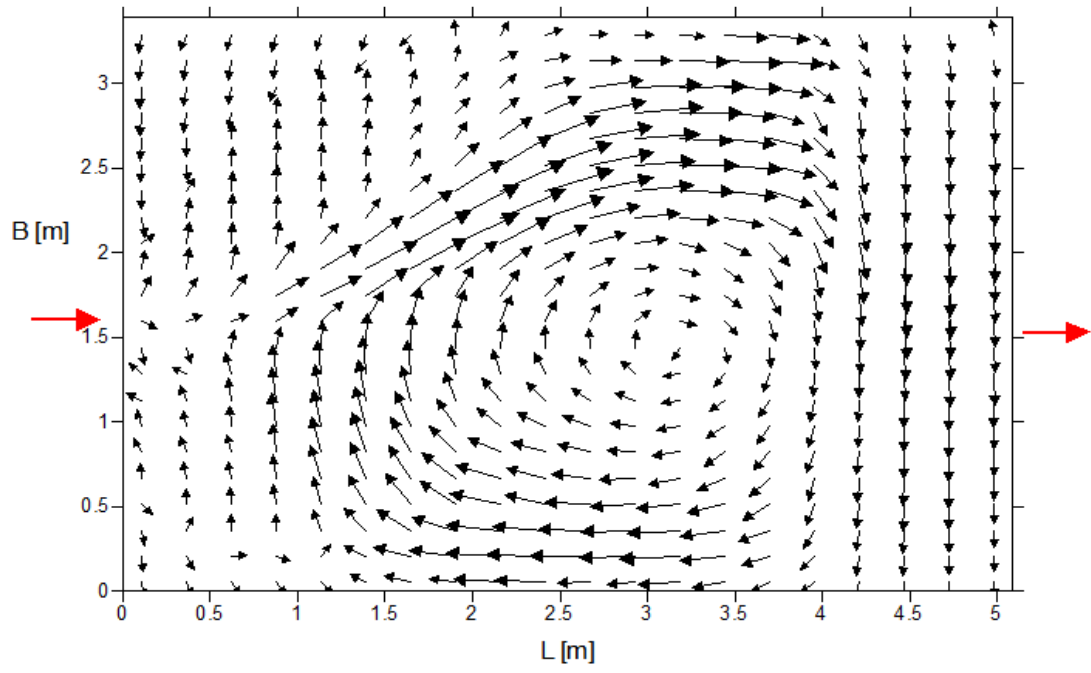


$L = 5 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

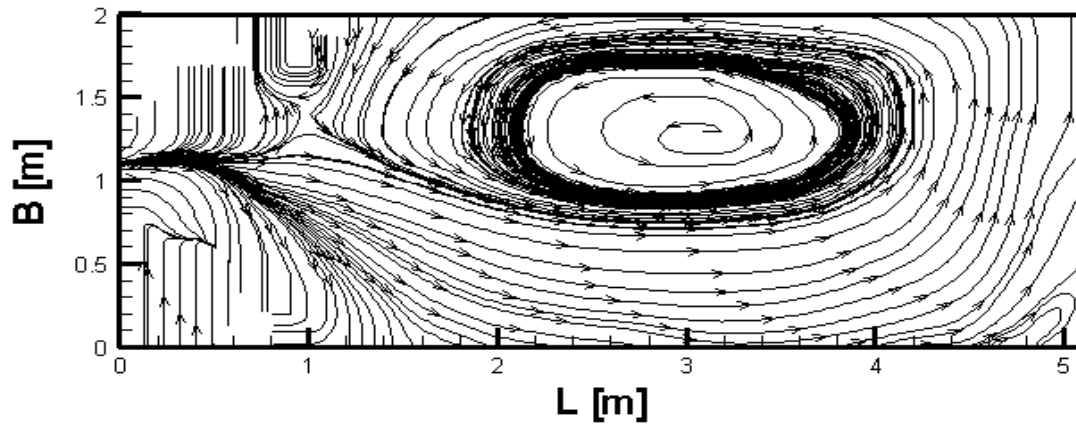
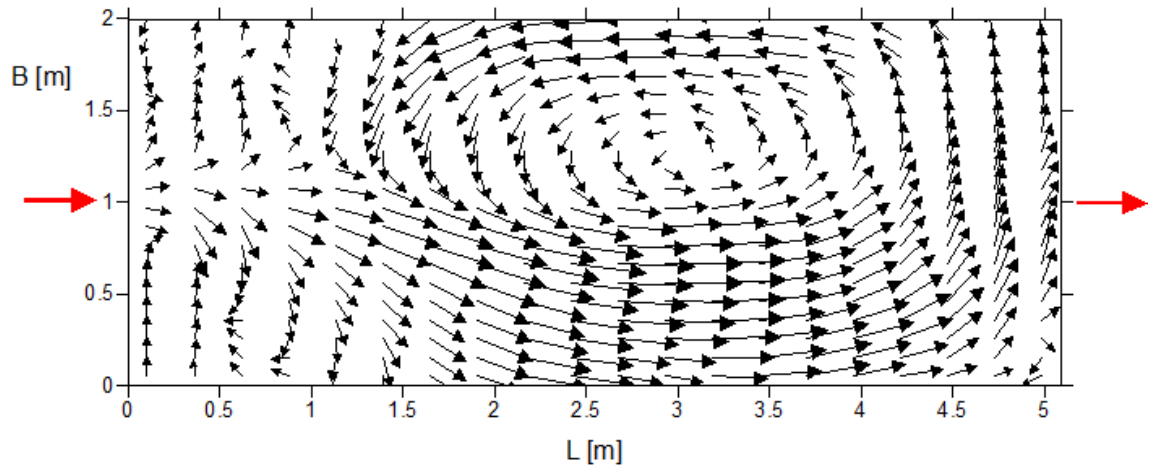




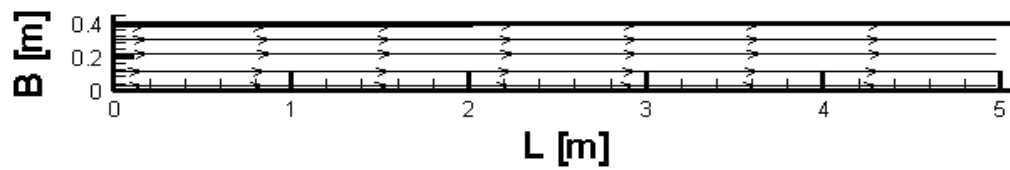
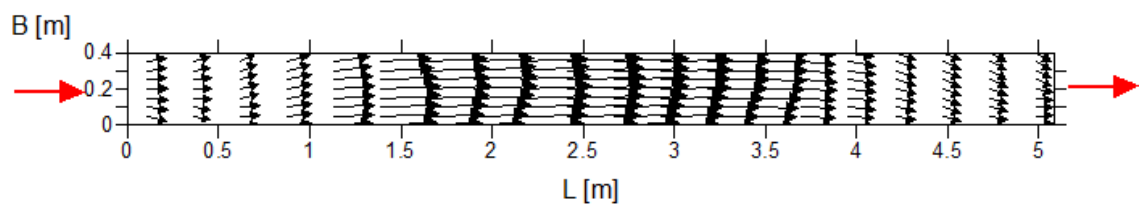
$L = 5 \text{ m}$ $B = 3 \text{ m}$



