



**POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Formazione dell'Onda di Dam-Break  
Bidimensionale: Studio Sperimentale con  
Macro Particelle Neutre**

**Relatore**

*Prof. Davide Poggi*

**Correlatore**

*Ing. Silvia Cordero*

**Candidato**

*Mariarosa Rinaldi*

Anno Accademico 2018/2019

*Alla mia famiglia*

## Abstract

Il crollo di una diga, noto anche come dam-break, può provocare il rilascio di ingenti quantità di acqua con la conseguente propagazione di un'onda di traslazione verso valle causando enormi danni al territorio e alle vite umane. Il rischio legato al verificarsi di un dam-break è funzione delle caratteristiche dell'onda di piena e delle sue modalità di propagazione, le quali dipendono dalle caratteristiche della diga, come il materiale e la geometria del paramento di monte, e dal territorio a valle della stessa. La propagazione dell'onda di dam-break è un fenomeno attivamente studiato dalla comunità scientifica e la letteratura include differenti definizioni e analisi di modelli teorici, numerici o fisici.

L'obiettivo della tesi è valutare il campo delle velocità del flusso di piena mediante uno studio sperimentale bidimensionale. A tal scopo, sono state effettuate delle simulazioni di dam-break in un ambiente controllato costituito da un canale artificiale presente nel laboratorio di Idraulica Giorgio Bidone del DIATI. Per simulare la diga, il canale è stato dotato di un'apposita paratoia in legno collegata ad un pistone ad aria compressa che ne permette l'istantaneo sollevamento. Le simulazioni sono state riprese in tempo reale mediante una videocamera con risoluzione 4K posta al lato del canale. I video risultanti, a seguito di un'opportuna calibrazione della videocamera, sono stati processati in modo da poter lavorare in campo metrico. Successivamente, è stata valutata la velocità dell'onda di piena mediante la tecnica denominata PTV (Particle Tracking Velocimetry). Questa tecnica prevede che la velocità venga ricavata dallo spostamento delle particelle in un fluido in movimento durante un determinato intervallo di tempo mediante algoritmi di cross-correlation. Nel caso in esame, i traccianti utilizzati sono macro particelle di densità prossima a quella dell'acqua. Le macro sfere utilizzate sono state scelte tra particelle di diverso materiale e dimensioni dopo opportuna classificazione. La classificazione è stata eseguita mediante una bilancia di precisione per misurare la massa e un calibro elettronico per la stima dei diametri. È stata fatta una caratterizzazione statistica dei dati ottenuti al fine di scegliere le sfere da utilizzare come traccianti.

# Indice

1. Introduzione.....	1
2. Il Dam-Break.....	3
2.1 Formazione della breccia .....	3
2.2 La formazione dell'onda.....	8
2.2.1 Alveo asciutto .....	10
2.3 Stato dell'arte .....	17
3. Particle Tracking Velocimetry (PTV) .....	25
3.1 Descrizione .....	25
3.2 Algoritmo alla base del software utilizzato .....	25
4. Setup Sperimentale.....	28
4.1 Descrizione del canale.....	28
4.2 Descrizione della telecamera.....	30
4.3 Caratterizzazione traccianti e test di salinità.....	31
4.4 Modalità di esecuzione delle prove.....	43
5. Analisi e Risultati.....	44
5.1 Processamento dei fotogrammi .....	44
5.2 Analisi dei fotogrammi .....	49
5.3 Post-processing dei dati ottenuti .....	51
6. Conclusioni e sviluppi futuri .....	75
Allegati.....	76
Bibliografia .....	92

## Indice delle figure

Figura 1 - Correlazioni empiriche $\frac{Hs}{Hd}$ (a) e tra $Q_{max}$ e $H_d$ (b) .....	6
Figura 2 - Schema della breccia.....	7
Figura 3 - Relazioni tra $H(Z)$ e $Z$ per diversi valori di $C(a)$ e livello finale della breccia $Z_\infty$ (b).....	8
Figura 4-Andamento della superficie libera nel piano fisico (a) e linee caratteristiche nel piano $x,t$ (b) con alveo asciutto .....	16
Figura 5 – Dimensioni [m] del canale e dell’ostacolo .....	17
Figura 6 – Sezione trasversale canale (a) e serbatoio (b) .....	18
Figura 7 – Setup sperimentale nelle condizioni iniziali [m].....	19
Figura 8 – Setup sperimentale .....	20
Figura 9 – Setup sperimentale .....	21
Figura 10 – Comparazione tra il profilo di Ritter e quello sperimentale.....	22
Figura 11 - Un confronto tra $h(x, t)$ misurato e modellato: $S_0 = 0$ e $H_0 = 15m$ (colonna a sinistra) e $S_0 = 3\%$ e $H_0 = 0,3 m$ (colonna a destra).....	24
Figura 12 - Vista laterale e vista dall'alto del canale quote in m .....	29
Figura 13 - Vista posteriore, frontale e laterale della paratoia e degli elementi accessori ad essa collegati - quote in cm.....	29
Figura 14 – Immagine posteriore e frontale della paratoia.....	30
Figura 15 - Sony DR-AX700.....	31
Figura 16 – Posizione della telecamera in l .....	31
Figura 17 - Bilancia di precisione.....	32
Figura 18 - Calibro elettronico.....	32
Figura 19 - Microscopio elettronico .....	33
Figura 20 - Esempio di particella vista dal microscopio elettronico .....	33
Figura 21 - Distribuzione delle sfere analizzate .....	37
Figura 22 - Distribuzione delle sfere analizzate .....	38
Figura 23 – Percentuale di sfere che galleggiano in funzione dei $g$ di sale.....	41
Figura 24 – Percentuale di sfere che galleggiano in funzione della densità di acqua.....	41
Figura 25 – Numero di sfere galleggianti ad ogni step.....	42
Figura 26 - Numero di sfere galleggianti ad ogni step .....	42
Figura 27 - Distorsione radiale negativa, nulla, positiva .....	45
Figura 28 – Istogramma indicante l’errore di riproiezione.....	46
Figura 29 – Caso di camera stazionaria .....	47
Figura 30 - Caso di pattern stazionari.....	47
Figura 31 – Confronto tra i punti trovati dalla camera e quelli derivanti dai parametri della camera.....	48
Figura 32 – Esempio di maschera.....	48
Figura 33 – Esempio di frame con maschera.....	49
Figura 34 - Traiettorie particelle con $h_0 = 30 cm, t_0 = 0 s, dt = 1 ms$ .....	51
Figura 35 - Esempio di profilo tracciato .....	51
Figura 36 - Esempio di sezioni tracciate.....	52
Figura 37 - Numero di ID trovati.....	53
Figura 38 - % di sfere individuate dal software ad ogni frame.....	54
Figura 39 - Numero di particelle identificate dal software prima del dam-break.....	54
Figura 40 - Numero di particelle identificate da software a $t = 0.15 s$ .....	55
Figura 41 - Numero di particelle identificate da software a $t = 0.60 s$ .....	55
Figura 42 - $u_x$ e $v_y$ prima del dam-break .....	56
Figura 43 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.05 s$ .....	56

Figura 44 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.15$ s .....	57
Figura 45 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.4$ s .....	57
Figura 46 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.5$ s .....	58
Figura 47 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.6$ s .....	58
Figura 48 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.65$ s .....	59
Figura 49 - Andamento delle $u_x$ nella sezione a monte della paratoia.....	60
Figura 50 - Andamento delle $u_x$ nella sezione immediatamente a valle della paratoia .....	60
Figura 51 - Andamento delle $v_y$ nella sezione a monte della paratoia .....	61
Figura 52 - Andamento delle $v_y$ nella sezione immediatamente a valle della paratoia.....	61
Figura 53 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 7 .....	63
Figura 54 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 6 .....	63
Figura 55 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 5 .....	64
Figura 56 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 4 .....	64
Figura 57 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 3 .....	65
Figura 58 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 2 .....	65
Figura 59 - Confronto tra Ritter e la media delle velocità nelle sezioni orizzontali.....	66
Figura 60 - Confronto tra Ritter e la media delle $u$ nelle sezioni orizzontali .....	66
Figura 61 - $u_x$ e $v_y$ prima del dam-break .....	67
Figura 62 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.2$ s .....	68
Figura 63 - $u_x$ e $v_y$ a $t = 0.3$ s .....	68
Figura 64 - Confronto tra la media delle velocità nelle sezioni verticali e Ritter.....	69
Figura 65 - Confronto tra la media delle $u$ e Ritter.....	69
Figura 66 - Confronto tra velocità sperimentali del 1° e 2° filmato con Ritter .....	70
Figura 67 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.05$ s .....	71
Figura 68 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.15$ s .....	71
Figura 69 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.2$ s .....	72
Figura 70 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.3$ s .....	72
Figura 71 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.4$ s .....	73
Figura 72 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.5$ s .....	73
Figura 73 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.6$ s .....	74
Figura 74 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a $t = 0.6$ s .....	74

# 1. Introduzione

Da sempre, l'uomo ha sentito la necessità di provvedere alla raccolta di acqua per diversi scopi, prima per usi irrigui e potabili e, più recentemente, per la produzione di energia o per il controllo delle piene. Per tale motivo, tutte le società organizzate hanno sentito la necessità di imbrigliare l'acqua dei fiumi, deviandone il corso o creando dighe per alimentare acquedotti e canali di irrigazione. Questi sbarramenti artificiali possono essere suddivisi, a seconda dell'altezza dello sbarramento o dei metri cubi invasati, in grandi o piccoli invasi. Se lo sbarramento ha un'altezza maggiore di 15 metri o il volume invasato è maggiore di 1.000.000 di metri cubi si parla di grandi invasi, in caso contrario, di piccoli sbarramenti. In Italia, i primi sono di competenza statale, mentre i secondi sono di competenza regionale.

Entrambi i tipi di dighe, in passato, sono stati protagonisti di fallimenti tecnici con le gravi conseguenze di perdite di vite umane ed ingenti danni all'ambiente circostante; questo ha generato serie preoccupazioni riguardo la sicurezza delle dighe in tutto il mondo [1]. Se non gestito correttamente, qualunque tipo di diga comporta notevoli rischi per la sicurezza [2]. Tuttavia, guasti alle piccole dighe sono molto più probabili e, pertanto, la rottura di uno di questi invasi è molto più frequente rispetto a quello di una grande diga [1]. I piccoli invasi, molto più numerosi delle grandi dighe, servono per scopi irrigui o per rifornire le stazioni sciistiche e, talvolta, sono posizionati in serie. In tutta Italia sono presenti migliaia di piccoli invasi. Il solo Piemonte attualmente ha censito oltre 800 dighe di competenza regionale.

Questi invasi, essendo di ridotte dimensioni e spesso realizzati anni or sono, non sono assoggettati a tutti quei controlli e verifiche fatti regolarmente, invece, per le grandi dighe in modo da garantirne implicitamente la sicurezza. Per far sì che i proprietari di tali invasi controllino e monitorino le dighe secondo una pratica accettabile tale che la risorsa idrica sia conservata in modo sicuro, esiste una chiara necessità di supervisione per le dighe private e/o agricole presenti nei bacini e pertanto una politica appropriata che richieda il sostegno della legislazione [3]. A tal proposito, si inserisce il progetto ALCOTRA-RESBA, avviato nel 2014, che ha come obiettivo quello di approfondire la conoscenza dei rischi legati alla presenza delle dighe sul territorio transfrontaliero italo-francese e migliorare la prevenzione, la comunicazione e la gestione della sicurezza dei territori a valle degli sbarramenti tramite adeguate procedure di protezione civile. Le dighe e gli sbarramenti transfrontalieri di montagna sono piccoli invasi, alcuni dei quali ormai vetusti, che presentano numerose criticità. Infatti, richiedono metodologie di progettazione corretta, un costante monitoraggio

e un'attenta valutazione della vulnerabilità rispetto al rischio idrogeologico e sismico. Per la valutazione del rischio derivante dalla rottura della diga è necessario conoscere le caratteristiche della stessa, della zona a valle dell'invaso e le caratteristiche dell'onda di dam-break. Tra gli obiettivi di RESBA, vi è la necessità di valutare la vulnerabilità e il rischio a valle della diga, di coinvolgere e sensibilizzare la popolazione esposta al rischio di collasso e, infine, lo sviluppo di innovativi sistemi di monitoraggio.

Il presente lavoro di tesi si pone come obiettivo quello di indagare l'evoluzione dell'onda di dam-break bidimensionale mediante la valutazione del campo di velocità misurato durante esperimenti condotti nel laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche 'Giorgio Bidone' del Politecnico di Torino. Nello specifico, i contributi della tesi sono stati i seguenti:

- Progettazione di un ambiente sperimentale per lo studio dell'evoluzione dell'onda di dam-break
- Misurazione e analisi delle velocità con ausilio di particelle neutre
- Confronto modello sperimentale ottenuto mediante Particle Tracking Velocimetry e il modello teorico di *Ritter*.

Il resto della tesi è articolato in quattro capitoli: nel primo vengono descritte, in breve, le modalità di collasso di una diga e il meccanismo di propagazione dell'onda di piena. Inoltre, sono brevemente riassunti i risultati di diversi studi sperimentali inerenti al dam-break in letteratura. Nel secondo capitolo viene descritto il metodo PTV (Particle Tracking Velocimetry) e l'algoritmo alla base del software di PTVlab utilizzato per l'elaborazione dei video realizzati. Nel terzo capitolo sono descritti nel dettaglio il setup sperimentale utilizzato per le prove, le modalità di esecuzione degli esperimenti ed i risultati ottenuti. Il quarto capitolo è dedicato alle modalità di processamento dati e ai risultati ottenuti. Nella quinta sezione sono presenti le conclusioni ed eventuali lavori futuri.

## 2. Il Dam-Break

Lo studio del dam-break, di tutto ciò che concerne il collasso di una diga e le modalità di propagazione della derivante onda di piena, è un problema su cui diversi studiosi hanno concentrato la loro attenzione. In questa sezione viene brevemente riportata la trattazione relativa alla formazione della breccia in una diga e alcune soluzioni teoriche relative alla propagazione di un'onda di dam-break.

### 2.1 Formazione della breccia

Le caratteristiche dell'onda di dam-break sono una conseguenza delle modalità di collasso della diga. Pertanto, è necessario fare una distinzione tra i diversi tipi di collasso, i quali dipendono dal tipo di diga e dalla causa del collasso stesso. Una diga può collassare improvvisamente o gradualmente. Il crollo istantaneo della diga è il caso peggiore, poiché tutto il volume di acqua contenuto nella diga va a formare l'onda di piena che si propaga a valle. Proprio per questo motivo, è il caso che viene adottato negli studi sperimentali di dam-break. L'ipotesi di rottura istantanea è realistica per le dighe in calcestruzzo mentre, per quanto riguarda le dighe in terra, non risulta adattabile. Nelle dighe in terra, infatti, il collasso avviene gradualmente in un determinato periodo di tempo e, l'onda risultante è nettamente diversa da quella formatasi per collasso istantaneo.

In letteratura, è possibile trovare diversi studi riguardo le modalità di formazione della breccia in una diga.

#### Price

Gli studi eseguiti da Price hanno condotto allo sviluppo di una formula semi-empirica con la quale è possibile calcolare la massima portata dovuta alla formazione di una breccia trapezoidale in una diga.

La formula può essere scritta come segue:

$$Q_{max} = \frac{8}{27} \cdot g^{\frac{1}{2}} \cdot H_0^{\frac{3}{2}} \cdot (0,4b + 0,6T) \quad (1)$$

dove:

- $Q_{max}$  è la portata massima

- $g$  l'accelerazione di gravità
- $H_0$  l'altezza d'acqua iniziale nel serbatoio di monte
- $b$  la larghezza della breccia alla base
- $T$  la larghezza della breccia all'altezza iniziale  $H_0$

### Wetmore e Fread

La portata massima può essere determinata anche mediante la formula di Wetmore e Fread. Essa deriva dalla formula dello stramazzo a larga soglia e permette di stimare la portata a diversi istanti temporali:

$$Q_{max} = 3.1 \cdot W \cdot \left[ \frac{c}{t + \frac{c}{\sqrt{H}}} \right]^3 \quad (2)$$

in cui:

- $Q_{max}$  è la portata massima, per la cui stima è necessaria la massima larghezza della breccia al tempo minimo
- $W$  la larghezza media della breccia espressa in piedi
- $c$  una costante arbitraria pari a  $c = 23.4 \cdot \frac{A}{W}$
- $t$  il tempo di formazione della breccia espresso in ore
- $H$  l'altezza d'acqua al momento del collasso espressa in piedi
- $A$  è l'area superficiale dell'invaso in acri.

### Fread

I suoi studi sperimentali hanno portato ad una formula empirica utile per la stima del tempo necessario alla formazione di una breccia:

$$t \leq \frac{1008 \cdot A}{W \cdot H^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

in cui:

- $t$  è il tempo di formazione della breccia espresso in secondi

- $A$  è l'area superficiale dell'invaso espressa in acri
- $W$  è la larghezza media della breccia espressa in piedi
- $H$  l'altezza d'acqua al momento del collasso espressa in piedi.

Questa formula ha dei limiti nell'applicabilità in quanto richiede la conoscenza della larghezza della breccia  $W$  che risulta difficile da conoscere.

### Singh

I suoi studi sperimentali, effettuati raccogliendo i dati di 52 crolli di invasi, hanno portato alla determinazione delle caratteristiche di una breccia. Essa si presenta, solitamente, come di seguito:

- forma trapezoidale
- rapporto medio tra la larghezza alla sommità e quella alla base pari a 1.29
- angolo di inclinazione dei bordi della breccia compreso tra 40° e 50°
- il rapporto tra la larghezza sommitale della breccia  $B$  e la sua profondità  $d$  varia linearmente in funzione del rapporto  $\frac{H_s}{H_d}$ , dove  $H_s = V_s^{\frac{1}{3}}$  e rappresenta l'altezza d'acqua equivalente funzione del volume di acqua  $V_s$  immagazzinato nell'invaso e  $H_d$  l'altezza della diga

Il tempo di collasso è variabile tra un'ora e le dodici ore, anche se nella maggior parte dei casi la diga è collassata dopo tre ore.

In questo studio, è stata individuata una correlazione tra  $Q_{max}$  e  $H_d$  come segue:

$$\frac{Q_{max}}{(g \cdot B_a^2 \cdot H_d^3)^{1/2}} = 1.25 \cdot 10^{-2} \frac{H_s}{H_d} \quad (4)$$

L'equazione 5 è valida solo nel caso in cui siano trascurabili le portate entranti e uscenti dagli sfioratori e dagli scarichi della diga rispetto alle portate uscenti della breccia. Questa ipotesi è comunque generalmente rispettata nel caso di collasso di una diga con formazione di una breccia.

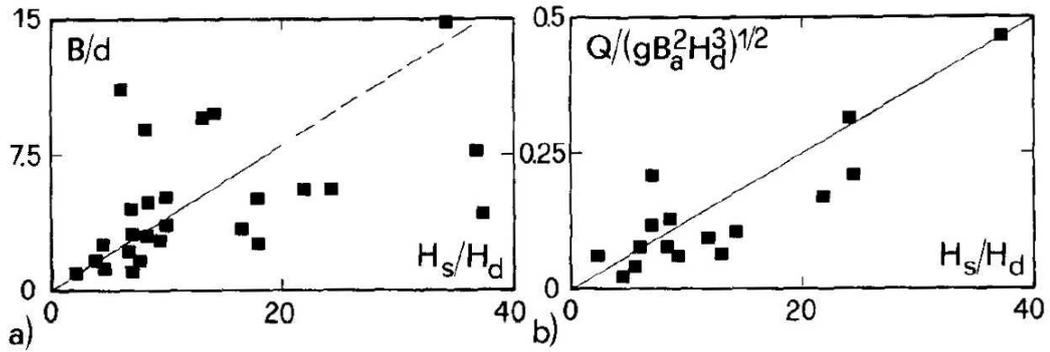


Figura 1 - Correlazioni empiriche  $\frac{H_s}{H_d}$  (a) e tra  $Q_{max}$  e  $H_d$  (b)

Singh ha, inoltre, proposto un modello analitico per descrivere la formazione di una breccia in una diga, partendo dall'equazione di bilancio del volume d'acqua fuoriuscito dall'invaso:

$$A_s(H) \frac{dH}{dt} = Q_b \quad (5)$$

dove:

- $A_s$  è l'area superficiale del serbatoio
- $H$  l'altezza di acqua
- $t$  il tempo
- $Q_b$  la portata effluente dalla breccia pari a  $Q_b = u \cdot A_b$

L'erosione della diga è stata descritta dal rapporto  $\frac{dz}{dt}$  funzione della velocità dell'acqua sulla breccia:

$$\frac{dz}{dt} = -\alpha u^\beta \quad (6)$$

in cui:

- $Z$  è la quota del fondo della breccia
- $u$  è la velocità media dell'acqua sulla breccia data da  $u = [2 \cdot g \cdot C_d^2 \cdot (h - z)]^2$  con  $C_d$  coefficiente di deflusso

- $\alpha$  e  $\beta$  sono due coefficienti

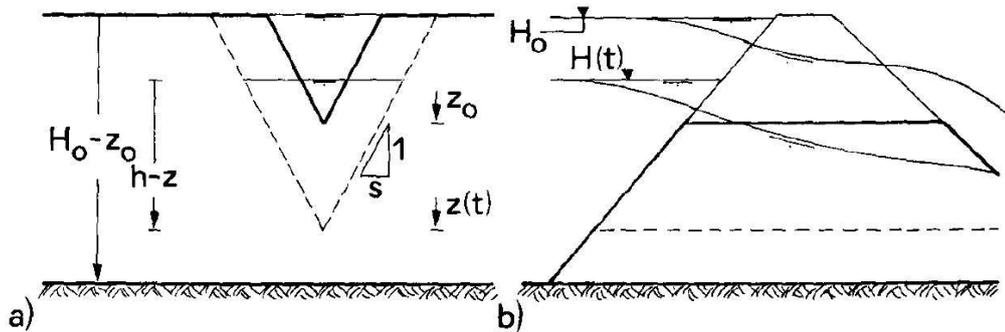


Figura 2 - Schema della breccia

Eliminando il differenziale rispetto al tempo si ottiene l'equazione di  $H(z)$ :

$$\frac{dH}{dz} = \alpha^{-1} \cdot \frac{A_b}{A_s} [2 \cdot g \cdot C_d^2 \cdot (h - z)]^{(1-\beta)/2} \quad (7)$$

Singh ha applicato questa equazione ad una breccia di forma triangolare, con le seguenti condizioni iniziali:  $H = H_0$  e  $z = z_0$  all'istante iniziale  $t = 0$ , e con i parametri adimensionali  $H = h/h_0$ ,

$$Z = z/z_0 \text{ e le costanti } \gamma = h_0/z_0 > 1 \text{ e } C^2 = \frac{\alpha \cdot A \cdot (2 \cdot g \cdot C_d^2 \cdot h_0)^{\frac{\beta-1}{2}}}{s \cdot h_0^2}:$$

Quindi, si ha:

$$1 + \gamma \cdot \frac{dH}{dz} = C^{-2} \cdot H^{\left(\frac{5-\beta}{2}\right)} \quad (8)$$

Per  $H(Z = 1) = 1$  e nel caso lineare e con  $\beta = 1$ , la soluzione è la seguente:

$$(9)$$

$$Z(H) = 1 - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot C^2 \cdot \left[ \frac{C+H}{C-H} \cdot \frac{C-1}{C+1} \right]$$

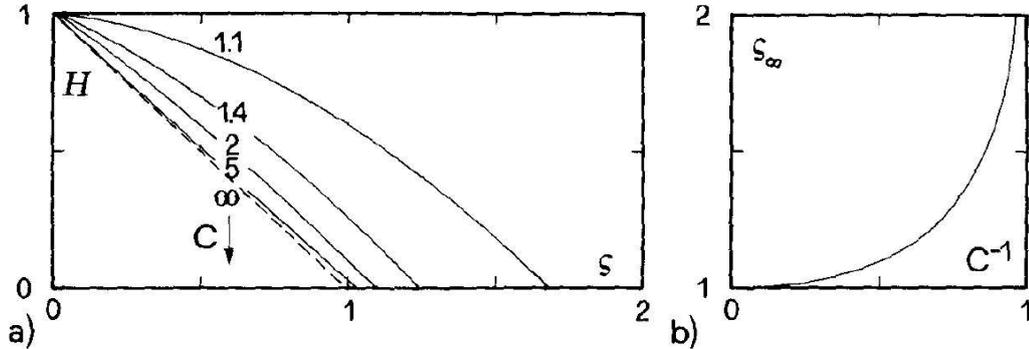


Figura 3 - Relazioni tra  $H(Z)$  e  $Z$  per diversi valori di  $C$  (a) e livello finale della breccia  $Z_{\infty}$  (b)

Dalla figura 3(a) si nota che per  $C > 2$  l'effetto di  $C$  è poco significativo. In figura 3(b) è riportato, in forma implicita, la profondità finale della breccia  $Z_{\infty}$  in funzione di  $C^{-1}$ .

La soluzione dipende dal coefficiente di erosione  $\alpha$ , che per  $\beta = 1$  è stimato come:

$$\alpha = 0,15 \cdot (H_s - H_d)^2 \quad (10)$$

Questo modello, è stato applicato da Singh a diversi casi di collasso di dighe con formazione di una breccia.

## 2.2 La formazione dell'onda

La propagazione dell'onda di piena è uno dei fenomeni di moto vario più importanti nelle correnti a pelo libero.

Una corrente a superficie libera, o a pelo libero, ha una superficie di contorno a contatto con l'atmosfera, la quale pertanto risulta una superficie isobarica.

Poiché essa è delimitata dall'atmosfera assume una forma variabile nello spazio e nel tempo. Nel moto vario, le grandezze di interesse, come l'altezza liquida, la portata e la velocità media variano lungo l'ascissa del corso d'acqua e nel tempo. Il moto di un'onda di piena può essere descritto attraverso le equazioni di De Saint-Venant, le quali permettono di

semplificare notevolmente le equazioni di Navier Stokes. L'utilizzo delle equazioni di De Saint-Venant prevede l'introduzione di alcune ipotesi:

- fluido incomprimibile
- fluido in moto unidirezionale
- distribuzione delle pressioni idrostatica
- pendenza del fondo trascurabile

Le equazioni che governano il fenomeno sono il principio di conservazione della massa (equazione di continuità) e il principio della conservazione della quantità di moto (equazione dinamica).

Le equazioni sono:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(vA)}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = i_f - j \quad (12)$$

dove:

- $x =$  *asse longitudinale di propagazione*
- $t =$   
*coordinata temporale, preso come riferimento l'istante di rottura della diga*
- $A =$  *area di deflusso*
- $j =$  *perdite d carico per unità di lunghezza*
- $i_f =$  *pendenza dell'alveo*

Assumendo di avere un canale a sezione rettangolare la cui area risulta essere  $A = b \cdot h$ , si ottengono le seguenti relazioni:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = i_f - j \quad (14)$$

### 2.2.1 Alveo asciutto

La teoria delle linee caratteristiche consente la modellazione analitica dell'onda di dam-break nelle due condizioni diametralmente opposte:

- alveo di valle perfettamente asciutto (“*dry conditions*”);
- alveo di valle caratterizzato da un valore finito del tirante idrico (“*wet conditions*”).

In seguito, viene discussa unicamente la “*dry conditions*” poiché è la condizione secondo la quale sono stati condotti gli esperimenti relativi al seguente lavoro di tesi.

Nel caso di alveo a valle asciutto prima del crollo dello sbarramento, la soluzione più semplice delle equazioni di De Saint-Venant è quella proposta da Ritter nel 1892. Questa soluzione prevede siano soddisfatte le seguenti ipotesi di base:

- $i_f - j = 0$  poiché  $i_f = j$
- *estensione invaso infinita verso monte*
- *alveo prismatico*
- *altezza di acqua nell'invaso al momento iniziale pari a  $y_0$*

Ritter risolse il sistema di equazioni di De Saint Venant trasformando il sistema alle derivate parziali in derivate totali mediante l'utilizzo delle linee caratteristiche, dove vale la relazione:

$\frac{dx}{dt} = \lambda$ , cioè linee che nel piano  $x - t$  hanno pendenza pari a  $\lambda$ .

Le equazioni alle derivate parziali:

$$a_{11} \frac{\partial u_1}{\partial x} + a_{12} \frac{\partial u_2}{\partial x} + b_{11} \frac{\partial u_1}{\partial t} + b_{12} \frac{\partial u_2}{\partial t} + d_1 = 0 \quad (15)$$

$$a_{21} \frac{\partial u_1}{\partial x} + a_{22} \frac{\partial u_2}{\partial x} + b_{21} \frac{\partial u_1}{\partial t} + b_{22} \frac{\partial u_2}{\partial t} + d_2 = 0 \quad (16)$$

Vengono trasformate in un sistema alle derivate totali di seguito riportate:

$$A_{11} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_1 + A_{12} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) u_2 + D_1 = 0 \quad (17)$$

$$A_{21} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \right) u_1 + A_{22} \left( \lambda \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \right) u_2 + D_2 = 0 \quad (18)$$

in cui:

- $\lambda \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}$  equivale alla derivata totale  $\frac{d}{dy}$  lungo le linee caratteristiche

Il passaggio alle derivate ordinarie è valido solamente lungo le linee caratteristiche e il sistema può essere riscritto come segue:

$$A_{11} \frac{du_1}{dy} + A_{12} \frac{du_2}{dy} + D_1 = 0 \quad (19)$$

$$A_{21} \frac{du_1}{dy} + A_{22} \frac{du_2}{dy} + D_2 = 0 \quad (20)$$

Per applicare il metodo alle linee caratteristiche al caso in esame le equazioni di De Saint-Venant sono state riscritte nella forma seguente:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

$$v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} = g(i_f - j) \quad (22)$$

Le equazioni (21) e (22) ci permettono di ricavare le matrici dei coefficienti  $a$  e  $b$ :

$$a = \begin{bmatrix} y & u \\ u & g \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Si indica con  $T$  la matrice di trasformazione così definita:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Il passaggio dal sistema alle derivate parziali a quello alle derivate totali è facilmente ottenibile mediante il prodotto tra una matrice  $T$ , equazione (24), e il sistema alle derivate

parziali. Vengono uguagliati i termini omologhi al fine di ottenere i valori dei parametri del sistema trasformato:

$$A_{11} \cdot \lambda = t_{11} \cdot a_{11} + t_{12} \cdot a_{21} \quad A_{11} \cdot \lambda = t_{11} \cdot b_{11} + t_{12} \cdot b_{21} \quad (25)$$

$$A_{12} \cdot \lambda = t_{11} \cdot a_{12} + t_{12} \cdot a_{22} \quad A_{12} \cdot \lambda = t_{11} \cdot b_{12} + t_{12} \cdot b_{22} \quad (26)$$

$$A_{21} \cdot \lambda = t_{21} \cdot a_{11} + t_{22} \cdot a_{21} \quad A_{21} \cdot \lambda = t_{21} \cdot b_{11} + t_{22} \cdot b_{21} \quad (27)$$

$$A_{22} \cdot \lambda = t_{21} \cdot a_{21} + t_{22} \cdot a_{22} \quad A_{22} \cdot \lambda = t_{21} \cdot b_{21} + t_{22} \cdot b_{22} \quad (28)$$

Infine, è possibile giungere a un sistema matriciale uguagliando i termini  $A_{ij}$  nelle equazioni sopra citate:

$$Ta = \lambda Tb \quad (29)$$

Nel sistema precedente sono presenti le seguenti due incognite:

- la matrice  $T$
- il valore  $\lambda$

Poiché il numero delle incognite è superiore al numero delle equazioni a disposizione il sistema non è risolvibile.

Per ovviare questo problema si impone che i termini non diagonali della matrice siano uguali:

$$t_{12} = t_{21} \quad (30)$$

Riscrivendo le equazioni di prima si arriva ad un sistema omogeneo in  $t$ ,  $a$ , e  $b$ , che si risolve imponendo che sia nullo il determinante della matrice:

$$\begin{bmatrix} a_{11} - \lambda b_{11} & a_{21} - \lambda b_{21} \\ a_{12} - \lambda b_{12} & a_{22} - \lambda b_{22} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Applicando il metodo alle equazioni di De Saint-Venant si ottiene:

$$\begin{bmatrix} y & v - \lambda \\ v - \lambda & g \end{bmatrix} \quad (32)$$

Calcolando il determinante della matrice (32) e ponendolo uguale a zero si ricava il valore di  $\lambda$ :

$$yg - (v - \lambda)^2 = 0 \rightarrow \lambda = v \mp \sqrt{gy} = v \mp c \quad (33)$$

dove:

- $c = \sqrt{gy}$  è la celerità dell'onda.