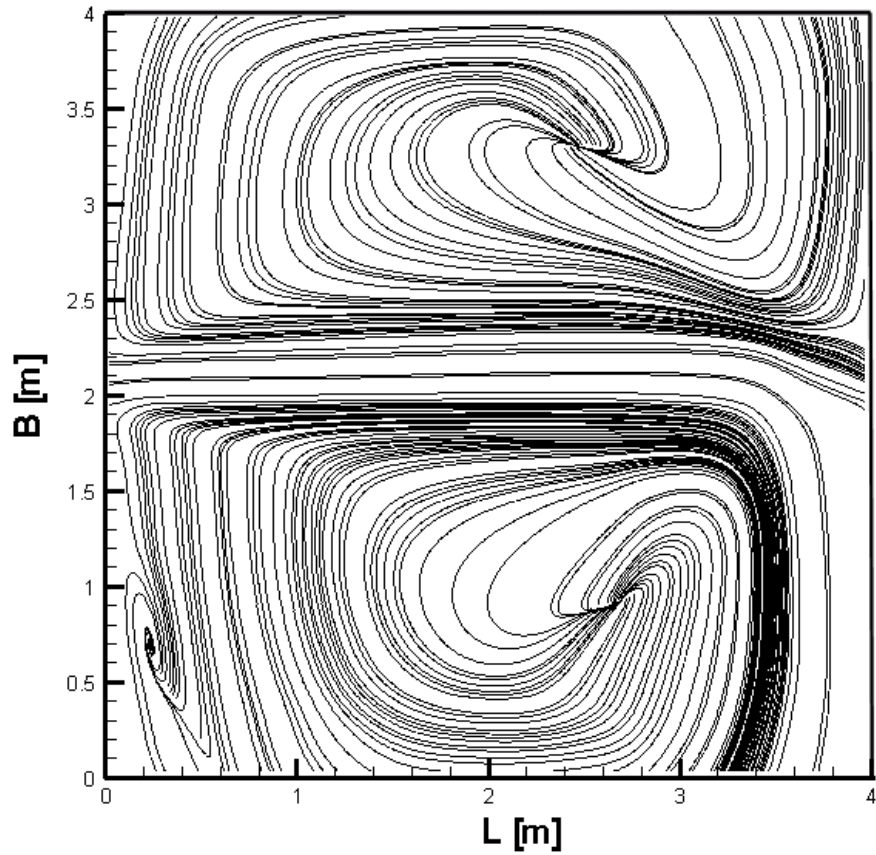
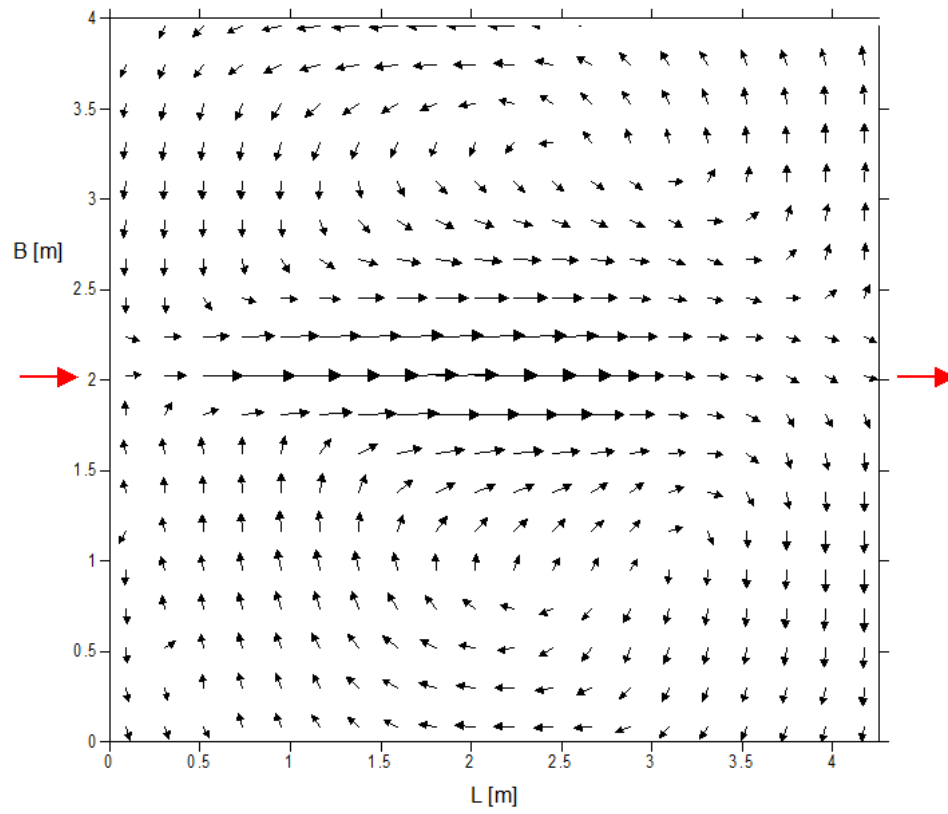
L = 5 m B = 2 m



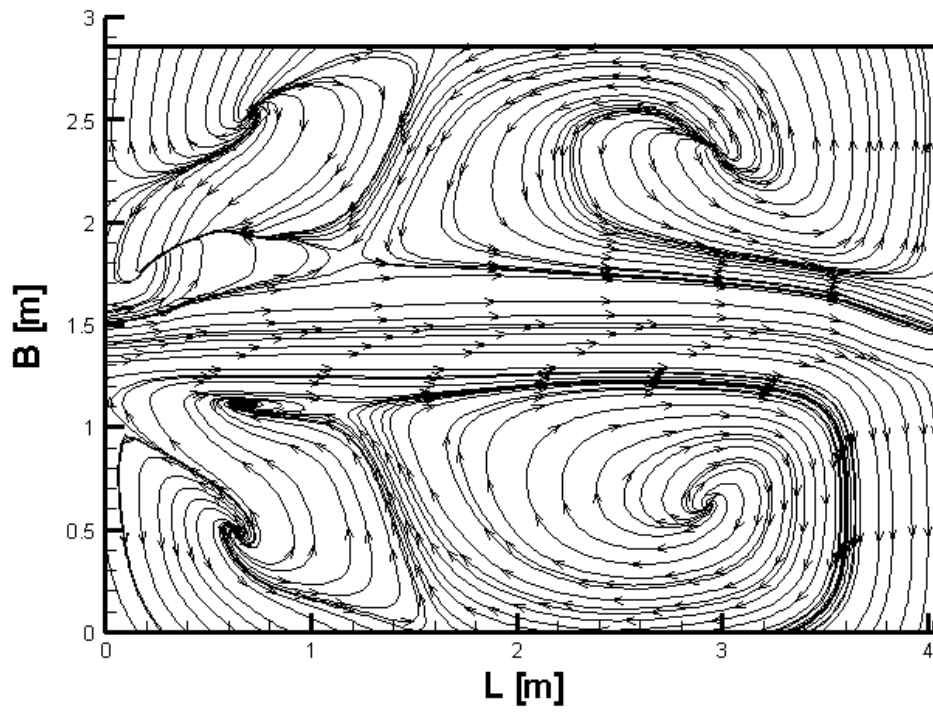
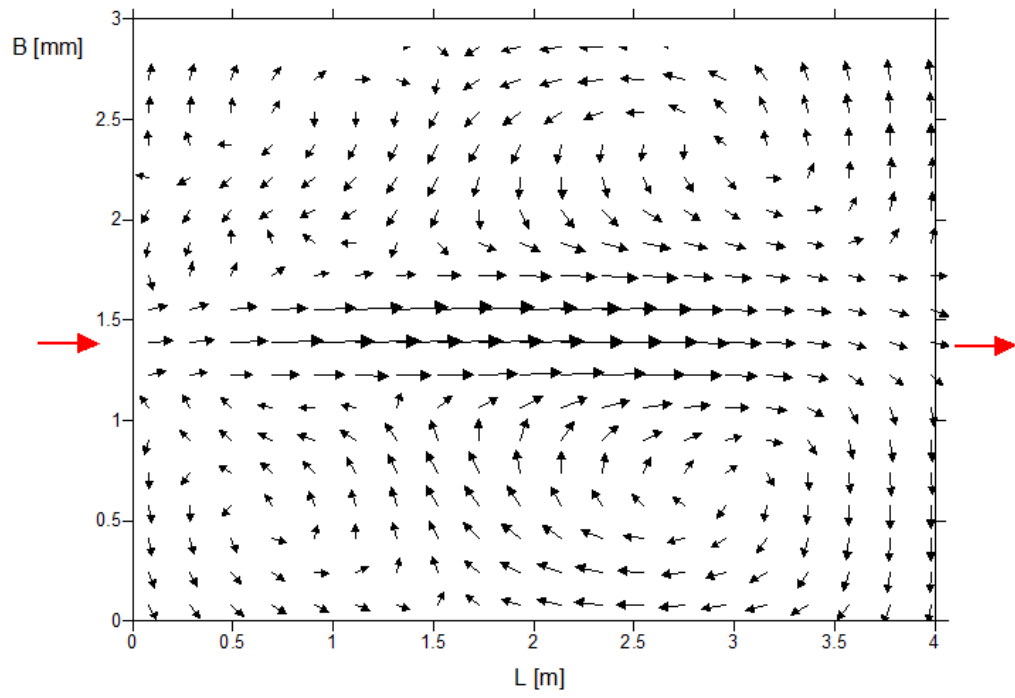
L = 5 m B = 0,4 m