Nel caso in cui si trovino due valori distinti di  $\lambda$ , il sistema di equazione è iperbolico e può essere trasformato. Noto il valore di  $\lambda$ , si ricavano i termini della matrice di trasformazione  $T$  dal sistema  $Ta = \lambda Tb$ :

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & y \\ -c & y \end{bmatrix} \quad (34)$$

Noti i parametri di trasformazione contenuti nella matrice  $T$  è possibile riscrivere il sistema trasformato, sostituendo poi nelle espressioni ottenute i termini delle equazioni di De Saint-Venant e dividendo per  $y$  si ottengono le seguenti equazioni:

$$\left( (v - c) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) v + \frac{c}{y} \left( (v - c) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) y - g(i_f - j) = 0 \quad (35)$$

$$\left( (v + c) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) v - \frac{c}{y} \left( (v + c) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) y - g(i_f - j) = 0 \quad (36)$$

Si nota che:

$$\frac{c}{y} \frac{dy}{dx} = \frac{c}{gy} \frac{d(gy)}{dx} = \frac{c}{c^2} \frac{d(c^2)}{dx} = \frac{2dc}{dx} 2 \left[ (v \pm c) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right] c \quad (37)$$

Sostituendo nel sistema si ottiene:

$$\left( (v \mp c) \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \right) (v \pm 2c) = g(i_f - j) \quad (38)$$

L'approccio fin qui utilizzato è valido per qualsiasi caso a cui si possano applicare le ipotesi delle equazioni di De Saint-Venant; la soluzione di Ritter, come già detto, prevede un canale

rettangolare e perdite di carico  $if = j$ , per cui si annulla il termine al secondo membro dell'equazione. Ponendo  $2c = w$  si arriva alla soluzione:

$$\frac{d(v \pm 2c)}{dt} = \frac{d(v \pm w)}{dt} = 0 \quad (39)$$

La (39) risulta valida lungo le linee caratteristiche:

$$\frac{dx}{dt} = v \mp c \quad (40)$$

L'equazione precedente definisce le linee caratteristiche nel piano  $x - y$ ; lungo queste linee risulta costante il termine  $v \pm 2c$ .

La soluzione di Ritter prevede l'applicazione della soluzione alle linee caratteristiche delle equazioni di De Saint-Venant ad un canale rettangolare orizzontale, la cui zona di monte, con altezza d'acqua  $y_0$ , è separata dalla zona di valle asciutta mediante una paratoia. L'innalzamento della paratoia permette lo spostamento verso valle dell'acqua contenuta nel serbatoio di monte. L'andamento dell'onda così generata si può ricavare dalle equazioni delle linee caratteristiche.

Muovendosi lungo la linea  $\frac{dx}{dt} = v - c$  si avrà  $v + 2c = 2c_0$ .

A ridosso della paratia, che si muove con velocità  $v_d$ , di conseguenza, si può scrivere  $v_d + 2c = 2c_0$ . Si nota ora che se  $v_d = 2c_0$ , allora  $c = 0$  e siccome  $c_0 = \sqrt{gy_0}$  allora  $y = 0$ , il che significa che se  $v_d \geq 2c_0$  l'altezza d'acqua a ridosso della paratia è pari a 0. In pratica, se  $v_d \geq 2c_0$  la massa d'acqua in movimento non 'vede' la paratoia, e ci si riconduce al caso di rimozione istantanea della paratia.

Definita la velocità di spostamento della perturbazione verso monte, che è indipendente dalla velocità della paratia e non cambia nel caso di istantanea rimozione, e definite le condizioni per cui si considera istantanea la rimozione della paratia, non resta che trovare, per ogni punto della massa d'acqua, i valori di  $c$  (da cui si ricava  $y$ ) e  $v$ .

Nell'istante iniziale, prima del crollo completo ed istantaneo dello sbarramento, si ha  $v = 0$  e  $c_0 = \sqrt{gy_0}$ . Fissata l'origine dell'asse delle ascisse nella sezione dello sbarramento ed il verso positivo nella direzione di valle, l'onda si propaga con celerità  $c = v - \sqrt{gy}$ , per la quale risulta:

$$v + 2\sqrt{gy} = cost = 0 + 2\sqrt{gy_0} \quad (41)$$

da cui, ricordando che  $c = v - \sqrt{gy}$ , risulta:

$$v = 2\sqrt{gy_0} - 2\sqrt{gy} \quad (42)$$

Sostituendo questo risultato nell'equazione della prima famiglia di linee caratteristiche

$\frac{dx}{dt} = v - c$ , il che equivale a muoversi lungo la linea stessa, si ottiene:

$$\frac{dx}{dt} = 2c_0 - 3c \quad (43)$$

Integrando questa espressione si ottiene  $3c = 2c_0 - \frac{x}{t}$ , e quindi la celerità risulta pari a:

$$c = \frac{1}{3}(2c_0 - \frac{x}{t}) \quad (44)$$

Allo stesso modo si può ricavare la velocità. Ponendo  $c = c_0 - \frac{v}{2}$  e sostituendo

nell'equazione della linea si ottiene  $\frac{dx}{dt} = v - c$  si ottiene  $\frac{dx}{dt} = \frac{3}{2}v - c_0$  e quindi integrando si ricava l'espressione di  $u$ :

$$v = \frac{2}{3}(c_0 + \frac{x}{t}) \quad (45)$$

Per ricavare queste equazioni si sono utilizzate solo le linee caratteristiche della prima famiglia, ma si sarebbero potuti ottenere gli stessi risultati seguendo l'altra famiglia di linee.

Se si ricava l'altezza d'acqua  $y$  da queste equazioni si nota che la superficie libera è, in ogni istante, una parabola, come si nota da figura 4.

Secondo questa soluzione nel punto in cui si trova originariamente la paratia,  $x = 0$ , l'altezza è costante e pari a  $h(x = 0) = \frac{4}{9}h_0$  la velocità è costante  $v(x = 0) = \frac{2}{3}c_0$ . Questi valori rimangono costanti fino a quando l'onda negativa raggiunge i limiti del serbatoio di monte.

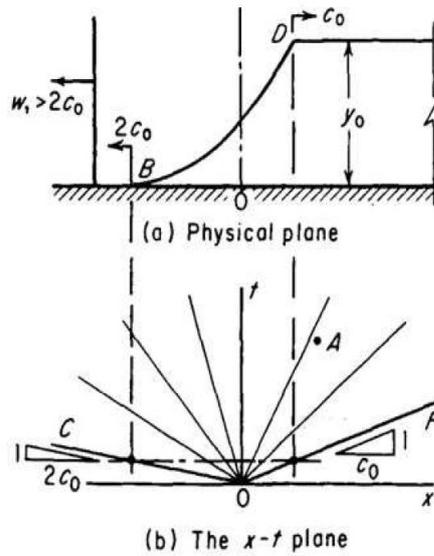


Figura 4-Andamento della superficie libera nel piano fisico (a) e linee caratteristiche nel piano  $x,t$  (b) con alveo asciutto

I risultati ricavati da Ritter, partendo dalle equazioni di De Saint-Venant, non sono validi nei momenti immediatamente successivi alla rimozione della paratoia poiché la distribuzione delle pressioni non è idrostatica.

Si introducono le grandezze adimensionalizzate rispetto all'altezza dell'acqua a monte dello sbarramento  $y_0$ :

$$X = \frac{x}{y_0} \quad (46)$$

$$Y = \frac{y}{y_0} \quad (47)$$

$$T = t \sqrt{\frac{g}{y_0}} \quad (48)$$

$$U = \frac{v}{\sqrt{y_0 g}} \quad (49)$$

$$Q = \frac{q}{\sqrt{y_0^3 g}} \quad (50)$$

la soluzione di Ritter può così essere riscritta in forma adimensionalizzata:

$$Y = \left[ \frac{1}{3} \left( 2 - \frac{X}{T} \right) \right]^2 \quad (51)$$

$$U = \frac{2}{3} \left( 1 + \frac{X}{T} \right) \quad (52)$$

$$Q = \frac{2}{27} \left( 1 + \frac{X}{T} \right) \left( 2 - \frac{X}{T} \right)^2 \quad (53)$$

### 2.3 Stato dell'arte

#### S. Soares-Frazão & Y. Zech, 2007

Lo scopo di questo lavoro è quello di fornire i dati sull'influenza di diversi ostacoli artificiali quali ponti, strade, edifici e naturali come argini su un'onda di dam-break. Questo studio valuta, quindi, tale influenza mediante un singolo edificio posto a valle della paratoia che simula la diga. Il collasso della diga viene simulato alzando rapidamente la paratoia, con un tempo di apertura di 0.23 s, in modo da rendere il fenomeno istantaneo. Esso non è allineato né con la direzione flusso né si trova al centro del canale. Il canale, utilizzato come set-up, è lungo 36 m e la sezione rettangolare diventa poi trapezoidale. Il serbatoio di monte è separato dalla valle mediante una paratoia. Il coefficiente di Manning risulta noto e pari a:  $n = 0.010 \text{ sm}^{-\frac{1}{3}}$ .

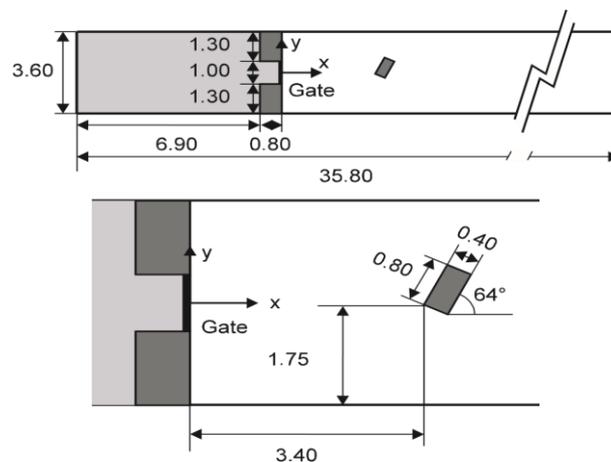


Figura 5 – Dimensioni [m] del canale e dell'ostacolo

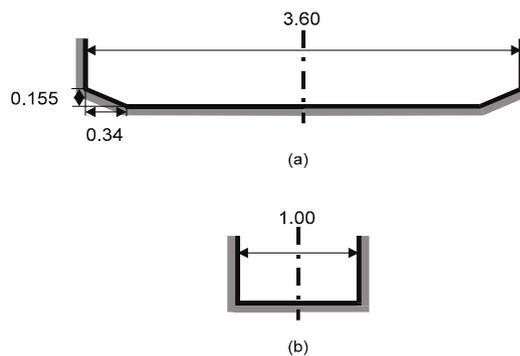


Figura 6 – Sezione trasversale canale (a) e serbatoio (b)

Le condizioni iniziali sono date da un'altezza d'acqua nel serbatoio di monte pari a  $h_0 = 0.40$  m e un sottile strato di acqua all'interno del canale, equivalente a 0.02 m.

L'estremità a monte del canale è un muro chiuso mentre in quella di valle vi sono dei sedimenti i quali fanno sì che si venga a creare una combinazione di stramazzi e muri. Questa condizione non influenza il flusso dopo i primi 30 secondi dall'inizio del dam-break, per cui può essere imposta nei modelli numerici. Le misure del livello di acqua e della velocità nel tempo sono state misurate mediante calibri resistivi e Acoustic doppler velocimeters (ADV). Poiché entrambi i dispositivi potrebbero risultare invadenti la velocità viene calcolata anche con tecniche di velocimetria digitale, mediante il metodo di Voronoi. Viene utilizzata una telecamera con un frame rate di 38 s posta al di sopra del canale in modo da catturare il flusso mediante l'utilizzo di traccianti. Le velocità ottenute con i diversi metodi di misurazione sono state poi confrontate. Durante questa campagna sperimentale, è stato anche possibile mostrare come le tecniche di immagine digitale possono completare i dati a disposizione. In effetti, l'intero campo può essere coperto, e il metodo è privo di qualsiasi intrusione che possa influire sulla misurazione.

### Soares-Frazão, 2007

In questo studio è stata studiata la propagazione delle onde di dam-break sul letto asciutto in presenza di una pendenza del fondo. Per le misurazioni sono stati utilizzati due tipi di dispositivi al fine di ottenere l'evoluzione della profondità dell'acqua. Sono stati utilizzati tre misuratori del livello dell'acqua e delle fotocamere digitali (25 fps), con le quali il flusso è stato filmato attraverso le pareti in vetro del canale. Una procedura automatizzata è stata progettata per misurare la profondità dell'acqua dalle immagini digitali. Il set-up

sperimentale è costituito da un canale a sezione rettangolare lungo 5,6 m e largo 0,5 m, con pareti di vetro. Il serbatoio a monte si estende per 2,39 m ed è inizialmente riempito con 0,111 m di acqua a riposo. A valle della paratoia, il canale è asciutto in condizioni iniziali. La paratia può essere tirata su rapidamente per mezzo di un sistema di contrappeso e puleggia che consente di simulare una rottura istantanea della diga.

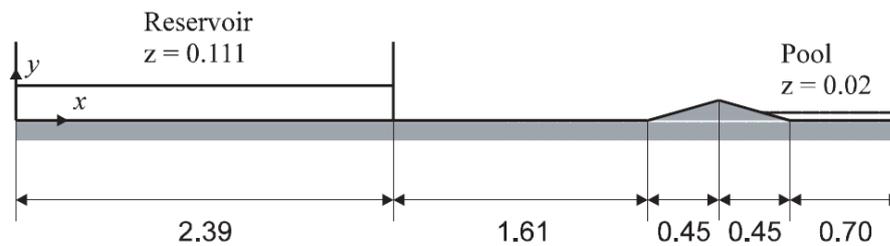


Figura 7 – Setup sperimentale nelle condizioni iniziali [m]

Grazie alla buona ripetibilità degli esperimenti è possibile combinare le immagini ottenute da diversi esperimenti in modo da formare un profilo d'acqua continuo. La misurazione con indicatori di livello dell'acqua forniscono una misurazione puntuale; è una tecnica ampiamente utilizzata ma presenta lo svantaggio di disturbare il flusso localmente. La seconda tecnica utilizzata, di immagine digitale è non intrusiva e ha mostrato di fornire risultati accurati e preziosi. Tuttavia, la sua applicabilità è condizionata dal fatto che il flusso può essere visto attraverso le pareti laterali del canale. Quindi, è applicabile solo per i flussi monodimensionali gestiti da una tale tecnica, poiché è disponibile solo una visione laterale. Tuttavia, la tecnica di imaging digitale offre grandi prestazioni potenziale nella caratterizzazione del flusso, principalmente a causa del suo non intrusività.

### **Mario Oertel a & Daniel B. Bung, 2011**

Gli autori in questo studio hanno confrontato i risultati delle onde di dam-break bidimensionale ottenute dal modello fisico e numerico con l'approccio analitico. Quindi i risultati ottenuti dalla Particle Image Velocimetry (PIV) sono stati in seguito rapportati a quelli ottenuti con il metodo numerico di volume di fluido (VOF). Gli esperimenti sono stati condotti in un canale rettangolare lungo 22 m, largo 0,30 m e alto 0,50 m. Il fondo e le pareti sono di plexiglas con una rugosità superficiale  $k_s \sim 0,0015$  mm. È stata installata una paratoia a 9 m da valle, dividendo così il canale in due. Il fondo del canale a valle della paratoia nelle condizioni iniziali è completamente asciutto.

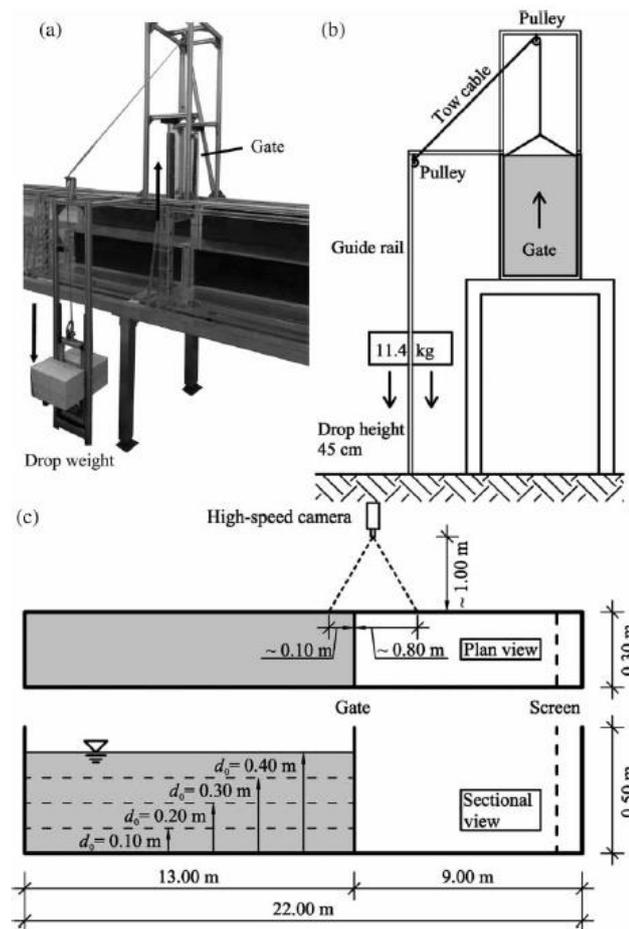


Figura 8 – Setup sperimentale

Per registrare l'onda di flusso è stata utilizzata una telecamera MotionScope M3. I test sono stati effettuati con una risoluzione della fotocamera di  $1280 \times 76$  pixel e una frequenza di campionamento di 1000 fps (otturatore tempo  $\sim 0.0009$  s). Per l'illuminazione sono state utilizzate luci alogene.

Per il calcolo della velocità si è utilizzato il codice MatPIV (Sveen) di MATLAB. I traccianti poliammidici, della stessa densità del fluido, si muovono principalmente lungo l'asse del canale durante il dam-break, in modo che gli effetti del muro possano essere trascurati. In due fotogrammi successivi, quindi in un incremento di tempo definito di 1ms, viene mostrato il movimento dei traccianti all'interno dell'area di osservazione. Mediante un algoritmo di cross-correlation si determina il campo di velocità. Le correlazioni sono state eseguite con una finestra di interrogazione variabile di dimensioni  $32 \times 32$  pixel e  $16 \times 16$  pixel e una sovrapposizione del 50%. Per ridurre il tempo di calcolo, aree che non sono parte del campo di flusso sono state mascherate. Il metodo VOF sviluppato da Hirt and Nichols (1981) è stato

applicato. Il codice commerciale FLOW-3D, versione V9.4, è stato utilizzato per simulare le onde di rottura della diga. La differenza principale tra il modello fisico e numerico si ha per la velocità anteriore dell'onda. A causa dell'attrito e della viscosità del fondo, la velocità si riduce in funzione della sabbia inferiore equivalente altezza della rugosità  $k_s$  e viscosità dinamica  $\mu$ . Si è constatato che le simulazioni numeriche si adattano al dati del modello fisico della superficie d'onda e dei profili di velocità inclusi gli effetti della paratoia, mentre gli approcci analitici sono in grado di includerli.

**S. Cordero, G.O.D. Fasanella, D. Poggi, 2018**

In questo studio gli autori hanno condotto gli esperimenti in un canale prismatico a fondo liscio per indagare il processo iniziale di formazione delle onde di dam-break, il fronte d'onda positivo e la velocità locale dell'onda. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con la soluzione teorica di Ritter. Il lavoro propone degli esperimenti condotti con laser a basso costo, fili fluorescenti e fluorescenza indotta da laser planare (PLIF). Il canale artificiale nel quale sono state effettuate le sperimentazioni è lungo 10 m e largo 0.5 m. Il fondo e la parete destra sono stati rivestiti con PVC nero da 3 mm e la parete sinistra, invece, è di vetro. È stata posizionata una paratoia posta a 4 m di distanza verso valle dall'estremità superiore del canale. La paratoia è stata sollevata mediante un pistone ad aria compressa che può permettere alla stessa di raggiungere accelerazioni pari a 5g.

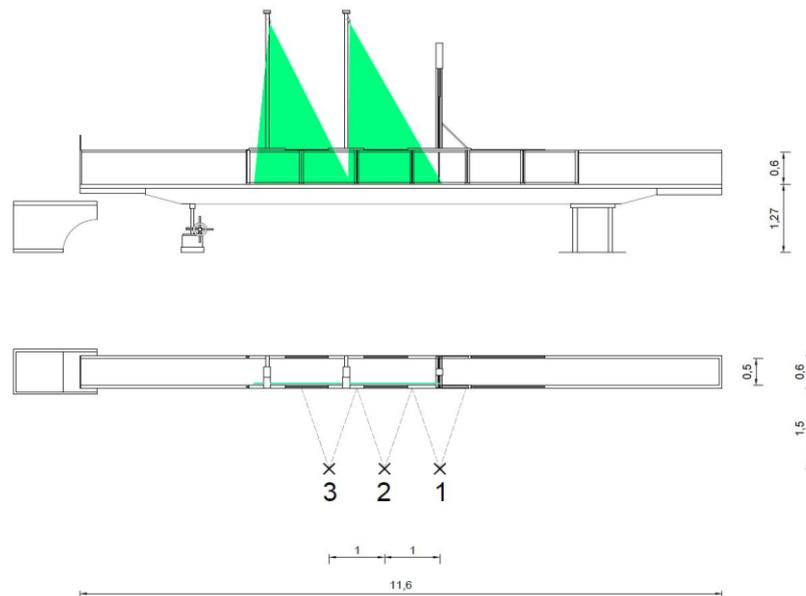


Figura 9 – Setup sperimentale

Per individuare chiaramente il profilo dell'onda, l'acqua è stata colorata mediante l'aggiunta di Rodamina. Sono stati utilizzati due laser a basso costo di potenza 300 mW, i quali emettono un piano di luce verde, longitudinale al canale. Le telecamere utilizzate per le registrazioni sono 3 SONY, le quali forniscono un campo visivo di circa 0,5 m di altezza e 3,0 m di lunghezza; esse registrano a 30 fps. Inoltre, per convalidare le immagini acquisite con le telecamere commerciali SONY, è stata utilizzata anche la videocamera scientifica ad alta risoluzione Andor Zyla (5.5 sCMOS Camera), il cui frame rate è pari a 100 fps. I frame acquisiti dalle tre telecamere SONY sono state unite in un'unica immagine. La posizione della superficie libera del flusso, in pixel, è stata determinata con la funzione di riconoscimento dei bordi. Il medesimo procedimento è stato reiterato automaticamente per ogni immagine estratta dai tre video e in seguito, le coordinate pixel calibrate sono state trasformate in valori metrici. Gli esperimenti sono stati condotti 5 volte per ogni altezza d'acqua e i valori temporali mostrano la ripetibilità dell'evento. I risultati ottenuti, sono stati confrontati con le soluzioni di Ritter.

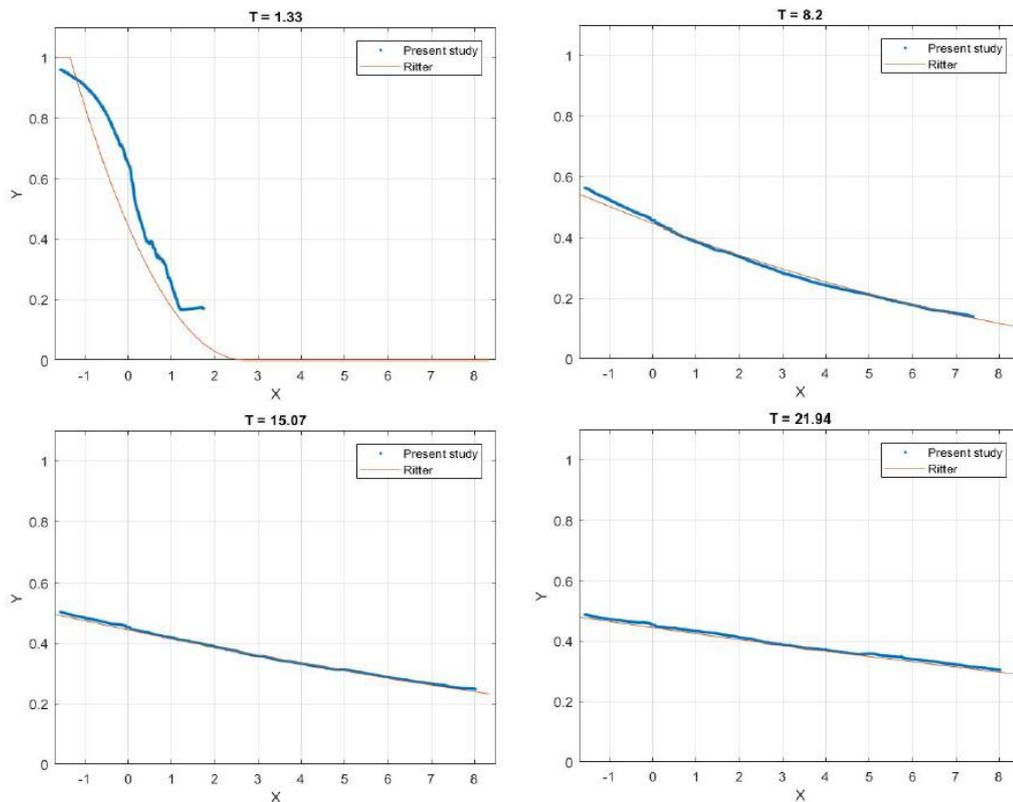


Figura 10 – Comparazione tra il profilo di Ritter e quello sperimentale

La concordanza dei risultati sperimentali con quelli ottenuti dall'equazioni di Ritter promette future campagne sperimentali con set-up a basso costo.

**Mattia Melis, Davide Poggi, Giovanni Oscar Domenico Fasanella, Silvia Cordero, and Gabriel G. Katul, 2019**

In questo studio, gli autori hanno eseguito esperimenti, simulanti un dam-break, in un canale a pendenza variabile sul cui fondo, a valle del serbatoio, sono state inserite macro-scabrezze distribuite uniformemente. È stato valutato l'effetto della resistenza idraulica sull'evoluzione del profilo superficiale  $h(x,y)$ . Questo studio è stato condotto utilizzando tre differenti modelli di attrito:

- la soluzione di Ritter, ovvero un modello senza attrito  $S_f = 0$
- $S_f$  descritto dalla formula di Manning con coefficiente di rugosità  $n$  costante
- formulazione di forza di resistenza distribuita, dove il coefficiente di drag  $C_d$  è modellato con delle equazioni standard per macro-scabrezze isolate, uniformemente distanziate e posizionate in modo sfalsato.

Quando si impone  $S_f = 0$ , la soluzione di Ritter riproduce bene il profilo dell'acqua misurato in assenza di macro-scabrezze. Tuttavia, sottostima il profilo misurato per una data velocità del fronte d'onda in presenza di macro-scabrezze. La più grande differenza tra profilo superficiale sperimentale e teorico è stata registrata immediatamente dopo il serbatoio ma prima dell'inizio della sezione vegetata. In questa posizione, la soluzione di Ritter sottostima il profilo superficiale di circa il 30%. Quando si rappresentano gli effetti della macro-scabrezza su  $S_f$  usando un attrito equivalente di parete (o Coulomb), si sceglie un coefficiente di Manning  $n$  ( $\approx 0,05$ ) costante, tarato in modo da confrontare la velocità del fronte d'onda misurata anche se le altezze non coincidono perfettamente. Il profilo della superficie ottenuto mediante l'utilizzo di Manning è dato da una legge di potenza in  $x$  con un esponente di sub-unità ad ogni istante  $t$ . Quando si modella  $S_f$  utilizzando una forza di trascinamento distribuita con  $C_d$  costante, l'accordo tra misurazioni e calcoli del modello viene soddisfatto mediante un coefficiente  $C_d$  superiore a 0,9. Il modello ha anche previsto che la forma del profilo di superficie dell'acqua vicino al fronte d'onda sia quasi lineare in  $x$  e possa essere teoricamente collegato a  $C_d$ . Un valore costante di  $C_d \approx 0.4$  è stato misurato e risulta molto più piccolo di  $C_d$  riportato per esperimenti di flusso uniforme con macro-

scabrezze sfalsate in corrispondenza dello stesso Numero di Reynolds. Ciò suggerisce che i meccanismi di riduzione della resistenza associati alla non uniformità, instabilità e transitorietà delle onde e disturbi del flusso sono più probabili rispetto agli effetti di resistenza convenzionale. Le implicazioni più ampie di questo lavoro evidenziano la necessità di nuove leggi di attrito che descrivono  $S_f$  in condizioni di flusso non disturbato, non uniforme, non stazionario oltre le rappresentazioni di attrito a parete o Coulomb convenzionali.

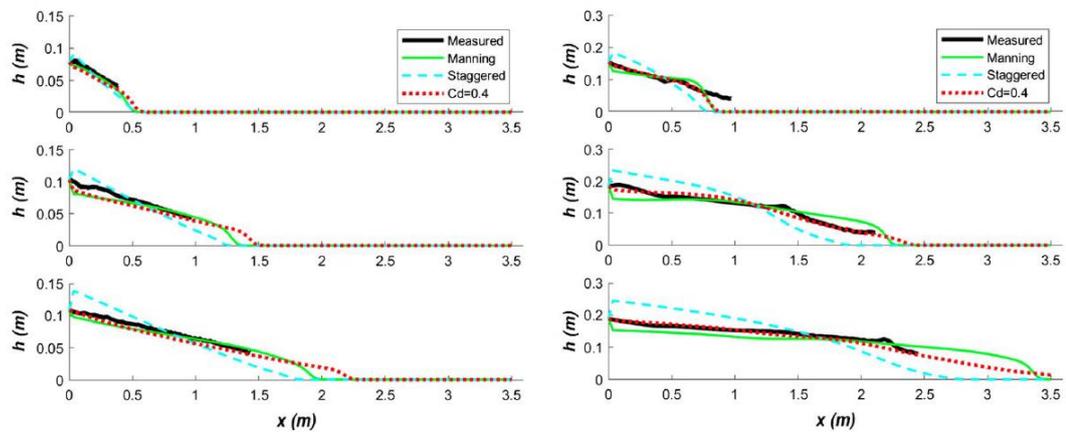


Figura 11 - Un confronto tra  $h(x, t)$  misurato e modellato:  $S_o = 0$  e  $H_o = 0,15$  m (colonna a sinistra) e  $S_o = 3\%$  e  $H_o = 0,3$  m (colonna a destra)

### **3. Particle Tracking Velocimetry (PTV)**

Dopo una breve descrizione della PTV, in questa sezione, viene effettuata una breve trattazione dell'algoritmo alla base del software utilizzato per il lavoro di tesi.

#### **3.1 Descrizione**

Le velocità di un fluido possono essere misurate mediante Particle Image Velocimetry (PIV), che determina la velocità in un campo Euleriano, e Particle Tracking Velocimetry (PTV), che lavora in un campo di riferimento Lagrangiano.

Il metodo utilizzato in questo lavoro è la PTV, una tecnica di velocimetria di immagine che prevede l'utilizzo di particelle come traccianti da inserire nel fluido in movimento. In passato, la PTV è stata ritenuta adatta ad immagini con una bassa densità di particelle, dove la densità è definita come il numero di particelle per pixel, ma i recenti algoritmi hanno fornito buoni risultati anche in caso di una densità di particelle moderatamente alta. Si assume che le particelle abbiano la medesima velocità del flusso locale. La velocità viene determinata dagli spostamenti dei traccianti tra due immagini successive. La frequenza dei fotogrammi (fps) determina la risoluzione temporale della registrazione.

Un altro aspetto delle dimensioni dei traccianti è che un tracciante dovrebbe avere dimensione almeno di 3x3 pixel nelle immagini digitali affinché si abbia una buona rilevazione delle particelle dell'algoritmo di valutazione.

Nella PTV ogni singola particella viene riconosciuta e identificata separatamente, e l'algoritmo cerca di ritrovarla nel secondo fotogramma. Lo spostamento di ogni singola particella è efficacemente determinato usando le informazioni delle particelle che si trovano nell'intorno considerato. Infatti, per ogni particella nell'immagine (i), le potenziali particelle corrispondenti vengono trovate nell'immagine (i + 1) cercando all'interno di un determinato raggio a partire dalla posizione della particella originale.

#### **3.2 Algoritmo alla base del software utilizzato**

Per l'elaborazione dei dati si è deciso di utilizzare PTVlab (Particle Tracking Velocimetry – lab) il quale è un software MATLAB che dispone di un'interfaccia grafica adattata dal progetto open source PIVlab. Questo software mira all'analisi di misurazioni sperimentali di velocimetria di immagini utilizzando un sistema di riferimento Lagrangiano. Diverse istituzioni sono state coinvolte nello sviluppo di PTVlab. Il dott. Wernher Brevis ha sviluppato principalmente gli algoritmi matematici sottostanti e la loro implementazione

durante i suoi studi di dottorato presso l'Università del Cile e l'Istituto di tecnologia di Karlsruhe, Germania. I gruppi di ricerca del dott. Brevis all'Università di Sheffield, nel Regno Unito, hanno sviluppato nuovi algoritmi e correzioni di bug. L'adattamento dell'interfaccia utente grafica di PIVlab e lo sviluppo di nuove funzionalità sono state apportate da Antoine Patalano, come parte dei suoi studi di dottorato presso l'Università Nazionale di Cordoba, in Argentina.

Vengono fornite alcune definizioni al fine di comprendere gli algoritmi utilizzati e la loro integrazione. L'algoritmo utilizzato, che si trova alla base del software, si chiama semplicemente Cross-Correlation (CC).

Le particelle individuate nel primo fotogramma, al tempo  $t = t_0$ , vengono chiamate *particelle target* ed è necessaria la conoscenza della posizione nel secondo frame, al tempo  $t = t_0 + Dt$ . Una *particella target* viene indicata con un sottoindice  $i$  che varia da 1 a  $N$ , dove  $N$  è il numero di particelle individuate nel primo frame. Le particelle del secondo fotogramma sono identificate con un sottoindice  $j$  che varia da 1 a  $M$ , dove  $M$  è il numero di particelle presenti nel fotogramma due. Con il termine *particella candidata* si indica una particella individuata nel secondo frame che potenzialmente corrisponde ad una determinata particella  $i$  del primo frame; ad essa viene associato un sottoindice  $j(i)$ . Queste particelle possono essere trovate utilizzando come criterio di selezione lo spostamento massimo di  $i$  dopo un tempo  $Dt$ . Viene confrontata la matrice di intensità di riferimento del primo fotogramma con un insieme di sottomatrici del secondo fotogramma. In questo modo, la velocità delle singole particelle è individuata utilizzando il coefficiente di cross-correlazione più elevato ottenuto dal confronto.

La prima matrice di riferimento viene trovata dopo aver estratto dal primo fotogramma le intensità di immagine situate all'interno di una finestra di interrogazione quadrata di dimensione  $l_w$  che è centrata sulla posizione della particella target  $\vec{x}_i$ . La lunghezza  $l_w$  è una stima dello spostamento massimo della particella "i". L'insieme di matrici bersaglio si ottiene dopo aver estratto le intensità del secondo fotogramma situato all'interno di una finestra di interrogazione centrata su ciascuna delle posizioni candidate  $\vec{y}_{j(i)}$ . Nel secondo fotogramma, la finestra di interrogazione si trova nella stessa posizione del fotogramma uno. Le particelle all'interno della finestra corrispondono alle particelle candidate di "i". La finestra dell'interrogazione è centrata su ciascuna delle posizioni delle particelle candidate  $\vec{y}_{j(i)}$ , dove  $j(i) = 1, 2, \dots, n_i$  e " $n_i$ " indica il numero totale di candidati associati alla particella "i". I coefficienti di correlazione incrociata, tra la matrice di riferimento al fotogramma 1 e ciascuna delle matrici centrate sulle particelle candidate, sono calcolati come segue:

$$R = \frac{\sum \sum (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum \sum (A_{mn} - \bar{A})^2)(\sum \sum (B_{mn} - \bar{B})^2)}} \quad (54)$$

dove:

- R è il coefficiente di correlazione incrociata
- A e B sono matrici di dimensioni  $m \times n$
- $\bar{A}$  e  $\bar{B}$  sono i valori medi delle intensità luminose degli elementi delle rispettive matrici.

Lo spostamento tra una particella situata in una posizione  $\vec{x}_i$  sul primo fotogramma e le sue particelle candidate situate in  $\vec{y}_{ij(i)}$  è definita come  $\vec{d}_{ij(i)} = \vec{u}_{ij(i)} \Delta t$ , dove  $\vec{u}_{ij(i)}$  è la velocità media delle particelle. Quando il flusso contiene gradienti ad alta velocità e il punto è più volte più lungo del diametro delle particelle, i pattern di particelle possono soffrire di una forte deformazione non lineare. Queste deformazioni del pattern possono produrre un'importante riduzione del livello di correlazione calcolato da CC, diminuendo l'affidabilità dell'analisi PTV. Inoltre, il livello di correlazione utilizzato in CC può essere ridotto anche a causa delle variazioni nella distribuzione dell'intensità dell'immagine dopo  $\Delta t$ , un problema comune nelle misurazioni su larga scala illuminate, ad esempio, mediante sorgenti luminose diffusive.

## 4. Setup Sperimentale

In questa sezione viene descritto il setup sperimentale utilizzato per la simulazione del dam-break. In particolare, viene descritto il canale nel quale è stato riprodotto l'esperimento e i diversi strumenti necessari, la telecamera utilizzata per l'acquisizione delle immagini e la modalità di esecuzione delle prove.

### 4.1 Descrizione del canale

Gli esperimenti sono stati condotti in un canale sito nel Laboratorio di Idraulica Giorgio Bidone del Politecnico di Torino. Il canale prismatico, lungo 11.6 metri, è a sezione rettangolare, largo 50 cm e alto 60 cm. Il canale è stato parzializzato, inserendo una paratoia fissa a 1.83 m dalla paratia in legno che simula lo sbarramento, in modo da creare un bacino a monte di dimensioni minori. La pendenza del fondo può essere regolata mediante un manubrio. Il fondo del canale è di acciaio e dista 1.27 metri da terra nel caso di pendenza nulla. Le pareti laterali del canale sono costituite da moduli di lunghezza pari a 1 metro. I moduli posti nella parte centrale sono lastre di vetro con un'intelaiatura di acciaio mentre quelli che si trovano nella parte laterale sono interamente in acciaio.

Per riprodurre il dam-break il canale è stato dotato di una paratoia in legno larga 50 cm ed impermeabilizzata al fine di evitarne il deterioramento durante gli esperimenti. La tenuta idraulica è garantita con una guarnizione in gomma sul fondo della paratoia, sui lati a contatto con le pareti in vetro con del nastro americano e con del mastice nei due spigoli inferiori. La paratoia è fissata su un supporto a doppia T in alluminio ed è libera di muoversi verso l'alto o il basso grazie ad una struttura in acciaio sostenuta dal corpo in acciaio delle pareti laterali del canale. Un cilindro ad aria compressa è fissato sulla parte superiore della struttura verticale ed è alimentato da un compresso posto a terra di fianco al canale. Secondo quanto riportato da Lauber e Hager (1998), il sollevamento della paratoia si può considerare istantaneo se il tempo necessario per il sollevamento è uguale o inferiore al tempo che una particella d'acqua, che si trova sulla superficie libera del volume di acqua a contatto col paramento di monte della paratoia, impiega per cadere sul fondo del canale. Il compressore indirizza una pressione pari ad 11 bar al pistone in modo da garantirne l'istantaneo sollevamento con una velocità pari a 0.86 m/s. Sul canale sono stati posizionati dei faretto per illuminare al meglio la parte di monte e di valle della paratoia.

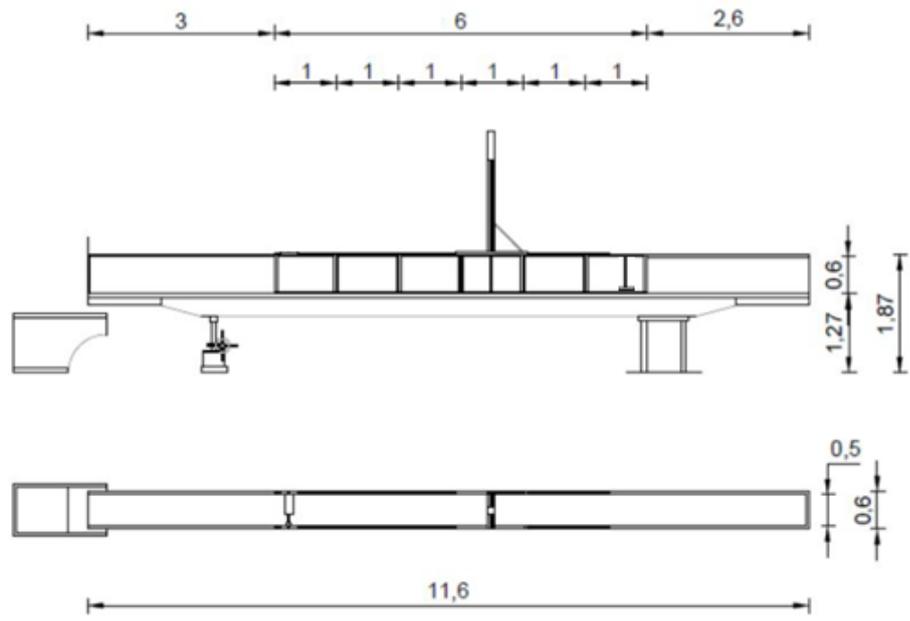


Figura 12 - Vista laterale e vista dall'alto del canale quote in m

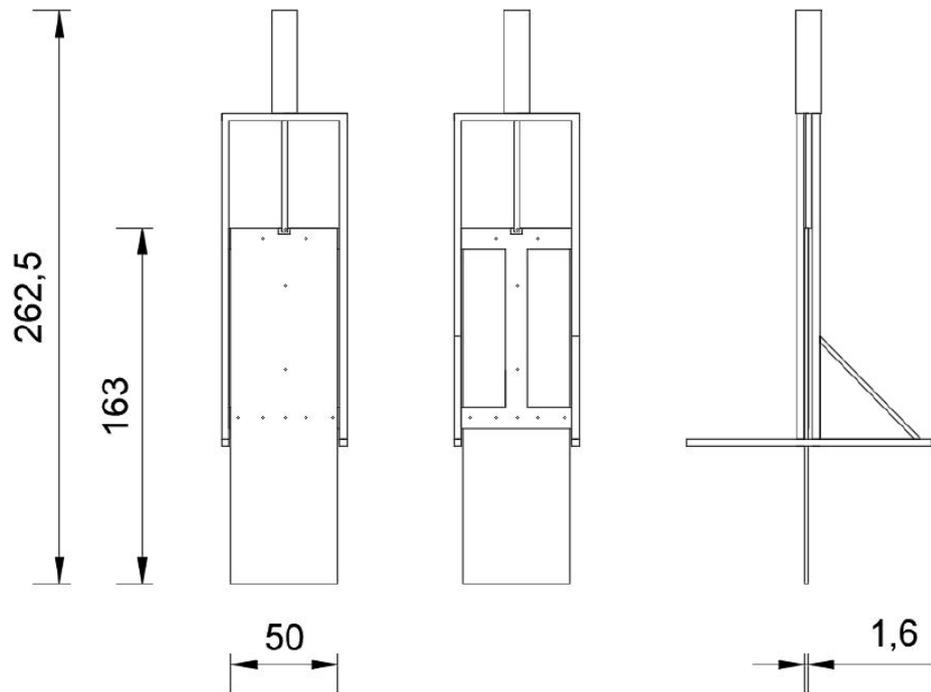


Figura 13 - Vista posteriore, frontale e laterale della paratoia e degli elementi accessori ad essa collegati - quote in cm



*Figura 14 – Immagine posteriore e frontale della paratoia*

#### **4.2 Descrizione della telecamera**

Risulta necessario una telecamera per acquisire dati al fine di valutare le velocità dell'onda di piena dovuta al collasso di una diga. L'esperimento è stato filmato con una videocamera modello Sony DR-AX700 Camcorder 4K HDR. La telecamera è equipaggiata di Display LCD Xtra Fine™ da 8,8 cm (3,5") (1.555.000) widescreen (16:9), obiettivo di tipo ZEISS® Vario-Sonnar® T e un telecomando per l'avvio a distanza della registrazione. Questa telecamera è in grado di registrare video compatibili con il formato di registrazione AVCHD. Permette di effettuare registrazioni in Slow e Quick Motion (S&Q) e in Super Slow Motion (SS) con diversi frame rate ad una risoluzione di 1920x1080. Si è scelto di registrare in Super Slow Motion a 1000 fps. Con questa modalità non si può scegliere la durata della registrazione, la quale è impostata su una durata di 3''72. La telecamera è posizionata ad una distanza di un metro dal canale in modo da riprendere 0.5 m a monte della paratoia mobile in legno e 0.5 a valle della stessa.



Figura 15 - Sony DR-AX700

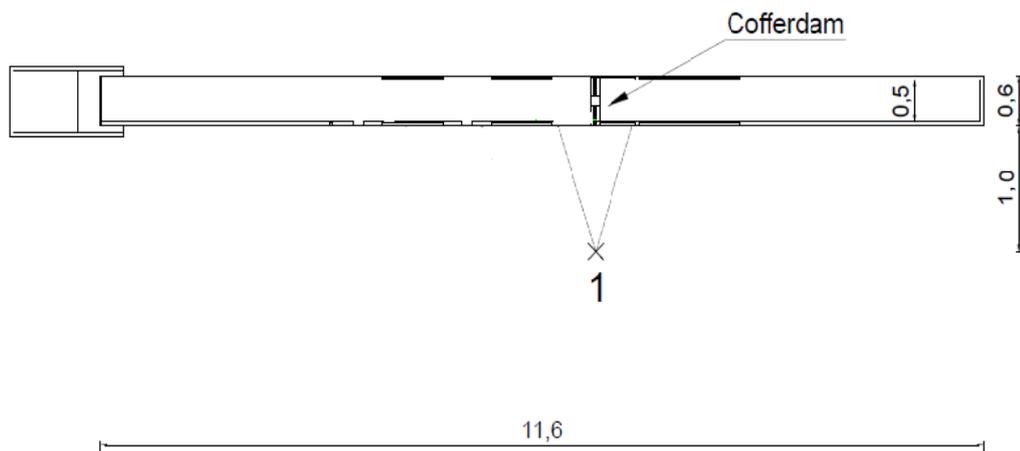


Figura 16 – Posizione della telecamera in 1

#### 4.3 Caratterizzazione traccianti e test di salinità

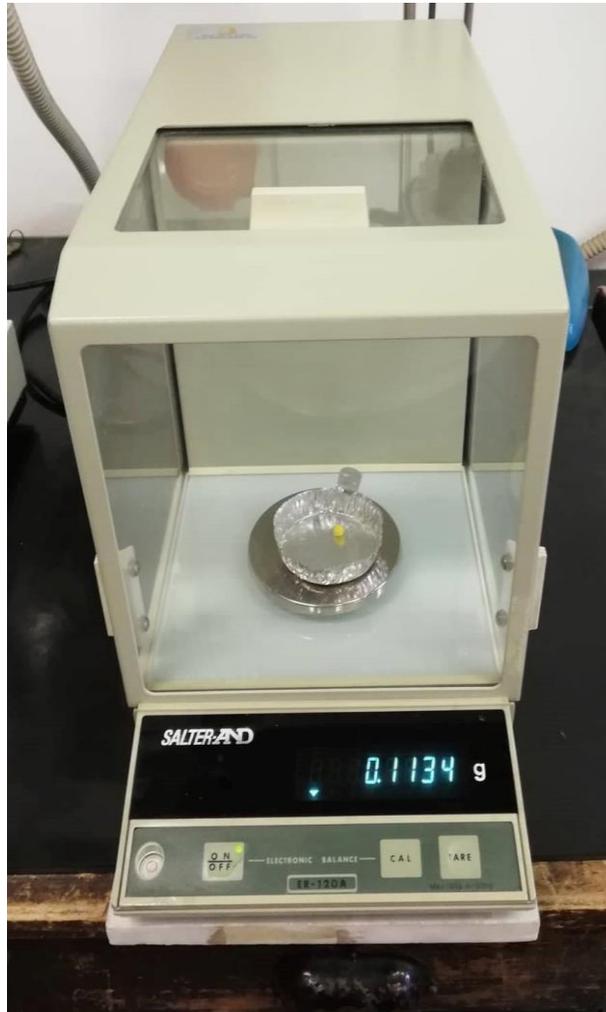
Per eseguire una PTV sono necessari dei traccianti che abbiano una densità più vicina possibile a quella dell'acqua in modo da risultare neutre all'interno di essa.

Pertanto, in laboratorio, è stata effettuata la caratterizzazione di 5 tipi di sfere di diverso materiale e diametro:

1. Sfere gialle con un diametro di 6 mm
2. Sfere rosse con un diametro di 5 mm
3. Sfere bianche con un diametro di 4,63 mm
4. Sfere giallo fosforescente con un diametro di 6 mm
5. Sfere verdi con un diametro di 6 mm

Gli strumenti utilizzati per caratterizzare al meglio i campioni sono stati:

1. Bilancia di precisione
2. Calibro elettronico
3. Microscopio elettronico



*Figura 17 - Bilancia di precisione*



*Figura 18 - Calibro elettronico*



*Figura 19 - Microscopio elettronico*

Per ogni tipologia di sfere è stato preso un campione di 50 particelle. Ogni sfera è stata pesata, sono stati misurati tre diametri ed infine è stata osservata al microscopio elettronico. Nelle tabelle in allegato vengono riportati i dati raccolti durante il campionamento.



*Figura 20 - Esempio di particella vista dal microscopio elettronico*

Come prima cosa, è stata valutata la sfericità calcolando la differenza tra i tre diametri. Le sfere gialle risultano essere quelle meno precise.

Sfere rosse	d <sub>1</sub> -d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>2</sub> -d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>1</sub> -d <sub>3</sub> [mm]
min	0,00	0,00	0,00
max	0,01	0,01	0,01
media	0,00	0,00	0,00

Sfere bianche	d <sub>1</sub> -d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>2</sub> -d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>1</sub> -d <sub>3</sub> [mm]
min	0,00	0,00	0,00
max	0,01	0,01	0,01
media	0,00	0,00	0,00

Sfere Gialle	d <sub>1</sub> -d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>2</sub> -d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>1</sub> -d <sub>3</sub> [mm]
min	0,00	0,00	0,00
max	0,05	0,06	0,04
media	0,03	0,02	0,02

Sfere Giallo fosforescente	d <sub>1</sub> -d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>2</sub> -d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>1</sub> -d <sub>3</sub> [mm]
min	0,00	0,00	0,00
max	0,04	0,04	0,05
media	0,01	0,01	0,01

Sfere Verdi	d <sub>1</sub> -d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>2</sub> -d <sub>3</sub> [mm]	d <sub>1</sub> -d <sub>3</sub> [mm]
min	0,00	0,00	0,00
max	0,05	0,07	0,06
media	0,01	0,02	0,02

Inoltre, dai tre diametri è stato calcolato il diametro medio  $\bar{d}_i$  come segue:

$$\bar{d}_i = \frac{d_{i,1} + d_{i,2} + d_{i,3}}{3} \quad (55)$$

Noto il diametro, è stato possibile ricavare il volume  $V_i$  per ogni sfera caratterizzata:

$$V_i = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{d^3}{8} \quad (56)$$

In seguito, conoscendo la massa e il volume, è stata ricavata la densità i-esima:

$$\rho_i = \frac{m_i}{V_i} \quad (57)$$

Nelle tabelle riportate negli allegati vengono indicati  $\bar{d}_i$ ,  $V_i$  e  $\rho_i$  ottenuti.

Sono stati fatti dei calcoli statistici sia sulla densità che sui diametri al fine di scegliere i traccianti che soddisfano al meglio le richieste.

1. Per la densità sono stati ottenuti i seguenti valori:

Sfere Gialle	
Media	1,04
Mediana	1,04
Asimmetria	-0,36
minimo	1,02
massimo	1,05
Deviazione standard	0,007
Varianza	0,00005

Sfere Bianche	
Media	1,15
Mediana	1,15
Asimmetria	0,71

minimo	1,14
massimo	1,16
Deviazione standard	0,005
Varianza	0,00002

Sfere Rosse	
Media	0,89
Mediana	0,89
Asimmetria	1,06
minimo	0,88
massimo	0,91
Deviazione standard	0,005
Varianza	0,00002

Sfere Gialle 16-10	
Media	1,03
Mediana	1,03
Asimmetria	0,39
minimo	1,02
massimo	1,05
Deviazione standard	0,007
Varianza	0,00004

Sfere Verdi	
Media	1,17
Mediana	1,17
Asimmetria	0,02
minimo	1,15
massimo	1,19
Deviazione standard	0,010
Varianza	0,0001

Una volta calcolati i tre risultati (MEDIA, MEDIANA e ASIMMETRIA) possiamo affermare di aver ottenuto una distribuzione normale se: la MEDIA corrisponderà al valore della MEDIANA, e l'ASIMMETRIA risulterà compresa tra il valore -2 e +2.

Tutte le tipologie di sfere caratterizzate seguono una distribuzione normale, come si evince anche dalla figura in seguito.

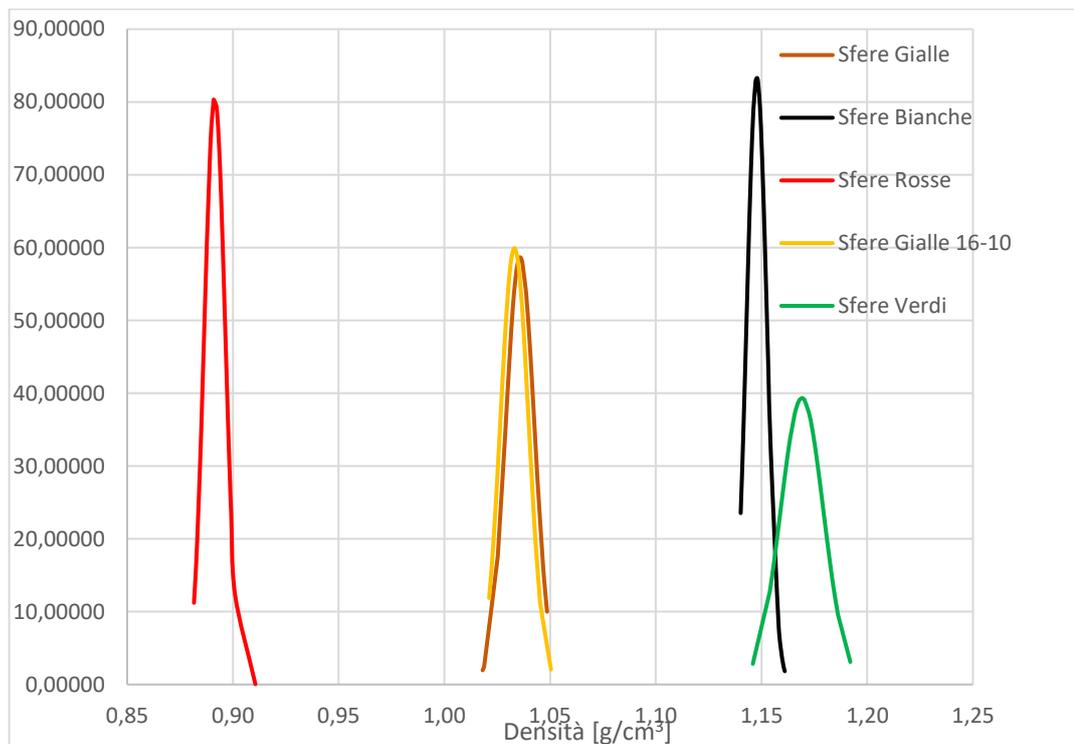


Figura 21 - Distribuzione delle sfere analizzate

Le sfere bianche e rosse mostrano dei valori di densità che non si discostano molto dalla media in quanto la campana di Gauss risulta essere più stretta. Nonostante esse abbiano valori di densità più omogenei vengono scartate in quanto presentano le rosse una densità troppo bassa e le bianche una densità troppo alta per i nostri esperimenti.

2. Le campane di Gauss relative ai diametri sono riportate nella figura seguente:

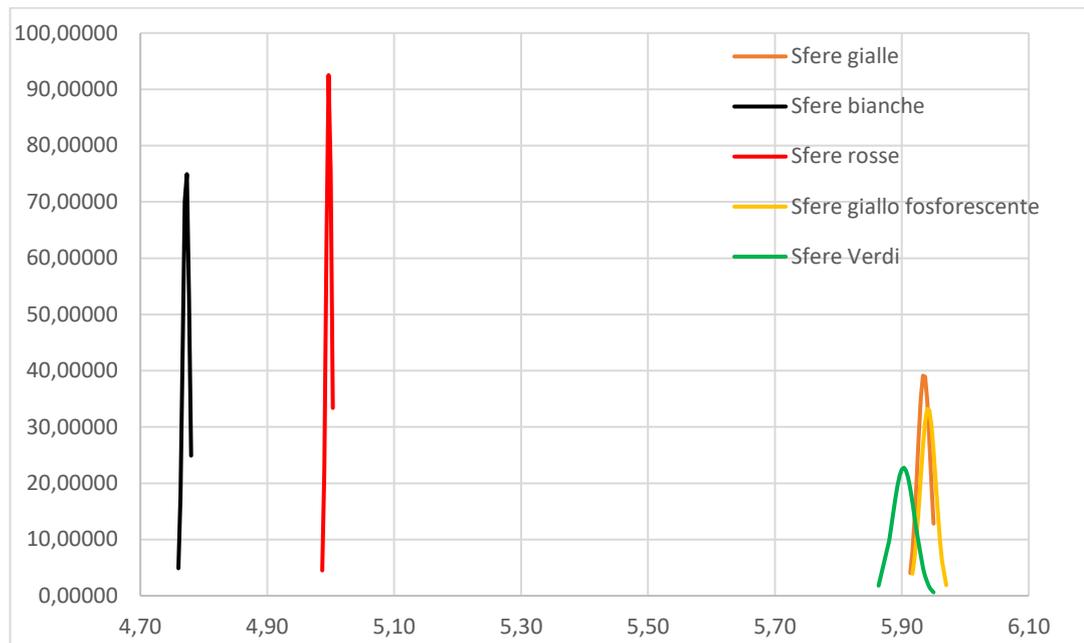


Figura 22 - Distribuzione delle sfere analizzate

Dalla figura in alto si evince che le sfere rosse sono più precise in quanto la campana risulta molto stretta e alta, pertanto i valori dei diametri si discostano di poco dalla media.

Dai risultati ottenuti in precedenza, si è notato che le sfere con densità più vicino a quella dell'acqua fossero le Gialle e le Giallo fosforescente. Poiché la densità dell'acqua è pari a  $1 \text{ g/cm}^3$ , entrambe le sfere vanno a fondo appena inserite in essa.

Per aumentare la densità dell'acqua al fine di raggiungere una densità simile a quella delle sfere precedentemente analizzate è stato aggiunto del sale. Per valutare la quantità di sale necessaria da inserire in acqua sono stati eseguiti dei test di salinità. L'esperimento è stato condotto per le sfere Gialle, Verdi e Giallo fosforescente. Per abbassare la tensione superficiale ed evitare che le particelle si aggregassero tra di loro, le sfere sono state lavate con un tensioattivo (sapone).

È stata riempita una vasca trasparente con dell'acqua e vi sono state immerse le sfere. Sono stati fatti diversi step, in ognuno dei quali è stata aggiunta una determinata quantità di sale. Ad ogni step è stato misurato il peso delle sfere che iniziavano a galleggiare ed eliminate. Nelle tabelle seguenti vengono riportati i risultati ottenuti.

<b>Sfere Gialle</b>								
<b>Step</b>	<b>Sale (parziale)</b>	<b>Sale (totale)</b>	<b>Volume totale vasca</b>	<b>Densità acqua</b>	<b>Peso sfere (parziale)</b>	<b>Peso sfere (totale)</b>	<b>Sfere minore densità</b>	<b>Numero di sfere parziale</b>
	g	g	l	g/cm <sup>3</sup>	g	g	%	n
0	0	0	21,315	1,000	0,0	0,0	0,0	0
1	250	250	21,431	1,006	0,0	0,0	0,0	0
2	100	350	21,477	1,009	0,0	0,0	0,0	0
3	50	400	21,500	1,010	0,0	0,0	0,0	0
4	50	450	21,523	1,011	0,0	0,0	0,0	0
5	50	500	21,546	1,012	0,0	0,0	0,0	0
6	50	550	21,570	1,014	63,4	63,4	5,1	559
7	50	600	21,593	1,015	83,5	146,9	11,7	736
8	50	650	21,616	1,016	125,4	272,3	21,8	1105
9	50	700	21,639	1,017	101,5	373,8	29,9	894
10	50	750	21,662	1,019	147,5	521,3	41,7	1300
11	50	800	21,685	1,020	180,5	701,8	56,1	1590
12	50	850	21,709	1,021	170,8	872,6	69,8	1505
13	50	900	21,732	1,022	112,7	985,3	78,8	993
14	63	963	21,761	1,024	151,1	1136,4	90,8	1331
15 (fondo)	0	963	21,761	1,024	114,6	1251,0	100,0	1010

<b>Sfere Verdi</b>								
<b>Step</b>	<b>Sale (parziale)</b>	<b>Sale (totale)</b>	<b>Volume totale</b>	<b>Densità acqua</b>	<b>Peso sfere (parziale)</b>	<b>Peso sfere (totale)</b>	<b>Sfere minore densità</b>	<b>Numero di sfere parziale</b>
	g	g	l	g/cm <sup>3</sup>	g	g	%	n
0	0	0	15,475	1,000	0	0	0	0
1	300	300	15,614	1,010	0	0	0	0
2	200	500	15,706	1,017	0	0	0	0
3	100	600	15,753	1,020	0	0	0	0
4	100	700	15,799	1,024	0	0	0	0
5	100	800	15,845	1,027	0	0	0	0

6	100	900	15,892	1,030	0	0	0	0
7	100	1000	15,938	1,034	0	0	0	0
8	57,4	1057,4	15,965	1,036	0	0	0	0
8 (fondo)	0	1057,4	15,965	1,036	594,7	594,7	100	0

<b>Sfere Giallo Fosforescente</b>								
<b>Step</b>	<b>Sale (parziale)</b>	<b>Sale (totale)</b>	<b>Volume totale</b>	<b>Densità acqua</b>	<b>Peso sfere (parziale)</b>	<b>Peso sfere (totale)</b>	<b>Sfere minore densità</b>	<b>Numero di sfere parziale</b>
	g	g	l	g/cm <sup>3</sup>	g	g	%	n
0	0	0	17,525	1	0	0	0,00	0
1	350	350	17,687	1,011	0	0	0,00	0
2	100	450	17,733	1,014	0	0	0,00	0
3	100	550	17,780	1,017	0	0	0,00	0
4	100	650	17,826	1,020	11	11	2,01	97
5	100	750	17,872	1,023	125,8	136,8	25,03	1109
6	60	810	17,900	1,024	54,4	191,2	34,98	480
7	60	870	17,928	1,026	107,4	298,6	54,63	947
8	73	943	17,962	1,028	136,7	435,3	79,64	1205
8 (fondo)	0	943	17,962	1,028	111,3	546,6	100,00	981

Dai risultati ottenuti dai precedenti test di salinità si evince che le sfere verdi hanno una densità più elevata di quella dell'acqua anche aggiungendo il sale.

Pertanto, la scelta dei traccianti migliori deve ricadere tra le Sfere Gialle e Giallo fosforescente.

In seguito si riportano il grafico in funzione dei grammi di sale o della densità di acqua e della percentuale di sfere che hanno una minore densità dell'acqua per quei determinati grammi di sale aggiunti.