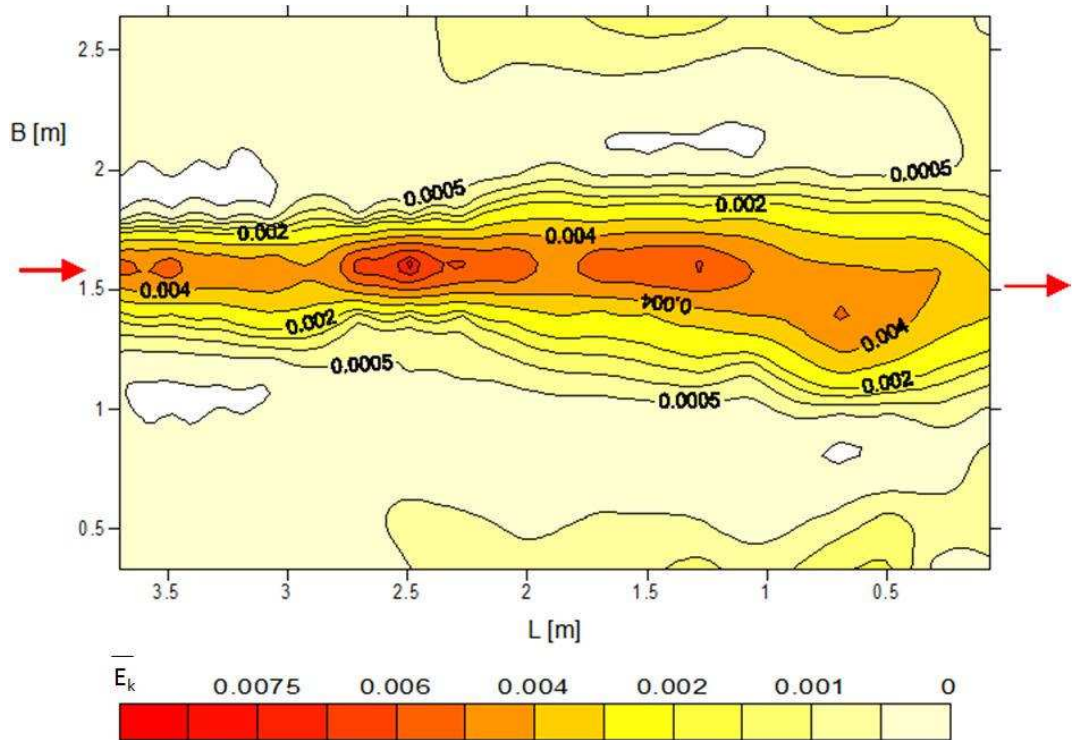
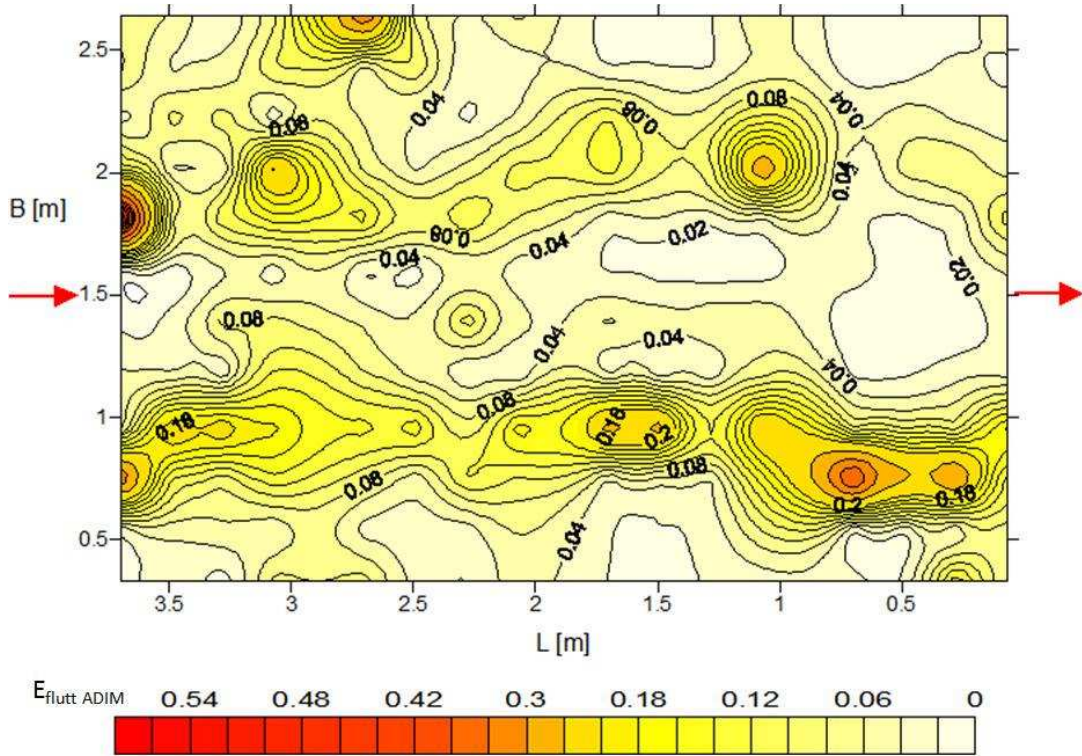


$L = 4 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

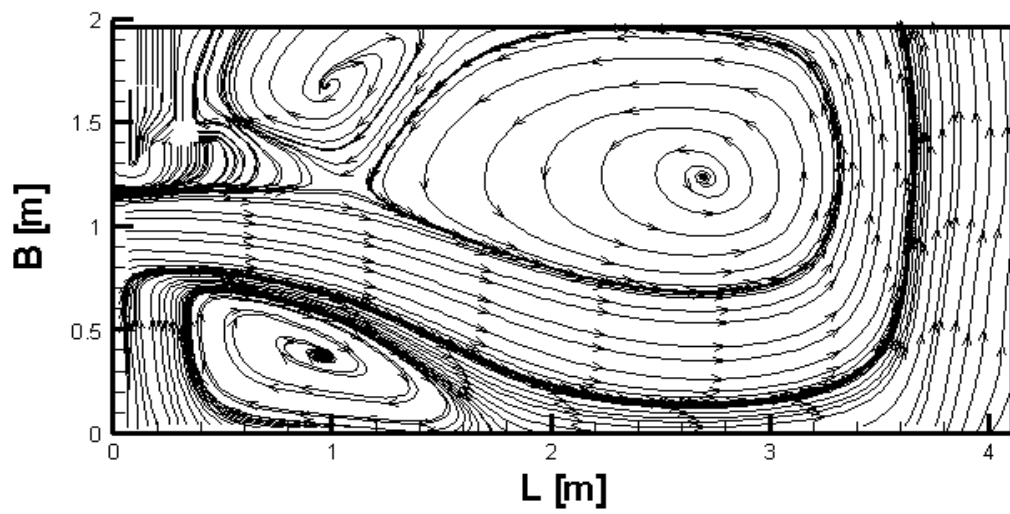
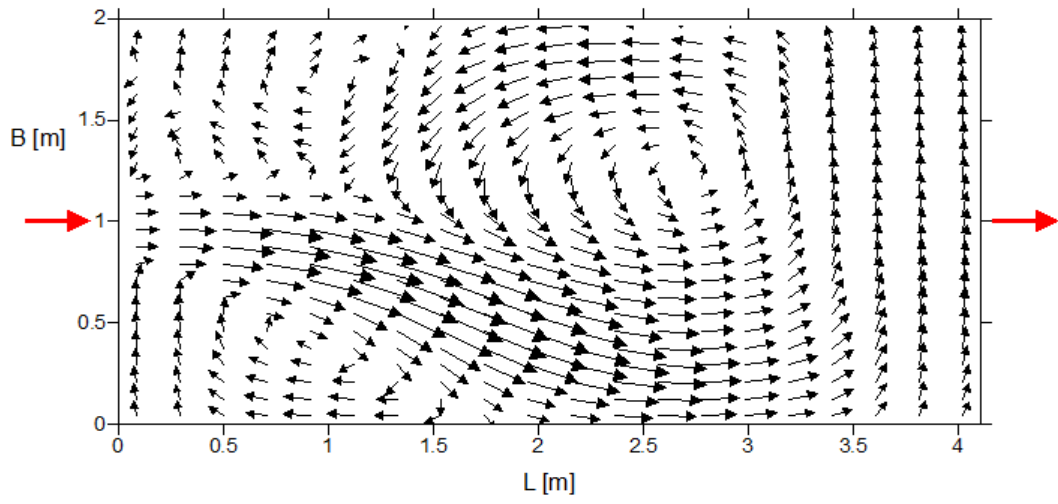


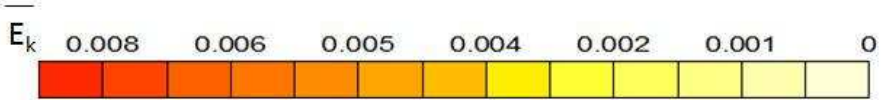
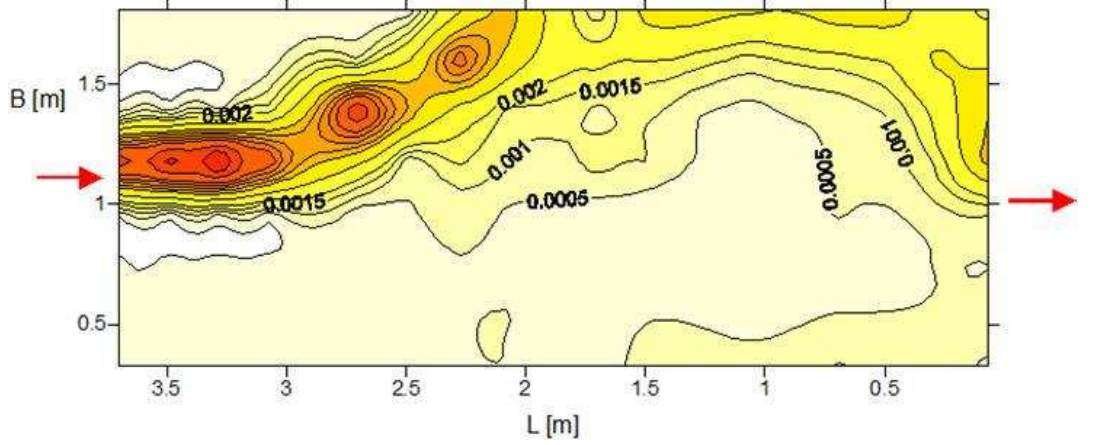
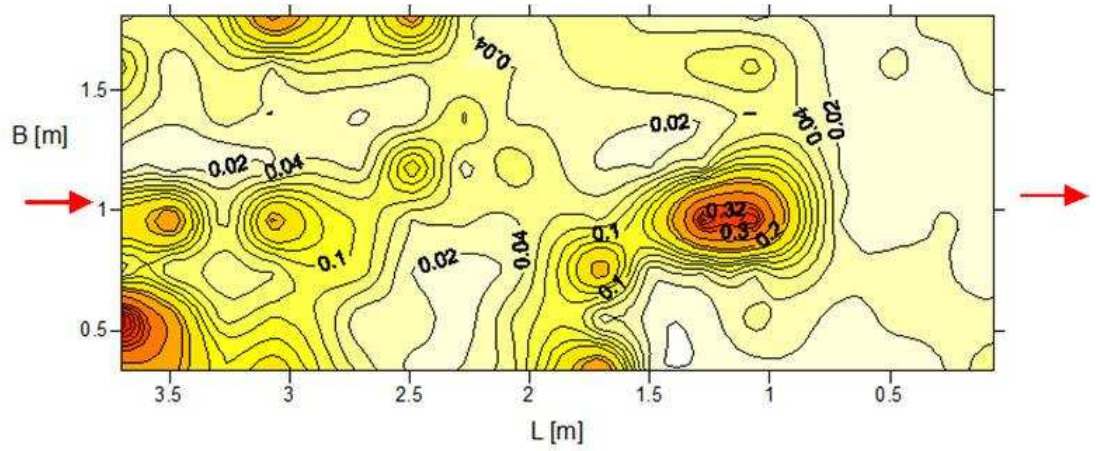
L = 4 m B = 3 m