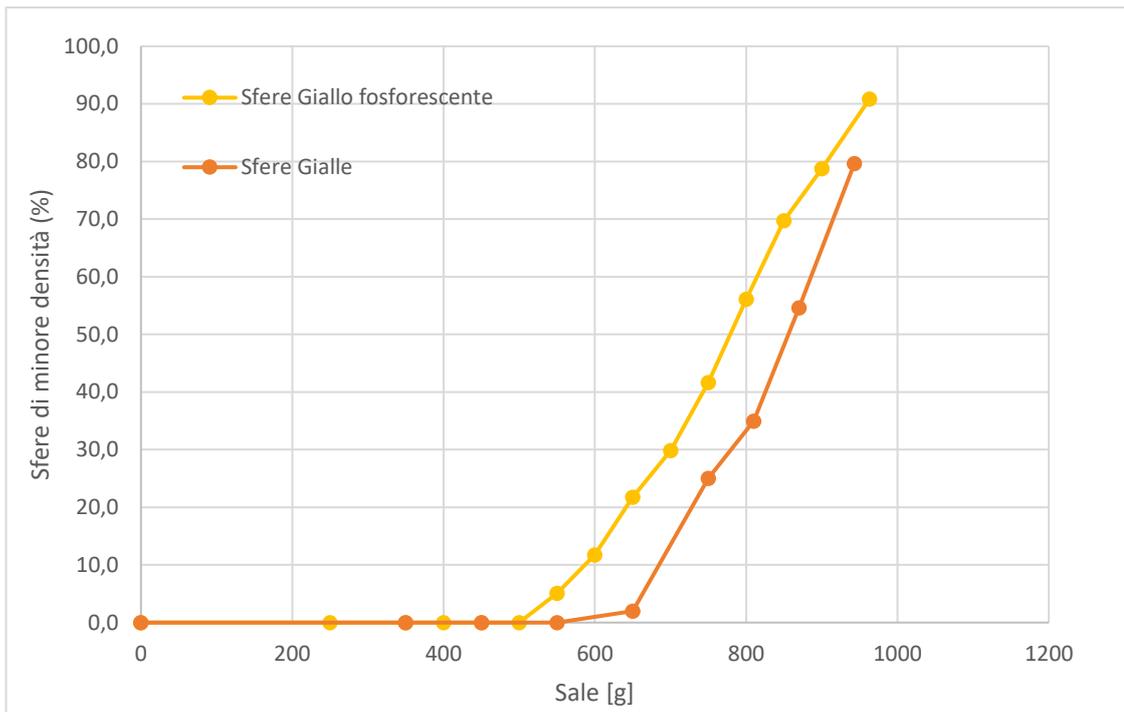


Figura 23 – Percentuale di sfere che galleggiano in funzione dei g di sale

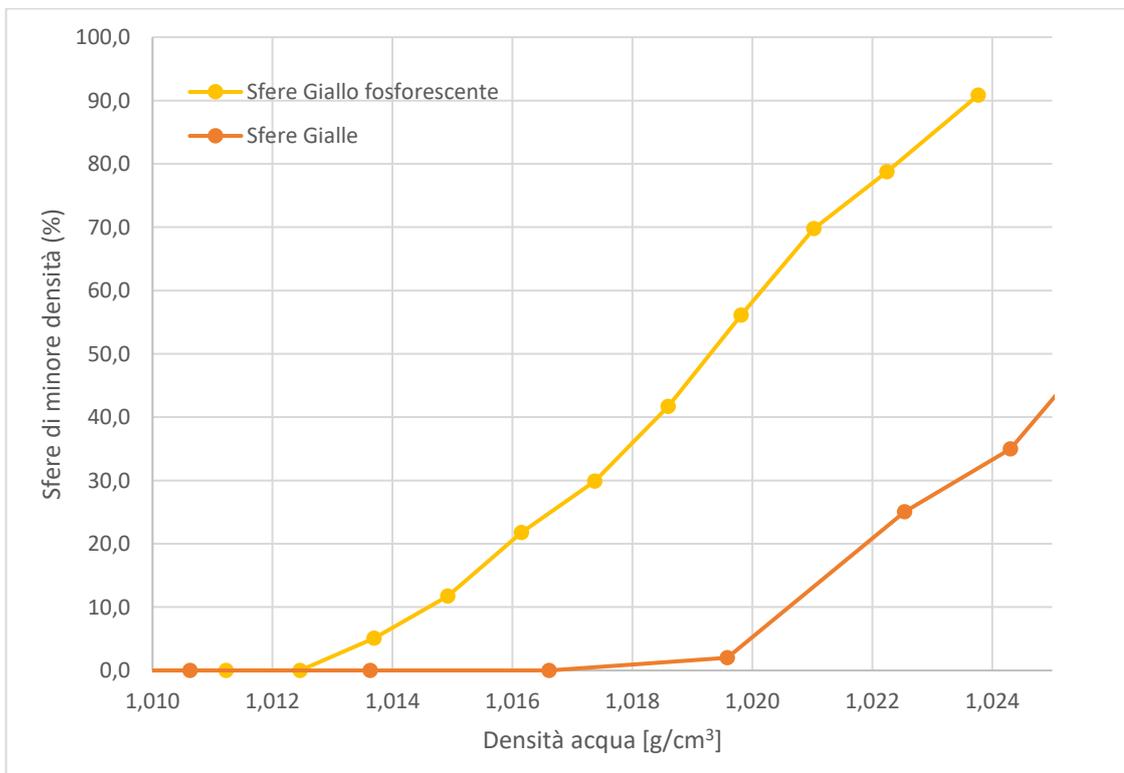


Figura 24 – Percentuale di sfere che galleggiano in funzione della densità di acqua

Le figure sotto rappresentano il numero parziale di sfere misurato ad ogni step.

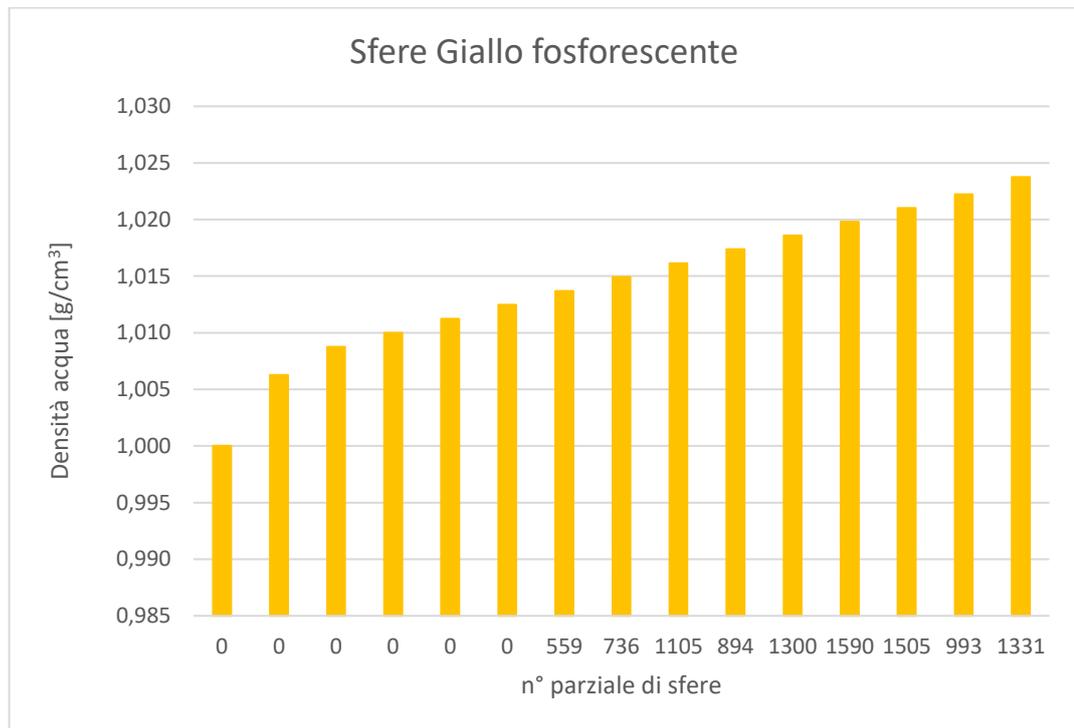


Figura 25 – Numero di sfere galleggianti ad ogni step



Figura 26 - Numero di sfere galleggianti ad ogni step

Si è scelto di eseguire gli esperimenti con le sfere Gialle, poiché presentano una densità più vicina a quella dell'acqua. È stato scelto il campione dello step 8 e suddiviso in un campione

8.1 e 8.2 al fine di diminuire la quantità di sfere. Per gli esperimenti è stato usato il campione 8.2 con una quantità di sale pari a 890g per 17.525 l.

#### **4.4 Modalità di esecuzione delle prove**

Le prove di dam-break sono state eseguite a fondo liscio, pendenza del canale nulla e altezza d'acqua a monte della paratoia pari a 30 cm. Prima di iniziare con le prove bisogna assicurarsi che il fondo del canale sia asciutto, in seguito bisogna regolarne la pendenza mediante un manubrio. Dopodiché, bisogna abbassare la paratoia in legno e assicurarne la tenuta idraulica mediante del nastro americano sui lati a contatto con il vetro e con del mastice nei due spigoli in basso. Il nastro viene posizionato per 2/3 sulla paratoia e 1/3 sul vetro in modo tale che, all'apertura della paratoia non rimanga attaccato al vetro. Anche il mastice viene posizionato in modo da aderire bene alla paratoia per evitare che, aprendosi, resti attaccato al fondo compromettendo così l'esperimento. Dopo, si procede al riempimento della parte di canale a monte della paratoia e all'aggiunta del sale necessario. La vasca di monte è larga 0.50 m e lunga 1.83 m. Con un'altezza di 0.30 m, si ha un volume di 274.5 l. Facendo una proporzione con la quantità di sale trovata in precedenza risulta che, per ogni dam-break, sono necessari 13.94 kg. Il sale viene fatto sciogliere mediante delle pompe in modo da velocizzare lo scioglimento. Una volta che il sale si è sciolto, si può procedere con l'esperimento. Viene acceso il compressore che alimenta il pistone per potervi convogliare aria con pressione pari ad 11 bar, in modo da permettere l'apertura istantanea della paratoia. I traccianti vengono opportunamente lavati con del tensioattivo al fine di evitare la successiva aggregazione durante l'esperimento. Vengono così inseriti all'interno di una gabbia metallica posta in posizione centrale nella parte di monte del canale. La gabbia metallica viene usata per fare in modo che tutte le sfere disperse nell'acqua si trovino sullo stesso piano, al fine di permettere, in seguito, una corretta elaborazione dei dati. Fatto questo, vengono accesi i faretto posti sul canale, viene accesa la videocamera e impostata sulla modalità Super Slow Motion a 1000 fps. Viene sollevata la gabbia metallica lentamente in modo da non perturbare il moto, viene fatta partire la registrazione e in seguito, si ruota la leva del compressore, il quale convoglia l'aria nel pistone permettendo l'apertura istantanea della paratoia. Terminata la registrazione, i video vengono trasferiti sul PC per poter essere elaborati ed analizzati. Per riportare il canale alle condizioni iniziali, viene posizionato a pendenza non nulla in modo da favorire la totale fuoriuscita di acqua e l'asciugatura dello stesso.

## 5. Analisi e Risultati

### 5.1 Processamento dei fotogrammi

L'analisi e l'estrazione dei fotogrammi dai due filmati è stata eseguita con il software MATLAB<sup>®</sup>.

Il processo di analisi che porta all'elaborazione dei dati si articola come segue:

- 1) Estrazione dei frames dal filmato e trasformazione dei frames da formato RGB a grayscale
- 2) Calibrazione
- 3) Costruzione della maschera e inserimento dei frames nel tool di MATLAB<sup>®</sup> PTVlab

Dal filmato registrato, della durata di 3.72'', vengono estratti 3720 frame e, in seguito, vengono trasformati, come detto sopra, dal formato RGB in scala di grigi. La correlazione tra le immagini restituite e il mondo reale è possibile solo dopo aver effettuato la calibrazione, grazie alla quale è possibile ottenere i parametri della camera. Questi ultimi permettono di lavorare in campo metrico sulle immagini ottenute. Essi sono divisi in:

- parametri esterni che sono sei e permettono di passare da un sistema di riferimento della camera ad un sistema di riferimento esterno mediante una matrice di rototraslazione
- parametri interni che sono sette e permettono di trasformare le coordinate pixel in coordinate geometriche
- distorsione della lente che possono essere di tipo radiale e tangenziale

Il modello lineare della telecamera non sempre è soddisfacente nel descrivere la realtà. Infatti, l'inserimento di lenti all'interno del modello comporta la nascita di distorsioni ottiche considerevoli. Quest'ultime si presentano generalmente come delle non linearità del sistema di visione. Tenendo presente ciò, il modello è modificato e i punti presenti sul piano immagine e il centro ottico non risultano essere più collineari. La distorsione radiale può essere negativa, nulla o positiva.

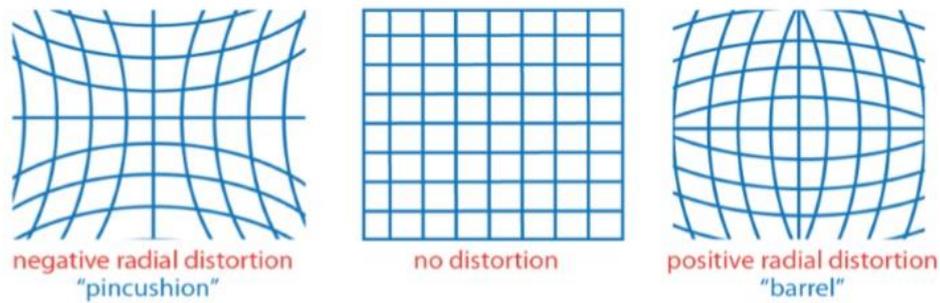


Figura 27 - Distorsione radiale negativa, nulla, positiva

I parametri della camera si possono ottenere mediante l'app di MATLAB® Camera Calibration. Data la necessità di eseguire una calibrazione in acqua, si è fatto costruire appositamente un pannello di alluminio di spessore 3 mm di dimensioni  $1 \times 0.5$  m ritraenti delle scacchiere le cui distanze tra i vertici sono di 20 mm. L'app camera calibrator supporta unicamente pattern a scacchiera ed è consigliato l'utilizzo di un numero di foto rientrante in un range di 10-20 immagini. I requisiti che devono possedere le scacchiere sono:

- lati di differenti lunghezze;
- vi devono essere due angoli neri in un lato e due bianchi nell'altro lato. In questo modo è possibile definire l'asse x che verrà posto sul lato più lungo, definendo quindi l'orientamento;
- la scacchiera deve essere posta su una superficie piana, in quanto eventuali imperfezioni della superficie possono intaccare la precisione della calibrazione;
- per migliorare il processo di calibrazione, si cerca di utilizzare una grandezza dei quadrati formanti la scacchiera quanto più piccoli.
- è necessario mantenere una distanza della camera nei confronti degli oggetti da misurare uguale a quando si effettua la calibrazione. È consigliato porre la scacchiera con un'angolazione minore di  $45^\circ$  rispetto al piano della camera.
- la distorsione dovuta alla presenza delle lenti è accentuata ai bordi dell'immagine, poiché cresce radialmente, pertanto, è consigliabile fare delle foto ai bordi dell'area catturata dalla macchina fotografica in modo da ridurre la distorsione.

Gli input da inserire sono le dimensioni dei quadrati costituenti la scacchiera espresse in mm. Vengono caricate le immagini ed eseguita la calibrazione.

L'app apre una finestra di dialogo in cui riporta le immagini accettate e quelle rigettate perché non idonee alle caratteristiche richieste.

Effettuata la calibrazione, viene fornito un istogramma che indica l'errore di riproiezione. Quest'ultimo fornisce la distanza in pixel tra i punti analizzati dall'immagine e quelli riproiettati usando i parametri della camera. Come regola generale, se l'errore di riproiezione è minore di 1 pixel risulta essere accettabile. Il toolbox ci permette di visualizzare anche la precisione della calibrazione e, volendo, di eliminare le immagini che risultano sfocate e riprocedere in seguito con la calibrazione.

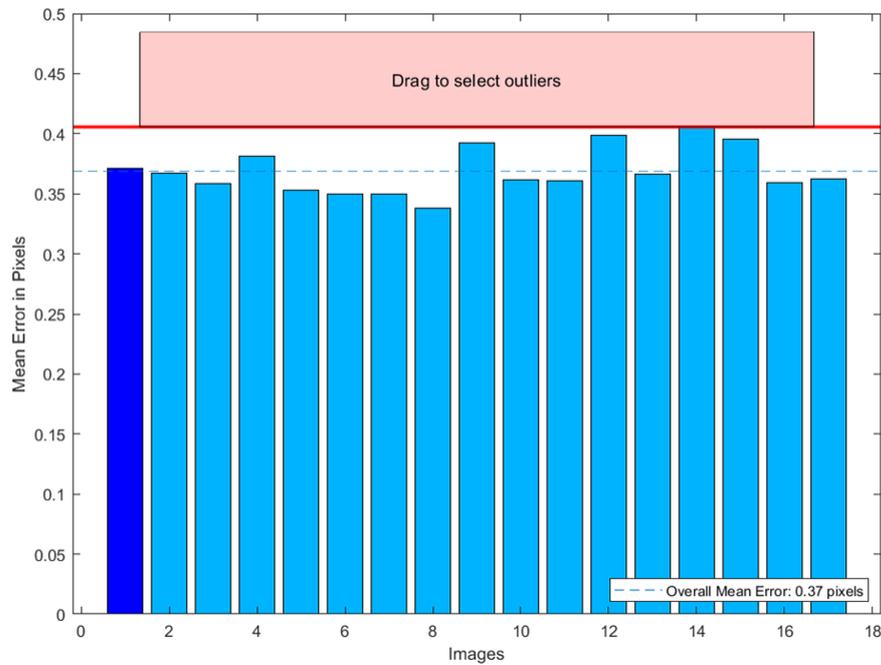


Figura 28 – Istogramma indicante l'errore di riproiezione

Nell'interfaccia dei risultati ottenuti si possono visualizzare anche i parametri estrinseci con un punto di vista dalla camera e da quello dei pattern, utili il primo nel caso in cui la camera sia stazionaria, il secondo quando i pattern sono invece stazionari.

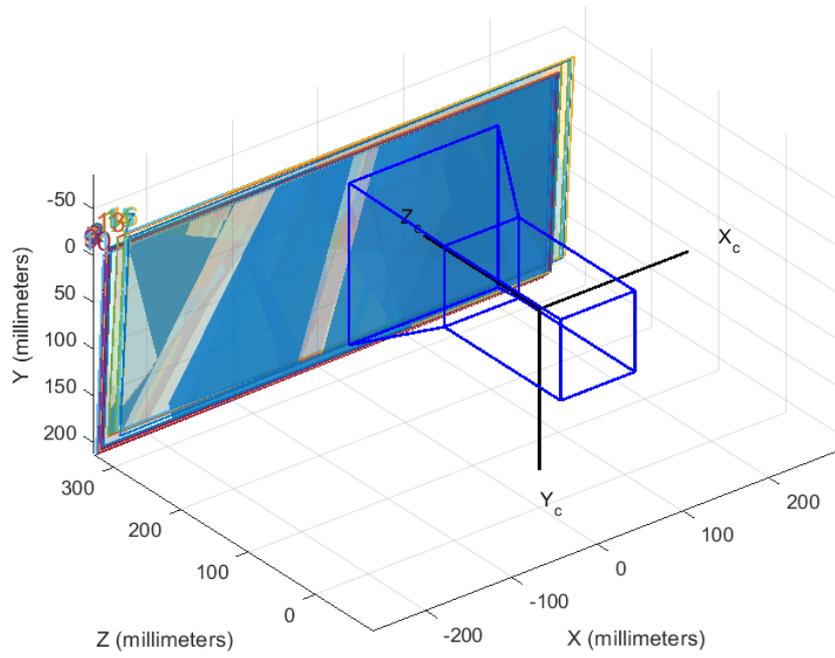


Figura 29 – Caso di camera stazionaria

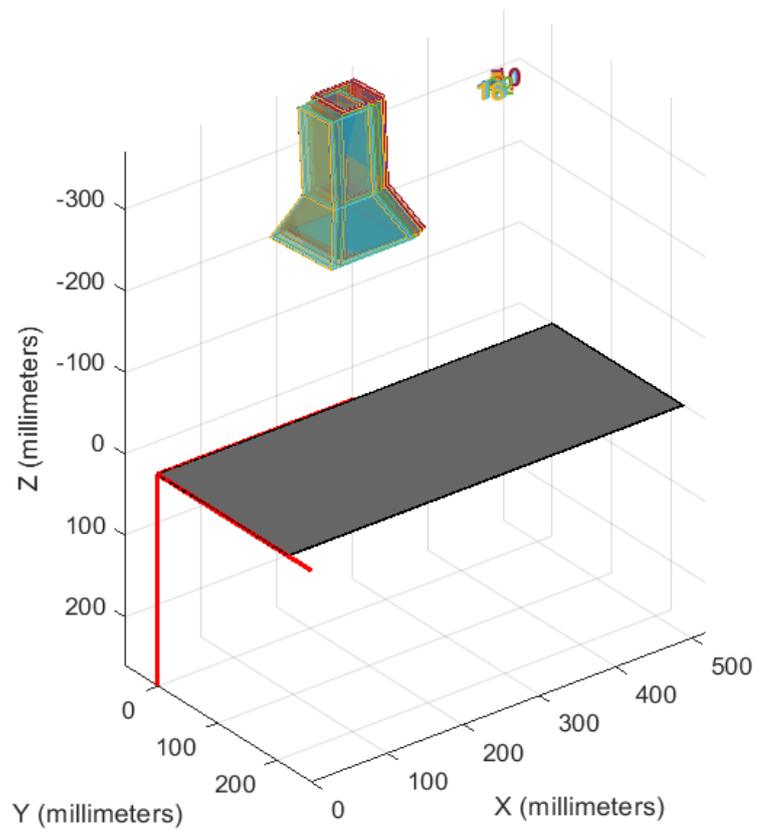


Figura 30 - Caso di pattern stazionari

L'origine del sistema di riferimento sulla scacchiera è in alto a sinistra.

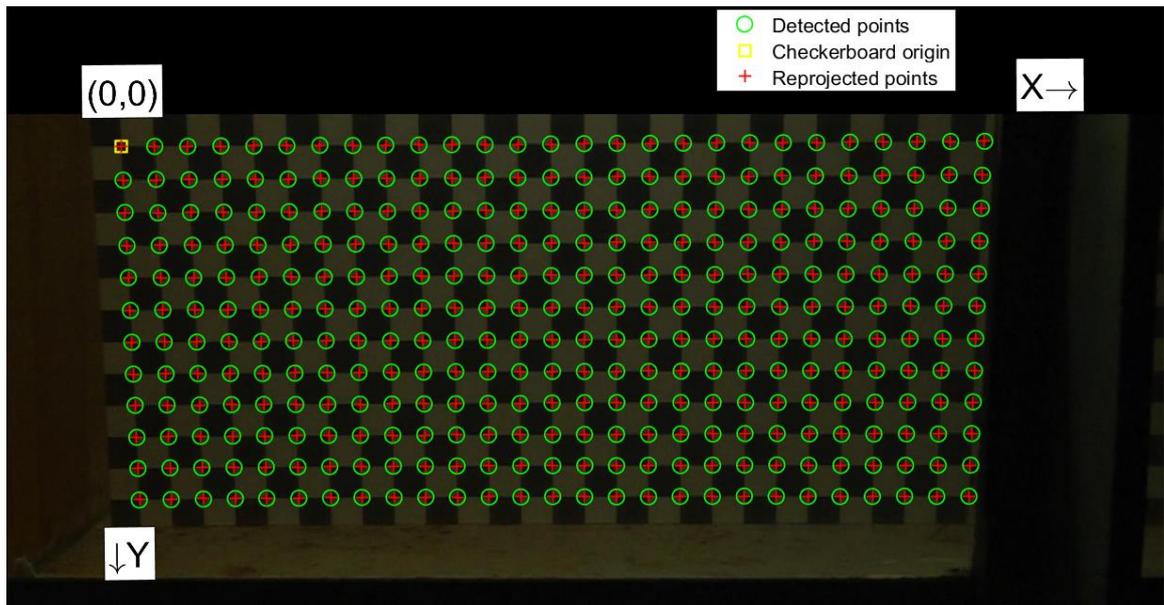


Figura 31 – Confronto tra i punti trovati dalla camera e quelli derivanti dai parametri della camera

Ottenuti i parametri della camera, le foto vengono raddrizzate mediante la funzione di MATLAB *'undistortImage'*. Le immagini raddrizzate presentano una risoluzione di 1074x1903, che risulta differente da quella iniziale. In questo caso, si è in presenza di una distorsione radiale negativa.

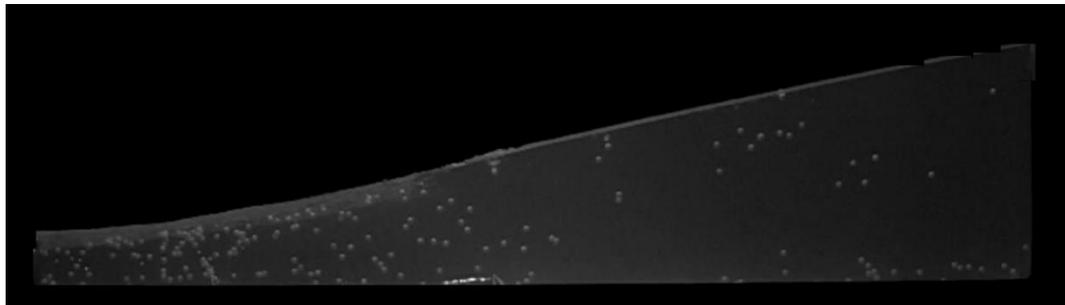
Da questo punto in poi, si è lavorato sulle immagini raddrizzate.

È possibile, ora, costruire una maschera tale da isolare l'acqua ed eliminare possibili elementi di disturbo per la successiva elaborazione delle immagini. La maschera è variabile nel tempo e viene sovrapposta ai vari frame per poi essere caricati e processati su PTVlab. La costruzione della maschera è stata eseguita mediante uno script di MATLAB, riportato negli allegati, basato sulla variazione di intensità di soglia. Nella figura 32 viene riportato un esempio di maschera realizzato.



Figura 32 – Esempio di maschera

Queste maschere, come detto in precedenza, vengono applicate al frame, permettendo di salvaguardare solo la parte in cui è presente l'acqua.



*Figura 33 – Esempio di frame con maschera*

## **5.2 Analisi dei fotogrammi**

Con questi passaggi, sono state ottenute le immagini elaborate su PTVlab per ricavare il campo di velocità. Sono stati eseguiti 7 step differenti:

- **Step 1 - Caricamento dei frame**

Una volta create le maschere, sono stati caricati i vari frame sul tool PTVlab. Poiché, tale tool non permette di inserire una maschera diversa per ogni frame, sono stati caricati su PTVlab i frame ottenuti a seguito dell'applicazione delle maschere.

- **Step 2 - Definizione della regione di interesse**

In seguito, dal tab 'Analyses Settings' si entra nell'impostazione 'Exclusions' dove si può settare la 'Region of Interest' (ROI), che indica la regione nella quale PTV esegue i calcoli. In questo caso, viene assunta pari ad un rettangolo uguale per tutti i frame in quanto non è possibile farla variare in maniera automatica per ognuno di essi.

- **Step 3 - Identificazione delle particelle (Particle detection)**

Nello step successivo, durante le differenti prove sperimentali, sono stati fatti variare i tre parametri seguenti allo scopo di identificare con successo solo le zone del frame che corrispondono alle particelle da tracciare:

- Correlation thershold
- Sigma [px], dimensione della particella
- Intensity thershold

	Primo video	Secondo video
Correlation thershold	0.7	0.65
Sigma [px]	10	10
Intensity thershold	75	65

- **Step 5 – Tracciamento delle particelle mediante Cross Correlation**

L’algoritmo di tracciamento su cui si basa il software è quello di Cross Correlation. In questo step vengono definiti i seguenti parametri dell’algoritmo:

- Interrogation area [px]
- Minimum correlation
- Similarity neighbors

	Primo video	Secondo video
Interrogation area [px]	25	25
Minimum correlation	0.4	0.4
Similarity neighbors	20	20

- **Step 6 – Calibrazione**

In seguito, si procede con l’analisi. Dopodiché si esegue la calibrazione in modo da avere una velocità espressa in m/s. Per la calibrazione si possono inserire misure reali (i) su un’immagine di calibrazione oppure (ii) su una delle immagini già caricate. Viene, inoltre richiesto il time step espresso in millisecondi (ms); questo parametro si calcola tenendo conto del valore di fps usato per registrare il video. Nel caso in esame, sono state inserite misure su un’immagine caricata in seguito (opzione ii). L’immagine caricata è quella di una scacchiera utilizzata per la calibrazione delle telecamere.

- **Step 7 - Visualizzazione dei risultati**

Il software ci restituisce un file in formato mat nel quale sono contenuti tutti i risultati della computazione. In questo file, è possibile trovare una cella denominata resultslistptv che contiene i risultati per ogni frame. Per ogni frame, vengono riportate le posizioni x e y di ogni particella individuata e l’ID ad essa associato. Molto spesso una particella viene persa

dopo alcuni frame e ritrovata dopo un po' di frame. In questo caso, anche trattandosi della stessa sfera, viene associata ad un ID diverso. Dalla figura 34 si può notare quanto detto, osservando che una stessa traiettoria appare di colori diversi. La traiettoria mostrata, è quella di particelle in un serbatoio con altezza  $h_0 = 30 \text{ cm}$  a  $t_0 = 0 \text{ s}$  ed un  $dt = 1 \text{ ms}$ .

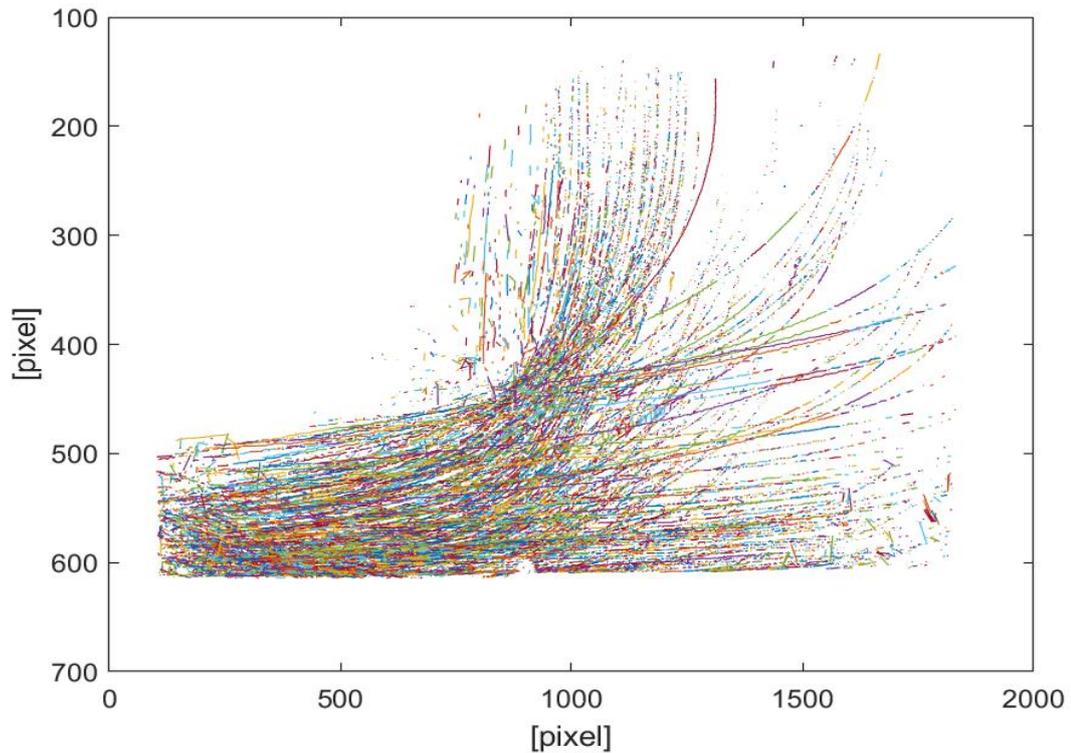


Figura 34 - Traiettorie particelle con  $h_0 = 30 \text{ cm}$ ,  $t_0 = 0 \text{ s}$ ,  $dt = 1 \text{ ms}$

### 5.3 Post-processing dei dati ottenuti

Per studiare al meglio le velocità ottenute si è scelto di suddividere il canale in sezioni. Le sezioni sono dodici verticali e rimangono costanti per ogni frame e quattro sezioni orizzontali differenti per ogni sezione verticale e per ogni frame. Per fare ciò, è stato necessario ricavare il profilo ad ogni istante temporale. Il profilo è stato tracciato dai frame a cui, in precedenza, è stata sovrapposta la maschera.

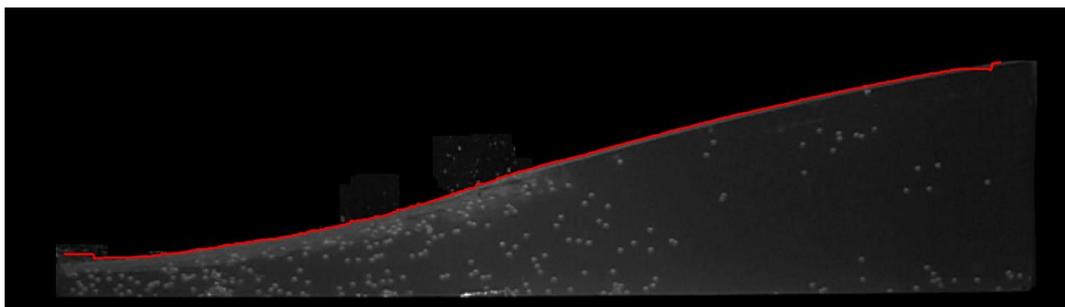


Figura 35 - Esempio di profilo tracciato

Una volta ricavato il profilo, è stato possibile eseguire la suddivisione verticale. Ogni settore verticale ha una larghezza di 158 pixel ed un'altezza variabile, dalla base fino al profilo tracciato. Ogni altezza è stata suddivisa in quattro parti uguali e, così, i punti ottenuti, sono stati uniti a quelli ottenuti sull'altezza immediatamente a destra. In questo modo, sono state ottenute quattro sezioni per ogni sezione verticale.

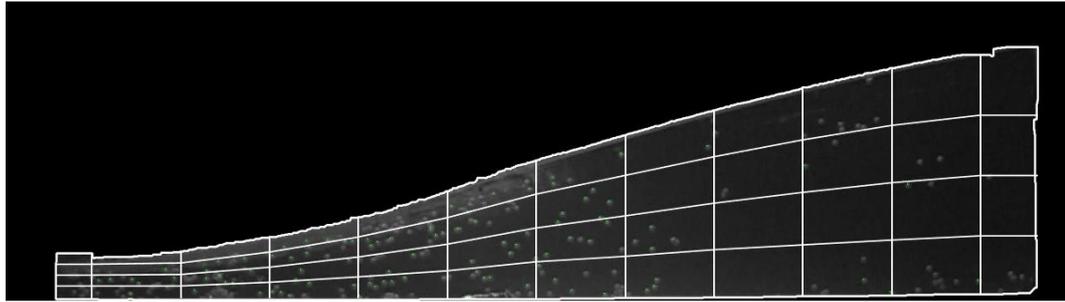


Figura 36 - Esempio di sezioni tracciate

PTVlab fornisce le coordinate delle particelle trovate. Per ogni frame, sono note le posizioni  $x_i$  e  $y_i$  della generica particella in quel frame e le posizioni  $x_{i+1}$  e  $y_{i+1}$  della stessa al frame successivo. In questo modo, è possibile calcolare la velocità lungo il moto e la velocità ad essa ortogonale.

$$x_{i+1} - x_i = \Delta x \quad (58)$$

$$y_{i+1} - y_i = \Delta y \quad (59)$$

dove:

- $x_i$  = *posizione x particella al frame i – esimo*
- $y_i$  = *posizione y particella al frame i – esimo*
- $x_{i+1}$  = *posizione x particella al frame i + 1 – esimo*
- $y_{i+1}$  = *posizione y particella al frame i + 1 – esimo*
- $\Delta x$  = *velocità lungo il moto in pixel/s*
- $\Delta y$  = *velocità ortogonale al moto in pixel/s*

Da questi dati, noto il coefficiente di conversione (caluv) fornito dal software PTVlab, è possibile ottenere le velocità espresse in metri al secondo.

$$\Delta x \cdot caluv = u_x \quad (60)$$

$$\Delta y \cdot caluv = v_y \quad (61)$$

in cui:

- $u_x = \text{velocità lungo il moto in m/s}$
- $v_y = \text{velocità ortogonale al moto in m/s}$

Come detto in precedenza, ogni particella viene identificata con un ID. La stessa particella può essere rinominata con diversi ID se durante il tracking viene persa dal software. Per diminuire l'onere computazionale, sono state eliminate tutte le velocità degli ID rinvenuti in meno di due frame. Dall'istogramma di figura 37, è possibile notare come, il numero di ID trovati in meno di due frame sia particolarmente elevato.

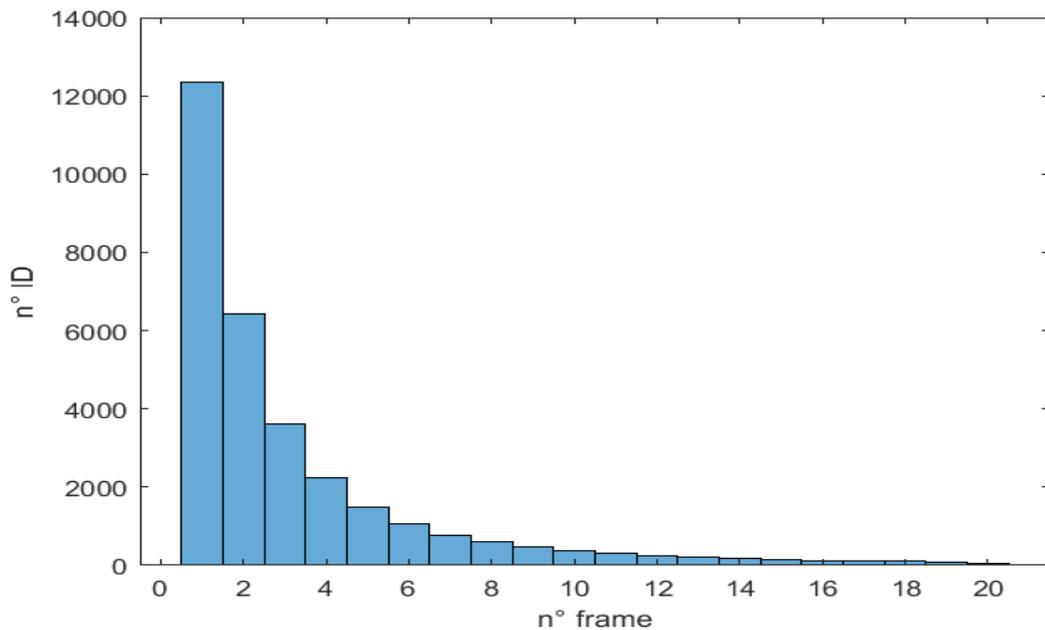


Figura 37 - Numero di ID trovati

Il software non riesce ad eseguire un detect corretto nelle fasi in cui l'acqua è ferma. Infatti, come si evince dalla figura sottostante, quando l'acqua è in movimento il numero delle particelle individuate è maggiore.

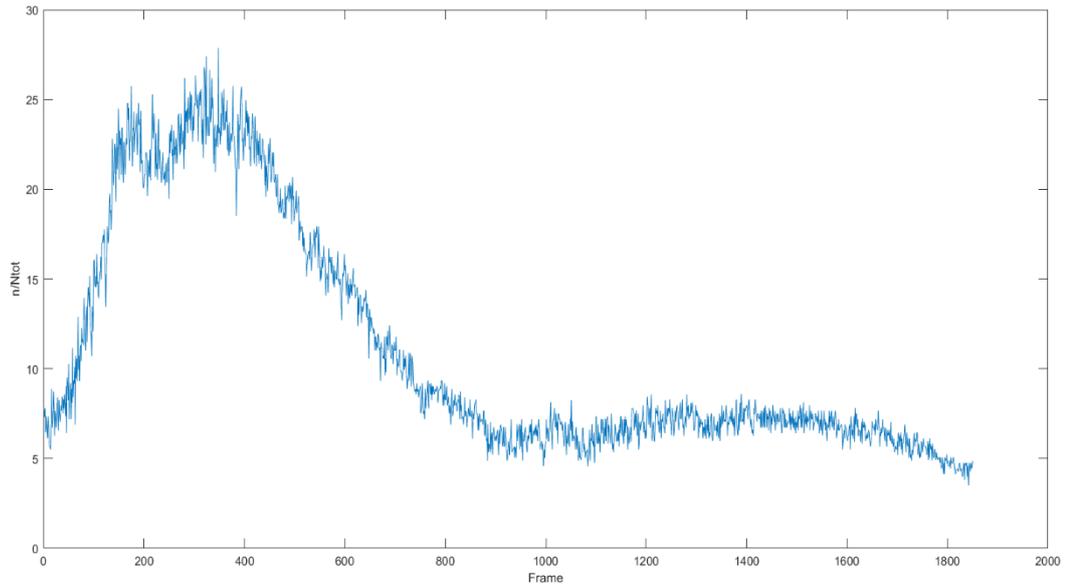


Figura 38 - % di sfere individuate dal software ad ogni frame

Per ogni frame, è stato calcolato il numero di particelle presenti in ogni sezione realizzata. Di seguito si riportano alcuni esempi, relativi al primo video processato, in cui sono già state eliminate le particelle trovate dal software in meno di due frame.

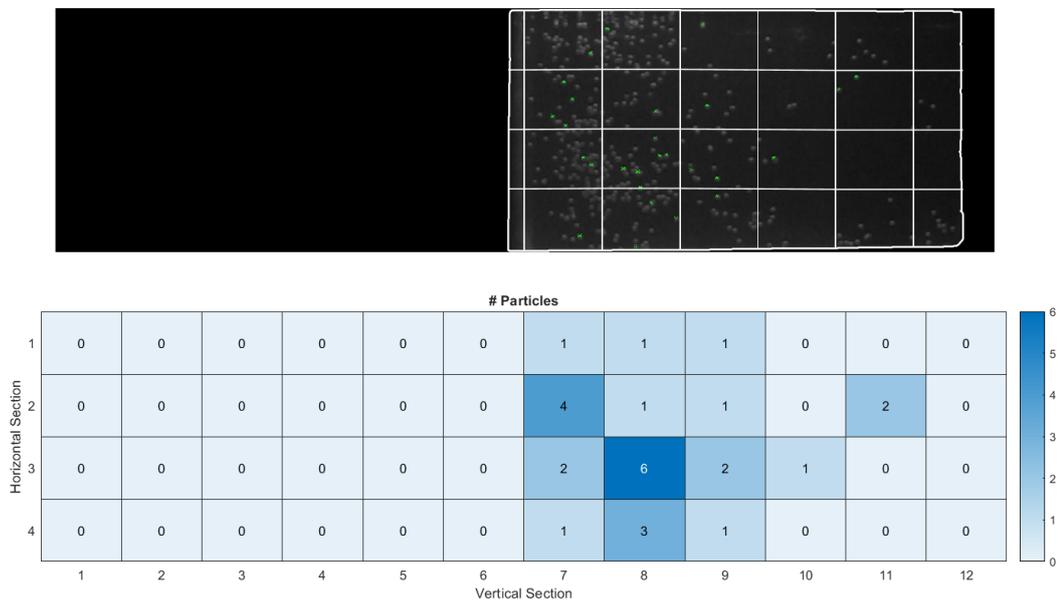


Figura 39 - Numero di particelle identificate dal software prima del dam-break

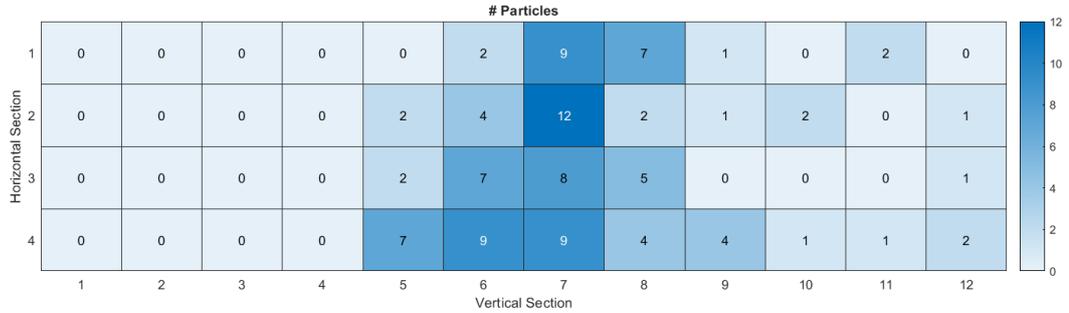
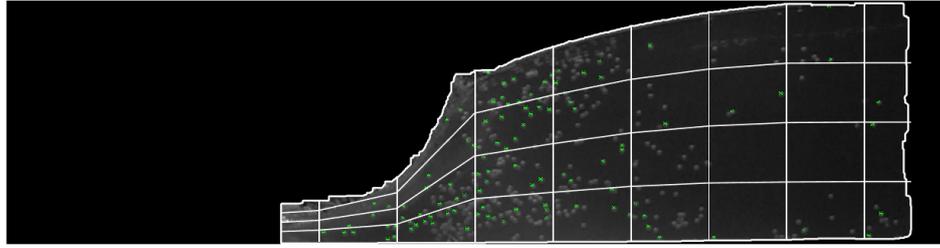


Figura 40 - Numero di particelle identificate da software a  $t = 0.15 s$

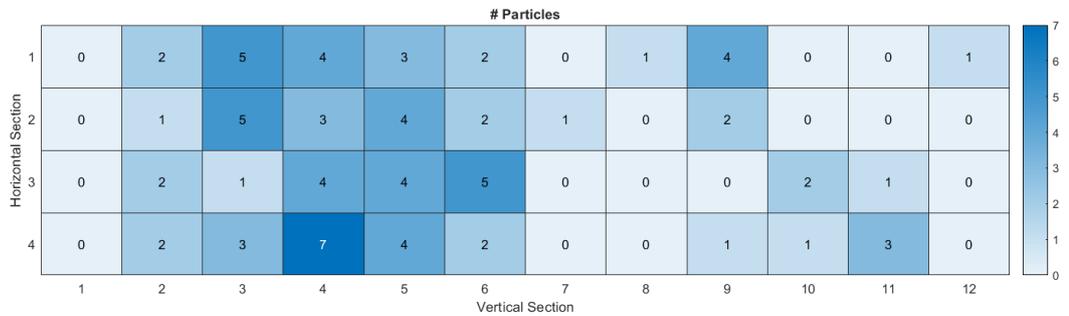
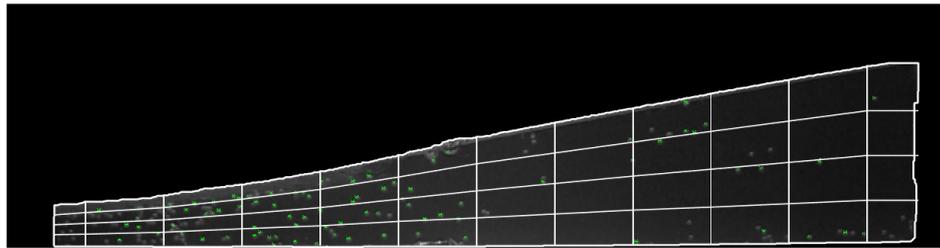
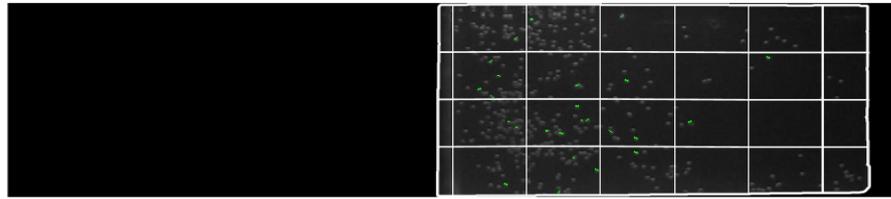


Figura 41 - Numero di particelle identificate da software a  $t = 0.60 s$

Noto il numero di particelle presenti in ogni sezione, è stato possibile calcolare da queste, le velocità di ogni sfera in essa presente. In seguito, è stata effettuata la media tra le particelle presenti nella stessa sezione sia per  $u_x$  che per  $v_y$ .

Vengono riportati alcuni frame di esempio nelle figure sottostanti:



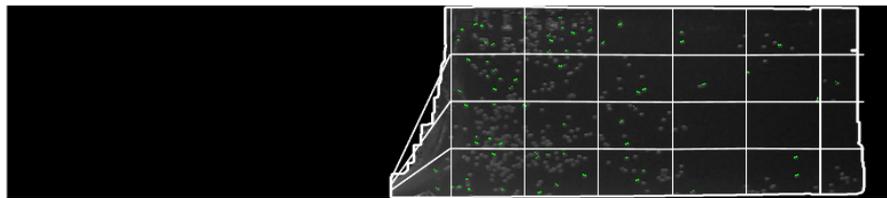
**Velocity X**

Horizontal Section	1	0	0	0	0	0	0	0.02138	0.3688	0.0148	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0.1047	0.009023	0.02528	0	0.03219	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0.008162	0.0179	0.2982	0.0059	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0.06289	0.1302	0.04547	0	0	0
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Vertical Section											

**Velocity Y**

Horizontal Section	1	0	0	0	0	0	0	0.0133	0.02964	0.3053	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0.2164	0.01604	0.02029	0	0.006526	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0.3976	0.02502	0.007576	0.004194	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0.07416	0.02302	0.008936	0	0	0
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Vertical Section											

Figura 42 -  $u_x$  e  $v_y$  prima del dam-break



**Velocity X**

Horizontal Section	1	0	0	0	0	0	0	0.1022	0.06717	0.01773	0.001926	0.01302	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0.06589	0.3651	0.5546	0.4347	0.1504	0.02202
3	0	0	0	0	0	0	0	0.4034	0.1268	0.1556	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0.6618	0.6092	0.2003	0.4738	0.01181	0.0635	0
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Vertical Section											

**Velocity Y**

Horizontal Section	1	0	0	0	0	0	0	0.3794	0.4052	0.3908	0.0611	0.02906	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0.3483	0.3926	0.4463	0.01848	0.176	0.01514
3	0	0	0	0	0	0	0	0.6535	0.6018	0.02299	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0.4494	0.3543	0.1362	0.008016	0.02301	0.008832	0
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Vertical Section											

Figura 43 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t = 0.05$  s

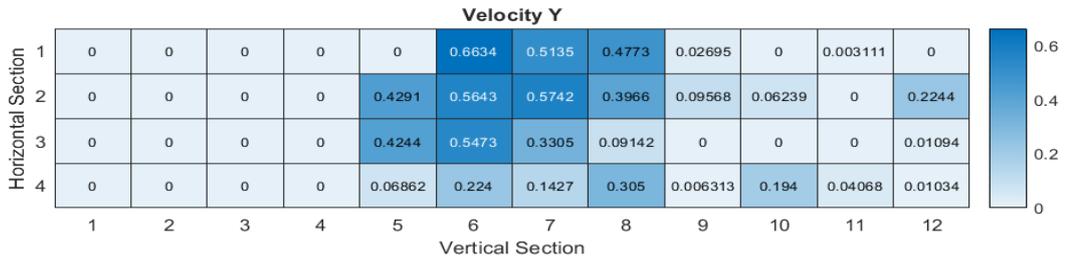
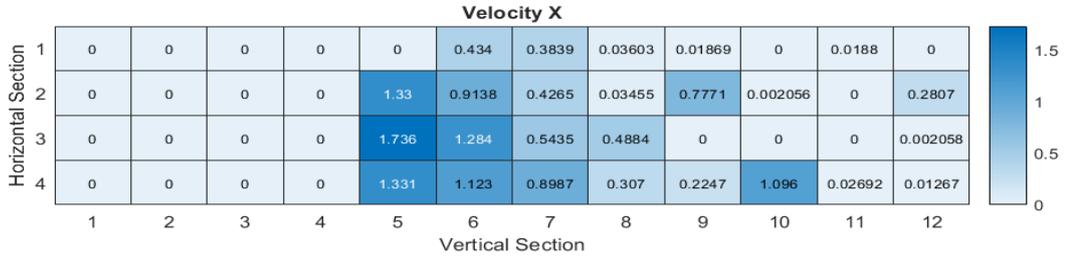
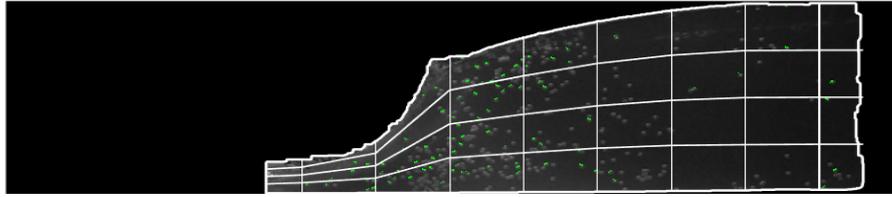


Figura 44 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t = 0.15$  s

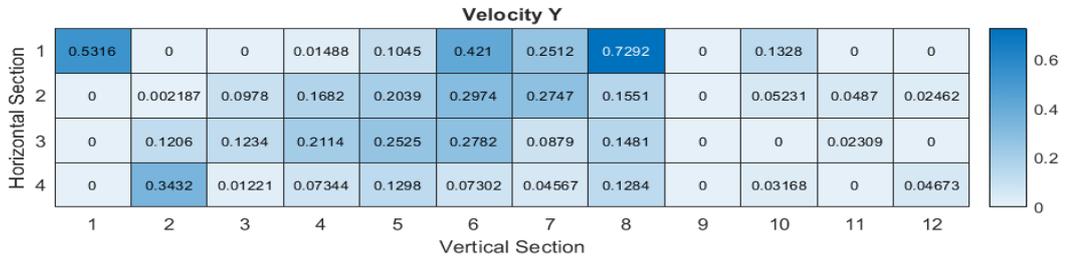
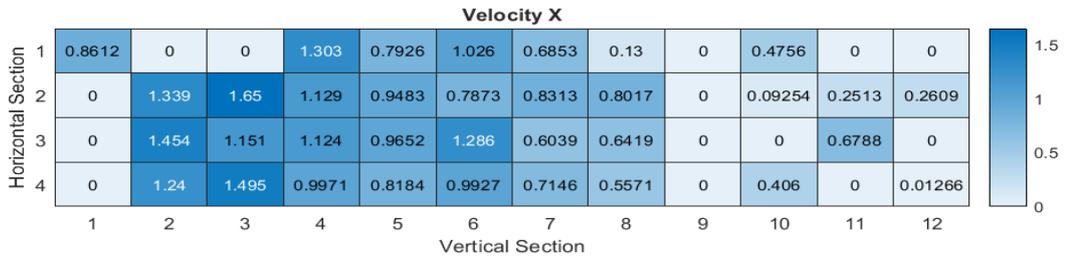
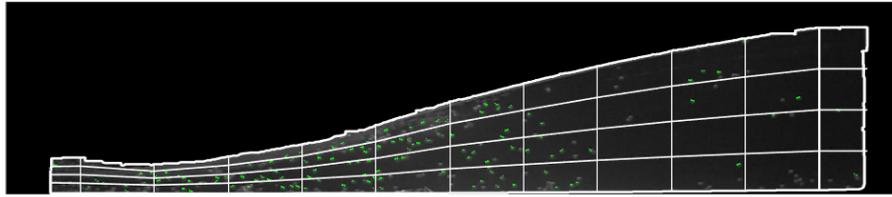


Figura 45 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t = 0.4$  s

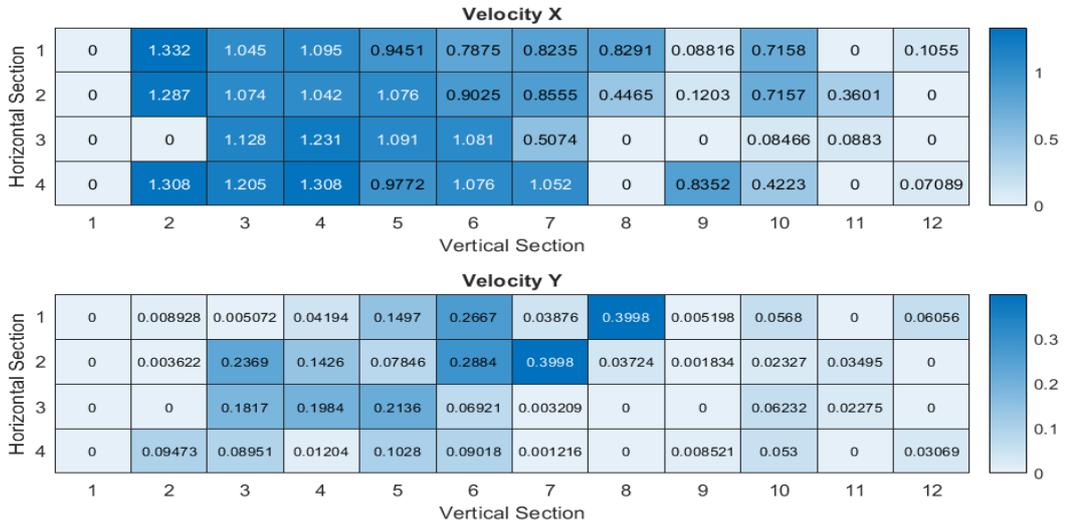
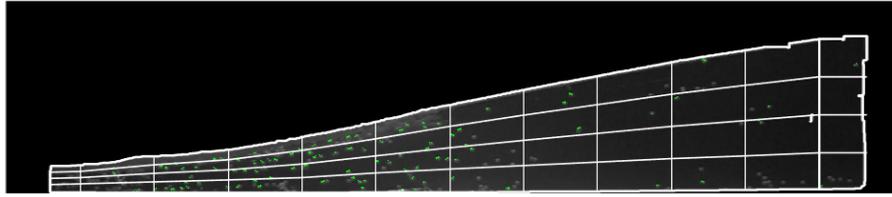


Figura 46 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t = 0.5 s$

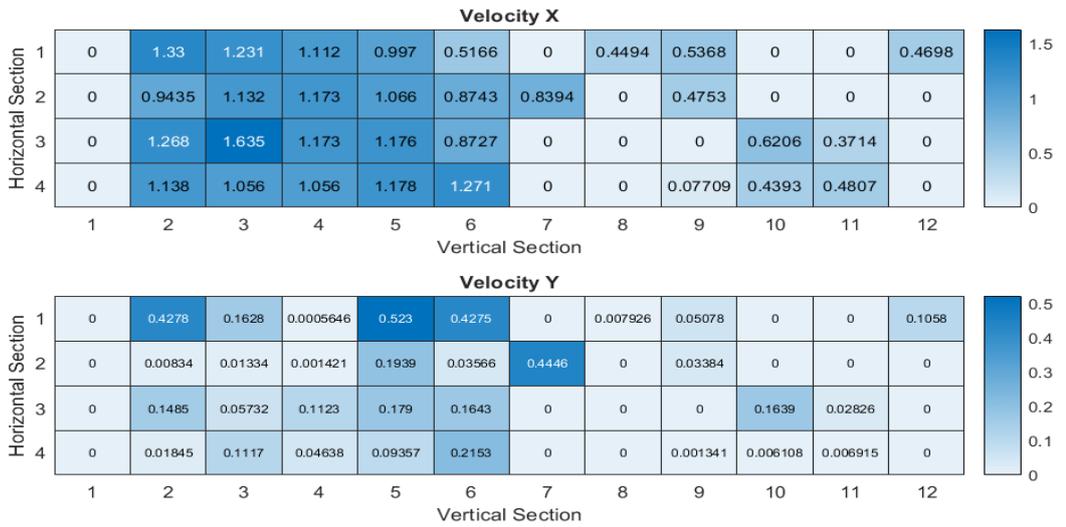
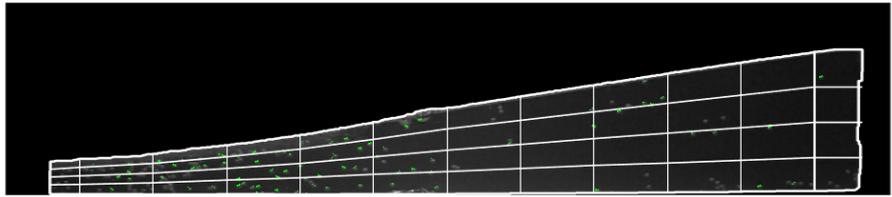


Figura 47 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t = 0.6 s$

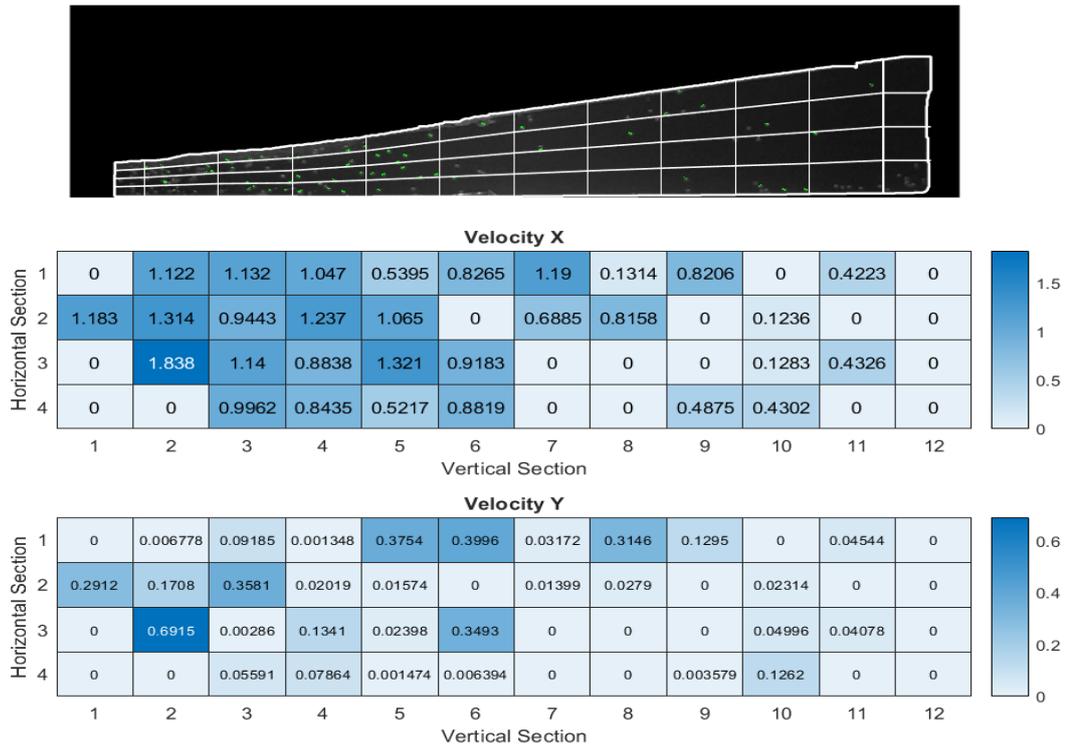


Figura 48 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t = 0.65$  s

Nella figura 42, prima dell'inizio del dam-break, le velocità sono prossime allo zero. Quando la paratoia viene sollevata le velocità iniziano ad aumentare. Si evince come il fronte d'onda, in ogni sezione, abbia una velocità maggiore.

Note le velocità  $u_x$  e  $v_y$ , è stato possibile ricavare anche il modulo della velocità come segue:

$$v = \sqrt{u_x^2 + v_y^2} \quad (62)$$

Poiché, nel caso in esame, le registrazioni sono state eseguite con un frame rate molto alto, si è deciso di fare la media delle velocità presenti in una stessa sezione su dieci frame. Questo è giustificabile con il fatto che le particelle tra un frame e l'altro compiono spostamenti molto piccoli. Dopodiché, è stato studiato l'andamento delle velocità nel tempo.

Di seguito si riporta l'andamento delle  $u_x$  e  $v_y$  nel tempo per alcune sezioni verticali.