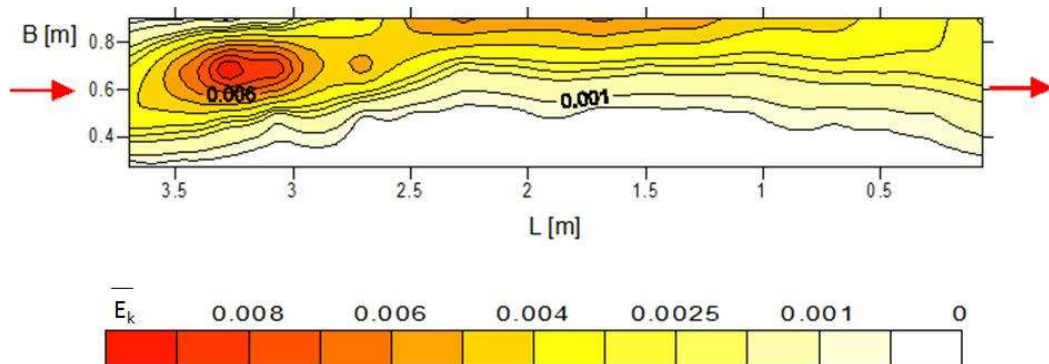
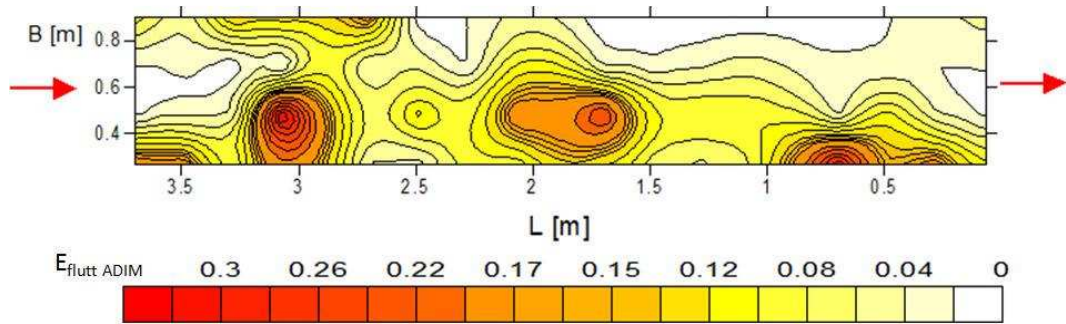
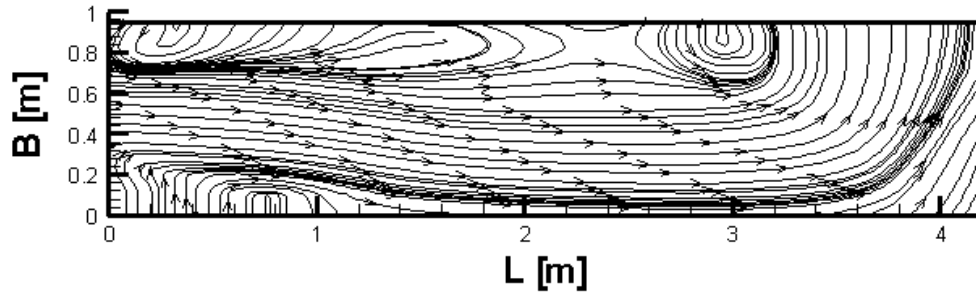
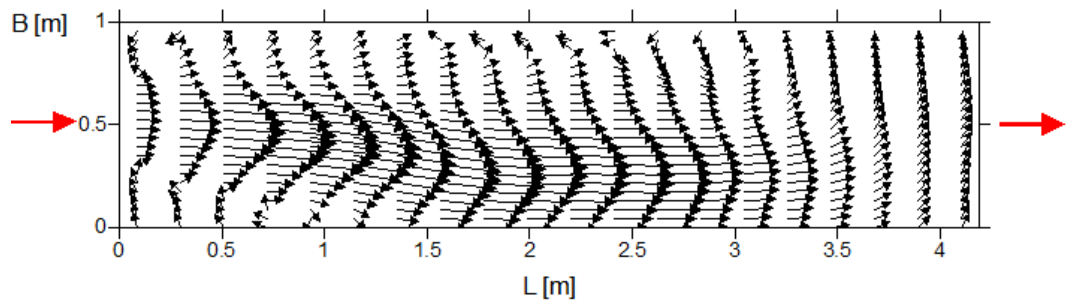


$L = 4 \text{ m}$ $B = 2 \text{ m}$

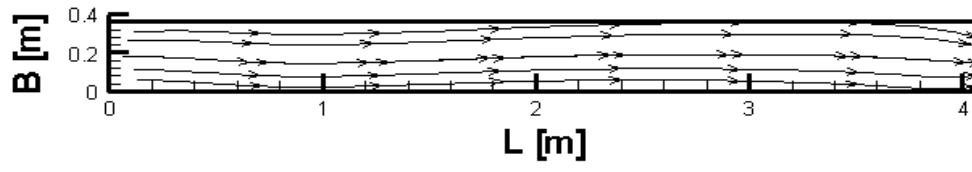
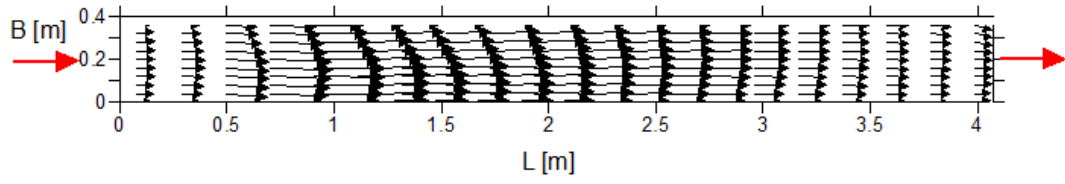




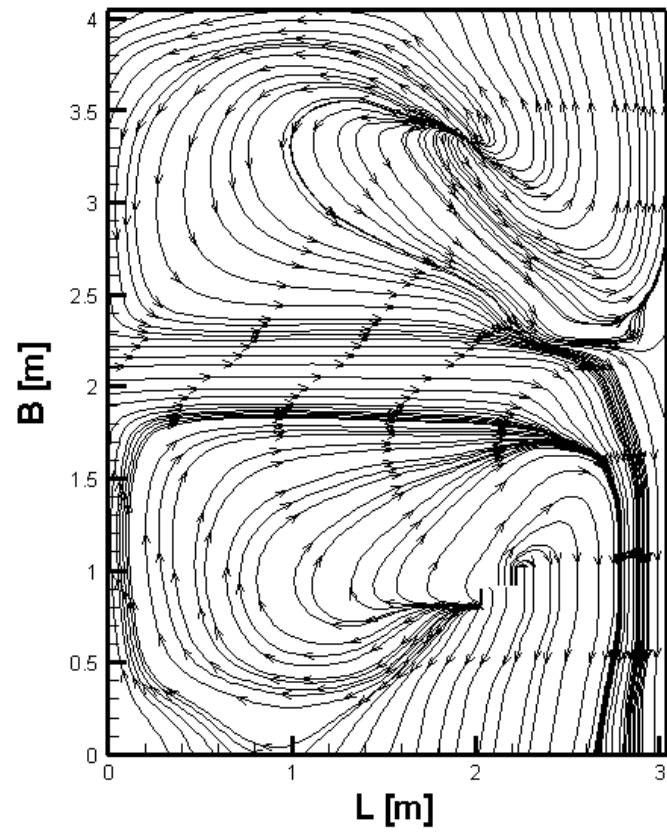
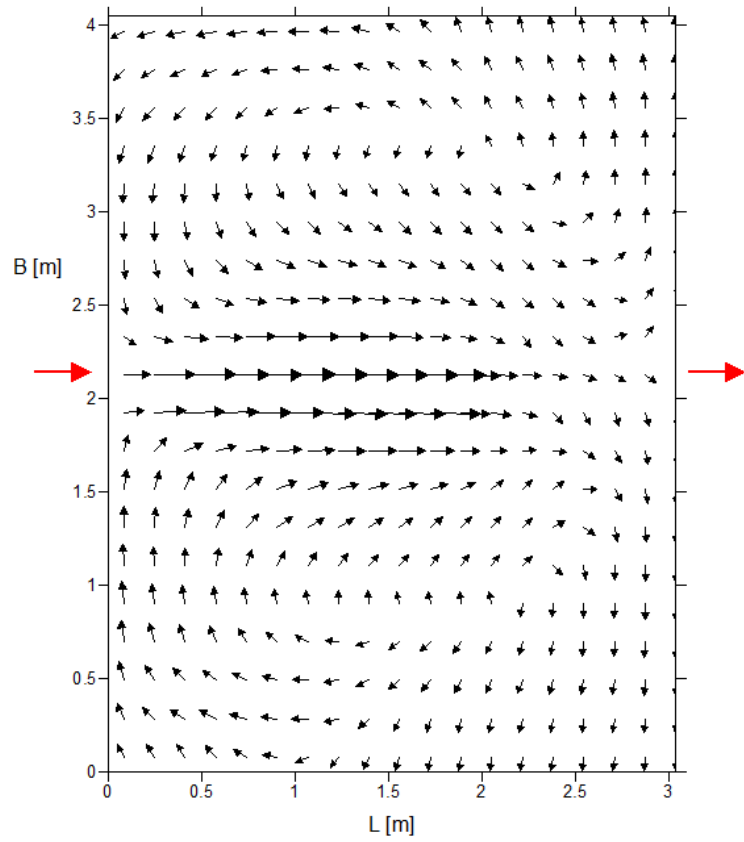
$L = 4 \text{ m}$ $B = 1 \text{ m}$

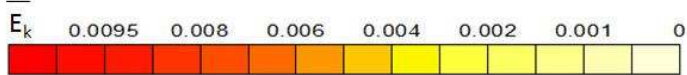
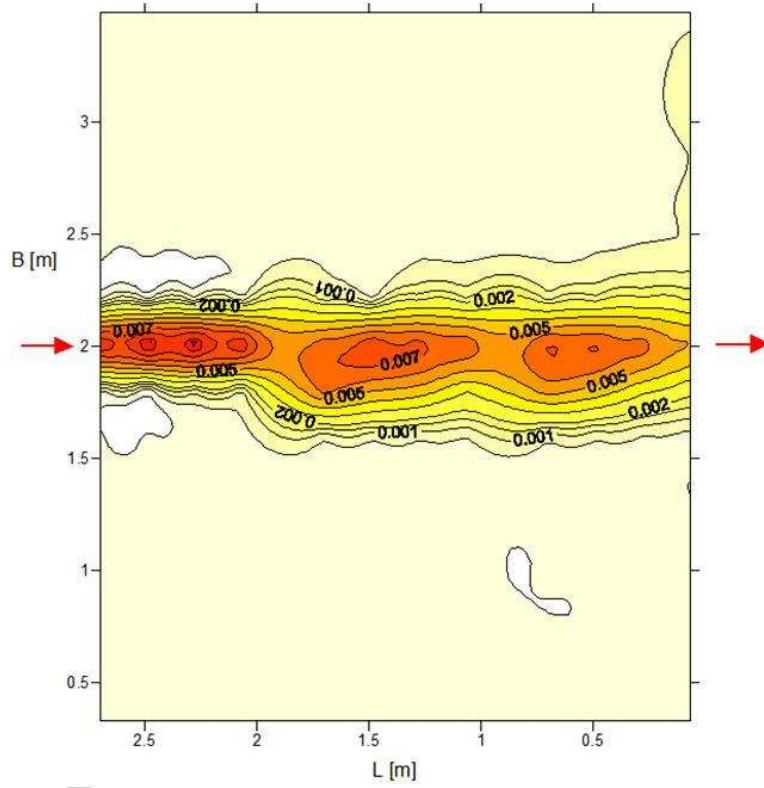
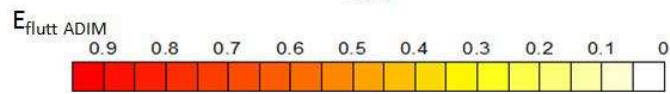
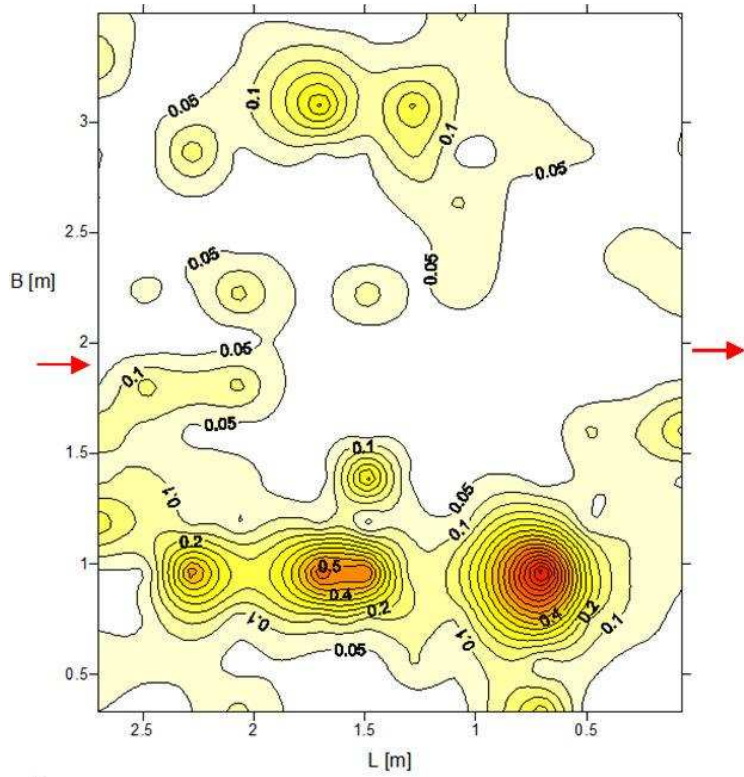


$L = 4 \text{ m}$ $B = 0,4 \text{ m}$

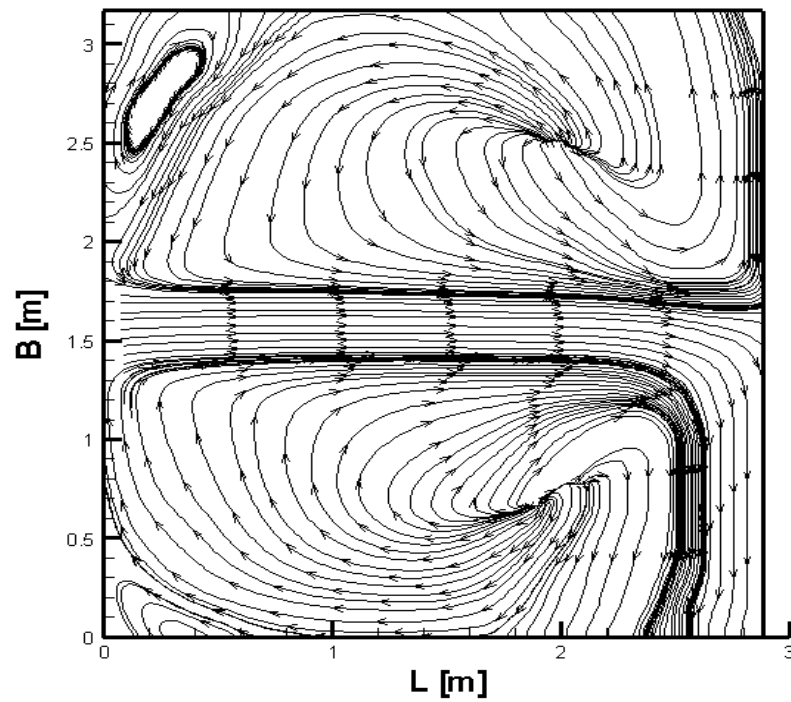
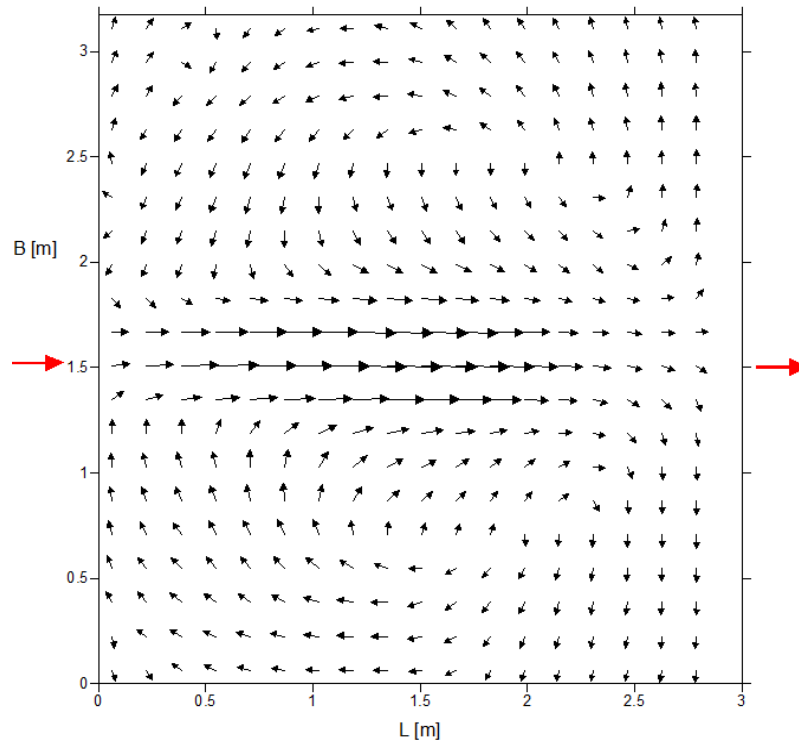