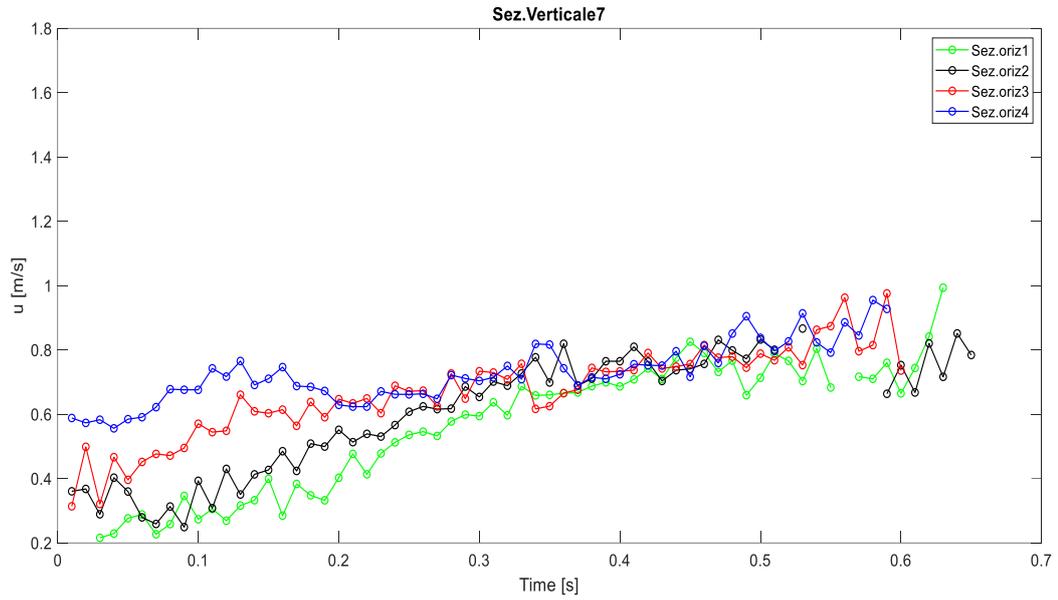


Figura 49 - Andamento delle  $u_x$  nella sezione a monte della paratoia

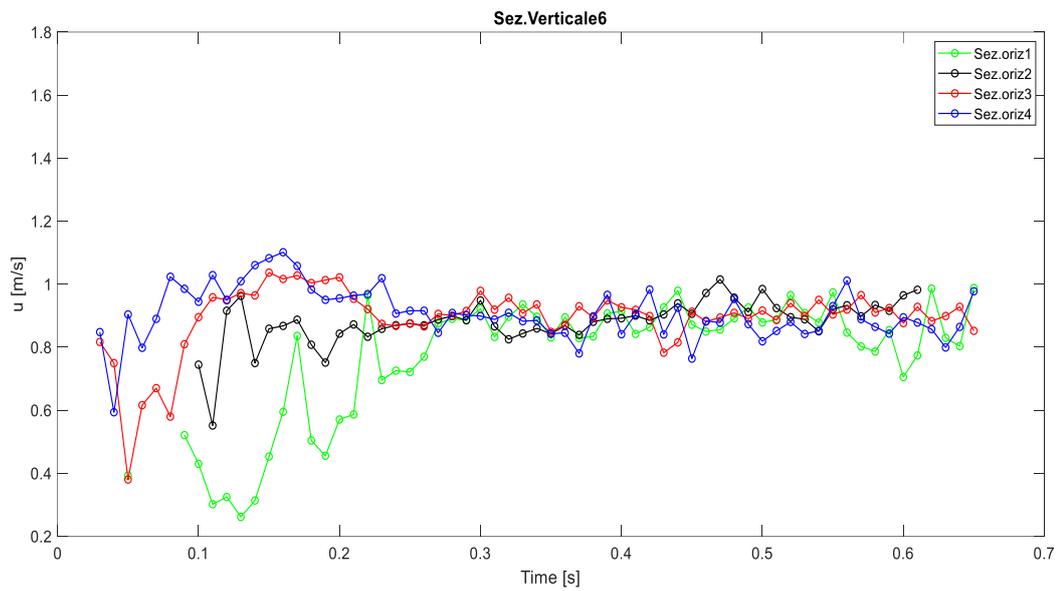


Figura 50 - Andamento delle  $u_x$  nella sezione immediatamente a valle della paratoia

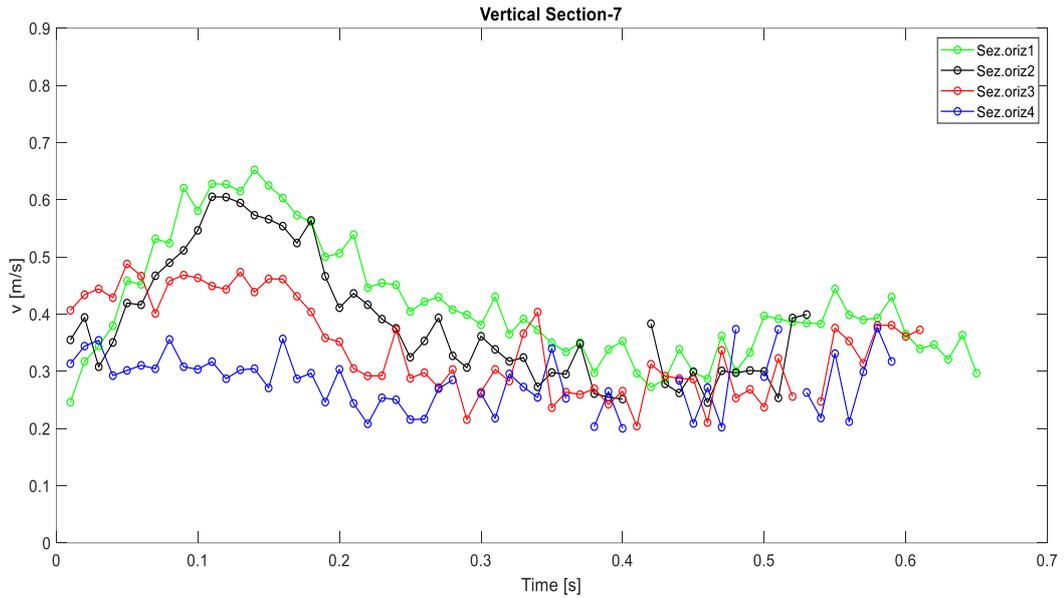


Figura 51 - Andamento delle  $v_y$  nella sezione a monte della paratoia

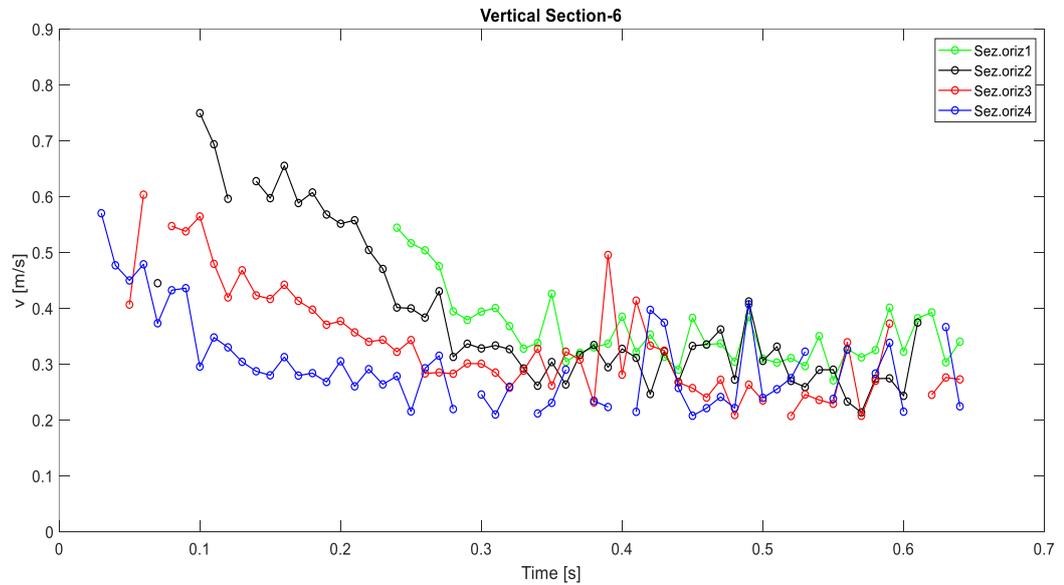


Figura 52 - Andamento delle  $v_y$  nella sezione immediatamente a valle della paratoia

I risultati delle velocità ottenute vengono confrontati con i risultati teorici di Ritter, con lo scopo di valutare la corretta esecuzione delle prove sperimentali effettuate. La soluzione di Ritter rappresenta una pietra miliare per quanto concerne la teoria del dam-break. Essa ha come ipotesi di base:

- canale orizzontale
- fondo asciutto a valle della diga

Le equazioni di De Saint-Venant per un canale prismatico a sezione rettangolare sono:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (62)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad (63)$$

Le equazioni 62 e 63 sono ottenute dalle equazioni di Eulero assumendo che l'accelerazione verticale possa essere trascurata e che il profilo di velocità in direzione x sia uniforme sulla verticale di altezza  $h(x, t)$ .

Di seguito, si riporta la soluzione di Ritter alle equazioni 62 e 63 per la rottura istantanea di una diga.

$$h(x, t) = \frac{1}{9 \cdot g} \left[ \left( 2 \cdot \sqrt{g \cdot y_0} - \frac{x}{t} \right) \right]^2 \quad (64)$$

$$U(x, t) = \frac{2}{3} \left( \sqrt{g \cdot y_0} + \frac{x}{t} \right) \quad (65)$$

con:

$y_0$  altezza di acqua iniziale nel serbatoio

$x = 0$  coordinata in corrispondenza della paratoia

$t$  il tempo.

Esse permettono di calcolare l'altezza di acqua e la velocità dell'onda positiva di valle nella direzione x ad ogni istante temporale.

La struttura ondulatoria include un fronte positivo del letto asciutto che si propaga alla velocità  $2 \cdot \sqrt{g \cdot y_0}$ , e un fronte negativo che si diffonde con velocità pari a  $-\sqrt{g \cdot y_0}$  sull'acqua ferma.

Dalle precedenti formule, è stata calcolata la velocità di Ritter in ogni sezione analizzata. Questa velocità è stata confrontata con le velocità ottenute dal software PTVlab in ogni sezione orizzontale per ogni sezione verticale.

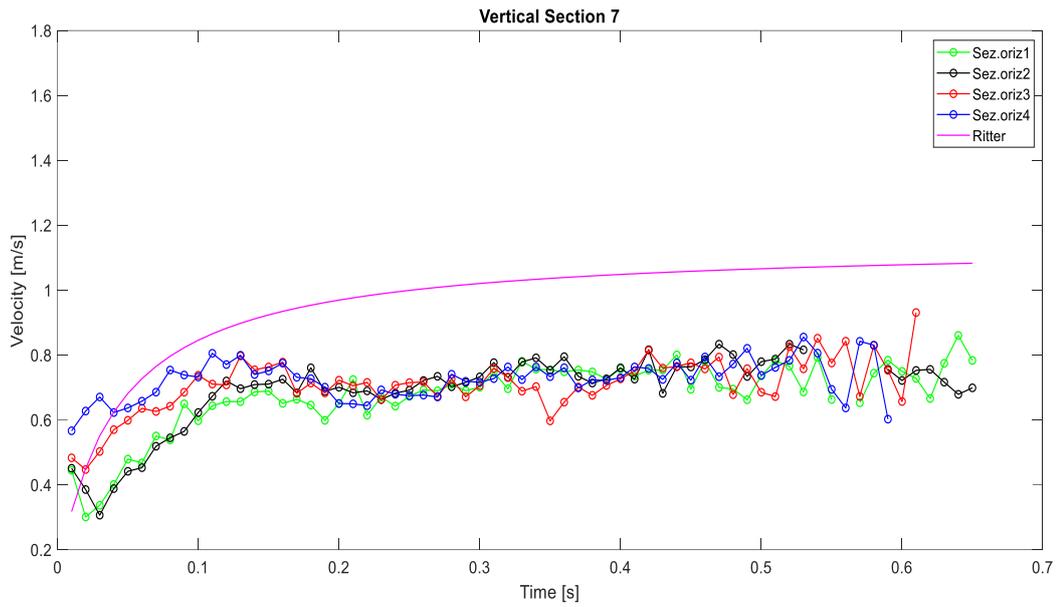


Figura 53 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 7

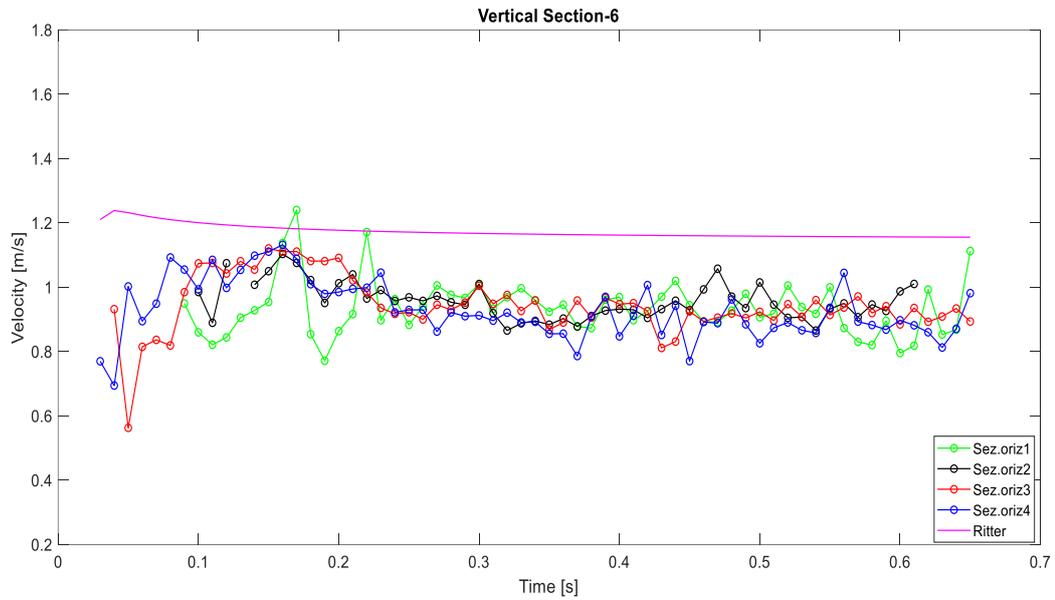


Figura 54 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 6

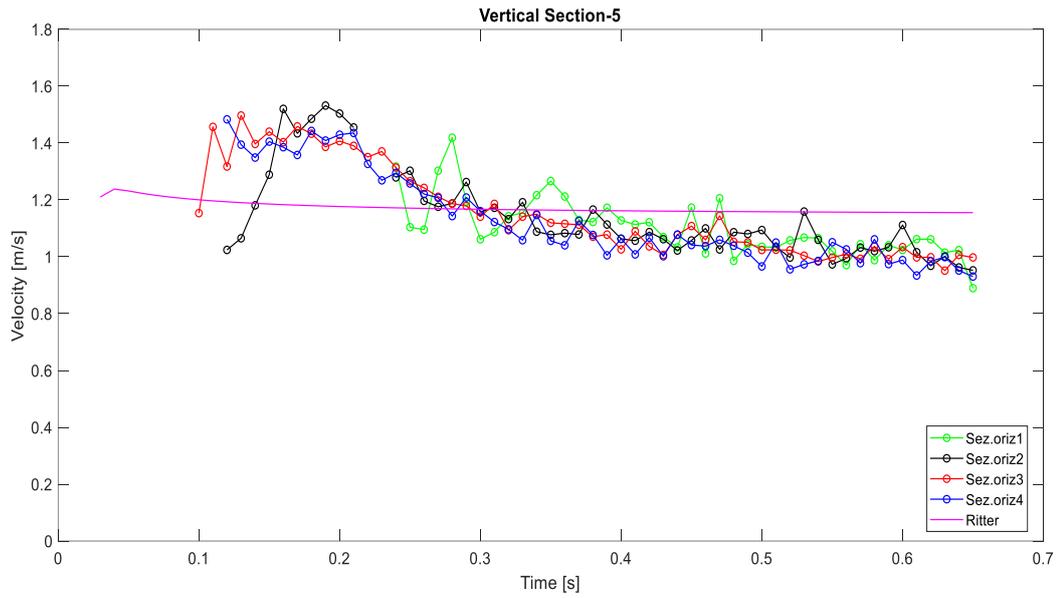


Figura 55 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 5

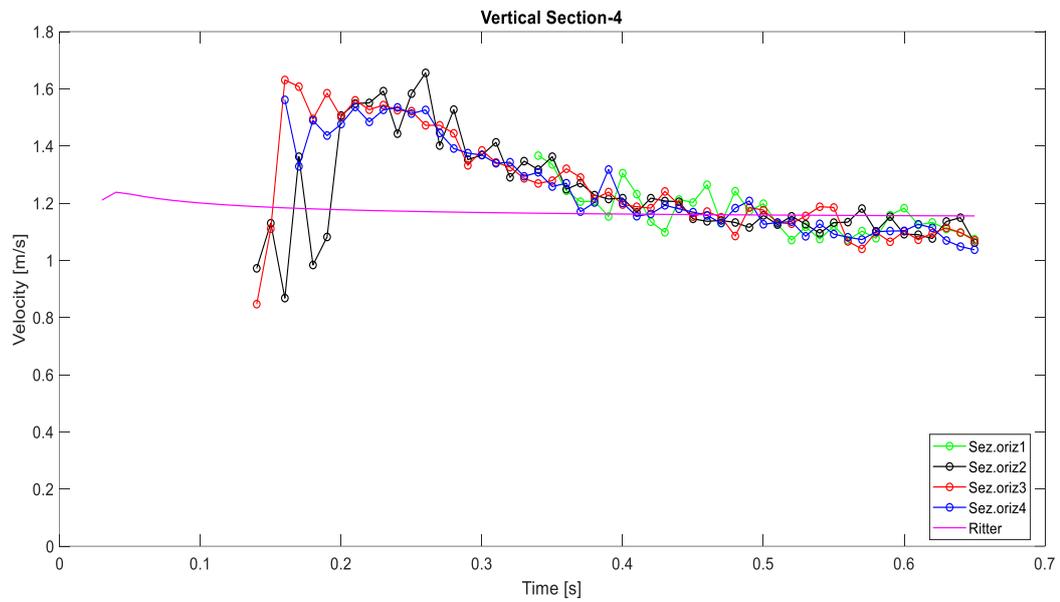


Figura 56 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 4

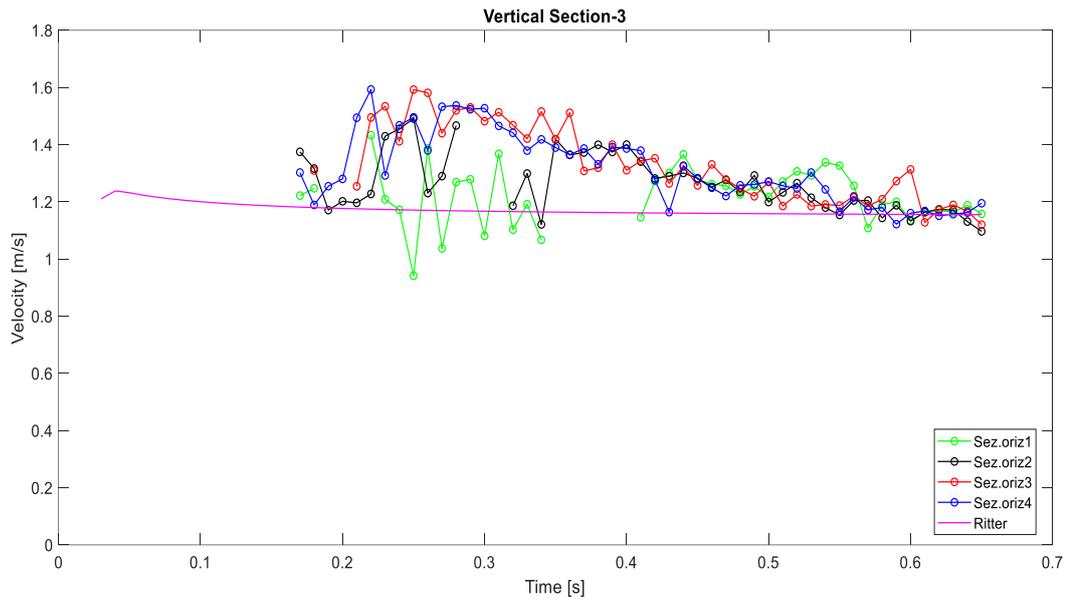


Figura 57 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 3

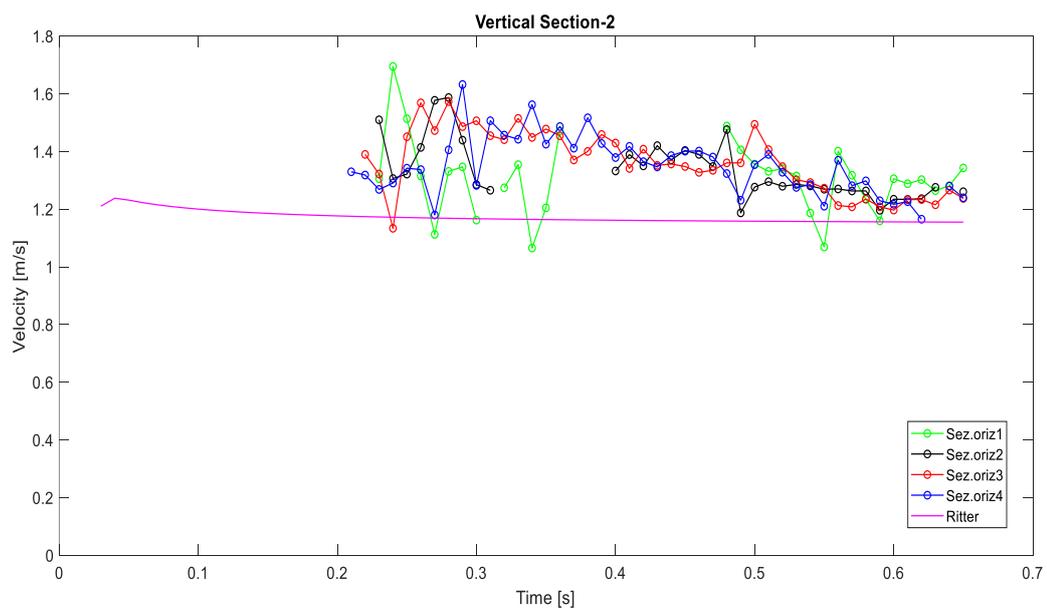


Figura 58 - Andamento delle velocità nel tempo sezione verticale 2

Si evince come la teoria di Ritter, sovrastimi leggermente la velocità nelle sezioni sette e sei.

La velocità di Ritter è stata anche confrontata, per ogni sezione verticale, con la media dalle velocità delle quattro sezioni orizzontali.

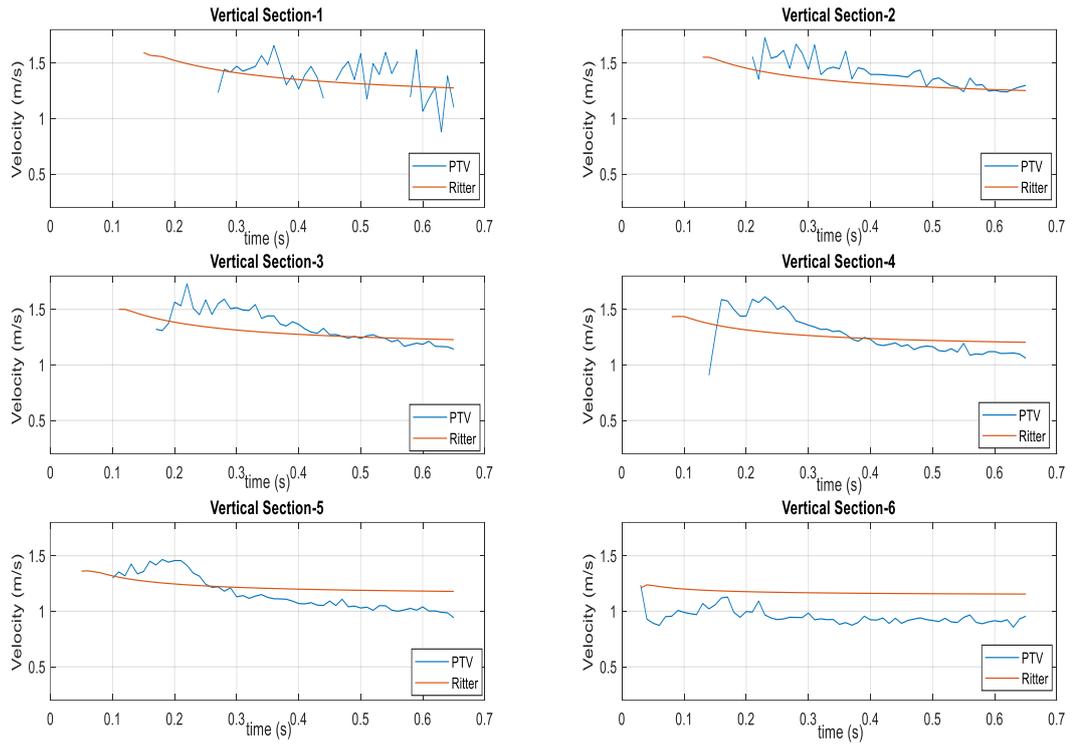


Figura 59 - Confronto tra Ritter e la media delle velocità nelle sezioni orizzontali

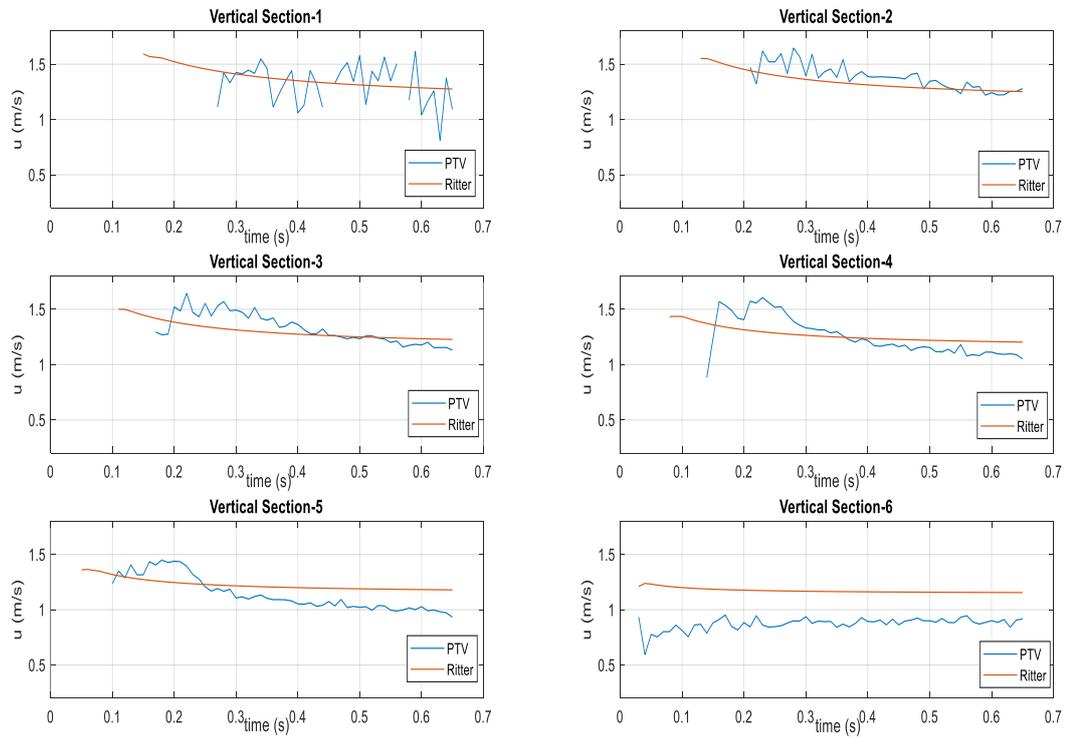


Figura 60 - Confronto tra Ritter e la media delle  $u$  nelle sezioni orizzontali

Sono stati eseguiti gli stessi step per il secondo video processato. Di seguito si riportano i grafici delle velocità  $u_x$  e  $v_y$ , e l'andamento delle medie delle velocità nel tempo confrontate con la soluzione teorica di Ritter.

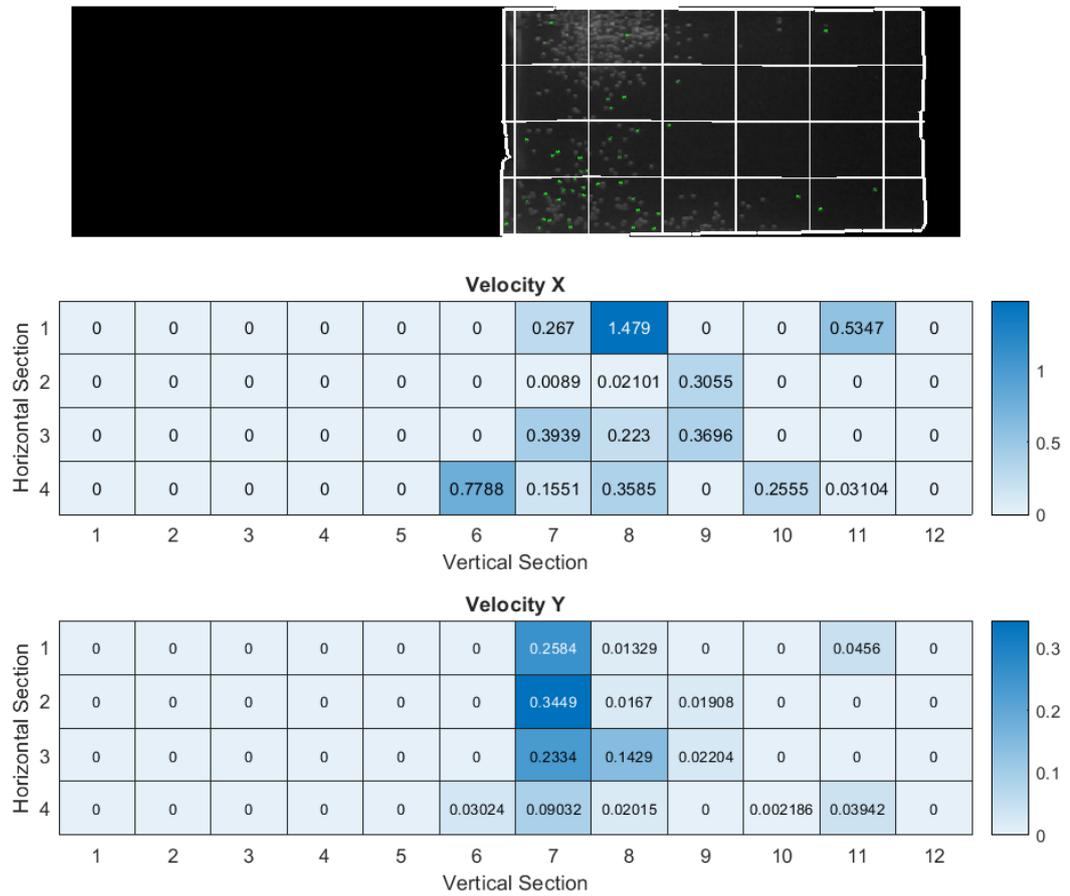
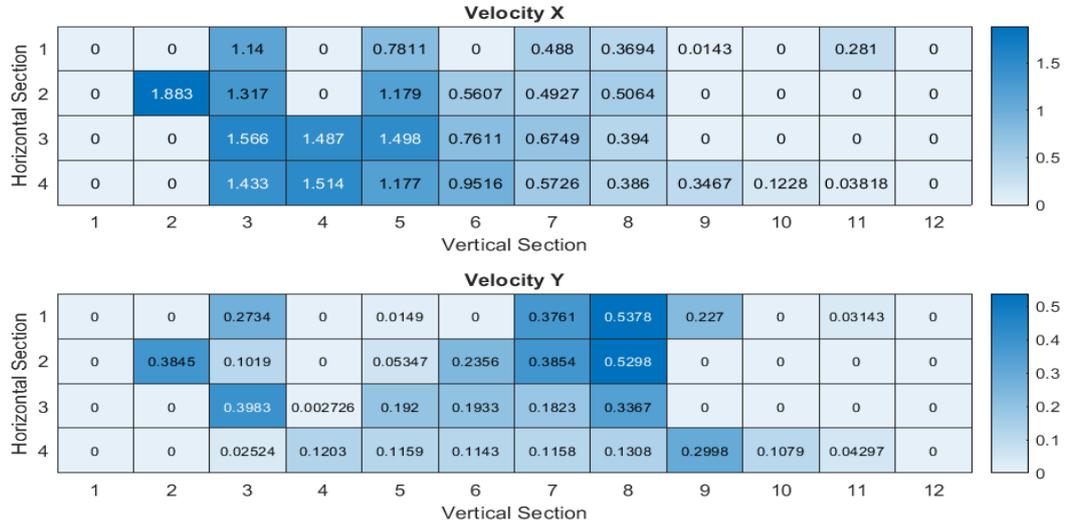
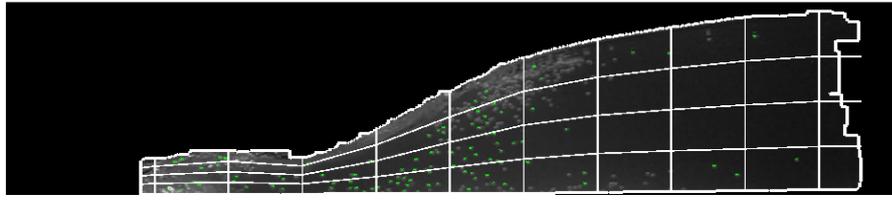
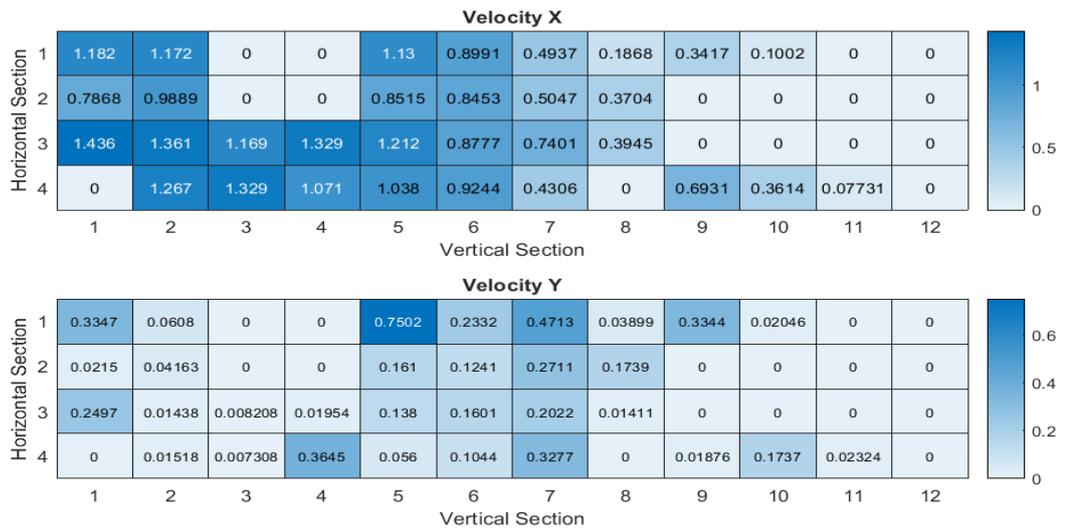
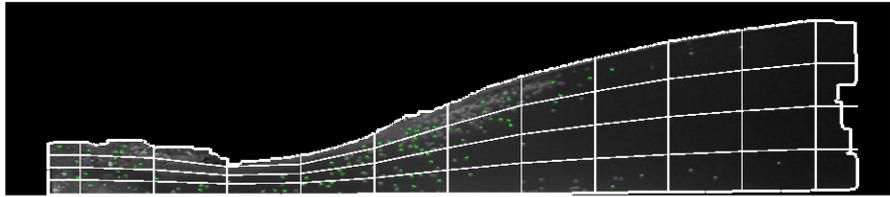