$L = 3 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

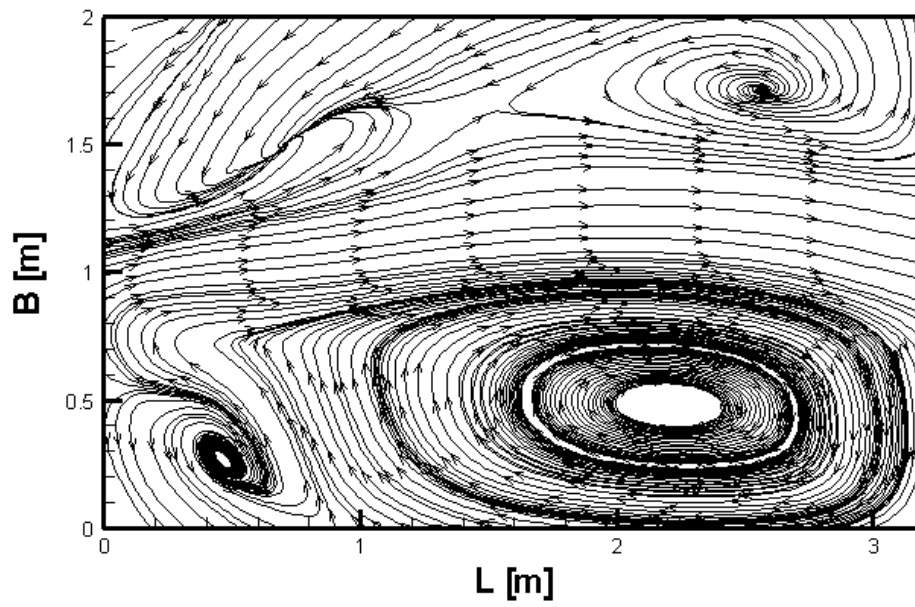
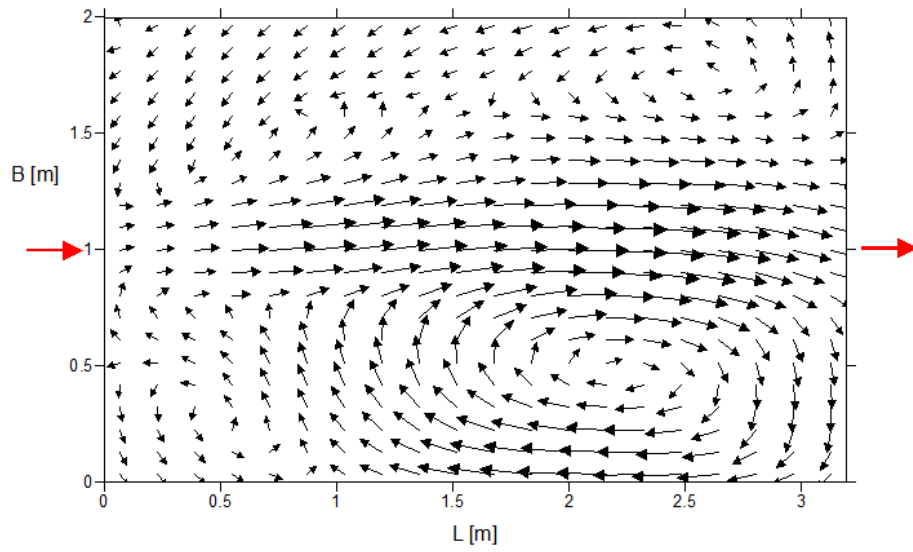




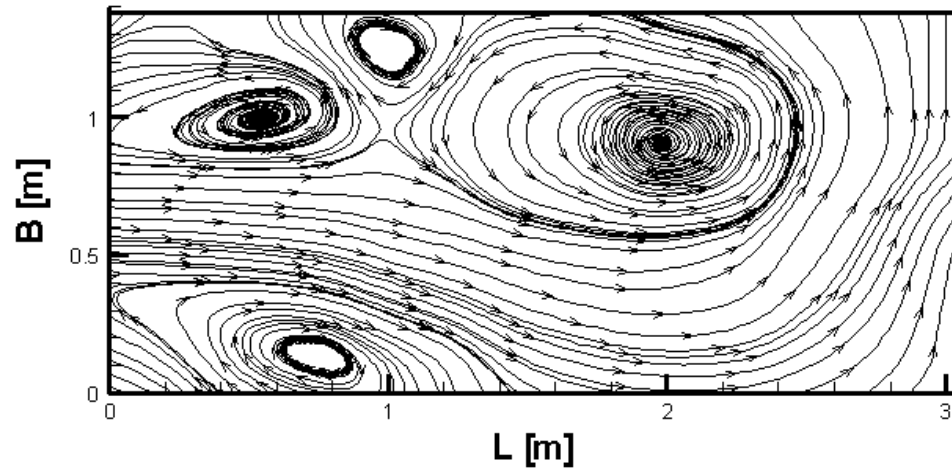
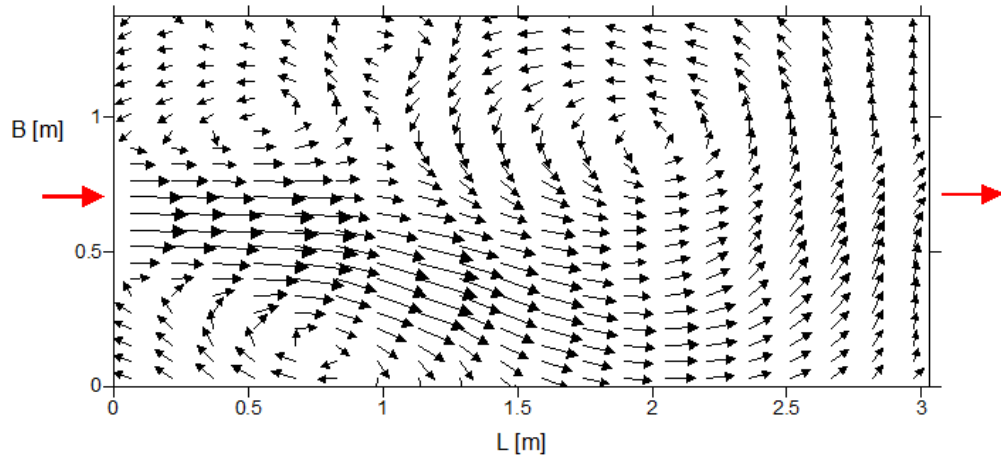
L = 3 m B = 3 m



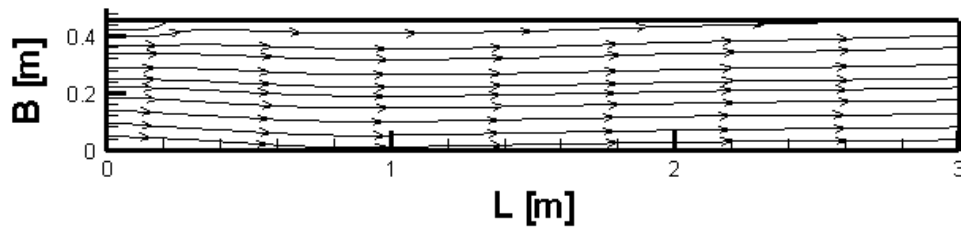
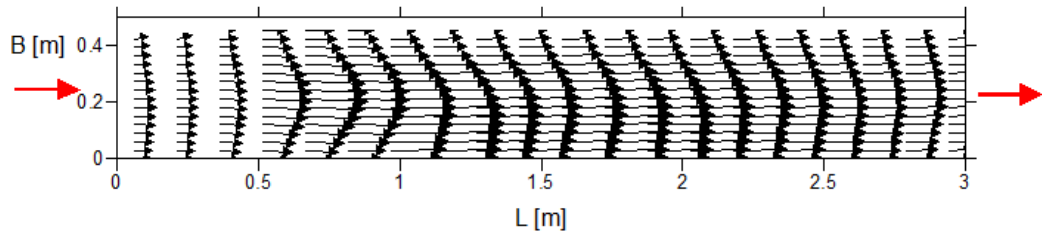
$L = 3 \text{ m}$ $B = 2 \text{ m}$



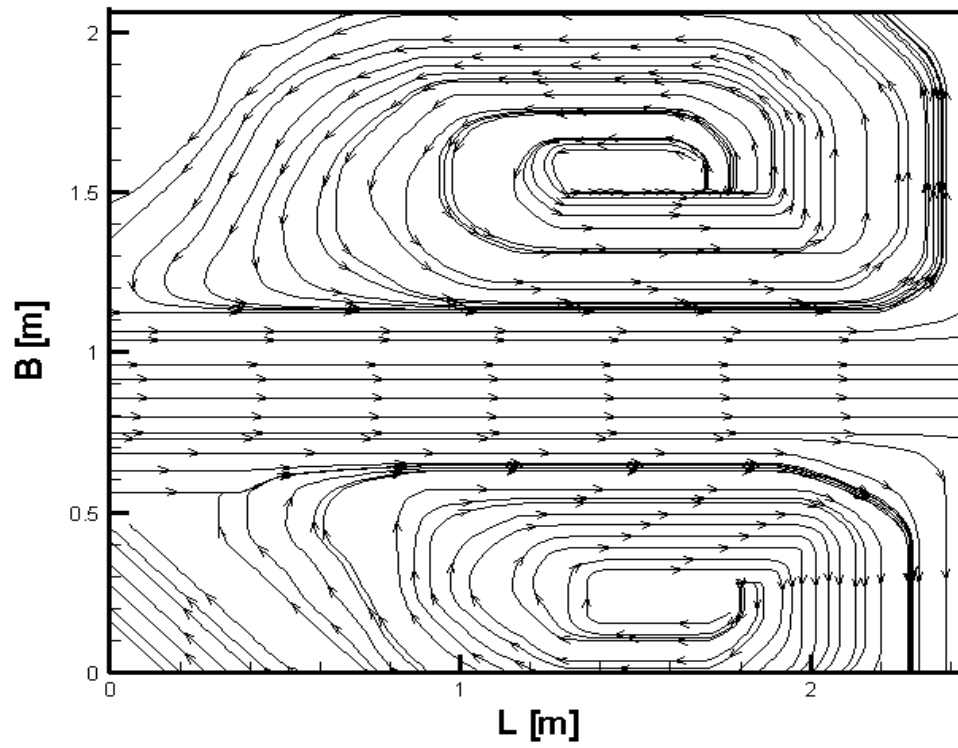
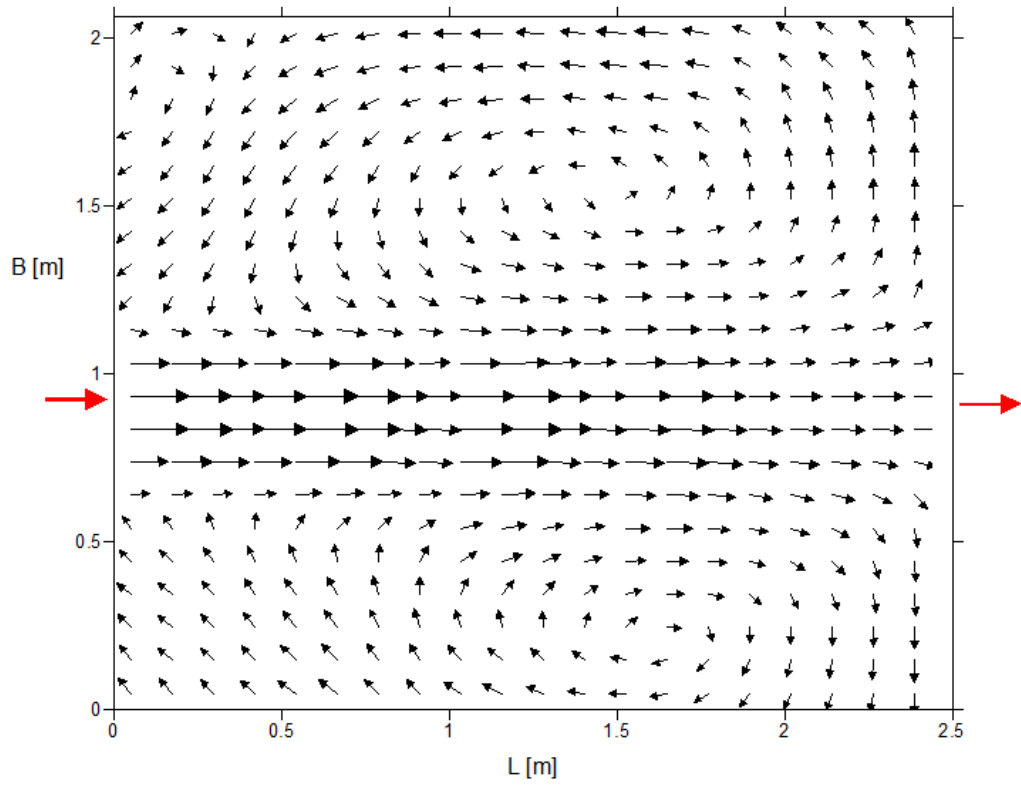
$L = 3 \text{ m}$ $B = 1,5 \text{ m}$



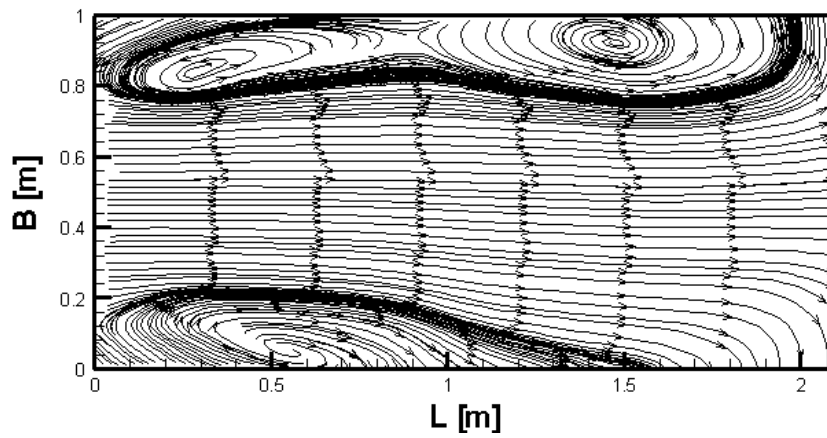
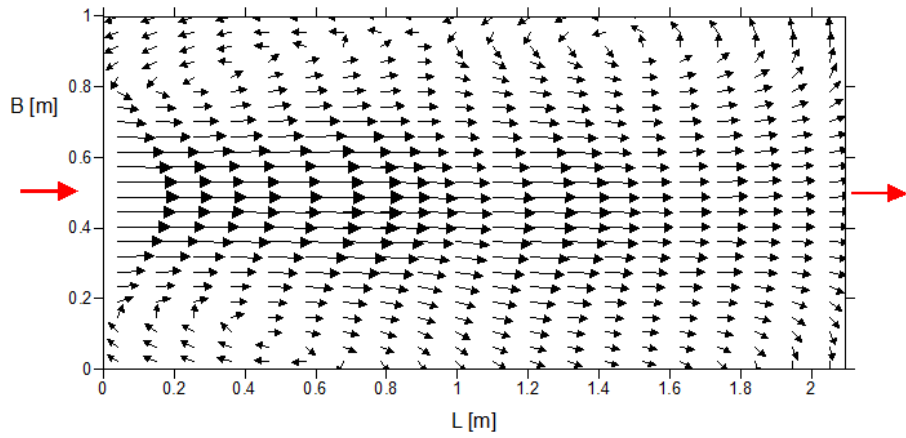
$L = 3 \text{ m}$ $B = 0,5 \text{ m}$



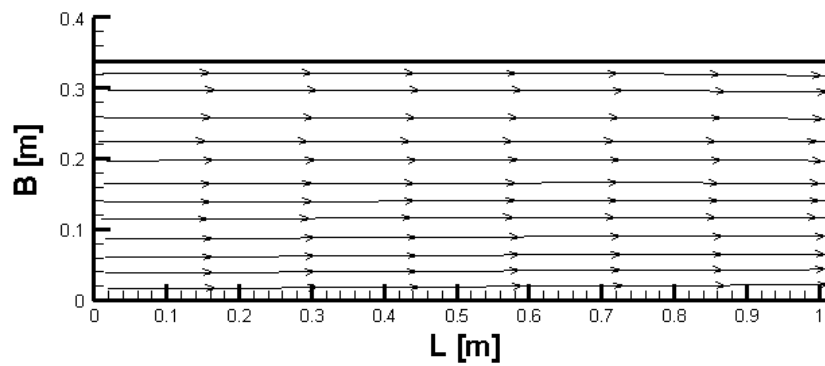
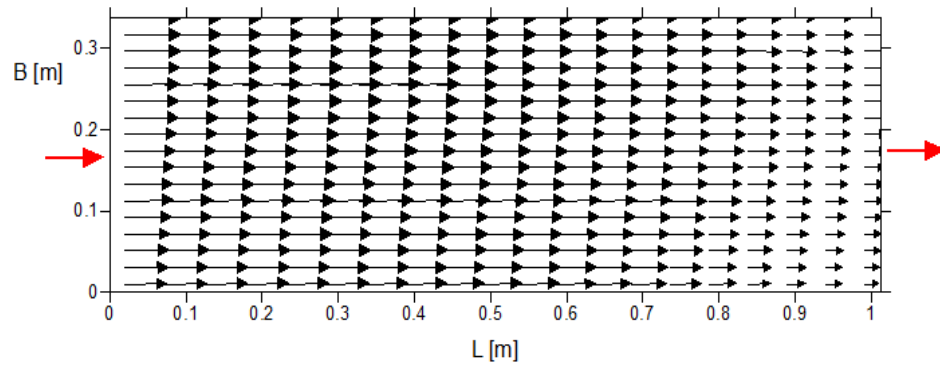
$L = 2,5 \text{ m}$ $B = 2 \text{ m}$