Figura 61 -  $u_x$  e  $v_y$  prima del dam-break



*Figura 62 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t=0.2$  s*



*Figura 63 -  $u_x$  e  $v_y$  a  $t=0.3$  s*

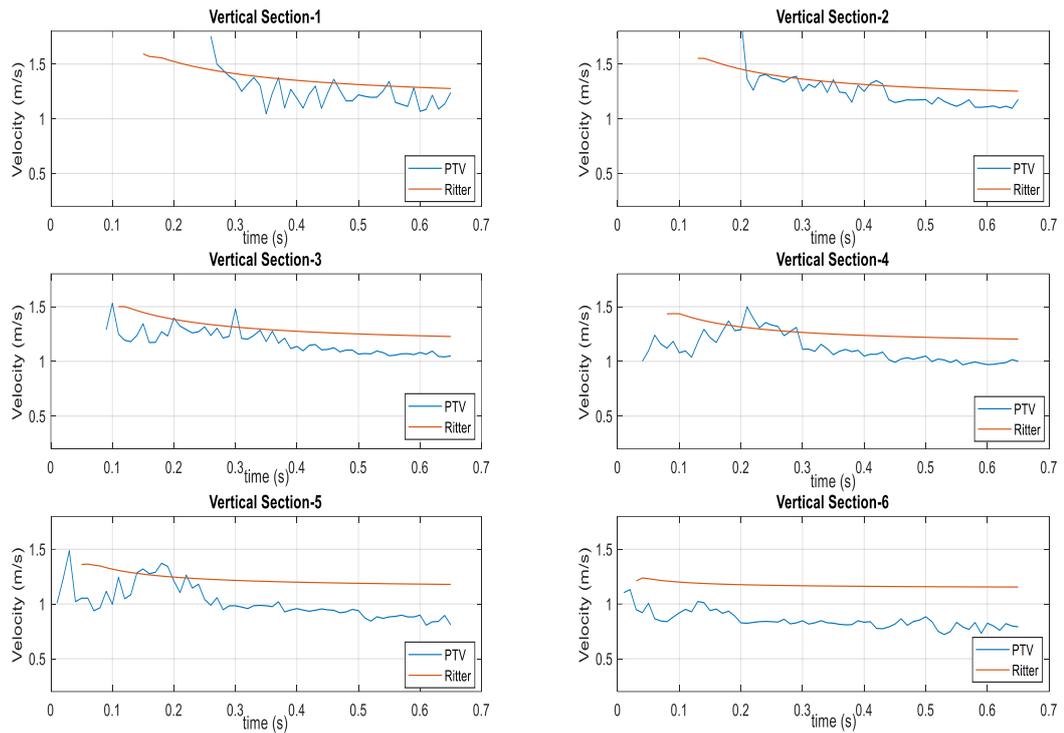


Figura 64 - Confronto tra la media delle velocità nelle sezioni verticali e Ritter

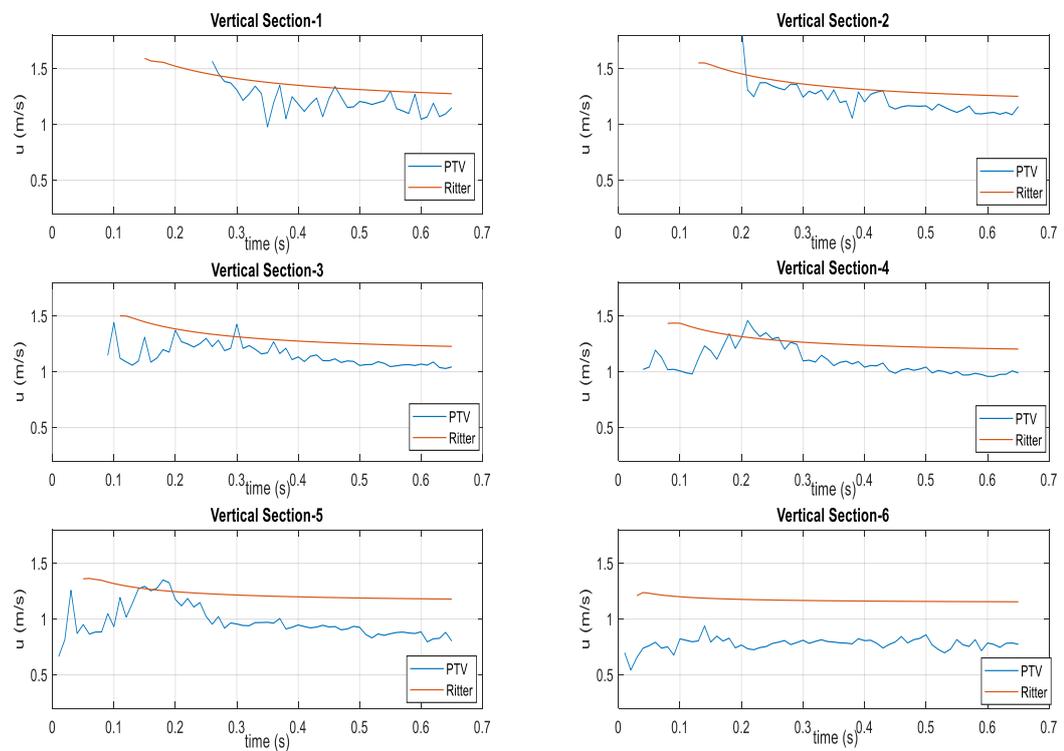


Figura 65 - Confronto tra la media delle u e Ritter

Nella figura 66 vengono confrontate le velocità sperimentali ottenute dal primo video e quelle ottenute dal secondo video con le velocità teoriche di Ritter.

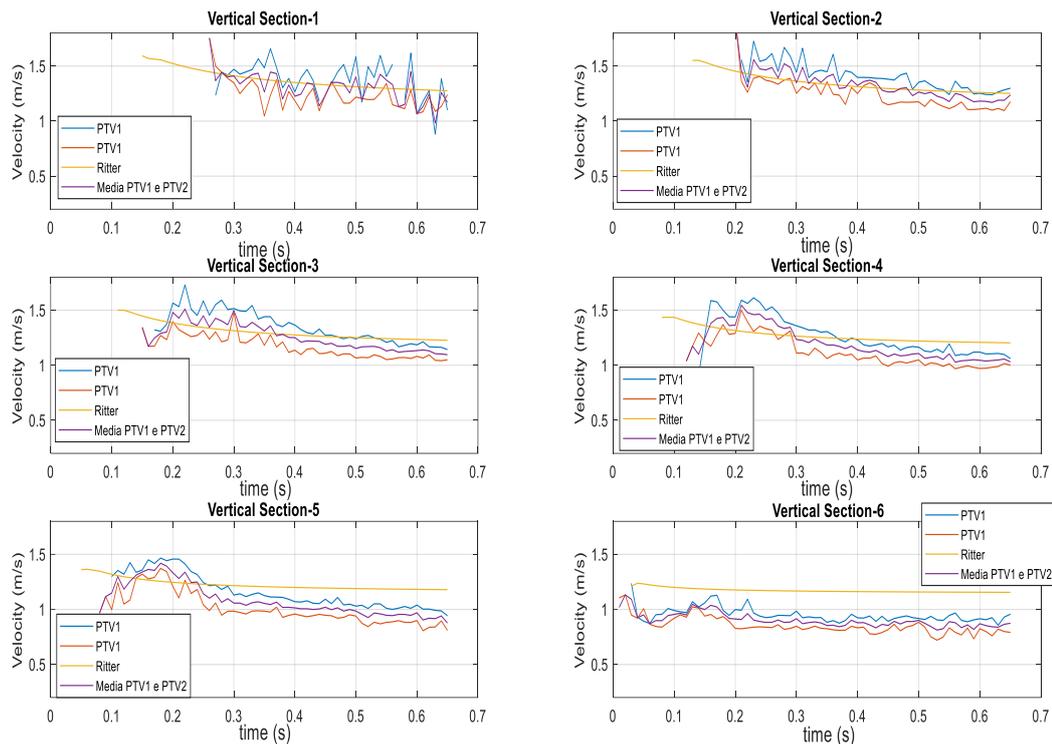


Figura 66 - Confronto tra velocità sperimentali del 1° e 2° filmato con Ritter

Si evince come le velocità sperimentali ottenute dai due filmati analizzati abbiano lo stesso andamento. Nella sezione sei, a valle della paratoia, Ritter tende a sovrastimare la velocità. Questo è dovuto al fatto che la soluzione di Ritter si basa sull'ipotesi che la velocità sia costante sulla verticale e che abbia un'unica componente, quella del moto.

Infine, si è deciso di confrontare il profilo teorico di Ritter, ottenuto con l'equazione 62, con il profilo sperimentale ottenuto. Prima di fare questo confronto, è stato necessario trasformare il profilo, ottenuto dalle maschere, espresso in coordinate pixel in coordinate metriche. Per attuare tale trasformazione sono necessari i parametri della camera, la matrice di rotazione R e matrice di traslazione T. Da questi dati di partenza, mediante la funzione di MATLAB *'pointsToWorld'*, si giunge al profilo ad ogni istante temporale espresso in coordinate metriche.

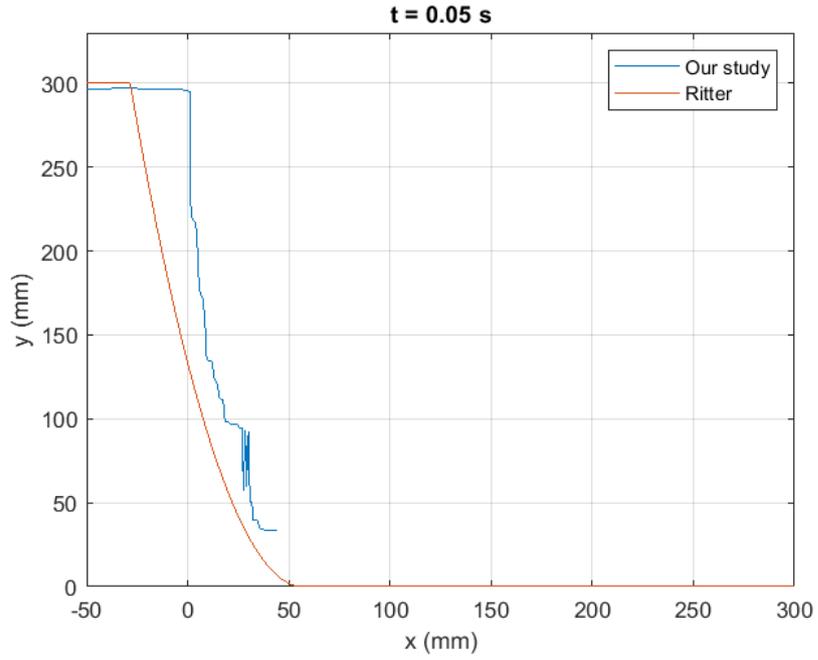


Figura 67 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.05\text{ s}$

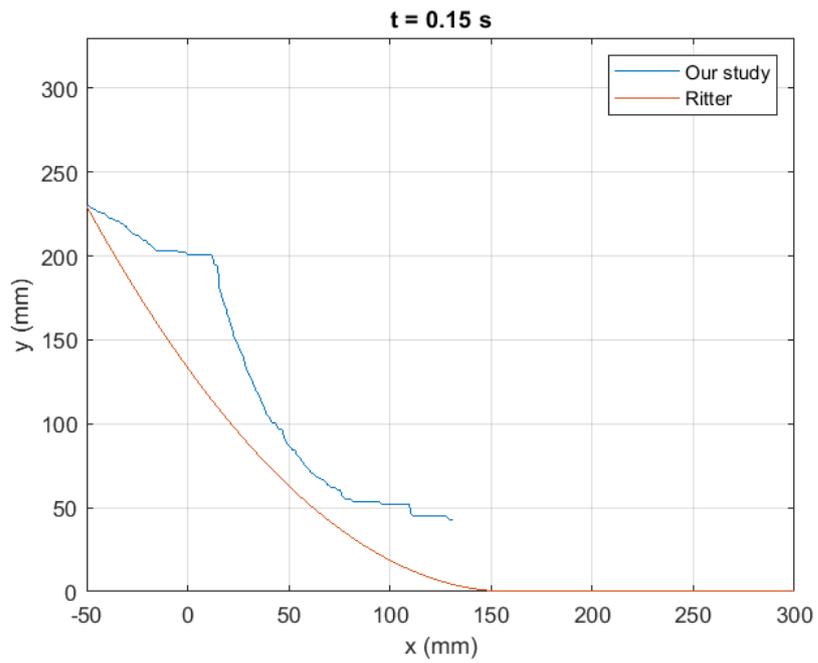


Figura 68 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.15\text{ s}$

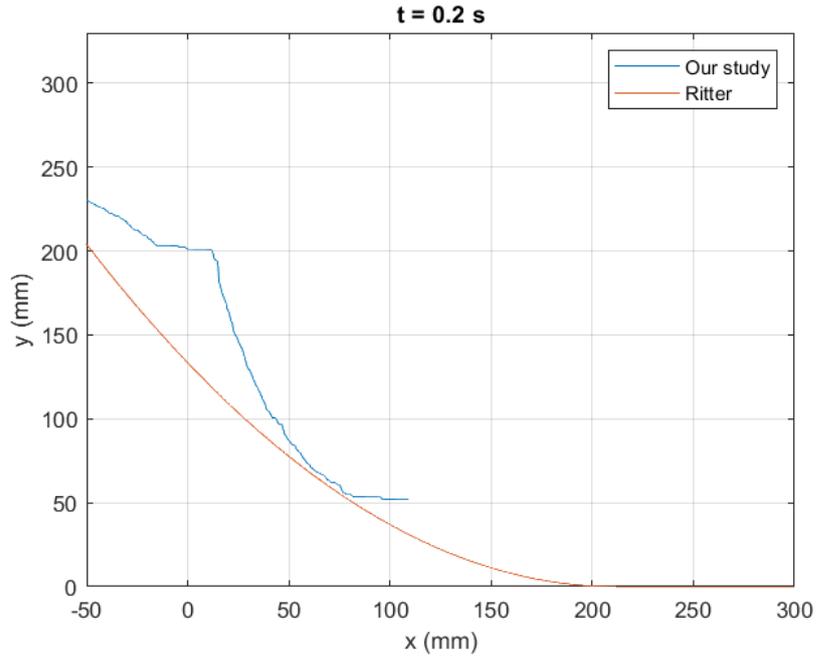


Figura 69 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.2$  s

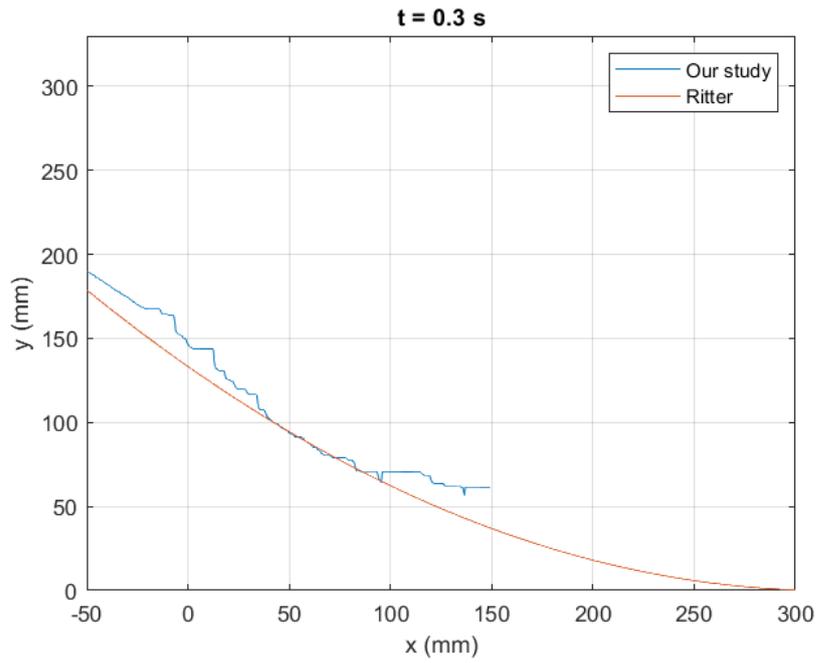


Figura 70 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.3$  s

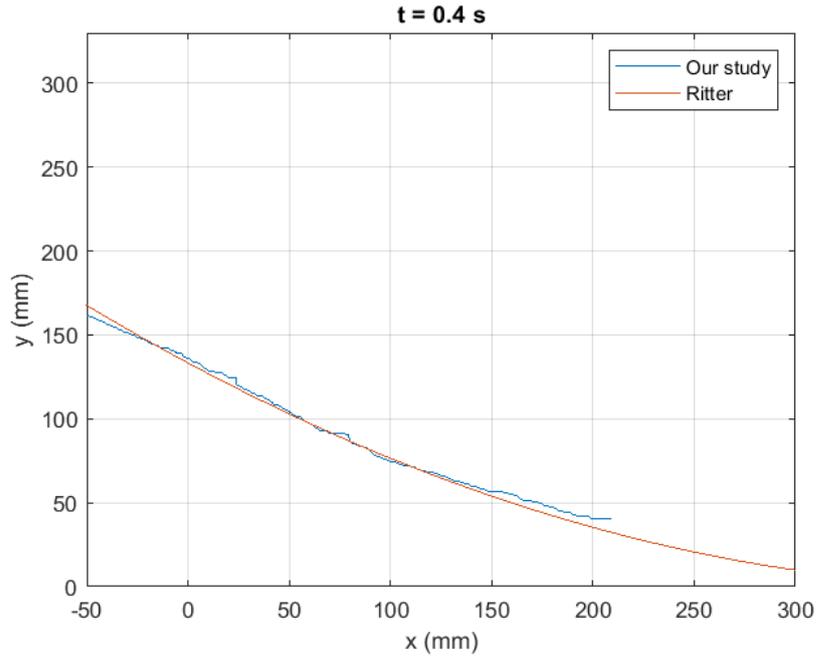


Figura 71 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.4 s$

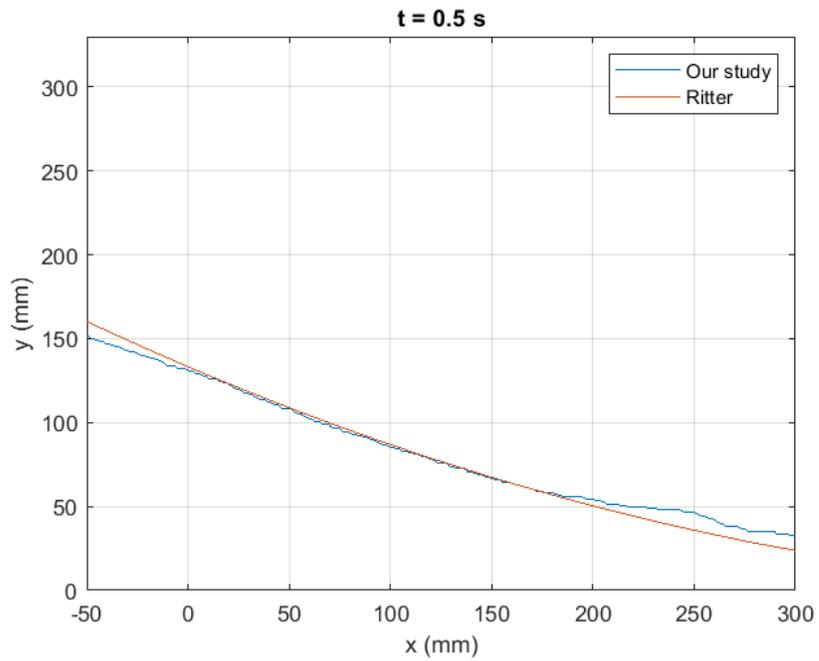


Figura 72 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.5 s$

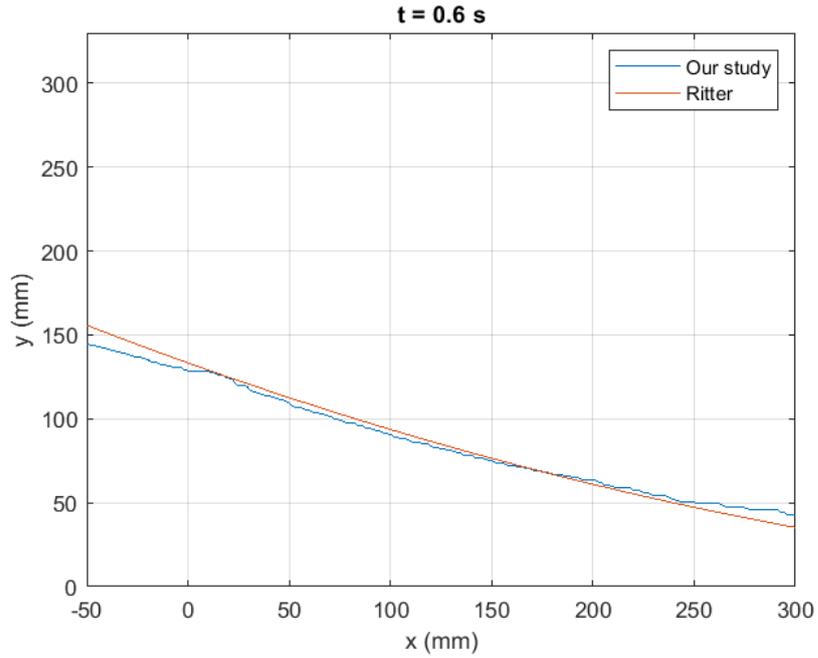


Figura 73 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.6 s$

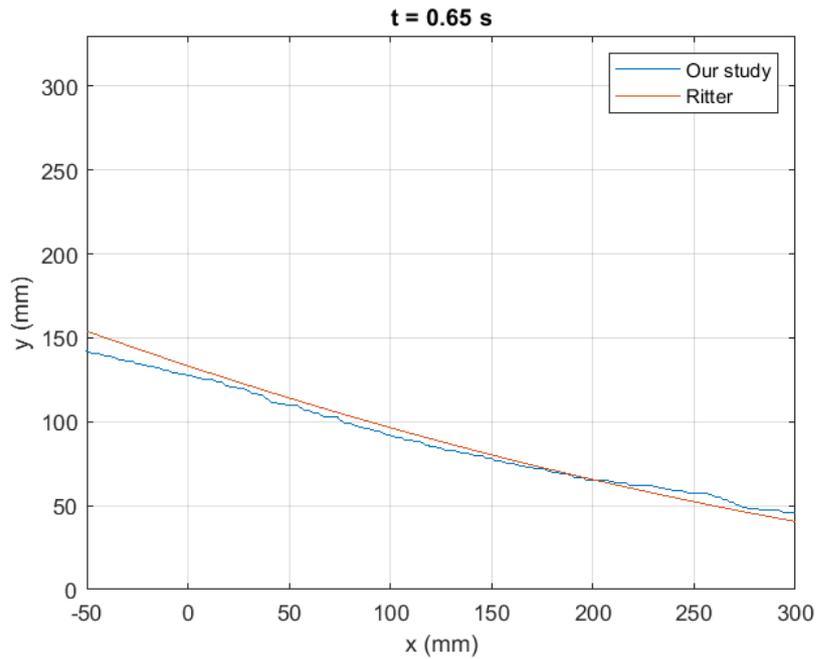


Figura 74 - Confronto tra profilo di Ritter e profilo sperimentale a  $t = 0.6 s$

Come si evince dai precedenti grafici, il profilo sperimentale si discosta leggermente dal profilo teorico di Ritter negli istanti iniziali. A partire da 0.3 s dall'inizio del dam-break si inizia ad avere una certa corrispondenza tra i due profili confrontati fino ad una totale sovrapposizione dall'istante 0.4 s.

## 6. Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi ha valutato sperimentalmente il campo di velocità di un'onda di piena a seguito di un dam-break tramite la simulazione in laboratorio di un modello fisico.

La progettazione e la messa in opera dell'ambiente sperimentale, svolta in maniera accorta, ha reso possibile migliorare l'efficienza esecutiva delle prove. Queste ultime, infatti, si sono rivelate difficoltose per svariati motivi tra cui la difficoltà nel reperimento di particelle che risultassero neutre in acqua e nel ricreare una adeguata dispersione delle stesse in acqua. In due casi, gli esperimenti condotti hanno soddisfatto le proprietà appena menzionate.

L'analisi dei corrispondenti video registrati durante le attività sperimentali ha permesso di raggiungere l'obiettivo prefissato, ossia studiare e analizzare il campo di moto del flusso di piena. Da tale studio si evince come il fronte d'onda abbia una velocità maggiore rispetto alla velocità misurata nelle altre sezioni.

Il campo di moto sperimentale, ottenuto mediante l'applicazione di un approccio di Particle Tracking Velocimetry, è stato confrontato con le velocità teoriche ottenute attraverso l'applicazione della soluzione di *Ritter*. Il confronto effettuato evidenzia come, tra il modello sperimentale e quello teorico, le velocità siano dello stesso ordine di grandezza in tutte le sezioni di moto verticale analizzate. Nella sezione immediatamente a valle della paratoia, è stato osservato come il modello teorico tenda a sovrastimare i valori di velocità.

In aggiunta, è stata effettuata una comparazione tra i profili ottenuti mediante il modello teorico di *Ritter* e quelli ricavati dall'analisi sperimentale condotta. I risultati ottenuti hanno dimostrato come vi sia una buona corrispondenza tra i profili sperimentali e quelli teorici.

Una delle principali criticità riscontrate durante l'attività sperimentale è stata l'impossibilità di tracciare il fronte d'onda in quanto il fondo del canale si trovava leggermente al di sotto del punto più basso ripreso dalla telecamera. Inoltre, le particelle utilizzate come tracciante possedevano una densità maggiore rispetto a quella dell'acqua e, questo, ha reso difficile ricreare la loro corretta dispersione in acqua. Tali elementi richiederanno ulteriori studi.

In futuro, si prevede di migliorare la fase di ricerca di un nuovo seeding ottimale che presenti una densità prossima a quella dell'acqua e di sollevare il letto del canale in modo da rendere possibile il tracciamento del fronte d'onda. In aggiunta, si potrebbe pensare di estendere il medesimo studio al caso dell'alveo vegetato.