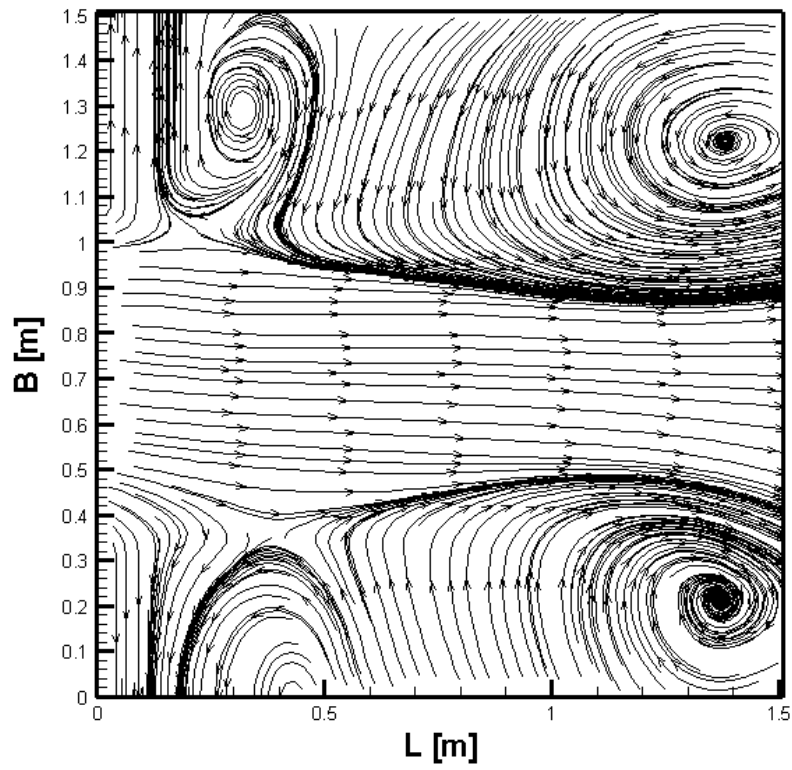
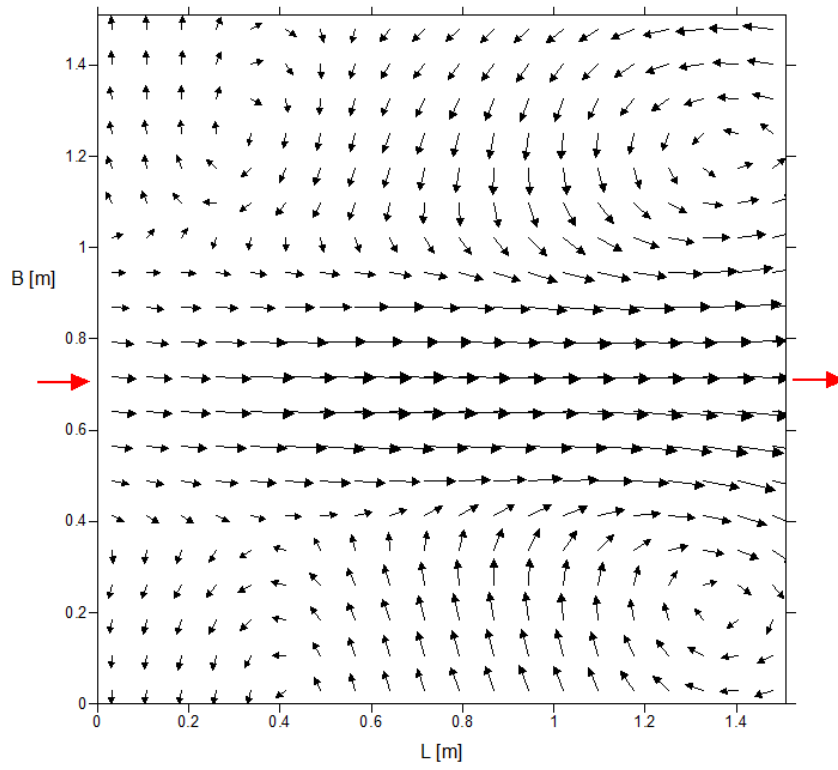
L = 2,08 m B = 1 m



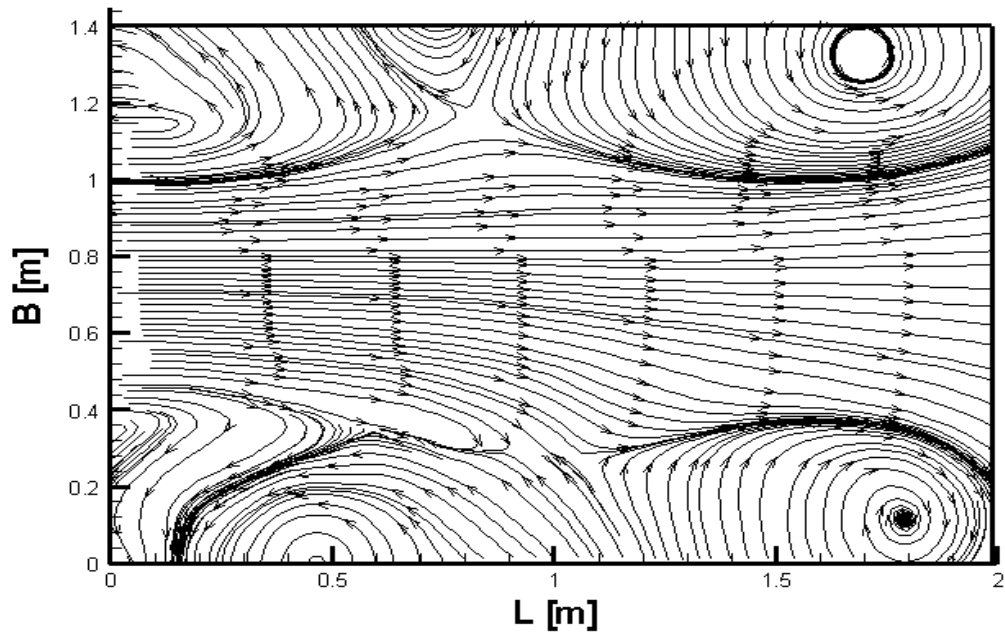
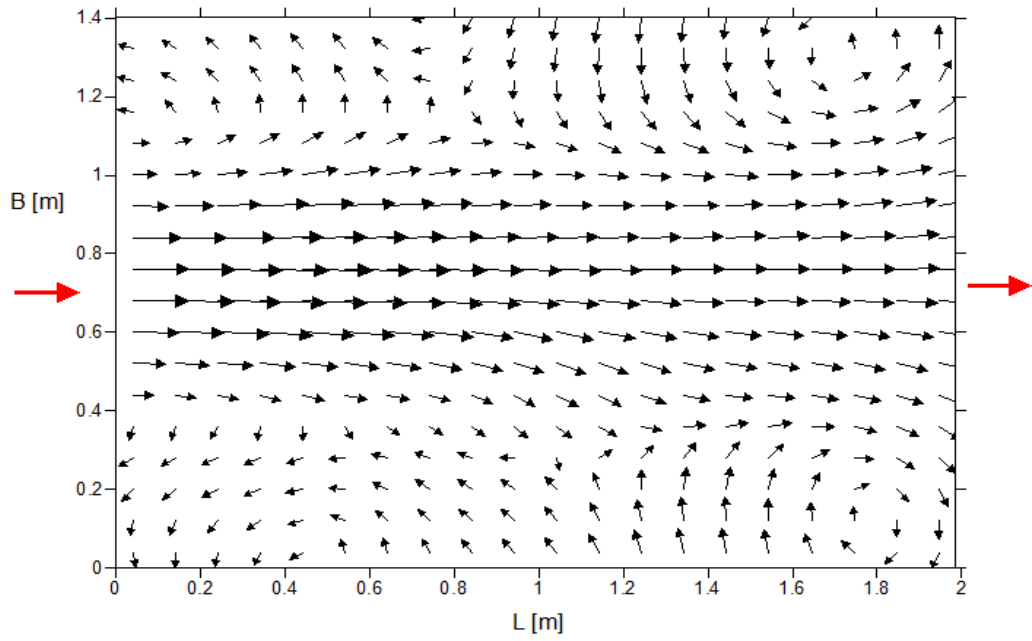
L = 1 m B = 0,4 m



$L = 1,5 \text{ m}$ $B = 1,5 \text{ m}$



$L = 2 \text{ m}$ $B = 1,4 \text{ m}$



$L = 1,6 \text{ m}$ $B = 4 \text{ m}$