# Allegati

**Dati inerenti le particelle ricavati dalle misurazioni con bilancia di precisione e calibro elettronico**

Sfere Gialle					Sfere Bianche				
	massa [g]	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]		massa [g]	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]
1	0,1129	5,96	5,91	5,97	1	0,0651	4,77	4,77	4,77
2	0,1124	5,94	5,92	5,91	2	0,0652	4,78	4,78	4,77
3	0,1132	5,92	5,90	5,93	3	0,0651	4,77	4,78	4,77
4	0,1134	5,92	5,92	5,93	4	0,0651	4,77	4,78	4,77
5	0,1136	5,96	5,93	5,95	5	0,0652	4,77	4,77	4,76
6	0,1136	5,91	5,92	5,92	6	0,0651	4,77	4,77	4,77
7	0,1124	5,92	5,95	5,92	7	0,0652	4,77	4,77	4,77
8	0,1120	5,96	5,94	5,93	8	0,0652	4,78	4,78	4,77
9	0,1132	5,92	5,96	5,94	9	0,0652	4,77	4,77	4,77
10	0,1143	5,93	5,95	5,95	10	0,0654	4,77	4,77	4,77
11	0,1121	5,97	5,94	5,93	11	0,0655	4,77	4,77	4,77
12	0,1142	5,95	5,92	5,93	12	0,0653	4,77	4,77	4,77
13	0,1140	5,92	5,96	5,96	13	0,0652	4,77	4,77	4,77
14	0,1132	5,94	5,94	5,93	14	0,0650	4,77	4,76	4,77
15	0,1128	5,94	5,92	5,95	15	0,0655	4,77	4,77	4,77
16	0,1134	5,93	5,94	5,93	16	0,0654	4,78	4,78	4,77
17	0,1127	5,90	5,94	5,90	17	0,0651	4,77	4,78	4,77
18	0,1140	5,95	5,92	5,94	18	0,0651	4,78	4,78	4,77
19	0,1137	5,96	5,91	5,93	19	0,0656	4,78	4,78	4,78
20	0,1138	5,93	5,92	5,95	20	0,0654	4,78	4,78	4,77
21	0,1140	5,96	5,95	5,93	21	0,0653	4,77	4,77	4,77
22	0,1139	5,94	5,96	5,94	22	0,0656	4,78	4,78	4,78
23	0,1142	5,94	5,96	5,93	23	0,0653	4,78	4,78	4,77
24	0,1131	5,92	5,95	5,93	24	0,0651	4,78	4,77	4,78
25	0,1128	5,94	5,92	5,95	25	0,0653	4,77	4,77	4,77

26	0,1133	5,95	5,93	5,94	26	0,0653	4,77	4,77	4,77
27	0,1133	5,94	5,94	5,93	27	0,0654	4,78	4,77	4,77
28	0,1143	5,91	5,94	5,93	28	0,0651	4,78	4,77	4,78
29	0,1137	5,97	5,93	5,94	29	0,0652	4,78	4,78	4,78
30	0,1137	5,91	5,90	5,94	30	0,0650	4,77	4,78	4,77
31	0,1136	5,93	5,94	5,94	31	0,0652	4,77	4,78	4,77
32	0,1127	5,93	5,96	5,92	32	0,0657	4,78	4,77	4,78
33	0,1134	5,93	5,95	5,93	33	0,0656	4,78	4,78	4,78
34	0,1135	5,95	5,97	5,93	34	0,0654	4,78	4,78	4,78
35	0,1130	5,93	5,91	5,90	35	0,0656	4,78	4,78	4,78
36	0,1144	5,92	5,95	5,96	36	0,0655	4,78	4,78	4,78
37	0,1135	5,94	5,97	5,94	37	0,0652	4,78	4,77	4,78
38	0,1139	5,92	5,97	5,94	38	0,0652	4,78	4,77	4,77
39	0,1132	5,92	5,95	5,91	39	0,0654	4,77	4,77	4,77
40	0,1125	5,95	5,90	5,91	40	0,0653	4,77	4,76	4,77
41	0,1128	5,91	5,93	5,95	41	0,0654	4,77	4,77	4,76
42	0,1139	5,95	5,92	5,93	42	0,0653	4,77	4,77	4,77
43	0,1136	5,94	5,92	5,93	43	0,0654	4,77	4,77	4,77
44	0,1127	5,96	5,92	5,95	44	0,0655	4,77	4,77	4,77
45	0,1132	5,94	5,90	5,93	45	0,0656	4,77	4,77	4,77
46	0,1136	5,91	5,96	5,94	46	0,0657	4,76	4,76	4,77
47	0,1133	5,94	5,94	5,93	47	0,0652	4,76	4,76	4,77
48	0,1141	5,93	5,97	5,92	48	0,0655	4,76	4,76	4,76
49	0,1137	5,92	5,93	5,91	49	0,0651	4,76	4,77	4,77
50	0,1129	5,94	5,92	5,96	50	0,0654	4,76	4,76	4,76

Sfere giallo fosforescente					Sfere Verdi				
	massa [g]	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]		massa [g]	d <sub>1</sub> [mm]	d <sub>2</sub> [mm]	d <sub>3</sub> [mm]
1	0,1131	5,94	5,94	5,94	1	0,1239	5,86	5,91	5,92
2	0,1128	5,95	5,94	5,94	2	0,1241	5,91	5,88	5,90

3	0,1139	5,97	5,97	5,97	3	0,1271	5,89	5,90	5,89
4	0,1134	5,96	5,97	5,95	4	0,1267	5,90	5,91	5,90
5	0,1133	5,94	5,96	5,93	5	0,1265	5,90	5,90	5,89
6	0,1149	5,97	5,97	5,95	6	0,1274	5,89	5,90	5,93
7	0,1131	5,94	5,94	5,95	7	0,1271	5,90	5,91	5,92
8	0,1128	5,95	5,94	5,93	8	0,1287	5,93	5,91	5,93
9	0,1143	5,97	5,94	5,97	9	0,1262	5,92	5,94	5,94
10	0,1125	5,94	5,95	5,94	10	0,1254	5,90	5,89	5,93
11	0,1129	5,95	5,93	5,93	11	0,1267	5,92	5,91	5,93
12	0,1141	5,97	5,96	5,95	12	0,1238	5,89	5,90	5,89
13	0,1133	5,94	5,96	5,96	13	0,1247	5,90	5,92	5,90
14	0,1141	5,95	5,92	5,93	14	0,1249	5,87	5,86	5,93
15	0,1128	5,94	5,94	5,93	15	0,1265	5,89	5,89	5,91
16	0,1129	5,95	5,94	5,94	16	0,1251	5,89	5,89	5,90
17	0,1130	5,92	5,95	5,92	17	0,1273	5,92	5,93	5,89
18	0,1133	5,94	5,93	5,94	18	0,1241	5,89	5,90	5,91
19	0,1128	5,94	5,93	5,89	19	0,1253	5,89	5,88	5,91
20	0,1138	5,94	5,95	5,94	20	0,1287	5,90	5,92	5,94
21	0,1136	5,95	5,95	5,94	21	0,1254	5,90	5,90	5,88
22	0,1132	5,92	5,96	5,93	22	0,1254	5,90	5,92	5,87
23	0,1150	5,96	5,95	5,98	23	0,1254	5,93	5,91	5,91
24	0,1134	5,93	5,96	5,93	24	0,1271	5,90	5,91	5,88
25	0,1131	5,94	5,94	5,94	25	0,1255	5,88	5,90	5,92
26	0,1128	5,94	5,94	5,92	26	0,1282	5,94	5,94	5,93
27	0,1139	5,92	5,92	5,94	27	0,1267	5,87	5,90	5,89
28	0,1140	5,95	5,95	5,93	28	0,1275	5,92	5,91	5,91
29	0,1134	5,92	5,94	5,91	29	0,1266	5,92	5,90	5,89
30	0,1135	5,95	5,93	5,92	30	0,1258	5,92	5,89	5,90
31	0,1127	5,95	5,92	5,94	31	0,1248	5,92	5,92	5,88
32	0,1141	5,92	5,95	5,95	32	0,1247	5,89	5,86	5,90
33	0,113	5,95	5,95	5,95	33	0,1267	5,93	5,92	5,91
34	0,1137	5,92	5,96	5,94	34	0,1252	5,89	5,89	5,89
35	0,1134	5,95	5,94	5,93	35	0,1279	5,94	5,97	5,92

36	0,1126	5,92	5,92	5,93	36	0,1264	5,92	5,92	5,92
37	0,1131	5,94	5,95	5,95	37	0,1266	5,90	5,90	5,90
38	0,1126	5,91	5,91	5,93	38	0,1226	5,89	5,89	5,89
39	0,1137	5,95	5,96	5,93	39	0,1245	5,87	5,87	5,92
40	0,1149	5,94	5,94	5,96	40	0,1253	5,87	5,87	5,90
41	0,1128	5,95	5,93	5,93	41	0,1282	5,94	5,95	5,96
42	0,1129	5,95	5,95	5,94	42	0,1254	5,89	5,90	5,87
43	0,1126	5,95	5,93	5,94	43	0,1244	5,87	5,87	5,85
44	0,1135	5,93	5,93	5,93	44	0,1248	5,88	5,88	5,88
45	0,1132	5,96	5,96	5,96	45	0,1255	5,89	5,89	5,92
46	0,1132	5,92	5,92	5,95	46	0,1275	5,94	5,92	5,94
47	0,1135	5,92	5,92	5,93	47	0,1246	5,88	5,93	5,88
48	0,1144	5,94	5,95	5,96	48	0,1257	5,94	5,91	5,88
49	0,1155	5,95	5,97	5,94	49	0,1236	5,87	5,88	5,89
50	0,1145	5,92	5,92	5,94	50	0,1271	5,88	5,88	5,89

Sfere Rosse				
	massa	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>
	[g]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,0580	4,99	4,99	5,00
2	0,0581	4,99	4,99	4,99
3	0,0584	5,00	5,00	4,99
4	0,0582	5,00	5,00	4,99
5	0,0581	4,99	5,00	5,00
6	0,0585	4,98	4,99	4,99
7	0,0584	4,99	5,00	4,99
8	0,0576	4,99	4,99	4,99
9	0,0585	4,99	4,99	4,99
10	0,0574	4,99	4,99	4,99
11	0,0579	4,99	4,99	4,99
12	0,0582	4,99	4,99	5,00
13	0,0584	4,99	4,99	4,99

14	0,0583	4,90	5,00	4,99
15	0,0582	4,99	4,99	4,99
16	0,0582	4,99	4,99	4,99
17	0,0585	5,00	5,00	5,00
18	0,0581	5,00	5,00	5,00
19	0,0585	5,00	5,00	5,00
20	0,0581	5,00	5,00	5,00
21	0,0582	5,00	5,00	5,00
22	0,0581	5,00	5,00	5,00
23	0,0579	5,00	5,00	5,00
24	0,0584	5,00	5,00	5,00
25	0,0582	5,00	5,00	5,00
26	0,0586	5,00	5,00	5,01
27	0,0582	5,00	5,00	5,00
28	0,0582	5,00	5,00	5,00
29	0,0581	5,00	5,00	5,00
30	0,0582	5,00	5,00	5,00
31	0,0581	5,00	5,00	5,00
32	0,0580	5,00	5,00	5,00
33	0,0586	5,00	5,00	5,01
34	0,0582	5,00	4,99	4,99
35	0,0585	5,00	5,00	5,00
36	0,0582	5,00	5,00	5,00
37	0,0584	4,99	5,00	5,00
38	0,0584	5,00	5,00	5,00
39	0,0577	5,00	5,00	5,00
40	0,0587	4,99	5,00	5,00
41	0,0583	4,99	5,00	5,00
42	0,0578	5,00	5,00	5,00
43	0,0583	5,00	5,00	5,00
44	0,0583	5,00	5,00	5,00
45	0,0586	5,00	5,00	5,00
46	0,0584	5,00	5,00	5,00

47	0,0582	5,00	5,00	5,00
48	0,0584	5,00	5,00	5,00
49	0,0582	5,00	5,00	5,00
50	0,0582	5,00	5,00	5,00

**Tabelle contenenti il diametro medio, il volume e la densità ricavati per ogni campione analizzato.**

Sfere Gialle			Sfere Bianche			Sfere Rosse		
d <sub>medio</sub> [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]	densità [g/cm <sup>3</sup> ]	d <sub>medio</sub> [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]	densità [g/cm <sup>3</sup> ]	d <sub>medio</sub> [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]	densità [g/cm <sup>3</sup> ]
5,95	110,11	1,03	4,77	56,83	1,15	4,99	65,19	0,89
5,92	108,82	1,03	4,78	57,07	1,14	4,99	65,06	0,89
5,92	108,45	1,04	4,77	56,95	1,14	5,00	65,32	0,89
5,92	108,82	1,04	4,77	56,95	1,14	5,00	65,32	0,89
5,95	110,11	1,03	4,77	56,71	1,15	5,00	65,32	0,89
5,92	108,45	1,05	4,77	56,83	1,15	4,99	64,93	0,90
5,93	109,18	1,03	4,77	56,83	1,15	4,99	65,19	0,90
5,94	109,92	1,02	4,78	57,07	1,14	4,99	65,06	0,89
5,94	109,74	1,03	4,77	56,83	1,15	4,99	65,06	0,90
5,94	109,92	1,04	4,77	56,83	1,15	4,99	65,06	0,88
5,95	110,11	1,02	4,77	56,83	1,15	4,99	65,06	0,89
5,93	109,37	1,04	4,77	56,83	1,15	4,99	65,19	0,89
5,95	110,11	1,04	4,77	56,83	1,15	4,99	65,06	0,90
5,94	109,55	1,03	4,77	56,71	1,15	4,99	65,19	0,89
5,94	109,55	1,03	4,77	56,83	1,15	4,99	65,06	0,89
5,93	109,37	1,04	4,78	57,07	1,15	4,99	65,06	0,89
5,91	108,27	1,04	4,77	56,95	1,14	5,00	65,45	0,89
5,94	109,55	1,04	4,78	57,07	1,14	5,00	65,45	0,89
5,93	109,37	1,04	4,78	57,19	1,15	5,00	65,45	0,89
5,93	109,37	1,04	4,78	57,07	1,15	5,00	65,45	0,89
5,95	110,11	1,04	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,89
5,95	110,11	1,03	4,78	57,19	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,92	1,04	4,78	57,07	1,14	5,00	65,45	0,88
5,93	109,37	1,03	4,78	57,07	1,14	5,00	65,45	0,89

5,94	109,55	1,03	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,74	1,03	4,77	56,83	1,15	5,00	65,58	0,89
5,94	109,55	1,03	4,77	56,95	1,15	5,00	65,45	0,89
5,93	109,00	1,05	4,78	57,07	1,14	5,00	65,45	0,89
5,95	110,11	1,03	4,78	57,19	1,14	5,00	65,45	0,89
5,92	108,45	1,05	4,77	56,95	1,14	5,00	65,45	0,89
5,94	109,55	1,04	4,77	56,95	1,14	5,00	65,45	0,89
5,94	109,55	1,03	4,78	57,07	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,55	1,04	4,78	57,19	1,15	5,00	65,58	0,89
5,95	110,29	1,03	4,78	57,19	1,14	4,99	65,19	0,89
5,91	108,27	1,04	4,78	57,19	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,92	1,04	4,78	57,19	1,15	5,00	65,45	0,89
5,95	110,29	1,03	4,78	57,07	1,14	5,00	65,32	0,89
5,94	109,92	1,04	4,77	56,95	1,14	5,00	65,45	0,89
5,93	109,00	1,04	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,88
5,92	108,63	1,04	4,77	56,71	1,15	5,00	65,32	0,90
5,93	109,18	1,03	4,77	56,71	1,15	5,00	65,32	0,89
5,93	109,37	1,04	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,88
5,93	109,18	1,04	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,92	1,03	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,89
5,92	108,82	1,04	4,77	56,83	1,15	5,00	65,45	0,90
5,94	109,55	1,04	4,76	56,59	1,16	5,00	65,45	0,89
5,94	109,55	1,03	4,76	56,59	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,74	1,04	4,76	56,47	1,16	5,00	65,45	0,89
5,92	108,63	1,05	4,77	56,71	1,15	5,00	65,45	0,89
5,94	109,74	1,03	4,76	56,47	1,16	5,00	65,45	0,89

Sfere Giallo fosforescente			Sfere Verdi		
d <sub>medio</sub> [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]	densità [g/cm <sup>3</sup> ]	d <sub>medio</sub> [mm]	Volume [mm <sup>3</sup> ]	densità [g/cm <sup>3</sup> ]
5,94	109,74	1,03	5,90	107,35	1,15
5,94	109,92	1,03	5,90	107,35	1,16
5,97	111,41	1,02	5,89	107,17	1,19
5,96	110,85	1,02	5,90	107,72	1,18
5,94	109,92	1,03	5,90	107,35	1,18

5,96	111,04	1,03	5,91	107,90	1,18
5,94	109,92	1,03	5,91	108,08	1,18
5,94	109,74	1,03	5,92	108,82	1,18
5,96	110,85	1,03	5,93	109,37	1,15
5,94	109,92	1,02	5,91	107,90	1,16
5,94	109,55	1,03	5,92	108,63	1,17
5,96	110,85	1,03	5,89	107,17	1,16
5,95	110,48	1,03	5,91	107,90	1,16
5,93	109,37	1,04	5,89	106,81	1,17
5,94	109,55	1,03	5,90	107,35	1,18
5,94	109,92	1,03	5,89	107,17	1,17
5,93	109,18	1,03	5,91	108,27	1,18
5,94	109,55	1,03	5,90	107,54	1,15
5,92	108,63	1,04	5,89	107,17	1,17
5,94	109,92	1,04	5,92	108,63	1,18
5,95	110,11	1,03	5,89	107,17	1,17
5,94	109,55	1,03	5,90	107,35	1,17
5,96	111,04	1,04	5,92	108,45	1,16
5,94	109,74	1,03	5,90	107,35	1,18
5,94	109,74	1,03	5,90	107,54	1,17
5,93	109,37	1,03	5,94	109,55	1,17
5,93	109,00	1,04	5,89	106,81	1,19
5,94	109,92	1,04	5,91	108,27	1,18
5,92	108,82	1,04	5,90	107,72	1,18
5,93	109,37	1,04	5,90	107,72	1,17
5,94	109,55	1,03	5,91	107,90	1,16
5,94	109,74	1,04	5,88	106,63	1,17
5,95	110,29	1,02	5,92	108,63	1,17
5,94	109,74	1,04	5,89	106,99	1,17
5,94	109,74	1,03	5,94	109,92	1,16
5,92	108,82	1,03	5,92	108,63	1,16
5,95	110,11	1,03	5,90	107,54	1,18
5,92	108,45	1,04	5,89	106,99	1,15
5,95	110,11	1,03	5,89	106,81	1,17
5,95	110,11	1,04	5,88	106,45	1,18
5,94	109,55	1,03	5,95	110,29	1,16

5,95	110,11	1,03	5,89	106,81	1,17
5,94	109,74	1,03	5,86	105,54	1,18
5,93	109,18	1,04	5,88	106,45	1,17
5,96	110,85	1,02	5,90	107,54	1,17
5,93	109,18	1,04	5,93	109,37	1,17
5,92	108,82	1,04	5,90	107,35	1,16
5,95	110,29	1,04	5,91	108,08	1,16
5,95	110,48	1,05	5,88	106,45	1,16
5,93	109,00	1,05	5,88	106,63	1,19

### Script per ricavare le maschere

```

SOURCE_DIR = 'C:\Users\maria\Desktop\Tesi Magistrale\Db\db30cm-2\db30cm-
2frame_undistort\';
MASK_DEST_DIR = 'C:\Users\maria\Desktop\Tesi Magistrale\Db\db30cm-2\db30cm-
2frame_undistort.MASK6\';
FRAME_DEST_DIR = 'C:\Users\maria\Desktop\Tesi Magistrale\Db\db30cm-2\db30cm-
2frame_undistort.FRAME6\';
mkdir 'C:\Users\maria\Desktop\Tesi Magistrale\Db\db30cm-2\db30cm-
frame_undistort.MASK6\';
mkdir 'C:\Users\maria\Desktop\Tesi Magistrale\Db\db30cm-2\db30cm-
2frame_undistort.FRAME6\';
S = dir(strcat(SOURCE_DIR, '*.jpg'));
for i=2000:2800
    % Step 0: Show current frame name
    S(i).name
    % Step 1: Frame Loading
    frame = imread(strcat(SOURCE_DIR,S(i).name));
    % Step 2: RoI Definition
    a = frame;
    mask = zeros(1074,1903);
    mask(130:630,:) = 1;
    a(logical(mask)==0)=0;
    % Step 3: Smoothing
    filt=fspecial('average', [10 10]);
    ff=imfilter(a,filt);
    % Step 4: Thresholding
    T1 = graythresh(ff);
    T1=T1*255 - 3;
    if i < 1170
        g1=(ff>=T1) & (ff<=T1+40);
    else
        g1=(ff>=T1);
    end
    % Step 5: Hole Filling
    g1(:,1:90) = 0;
    g1(:,1860:1903)= 0;

```

```

fh = imfill(g1, 'holes');
% Step 6: Erosion 1
se = strel('square', 100);
water_mask_1 = imopen(fh, se);
water_mask_1(:,1:1000)= 0;
water_mask_1(130:630,1720:1820)= 255;
% Step 6: Erosion 2
se = strel('square', 200);
water_mask_2 = imopen(fh, se);
water_mask_2(:,1001:1903)= 0;
if (i > 987) && (i < 1010)
    first_non_zero_column = find(any(water_mask_2),1);
    water_mask_2(130:630,first_non_zero_column:first_non_zero_column+200) = 0;
end
if (i >= 1010) && (i < 1165)
    first_non_zero_column = find(any(water_mask_2),1);
    water_mask_2(130:630,first_non_zero_column:first_non_zero_column+290) = 0;
end
% Step 7: Combine Masks
water_mask = or(water_mask_1, water_mask_2);
% Step 8: Water Masking
masked_frame = imread(strcat(SOURCE_DIR,S(i).name));
masked_frame(logical(water_mask)==0)=0;
% Step 10: Saving
imshow(masked_frame)
break
imwrite(water_mask, strcat(MASK_DEST_DIR,S(i).name));
imwrite(masked_frame, strcat(FRAME_DEST_DIR,S(i).name))
end

```

### Script per trovare le sezioni e le velocità

```

clc

dimlistptv = size(resultslistptv);
n_frames = dimlistptv(2);
n_sections_vert = 12;
n_sections_oriz = 4;
SOURCE_DIR = 'C:\Users\maria\Desktop\Tesi Magistrale\Db\db30cm-2\Framexptv\';
S = dir(strcat(SOURCE_DIR, '*.jpg'));

sum_velx = zeros(n_sections_vert, n_sections_oriz);
sum_vely = zeros(n_sections_vert, n_sections_oriz);
n_particles = zeros(n_sections_vert, n_sections_oriz);

avg_vely_by_time = zeros(n_frames, n_sections_vert, n_sections_oriz);
avg_vely_by_time = zeros(n_frames, n_sections_vert, n_sections_oriz);
avg_vely_by_time = zeros(n_frames, n_sections_vert, n_sections_oriz);
n_particles_by_time = zeros(n_frames, n_sections_vert, n_sections_oriz);

fprintf('Total frames %i\n', n_frames);

```

```

for i = 1:n_frames

    % LOAD FRAME
    frame = imread(strcat(SOURCE_DIR,S(i).name));
    frame_size = size(frame);
    section_size_vert = floor(frame_size(2) / n_sections_vert);

    % PRINT METADATA
    fprintf('Frame %i\n', i);

    % LOAD COORDINATES AND PARTICLE ID
    ya = cell2mat(resultslistptv(1,i));
    yb = cell2mat(resultslistptv(3,i));
    xa = cell2mat(resultslistptv(2,i));
    xb = cell2mat(resultslistptv(4,i));
    labels = cell2mat(resultslistptv(6,i));

    % CREATE MASK FOR PARTICLES APPEARED IN MORE THAN ONE FRAME
    labels_size = size(labels);
    n_frame_mask = zeros(labels_size(1),1);
    for k=1:labels_size(1)
        if frames_per_particle(labels(k)) > 1
            n_frame_mask(k) = 1;
        else
            n_frame_mask(k) = 0;
        end
    end
    n_frame_mask = logical(n_frame_mask);

    % GET-IN REGION PARTICLE
    bw = frame;
    se = strel('square', 50);
    water_mask_1 = imopen(bw, se);
    T1 = graythresh(water_mask_1) * 255;
    mask = (water_mask_1 >= T1);
    xa_size = size(xa);
    n_in_region = zeros(xa_size(1),1);
    for k=1:xa_size(1)
        pixels = impixel(mask,[xa(k)],[ya(k)]);
        n_in_region(k) = pixels(1);
    end
    n_in_region = logical(n_in_region);

    % COMPUTE BELONGING SECTION
    section_vert = fix(xa / section_size_vert) + 1;

    % COMPUTE VELOCITIES AND FILTER VELOCITIES WITHIN A RANGE
    deltax = xb - xa;
    deltay = yb - ya;
    velx = deltax * caluv;
    vely = deltay * caluv;

```

```

% CREATE MASK FOR VELOCITY
labels_size = size(labels);
n_speedy_mask = zeros(labels_size(1),1);
for k=1:labels_size(1)
    if velx(k) > -4.0 && velx(k) < 4.0 && vely(k) > -4.0 && vely(k) < 4.0
        n_speedy_mask(k) = 1;
    else
        n_speedy_mask(k) = 0;
    end
end
n_speedy_mask = logical(n_speedy_mask);

% SHOW FRAME WITH SECTIONS AND PARTICLE MARKERS
all_mask = n_frame_mask & n_in_region & n_speedy_mask;
frame = insertMarker(frame,[xa(all_mask) ya(all_mask)],'size',3,'marker','o');
for k = 1:section_size_vert:frame_size(2)
    frame(130:616,k:k+2,:) = 255;
end
frame = frame(125:620, :, :);
bw = rgb2gray(frame);
se = strel('square', 50);
water_mask_1 = imopen(bw, se);
T1 = graythresh(water_mask_1) * 255;
mask = (water_mask_1 >= T1);
r = frame(:, :, 1);
g = frame(:, :, 2);
b = frame(:, :, 3);
r(logical(mask)==0) = 0;
g(logical(mask)==0) = 0;
b(logical(mask)==0) = 0;
frame(:, :, 1) = r;
frame(:, :, 2) = g;
frame(:, :, 3) = b;
mask_orig = edge(mask);
mask_edge = edge(mask);
se = strel('line', 2, 0);
mask_edge = imerode(mask_edge, se);
mask_edge(end-50:end-1, :) = 0;
[y, x] = find(mask_edge);
mask_y = zeros(n_sections_vert, 4);
for k = 1:n_sections_vert
    x1 = (k-1)*section_size_vert+1;
    x2 = (k-1)*section_size_vert+section_size_vert+1;
    index = find(x > x1 & x < x2);
    x_index = x(index);
    y_index = y(index);
    if ~isempty(x_index) && ~isempty(y_index)
        x_middle = x_index(1);
        y_middle = y_index(1);
        y_dim = fix((487-y_middle) / 4) + 1;
    end
end

```

```

    for j = 1:4
        h = (y_middle + j*y_dim);
        mask_y(k,j) = h;
    end
end
end

figure(1)
subplot(2,1,1)
imshow(frame);
hold on
visboundaries(mask, 'Color', 'w', 'LineWidth', 0.5);
xa_size = size(xa);
section_oriz = zeros(xa_size(1),1) + 4;
for k = 1:n_sections_vert
    x1 = (k-1)*section_size_vert+1;
    x2 = (k-1)*section_size_vert+section_size_vert+1;
    [row, col] = find(mask>0);
    if x1 < col(1)
        x1 = col(1);
    end
    if x2 > col(end)
        x2 = col(end);
    end
    for j = 1:4
        if mask_y(k,j) > 0
            if k < n_sections_vert
                if j < 4
                    line([x1,x2],[mask_y(k,j),mask_y(k+1,j)],'Color','white','LineWidth',1);
                end
                coefficients = polyfit([x1,x2],[mask_y(k,j),mask_y(k+1,j)], 1);
                for w=1:xa_size(1)
                    if section_vert(w) == k
                        y_val = polyval(coefficients,xa(w)) + 125;
                        if ya(w) < y_val && section_oriz(w) == 4
                            section_oriz(w) = j;
                        end
                    end
                end
            end
        else
            if j < 4
                line([x1,x2],[mask_y(k,j),mask_y(k,j)],'Color','white','LineWidth',1);
            end
            coefficients = polyfit([x1,x2],[mask_y(k,j),mask_y(k,j)], 1);
            for w=1:xa_size(1)
                if section_vert(w) == k
                    y_val = polyval(coefficients,xa(w)) + 125;
                    if ya(w) < y_val && section_oriz(w) == 4
                        section_oriz(w) = j;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
end
end

% UPDATE VELOCITIES VECTORS
for k = 1:n_sections_vert
    for j = 1:n_sections_oriz
        % COMPUTING GLOBAL STATISTICS
        velocities_by_section = (section_vert == k) & (section_oriz == j) & n_frame_mask
& n_in_region & n_speedy_mask;
        sum_velx(k,j) = sum_velx(k,j) + sum(velx(velocities_by_section));
        sum_vely(k,j) = sum_vely(k,j) + sum(vely(velocities_by_section));
        n_particles(k,j) = n_particles(k,j) + sum(velocities_by_section);

        % COMPUTING STATISTICS BY TIME
        if sum(velocities_by_section) > 0
            curr_avg_velx = sum(velx(velocities_by_section)) / sum(velocities_by_section);
            curr_avg_vely = sum(vely(velocities_by_section)) / sum(velocities_by_section);
        else
            curr_avg_velx = 0;
            curr_avg_vely = 0;
        end
        avg_vely_by_time(i,k,j) = sqrt(curr_avg_velx.^2 + curr_avg_vely.^2);
        avg_vely_by_time(i,k,j) = curr_avg_velx;
        avg_vely_by_time(i,k,j) = curr_avg_vely;
        n_particles_by_time(i,k,j) = sum(velocities_by_section);
    end

end

subplot(2,1,2)
heatmap(squeeze(n_particles_by_time(i,:,:)), 'XLabel', 'Vertical Section', 'YLabel',
'Horizontal Section');
title('# Particles');
figure(3)
heatmap(squeeze(avg_vely_by_time(i,:,:)));
title('Velocity Module');
figure(5)
subplot(3,1,3)
heatmap(squeeze(avg_vely_by_time(i,:,:)));
title('Velocity Y');
subplot(3,1,2)
heatmap(squeeze(abs(avg_vely_by_time(i,:,:))));
title('Velocity X');
subplot(3,1,1)
vel_x_squeeze = squeeze(avg_vely_by_time(i,:,:)) * 100;
vel_y_squeeze = squeeze(avg_vely_by_time(i,:,:)) * 100;
imshow(frame);
hold on

```

```

visboundaries(mask, 'Color', 'w', 'LineWidth', 0.5);
xa_size = size(xa);
section_oriz = zeros(xa_size(1),1) + 4;
for k = 1:n_sections_vert
    x1 = (k-1)*section_size_vert+1;
    x2 = (k-1)*section_size_vert+section_size_vert+1;
    [row, col] = find(mask>0);
    if x1 < col(1)
        x1 = col(1);
    end
    if x2 > col(end)
        x2 = col(end);
    end
    index = find(x>x1 & x<x2);
    x_index = x(index);
    y_index = y(index);
    if ~isempty(x_index) && ~isempty(y_index)
        x_middle = x_index(1);
        y_middle = y_index(1);
        y_dim = fix((487-y_middle) / 4) + 1;
        for j = 1:4
            h = (y_middle + j*y_dim);
            if mask_y(k,j) > 0
                if k < n_sections_vert
                    if j < 4
                        line([x1,x2],[mask_y(k,j),mask_y(k+1,j)], 'Color','white','LineWidth',1);
                    end
                    quiver(x_middle + (x2-x1)/2,h -
y_dim/2,vel_x_squeeze(k,j),vel_y_squeeze(k,j), 'Color','red','LineWidth',1);
                else
                    if j < 4
                        line([x1,x2],[mask_y(k,j),mask_y(k,j)], 'Color','white','LineWidth',1);
                    end
                    quiver(x_middle + (x2-x1)/2,h -
y_dim/2,vel_x_squeeze(k,j),vel_y_squeeze(k,j), 'Color','red','LineWidth',1);
                end
            end
        end
    end
end
end
end
title('Frame with Arrows');

break
end
% media = mean(avg_vel_by_time,3);
avg_vely_by_time = abs(avg_vely_by_time);
for k = 1:7
    A = avg_vely_by_time(:,k,4);
    A(A<=0.2)=NaN;
    % A(A>=1.0)=NaN;
out4 = reshape(A(1:900), [10 90]);

```

```

means4 = mean(out4, 1,'omitnan');
B = avg_vely_by_time(:,k,3);
B(B<=0.2)=NaN;
% B(B>=1.0)=NaN;
out3 = reshape(B(1:900), [10 90]);
means3 = mean(out3, 1,'omitnan');
C = avg_vely_by_time(:,k,2);
C(C<=0.2)=NaN;
% C(C>=1.0)=NaN;
out2 = reshape(C(1:900), [10 90]);
means2 = mean(out2, 1,'omitnan');
D = avg_vely_by_time(:,k,1);
D(D<=0.2)=NaN;
% D(D>=1.0)=NaN;
out1 = reshape(D(1:900), [10 90]);
means1 = mean(out1, 1,'omitnan');
t = [0.01:0.01:0.65];
figure
plot(t,means1(:,6:70),'go-','LineWidth',1)
xlabel('Time [s]')
xlim([0 0.7])
ylabel('v [m/s]')
ylim([0.2 1.0])
hold on
plot(t,means2(:,6:70),'ko-','LineWidth',1)
hold on
plot(t,means3(:,6:70),'ro-','LineWidth',1)
hold on
plot(t,means4(:,6:70),'bo-','LineWidth',1)
legend('Sez.oriz1','Sez.oriz2','Sez.oriz3','Sez.oriz4')
title(strcat('Vertical Section','- ',num2str(k)))
end

```

## Bibliografia

1. John D. Pisaniello, A Comparative Review of Environmental Policies and Laws Involving Hazardous Private Dams: 'Appropriate' Practice Models for Safe Catchments
2. John D. Pisaniello, Roger L. Burritt, Joanne Tingey-Holyoak, Dam safety management for sustainable farming businesses and catchments, Centre for Accounting, Governance and Sustainability, School of Commerce, University of South Australia, City
3. Joanne L. Tingey-Holyoak, John D. Pisaniello, Roger L. Burritt, Arthur Spassis, Incorporating on-farm water storage safety into catchment policy frameworks: International best practice policy for private dam safety accountability and assurance, Centre for Accounting, Governance and Sustainability, University of South Australia, City West Campus, North Terrace, Adelaide, SA 5000, Australia
4. August Ritter. Die fortpflanzung der wasserwellen. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 36(33):947–954, 1892.
5. S. Soares-Frazão & Y. Zech (2007) Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle, *Journal of Hydraulic Research*, 45:sup1, 27-36, DOI:10.1080/00221686.2007.9521830
6. S. Soares-Frazão (2007) Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill, *Journal of Hydraulic Research*, 45:sup1, 19-26, DOI: 10.1080/00221686.2007.9521829
7. Mario Oertel & Daniel B. Bung (2012) Initial stage of two-dimensional dam-break waves: laboratory versus VOF, *Journal of Hydraulic Research*, 50:1, 89-97, DOI: 10.1080/00221686.2011.639981
8. S. Cordero<sup>1</sup>, G.O.D. Fasanella, D. Poggi, (2018) Experimental investigation of dam-break using low cost laser sources and image processing techniques
9. Melis, M., Poggi, D., Fasanella, G. O. D., Cordero, S., & Katul, G. G. (2019). Resistance to flow on a sloping channel covered by dense vegetation following a dam break. *Water Resources Research*, 55, 1040–1058. <https://doi.org/10.1029/2018WR023889>
10. Béla Sokoray-Varga / János Józsa Particle tracking velocimetry (PTV) and its application to analyse free surface flows in laboratory scale models
11. Brevis, W., Niño, Y. & Jirka, Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry