POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Studio sperimentale sulla propagazione di onde di dam break in presenza di vegetazione rigida



Relatore:

Prof. Davide Poggi

Candidato: Elia Buono



Abstract

L'evoluzione della superficie libera a seguito del crollo istantaneo di una diga e della forza di drag sulla vegetazione dovuta alla relativa onda è stata studiata conducendo una serie di esperimenti in un canale a pendenza variabile coperto da un canopy di bacchette di acciaio inossidabile uniformemente distribuite. Misure dirette della forza di drag sono state eseguite su diversi punti lungo la corrente con aste strumentate con celle di carico e misurazioni della superficie libera sono state condotte attraverso tecniche fotografiche. Applicando il principio di continuità idraulica su volumi finiti di corrente, sono state ottenute le velocità medie della sezione; quindi, il coefficiente di drag \mathcal{C}_d è stato ottenuto dalla forza idrodinamica sulle aste secondo la definizione canonica dell'equazione di drag. Lo studio mostra un incremento di \mathcal{C}_d durante i primi secondi successivi al passaggio del fronte d'onda, seguito da una stabilizzazione a un valore costante; la riduzione iniziale del valore di \mathcal{C}_d potrebbe essere attribuita alla riduzione della densità del fluido dovuta all'aria inglobata dal fronte d'onda. Il valore medio di \mathcal{C}_d a stabilità raggiunta varia tra 0,6 e 1,1, generalmente inferiore al valore di circa 1 relativo a una corrente uniforme su cilindri sfalsati, per lo stesso numero di Reynolds caratteristico della vegetazione. I risultati mostrano anche un incremento di \mathcal{C}_d all'aumentare del livello iniziale dell'acqua nel serbatoio e una riduzione di \mathcal{C}_d con l'aumento della pendenza.

Indice

1		Intro	oduzi	one	1
2		Teor	ia		2
	2.	2.1 Solu		ızioni analitiche per l'onda di dam break	2
		2.1.1		Soluzione Ritter	3
		2.1.2	2	Effetto della scabrezza	3
		2.1.3		Effetto della pendenza longitudinale	5
	2.	2	Can	opy drag e cadente piezometrica	6
	2.	3	Dete	erminazione del coefficiente di drag per misurazione diretta	7
3		Rass	egna	della letteratura	8
	3.	1	Prov	ve di dam-break	8
		3.1.1	1	Fasanella 2017	8
		3.1.2	2	Melis et al. 2019	9
	3.	2	Prov	ve su canopy di bacchette	11
		3.2.1		Poggi 2004	11
		3.2.2		Tanino Nepf 2008	13
		3.2.3		Poggi et al 2009	15
		3.2.4		Cheng 2013	16
		3.2.5		Wang et al 2015	18
		3.2.6 3.2.7		Etminan 2017	20
				Sonnenwald et al 2019	21
4		Stru	ment	tazione	24
	4.	1	Setu	ıp sperimentale	24
	4.	2	Stru	menti di misura	26
		4.2.2	1	Misurazione della superficie libera	27
		4.2.2	2	Calibrazione camere	28
		4.2.3 4.2.4 4.2.5		Misurazione delle spinte idrodinamiche	30
				Calibrazione delle celle di carico	31
				Misurazione del livello nel serbatoio di monte	32
5		•		erimentali	34
	5.			ve in moto permanente	34
	5.	2	Prov	ve di dam-break	34
		5.2.2	1	Sincronizzazione della strumentazione	35
		5.2.2 5.2.3		Identificazione della superfice libera	37
				Algoritmo e metodologie di post processing	39

5.2.4 Calcolo delle velocità medie	42
6 Risultati	44
6.1 Prove in moto permanente	44
6.2 Prove di dam-break	45
7 Discussione	Errore. Il segnalibro non è definito.
Appendice – codici matlab	59
Codie principale per l'analisi	59
Prove in dam-break	Errore. Il segnalibro non è definito.
Prove in moto permanente	59
Funzioni di supporto all'analisi delle prove	82
Idetificazione di variazioni di colore nei video	82
Identificazione pixel di corrente all'interno dei video	83
Acquisizione dati sensori da file di testo	84
Creazione e apertura di strutture	85
Creazione di immagini per la definizione dei range di colore	85
Passaggio da lettura delle celle a momento applicato	86
Conversione da coordinate pixel a spazio e viceversa	86
Script di calibrazione	87
Calibrazione delle camere	87
Calibrazione dei sensori	88
Bibliografia	59

1 Introduzione

Attualmente dighe e relativi invasi rappresentano una irrinunciabile risorsa per la quasi totalità delle nazioni e dei popoli; infatti, oltre al loro impiego come fonti di energia idroelettrica, esse costituiscono una fondamentale riserva d'acqua a scopo irriguo o idropotabile, e giocano un importante ruolo di protezione del territorio, grazie al loro effetto di laminazione delle portate di piena. L'umanità si avvale di queste strutture da tempi considerevolmente remoti; si fa risalire infatti al 4000 a.C. la prima diga realizzata dall'uomo, ad opera del popolo babilonese, mentre lo sviluppo delle dighe nella concezione odierna è avvenuto principalmente nello scorso secolo con l'avvento delle moderne tecniche di costruzione. Al 2008 il solo patrimonio italiano di invasi era costituito da 541 grandi e oltre 10,000 piccole dighe [1] e sebbene in Italia, come nella maggior parte dei paesi sviluppati, la realizzazione di nuove dighe abbia subito una battuta di arresto il numero di dighe è globalmente in aumento [2] grazie al contributo di molti paesi in via di sviluppo i quali vedono tutt'oggi nell'idroelettrico una conveniente fonte di energia su cui investire. Nonostante la loro fondamentale importanza anche, come detto, in termini di protezione del territorio da fenomeni metereologici estremi, le dighe sono strutture intrinsecamente legate ad un elevato rischio; basti pensare che un crollo totale o anche solo parziale, a cui di seguito si farà riferimento come "dam break", comporta il rilascio a valle di enormi volumi d'acqua con gravissime conseguenze sia sull'ambiente sia sulle strutture a valle dell'invaso. Il rischio relativo al dam break è più elevato nel caso di piccole dighe: esse infatti, sebbene contengano una quantità d'acqua inferiore, collassano con una probabilità nettamente superiore rispetto alle grandi dighe, probabilità che addirittura aumenta per i piccoli invasi privati [3]. Oltre 1600 casi di collasso di una diga sono documentati in letteratura, il 66% dei quali è avvenuto in dighe in terra [4]. Per citare alcuni esempi significativi: la diga del Coedty in Regno Unito con un invaso di 0,32 milioni di metri cubi crollò nel 1925 causando la morte di 16 persone [5]; la diga di Kelly Barnes, con i suoi 11,6 m di altezza, crollò nel 1977 causando la morte di 39 persone [3]; per quanto riguarda invece il territorio italiano non si possono non citare i collassi di Gleno nel 1923, Molare nel 1935 e Stava nel 1985 [1]. Inoltre, lo studio dell'onda di dam break permette di comprendere il funzionamento di altri fenomeni sostanzialmente simili, come possono essere ad esempio il collasso di invasi naturali come invasi indotti da frane [6], lo scioglimento di laghi glaciali [7], o onde anomale [8]. Un altro fenomeno non dissimile da un dam break sono i fronti di inondazione causati da intensi fenomeni di precipitazione [9]-[17]. Essendo così alto il rischio relativo a collasso di una diga, ed essendo varia la possibile applicazione dei risultati ottenuti, pare chiaro come possa essere di fondamentale importanza una descrizione dell'evoluzione delle caratteristiche fondamentali dell'onda di dam break, come velocità e tirante, indispensabili per la valutazione quantitativa del rischio, in particolar modo in condizioni tuttora poco studiate come può essere nel caso di interazione tra onda di dam break e vegetazione.

2.1 SOLUZIONI ANALITICHE PER L'ONDA DI DAM BREAK

Il fenomeno dell'onda di dam break trova un suo inquadramento all'interno dei problemi di moto vario delle correnti a superficie libera. Nel caso mono dimensionale una soluzione in forma chiusa vene ricercata a partire dalle equazioni di de Saint-Venant [18] le quali descrivono l'equilibrio di massa e quantità di moto sotto le ipotesi di: i) fluido incomprimibile, ii) scale delle lunghezze verticali e trasversali trascurabili rispetto alla dimensione longitudinale, iii) scale di velocità nelle direzioni verticali e trasversali trascurabili rispetto componenti di velocità longitudinali iv) condizione di debole pendenza del fondo e v) andamento delle pressioni lungo la verticale approssimabile come idrostatico. Il sistema di equazioni può essere espresso nella seguente forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - S_0 \right) + gAS_f = 0$$
 (2.2)

Dove Q rappresenta la portata, A indica l'area della sezione trasversale, h è l'altezza della corrente, S_0 indica la pendenza del fondo, g è l'accelerazione di gravità ed S_f indica la cadente piezometrica. Introducendo l'ipotesi di sezione rettangolare di larghezza b ed introducendo la velocità media della sezione U, essendo A=bh e Q=UA è possibile riscrivere il sistema di equazioni in termini di velocità e tirante.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f)$$
 (2.4)

Per tale sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali viene generalmente ricercata una soluzione, per quanto concerne al problema del dam break, con il metodo delle caratteristiche per cui il sistema viene ridotto, in un particolare sottoinsieme del dominio di spazio e tempo, in un sistema di due equazioni alle derivate totali fra di loro disaccoppiate.

$$\frac{d(U\pm 2c)}{dt} = g(S_0 - S_f) \tag{2.5}$$

Dove $c = \sqrt{gh}$ rappresenta la celerità dell'onda nella corrente, la soluzione così ottenuta è valida per i punti del dominio di spazio e tempo legati dalla seguente relazione:

$$\frac{dx}{dt} = U \mp c \tag{2.6}$$

Ovvero le cosiddette linee caratteristiche da cui il metodo prende il nome

2.1.1 Soluzione Ritter

In condizioni di assenza di perdite di carico e pendenza nulla del fondo, o nelle condizioni in cui $S_0=S_f$, una soluzione in forma chiusa è stata ricavata da Ritter [19]. Nel caso in questione il termine non differenziale si annulla; ne risulta quindi $U\pm c$ costante lungo le line caratteristiche. A partire dalle condizioni iniziali di tirante indisturbato h_0 vengono ricavati i valori di velocità e tirante i quali possono essere espressi in forma adimensionale come segue:

$$c_n = \frac{1}{3} \left(2 - \frac{x_n}{t_n} \right) \tag{2.7}$$

$$U_n = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{x_n}{t_n} \right) \tag{2.8}$$

Dove $c_n=\sqrt{h/h_0}$ indica la radice del tirante adimensionalizzato, $U_n=U(h_0g)^{-1/2}$ indica la velocità media adimensionalizzata, $t_n=t(h_0/g)^{-1/2}$ è il tempo adimensionale e $x_n=x/h_0$ la coordinata longitudinale adimensionale. La soluzione così determinata è valida nel tratto di corrente compreso tra il fronte d'onda ed il fronte dell'onda di svuotamento [8]

$$-1 \le \frac{x_n}{t_n} \le +2 \tag{2.9}$$

La soluzione di Ritter è la prima soluzione analitica determinata per tale fenomeno, nonché la più semplice non tenendo conto di fattori spesso non trascurabili, come nel caso in oggetto, ovvero il fondo inclinato e soprattutto l'effetto della resistenza idraulica.

2.1.2 Effetto della scabrezza

Ben più complessa è la risoluzione del sistema di equazioni in presenza di scabrezza del fondo; una soluzione analitica che tiene conto di tale effetto è stata proposta da Dressler [20]. L'autore considera una perdita di carico alla Darcy-Weisbach in funzione del parametro di scabrezza f per cui la cadente piezometrica si esprime nella forma:

$$S_f = \frac{f}{4R_h} \frac{U^2}{2g} \tag{2.10}$$

Ricavando una soluzione perturbativa in cui l'effetto della scabrezza è espresso sotto forma di successive approssimazioni ovvero:

$$c_n = c_n^{(0)} + c_n^{(1)}\sigma + c_n^{(2)}\sigma^2 + \cdots$$
 (2.11)

$$U_n = U_n^{(0)} + U_n^{(1)} \sigma + U_n^{(2)} \sigma^2 + \cdots$$
 (2.12)

Dove $\sigma=f/8$ è il parametro adimensionale che tiene conto della scabrezza. I termini $U_n^{(0)}$ e $c_n^{(0)}$ corrispondo alla soluzione di Ritter. Considerando solo il primo ordine delle correzioni dovute alla scabrezza Dressler propone le seguenti relazioni:

$$c_n \sim \frac{1}{3}(2-m) + k(m)t_n\sigma$$
 (2.13)

$$u_n \sim \frac{2}{3}(1+m) + h(m)t_n\sigma$$
 (2.14)

Dove h(m) e k(m) sono le seguenti funzioni algebriche.

$$h(m) = -\frac{108}{7(2-m)^2} + \frac{12}{(2-m)} - \frac{8}{3} + \frac{8\sqrt{3}}{189}(2-m)^{3/2}$$
 (2.15)

$$k(m) = \frac{6}{5(2-m)} - \frac{2}{3} + \frac{4\sqrt{3}}{135}(2-m)^{3/2}$$
 (2.16)

Come si può osservare la sola introduzione del primo ordine di influenza della scabrezza genera un considerevole aumento nella complessità della soluzione; tale aumento di complessità, il quale ragionevolmente si intensifica introducendo le successive approssimazioni, rende la soluzione di Dressler difficilmente applicabile per una corretta descrizione del fronte d'onda tanto più il tirante è prossimo allo zero.

Per ovviare a questo problema viene proposta da Whitham a pochi anni di distanza una soluzione alternativa basata su un approccio completamente diverso [21], maggiormente focalizzato alla descrizione della cosiddetta "regione di punta" avvero il tratto ci corrente prossimo al fronte d'onda dove il comportamento risulta più affine ad un problema di strato limite. Secondo l'autore, per un dato istante di tempo il profilo della corrente si distacca dalla soluzione di Ritter solo nel tratto finale, ovvero la regione di punta. Mentre nel tratto governato da un comportamento alla Ritter la velocità U cresce linearmente lungo x, all'interno della regione di punta essa assume un valore costante pari alla velocità del fronte d'onda, ragion per cui all'interno di tale tratto la velocità risulta dipendente esclusivamente dal tempo. Si assume che la posizione del fronte d'onda corrisponda ad x=a(t), e conseguentemente la velocità del fronte d'onda è pari a u=da/dt, inoltre in corrispondenza del fronte d'onda l'equilibrio di quantità di moto si riduce a:

$$-g\frac{dh}{dt} = \frac{K}{h} \left(\frac{da}{dt}\right)^2 \tag{2.17}$$

Dove $K=S_fh/U^2$ è il parametro che tiene conto della scabrezza. La soluzione è poi ottenuta mediante un adattamento del metodo di Pohlhausen, ben noto nella sua applicazione ai problemi convenzionali dello strato limite. Ponendo $u=da/dt=\sqrt{gh_0}(2-d\alpha/d\tau)$ la determinazione di u si riduce alla soluzione del problema differenziale

$$4\dot{\alpha}^{3}\tau\ddot{\alpha} + \dot{\alpha}^{4} = 16(2 - \dot{\alpha})^{2}(3\dot{\alpha}\tau - 2\alpha) \tag{2.18}$$

Dove $\alpha = (2\sqrt{gh_0}t - a)K/h_0$ e $\tau = \sqrt{g/h_0}Kt$, sebbene tale problema non sia risolvibile in forma chiusa, in prima approssimazione la velocità del fronte d'onda vale e di conseguenza del tirante entro la regione di punta valgono:

$$u = \frac{da}{dt} \sim \sqrt{gh_0} \left[2 - 3.452 \left[Kt \sqrt{\frac{g}{h_0}} \right]^{1/3} \right]$$
 (2.19)

$$h \sim u \sqrt{\frac{2K}{g}(a-x)} \tag{2.20}$$

Nota la velocità del fronte d'onda è anche possibile, applicando la soluzione di Ritter, individuare il limite posteriore della regione di punta, posto in corrispondenza di $x = \xi(t)$ dove ξ vale:

$$\xi = \sqrt{gh_0} \left(\frac{3u}{2\sqrt{gh_0}} - 1 \right) t \tag{2.21}$$

Di seguito è illustrato come si presenta sa soluzione proposta da Whitham con le posizioni dei limiti ξ ed a della regione di punta, a confronto con la soluzione approssimata di Ritter.

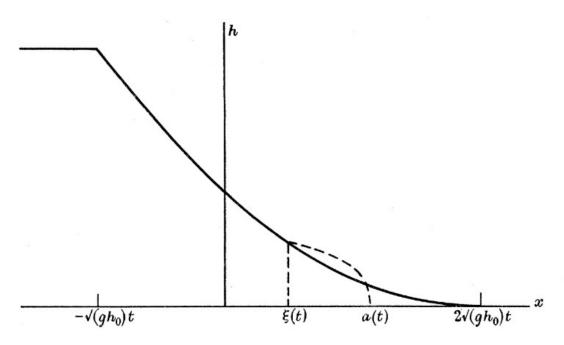


Figura 1 Posizione e forma della regione di punta secondo Whitham a confronto alla soluzione approssimata di Ritter

2.1.3 Effetto della pendenza longitudinale

La soluzione di Ritter può essere estesa al caso di fondo inclinato [18], [22] secondo le seguenti relazioni espresse sempre in termini adimensionali:

$$c_n = \frac{1}{3} \left(2 + \frac{1}{2} S_0 t_n - \frac{x_n}{t_n} \right) \tag{2.22}$$

$$U_n = \frac{2}{3} \left(1 + S_0 t_n + \frac{x_n}{t_n} \right) \tag{2.23}$$

Il campo di validità della soluzione è:

$$-1 \le \frac{x_n}{t_n} \le +2 - \frac{1}{2}S_0 t_n \tag{2.24}$$

La soluzione così definita è sostanzialmente la soluzione di Ritter alla quale si aggiunge un termine proporzionale alla pendenza del fondo S_0 .

2.2 CANOPY DRAG E CADENTE PIEZOMETRICA

Oltre alla trattazione relativa alle principali soluzioni analitiche per l'onda di dam break si ritiene necessario soffermarsi sulla definizione della cadente piezometrica S_f ; Generalmente il termine relativo alle perdite di carico si esprime sulla base della nota relazione di Chézy, dove l'effetto della scabrezza viene espresso, per esempio, attraverso un coefficiente di scabrezza n alla Manning.

$$S_f = \left(\frac{2gn^2}{R_h^{4/2}}\right) \frac{U^2}{2g} \tag{2.25}$$

Nel caso in questione la perdita di carico è dovuta alla resistenza idraulica indotta dalle bacchette più che all'effetto della scabrezza del fondo. Per determinare l'effetto della vegetazione sulla cadente piezometrica è sufficiente valutare l'equilibrio alla traslazione di un tratto infinitesimo di corrente dx.

$$\rho g S_f V_v = C_d A_v \rho \frac{U^2}{2g} + b(1 - \phi_v) \tau_g dx + 2h \tau_w g$$
 (2.26)

Dove C_d è il coefficiente di drag, V_v è il volume d'acqua nel tratto infinitesimo, A_v è l'aria di vegetazione esposta alla corrente, ρ è la densità dell'acqua, ϕ_v è la densità di vegetazione ovvero il rapporto tra la superficie del fondo e la superficie occupata dalla vegetazione, τ_g è la tensione al fondo e τ_w è la tensione lungo le sponde. Essendo τ_g e τ_w contributi piccoli di resistenza rispetto alla macroscabrezza indotta dalle bacchette, la relazione si riduce a:

$$\rho g S_f V_v = C_d A_v \rho \frac{U^2}{2g} \tag{2.27}$$

Il valore di V_v può essere espresso in funzione della densità di vegetazione, nel caso di canopy di bacchette cilindriche vale infatti:

$$V_v = h(1 - \alpha_s \phi_v) \tag{2.28}$$

Dove α_s è un parametro che tiene conto del sommergimento, in caso di sommergimento parziale $\alpha_s=1$ nel caso di sommergimento totale $\alpha_s=h_c/h$ con h_c altezza della vegetazione. I valori di A_v e ϕ_v vengono valutati attraverso semplici considerazioni geometriche in funzione del diametro delle bacchette D, e del numero di bacchette per unità di superficie m, si ha infatti $A_v=mDh\alpha_s$ e $\phi_v=m\pi D^2/4$. In fine si ricava una definizione della cadente piezometrica S_f come espressione di una forza di drag distribuita

$$S_f = \left(\frac{C_d m D \alpha_s}{1 - \alpha_s \phi_v}\right) \frac{U^2}{2 q} \tag{2.29}$$

2.3 DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI DRAG PER MISURAZIONE DIRETTA

Dal punto di vista applicativo C_d si ricava dai valori noti di forza di drag F_d e velocita media invertendo la nota definizione standard.

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho h D U^2} \tag{2.30}$$

Per la determinazione della forza di drag F_d agente sulla singola bacchetta a partire dalle misure delle celle di carico va risolto un banale problema di equilibrio geometrico. L'apparato di misura può essere idealizzato come una trave isostatica vincolata con una cerniera ed un carrello in corrispondenza della cella di carico. Calcolando l'equilibrio alla rotazione in corrispondenza della cerniera si ha:

$$M_c = M_d + M_l + M_0 (2.31)$$

Dove $M_d=F_dl_d$ è il momento dalla risultante delle spinte idrodinamiche nella direzione del moto, $M_c=R_cl_c$ è il momento indotto dalla reazione vincolare in corrispondenza della cella di carico, M_0 è il momento indotto dal peso proprio dell'asta e M_l è il momento risultante dalle forze di lift contributo che viene considerato trascurabile rispetto agli altri termini. Avendo posto per ipotesi $M_l=0$ ed essendo $\Delta M=M_c-M_0$ noto dalla curva di calibrazione delle celle di carico si ricava:

$$F_d = \frac{\Delta M}{l_d} = \frac{\Delta M}{l_a - h_d} \tag{2.32}$$

Dove l_a è la lunghezza nota dell'asta di misura dalla cerniera al fondo del canale e h_d è la quota dal fondo del centro di spinta della corrente. Il valore di h_d e non è a priori noto esso andrebbe valutato a rigore come segue

$$h_{d} = \frac{1}{F_{d}} \int_{0}^{h} \frac{1}{2} DC_{d}(z) \bar{u}^{2} z dz$$
 (2.33)

Tuttavia, essendo \bar{u} sostanzialmente pari alla velocità media tranne un breve tratto a ridosso del fondo del canale [23]–[26] ed ipotizzando C_d costante lungo la verticale si ricava $h_d=h/2$. Risulta in questo modo chiuso il problema della definizione di F_d secondo la relazione:

$$F_d = \frac{\Delta M}{l_a - \frac{h}{2}} \tag{3.34}$$

3.1 PROVE DI DAM-BREAK

Esiste un'ampia letteratura di prove di dam-break eseguite su canali a fondo liscio, a partire dagli anni '60 del '900 sono state condotte sull'argomento una considerevole varietà di campagne sperimentali. Nella maggioranza dei casi trattasi di prove eseguite su canali rettangolari rettilinei taluni in condizioni di fondo orizzontale [27]–[30] talaltri in condizioni di fondo inclinato [31]–[33]. Sono state inoltre condotte prove su canali a sezione variabile [34], [35] e su canali non rettilinei [36], [37]. Molto poco è stato fatto nei termini dello studio dell'onda di dam break in presenza di vegetazione; di seguito verrà proposta una breve descrizione dei due studi di maggiore interesse [38], [39].

3.1.1 Fasanella 2017

Giovanni O. D. Fasanella nella propria tesi di laurea, oltre a riportare una attenta descrizione delle principali prove in letteratura relative a dam break su fondo liscio, ha condotto nel 2017 una campagna sperimentale su un canale prismatico con fondo orizzontale in calcestruzzo con misurazione della superficie libera attraverso riprese video. Le prove son state condotte per quattro diversi carichi iniziali a monte della paratoia ovvero $H_0=0.15\ m,0.20\ m,0.25\ m$, $0.30\ m$. Le prove condotte da Fasanella confermano la soluzione analitica di Ritter.

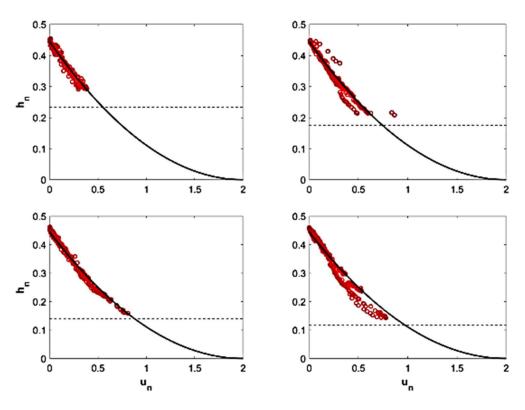


Figura 2 Confronto tra valori misurati (cerchi rossi) e soluzione analitica di Ritter (linea nera) in termini di tirante normalizzato h_n rispetto alla velocità normalizzata u_n ; I quattro grafici da sinistra a destra e dall'alto in basso rappresentano prove con $H_0=0.15\,m$, $0.20\,m$, $0.25\,m$, $0.30\,m$ ed $S_0=0$. La linea tratteggiate rappresenta la quota al di sotto della quale non è stato possibile rilevare il profilo.

Le medesime prove sono state poi condotte con, sul fondo del canale, un canopy di bacchette in PVC della lunghezza di 0.10 m e dal diametro di 0.006 m in configurazione staggered per una densità di 1206 bacchette per unità di superficie.

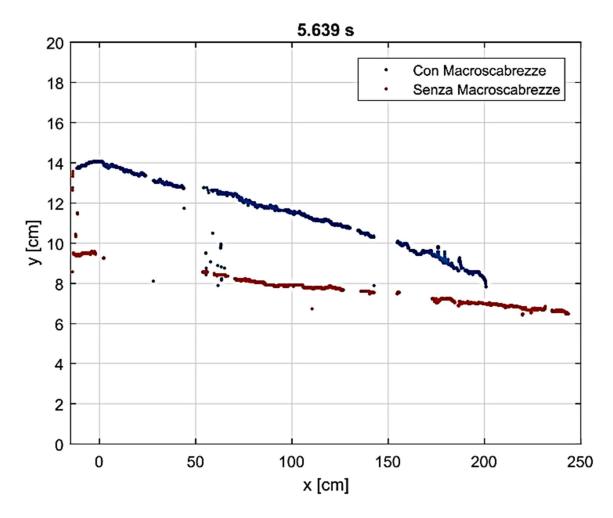


Figura 3 Confronto tra i profili della superficie libera misurato in presenza del canopy di bacchette (punti blu) a fondo liscio (punti rossi; prove eseguite con $H_0 = 20$ a t = 5.639 s.

3.1.2 Melis et al. 2019

Nel 2019 Mattia Melis ha condotto una serie di esperimenti volti alla descrizione dell'evoluzione dell'onda di dam-break e alla definizione dei coefficienti di drag in presenza di canopy artificiale di bacchette, al fine di studiare l'effetto della vegetazione in termini di resistenza idraulica. Il fondo del canale, a sezione rettangolare e pendenza variabile sul quale sono state condotte le prove era dotato di un canopy di bacchette in resina polimerica dell'altezza di 0.10 m e del diametro di 0,006 m, disposte per file sfalsate con interasse di 0.035 m in configurazione staggered per una densità di 1.206 bacchette per metro quadro. Melis ha testato 16 differenti combinazioni di quattro pendenze ($S_0 = 0\%, 1\%, 2\%, 3\%$) e carico a monte della paratoia ($H_0 = 0.15m, 0.20m, 0.25m, 0.30m$). Lo studio in oggetto verte alla definizione di un coefficiente di drag C_d costante, definito sulla base delle misure di tirante. C_d viene determinato sulla base della cadente piezometrica. In questo caso una idealizzazione della forza di drag come entità distribuita si sostituisce ad una convenzionale visione della resistenza idraulica come effetto scabrezza di parete, ovvero quanto viene fatto attraverso il coefficiente di Manning.

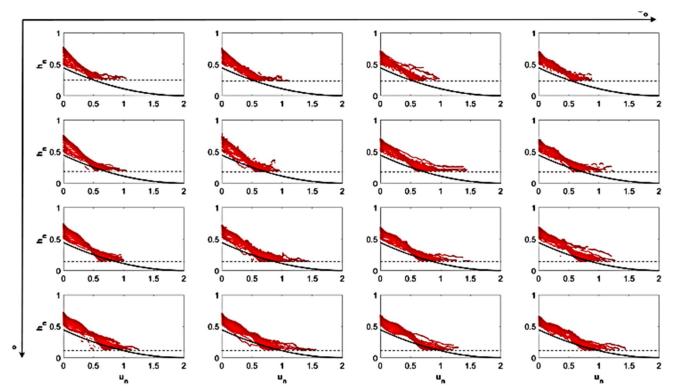


Figura 4 Confronto tra misure effettuate e soluzione analitica di Ritter per $S_0=0$ (linea nera) in termini di tirante normalizzato h_n e velocità normalizzata u_n . La linea tratteggiata rappresenta il livello oltre il quale non è stato possibile effettuare le misure. I 16 grafici riportano le differenti condizioni al contorno: da sinistra a destra $S_0=0,1,2,3\%$, dall'alto verso il basso $H_0=0.15,0.20,0.25,0.30m$

Il valore determinato attraverso la cadente piezometrica ricavata dalle misure di tirante è stato poi verificato attraverso una soluzione numerica delle equazioni di DSV sulla base della corrispondenza tra tirante misurato e soluzione numerica. Le equazioni di DSV sono state risolte sotto le ipotesi di velocità costante in prossimità del fronte d'onda [8]

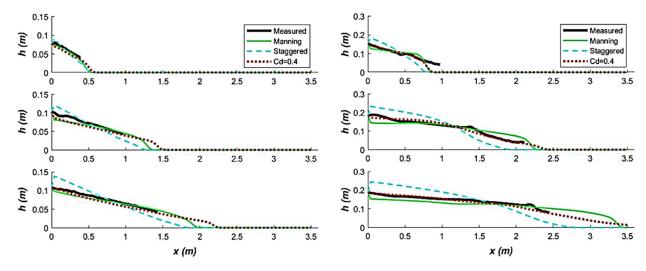


Figura 5 Confronto tra valori di tirante h misurati (linea nera continua) e calcolati attraverso DSV. A sinistra profili per $H_0=0.15m\,{\rm ed}\,S_0=0\%$, a destra profili per $H_0=0.30m\,{\rm ed}\,S_0=3\%$. I profili calcolati numericamente sono stati ricavati modellando la resistenza idraulica tramite: coefficiente di Manning n=0.05 (linea verde continua), coefficiente di drag per canopy staggered (linea azzurra tratteggiata) e coefficiente di drag calcolato dell'autore $C_d=0.4$ (linea rossa tratteggiata)

I risultati di Melis mostrano un valore di C_d di circa 0.4 in grado di fornire una predizione efficace della velocità del fronte d'onda e forma della superficie libera ($R^2 = 0.91$) sotto le ipotesi adottate.

3.2 Prove su canopy di bacchette

Per quanto riguarda lo studio della resistenza idraulica indotta da vegetazione rigida, la parte preponderante di quanto è stato fatto negli anni è relativa alla condizione di moto permanente. Numerose sono le campagne sperimentali condotte in canali a forma trapezia, con varie densità di vegetazione, sia in condizioni di completa che parziale sommergenza; Di seguito si intende riportare gli studi di maggiore interesse [40]–[46] per quanto riguarda la descrizione della resistenza idraulica indotta da canopy di bacchette con particolare enfasi sulla parametrizzazione del coefficiente di drag.

3.2.1 Poggi 2004

Il lavoro di Poggi del 2004 è volto ad una descrizione fenomenologica delle strutture della turbolenza di correnti attraverso vegetazione rigida, al variarne della densità della vegetazione. Le prove sperimentali sono state condotte in un canale a sezione rettangolare in condizioni di moto permanente e completa sommergenza della vegetazione. Il canopy artificiale all'interno del canale era costituito da bacchette in acciaio inossidabile del diametro di 0.004 m e della lunghezza di 0.12 m. Le prove sono state effettuate con cinque diverse densità della vegetazione, ovvero 67, 134, 268, 536 e 1027 bacchette per metro quadro, e le misure di velocità sono state effettuate per mezzo di un anemometro laser doppler (LDA).

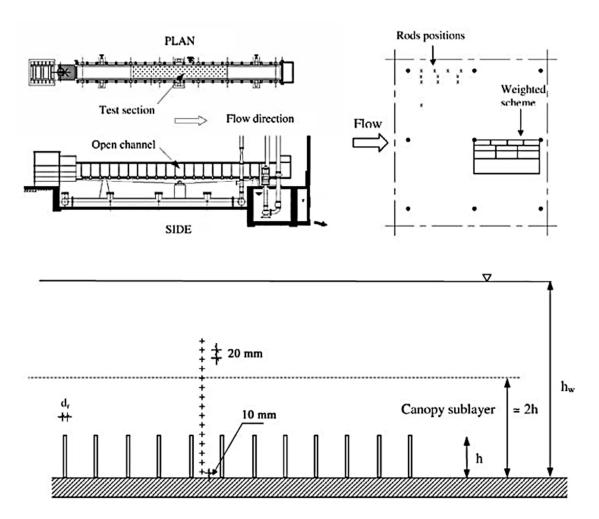


Figura 6 Una vista delle tre scale significative dell'esperimento: l'impianto di flusso del canale e la sezione di lavoro (in alto a sinistra), la vista in pianta dei punti di campionamento spaziale (in alto a destra) e la vista in sezione dei punti di misura in relazione alle dimensioni del canopy (in basso).

In questo studio il coefficiente di drag viene ricavato in quanto parametro chiave all'interno dell'equazione di equilibrio della quantità di moto mediata sulla turbolenza. Analiticamente il coefficiente di drag \mathcal{C}_D vale

$$C_D = -\left(\frac{d\overline{(u'w')}}{dz} + \frac{d\bar{p}}{dz}\right)(a\bar{u}^2)^{-1}$$
(3.1)

Con $\overline{u'w'}$ tensione di Reynolds, \bar{u} velocità media nella direzione del flusso, \bar{p} pressione cinematica media ed a indice di area frontale (superficie frontale delle bacchette per unità di volume della corrente $[a]=m^{-1}$). La relazione è ricavata combinando la definizione di forza idrodinamica per unità di volume con l'equazione media di equilibrio della quantità di moto semplificata. I valori così determinati evidenziano l'insorgenza dell'effetto dello sheltering per valori del numero di Reynolds caratteristico delle bacchette $Re=d_r\bar{u}/v\approx 10^3$ con d_r diametro della bacchetta.

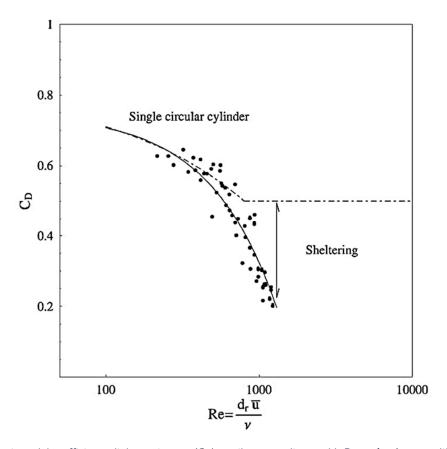


Figura 7 Variazione del coefficiente di drag misurato (C_D) con il numero di Reynolds $Re=d_r\bar{u}/\nu$ per 5 differenti densità di vegetazione da 67 a 1072 bacchette per metro quadro.

Secondo quanto ottenuto dalle misure sperimentali viene inoltre proposta una parametrizzazione del coefficiente di drag sulla base del solo numero di Reynolds caratteristico della bacchetta ovvero:

$$C_D = \frac{1}{2} [1.5 - 8.5x10^{-4}Re]$$
 (3.2)

3.2.2 Tanino Nepf 2008

Nel 2008 Tanino e Nepf hanno condotto uno studio su correnti in moto permanente attraverso canopy di bacchette disposte in maniera random, per determinare la dipendenza del coefficiente di drag con il numero di Reynolds, per diverse densità della vegetazione ϕ con, dove la per densità della vegetazione si intende la frazione volumica di corrente occupata dalla vegetazione, nel caso di bacchette cilindriche in condizione di parziale sommergimento essa coincide con la frazione di superficie di fondo occupata dalla vegetazione ed è pari a:

$$\phi = m\pi \frac{d^2}{4} \tag{3.3}$$

Dove m è il numero di bacchette di diametro d per unità di superficie. Lo studio analizza quanto precedentemente riportato in letteratura [17], [47]–[52], evidenziando una assenza di risultati in configurazione random per $\phi>0.05$ per $Re_p>100$ e per $\phi<0.05$ e $Re_p<1000$ con $Re_p=U_pd/v$ con $U_p=Q/[bh(1-\phi)]$ è la velocità media al netto della vegetazione.

Source	Array	Configuration	ф	Reynolds number
Ayaz and Pedley 1999	Rigid cylinders (N)	Square	0.13	≤40.00/(1-ф)
			0.35	
			0.50	
			0.59	
Koch and Ladd 1997	Rigid cylinders (N)	Random	0.05	≈37
			0.10	≤33
			0.20	≤100
			0.40	≤67
		Square, staggered	0.2	57-210
			0.4	82-320
Lee et al. 2004	Sawgrass (L; F)	N/A	N/A	0-200 (L)
				70-104 based on depth (F)
Mazda et al. 1997	Two tidal mangrove swamps (F)	N/A	0.05-0.45	N/A
			(depth dependent)	
Nepf 1999	Rigid cylinders (L)	Random	0.006	4,000-10,000
			0.02	
			0.06	
Petryk 1969	Rigid cylinders (L)	Random	0.015	$(0.6-5) \times 10^4$
			0.027	$(3-9) \times 10^4$
Stone and Shen 2002	Rigid cylinders (L)	Staggered	0.0055	O(250-8,000) assuming
			0.0220	$v = 0.009 \text{ cm}^2/\text{s}$
			0.0610	
Wu et al. 1999	Flexible horsehair mattress (L)	N/A	N/A	20–3,000 based on depth and $U_p(1-\phi)$

Tabella 1 Campagne sperimentali considerate da Tanino e Nepf. Nella seconda colonna N, F e L indicano rispettivamente i risultati numerici, sul campo e di laboratorio. N/A indica informazioni non disponibili o non applicabili. Numero di Reynolds valutato come $Re_d=dU_p/v$ se non altrimenti specificato

Dal punto di vista analitico il valore di \mathcal{C}_d viene parametrizzato attraverso due coefficienti adimensionali α_0 ed α_1 che tengono conto rispettivamente degli effetti viscosi ed inerziali. Per mezzo di detti parametri \mathcal{C}_d è espresso come applicazione lineare di Re_p^{-1} , come precedentemente fatto [53] per la definizione di parametri di drag nello studio delle cadute di pressione all'interno di colonnati.

$$C_D = 2\left(\frac{\alpha_0}{Re_p} + \alpha_1\right) \tag{3.4}$$

Il modello è stato poi confrontato con il modello empirico proposto da White (1992):

$$C_d \approx 1 + 10Re_p^{-2/3} \tag{3.5}$$

Le prove sono state condotte con diverse densità volumetriche della vegetazione artificiale $\phi_v=0.091,0.15,0.20,0.27$, e 0.35. Sono stati adottati valori di Re_p bassi, in un range che va da 25 a 685. Quanto ottenuto da Tanino e Nepf è riportato nella seguente tabella assieme ai risultati relativi alle prove in condizione random al tempo in letteratura.

Source	ф	α_0	α_1	r	n	Re_p range
Petryk 1969	0.015	$(3.0 \pm 1.2) \times 10^3$	0.49 ± 0.04	0.975	10	$(0.6-5) \times 10^4$
	0.027	$(3.2\pm2.4)\times10^3$	0.66 ± 0.04	0.993	5	$(3-9) \times 10^4$
Present study	0.091	25±12	0.74 ± 0.03	0.985	18	148-685
	0.15	84±14	1.12 ± 0.06	0.969	26	87-396
	0.20	85±5	1.15 ± 0.02	0.996	37	29-482
	0.27	82±2	1.58 ± 0.01	0.999	20	25-294
	0.35	84±6	1.72 ± 0.03	0.997	19	40-305
Koch and Ladd 1997	0.05	11	0.97			5-37
	0.1	17	1.0			6-33
	0.2	40	1.2			6-100
	0.4	167	2.6			8-67

Tabella 2 Coefficienti della parametrizzazione α_0 ed α_1 e relativi intervalli di confidenza, valutati sulla base dei tre studi su canopy random presi in considerazione. Con ϕ densità volumica della vegetazione, r coefficiente di correlazione ed n numerosità dei campioni.

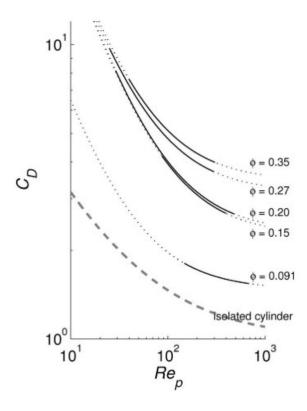


Figura 8 Valore del coefficiente di drag al variare del numero di Reynolds Re_p per diverse densità di vegetazione ϕ , modello confrontato con il caso di cilindro isolato (linea spessa tratteggiata)

3.2.3 Poggi et al 2009

Nello studio del 2009 di Poggi et al. sono state analizzate 130 singole prove sperimentali di moto permanente su canopy completamente sommerso condotte dal 1969 al 2007 [40], [55]–[64]. Sulla base delle prove sopracitate ed attraverso un modello di chiusura del primo ordine è stata proposta una definizione del fattore di attrito alla Darcy-Weisbach f.

$$\frac{8}{f} = 2\frac{L_c}{h_c} \left(1 + \left(1 - \frac{H_w}{h_c} \right) \frac{\Delta U}{U_{cl}} \right) \tag{3.6}$$

Dove L_c rappresenta la scala tipica delle lunghezze ed è definita come $L_c=(C_da)^{-1}$ con a densità di superficie frontale della vegetazione ovvero a=mD, H_w altezza della corrente, h_c altezza della vegetazione, U_{cl} velocità media nello strato vegetato e ΔU incremento di velocità media tra strato vegetato e strato di corrente al di sopra del canopy. Nel caso di vegetazione parzialmente sommersa $\Delta U=0$ e l'equazione si riduce a:

$$\frac{8}{f} = 2\frac{L_c}{h_c} = \frac{2}{C_d a h_c}$$
 (3.7)

Nella seguente figura viene proposto il confronto tra valori del suddetto modello teorico ed i valori misurati di fattore di attrito alla Darcy-Weisbach.

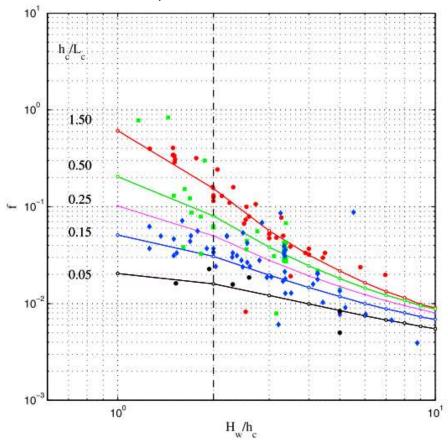


Figura 9 Variazioni del fattore di attrito f rispetto al tirante normalizzato (H_w/h_s) al variare del rapporta h_c/L_c . Le linee continue rappresentano i valori analitici ottenuti attraverso il modello proposto. Ogni riga rappresenta un diverso numero di Reynolds. Il colore dei simboli rappresenta le seguenti soglie di h_c/L_c : nero <0,1, blu 0,1–0,4, verde 0,4–1,4 e rosso > 1,4.

3.2.4 Cheng 2013

Nel 2013 Cheng ha condotto uno studio focalizzato sulla definizione del valore di coefficiente di drag per correnti su canopy di bacchette circolari parzialmente sommerse. Sono state analizzati da Cheng svariati risultati presenti in letteratura, per prove su canopy sia random sia staggered [24], [26], [41], [65]–[67].

Investigator	Number of datasets	Vegetation fraction, λ	Stem arrangement	Stem diameter, d (mm)	$R_a(V_v d/\nu)$
Ishikawa et al. (2000)	30	0.00314-0.0126	Staggered	4; 6.4	910-4,570
James et al. (2004)	23	0.0035-0.0314	Staggered	5	240-870
Liu et al. (2008)	9	0.0031-0.0160	Staggered; in-line	6.35	1,280-2,200
Tanino and Nepf (2008)	116	0.090-0.35	Random	6.4	25-690
Ferreira et al. (2009)	2	0.022-0.038	Random	11	1,190-1,450
Tanino and Nepf (personal communication, 2010)	73	0.031-0.056	Staggered	6.4	110-830
Cheng and Nguyen (2011)	143	0.0043-0.119	Staggered	3.2; 6.6; 8.3	200-1,540

Tabella 3 Sommario dati sperimentali considerati

Cheng studia il valore di coefficiente di drag prima nel caso di cilindro isolato, considerando poi un canopy di bacchette omogenee secondo ed in fine propone una originale parametrizzazione del coefficiente di drag sulla base del concetto di pseudo-fluido, costrutto solitamente utilizzato nella trattazione dei flussi costituiti da più fasi dove le caratteristiche di densità e viscosità delle parti vengono mediate definendo un fluido omogeneo rappresentativo della miscela. Modelli basati sul concetto di pseudo-fluido trovano applicazione nell'ambito dei flussi con particelle in sospensione [68], [69]. Nella fattispecie nel caso di cilindro isolato il coefficiente di drag è definito nella forma $C_D = 2F_D/(\rho dU^2)$ dove F_D è la spinta per unità di lunghezza che agisce sul cilindro; C_D e parametrizzato in funzione del numero di Reynolds caratteristico del cilindro $R = Ud/\nu$ dove U è la velocità media e d è il diametro della bacchetta; secondo l'autore C_D varia in funzione di R secondo la relazione:

$$C_D = 11R^{-0.75} + 0.9\left[1 - exp\left(-\frac{1000}{R}\right)\right] + 1.2\left[1 - exp\left(-\left(\frac{R}{4500}\right)^{0.7}\right)\right]$$
(3.8)

In caso invece di canopy di bacchette, secondo il modello basato su un fluido tradizionale, nella definizione di coefficiente di Drag alla velocità media nella sezione U si sostituisce la velocità al netto della vegetazione $U_v = U/(1-\lambda)$ dove λ è la densità della vegetazione e la forza di drag per unità di lunghezza F_{Da} è ora un valore medio tra i singoli elementi del canopy; C_{Da} è, come visto precedentemente, legato alla cadente piezometrica S_f

$$C_{Da} = \frac{2F_{Da}}{\rho dU_v^2} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\lambda} \frac{g dS_f}{U_v^2}$$
 (3.9)

Il valore C_{Da} viene parametrizzato in funzione del numero di Reynolds $R_a = U_v d/v$. Introducendo in fine il concetto di pseudo-fluido Cheng definisce le seguenti relazione per i valori di coefficiente di drag e numero di Reynolds significativo:

$$C_D' = \frac{1 - \lambda}{1 + S_f} C_{Da} \tag{3.10}$$

$$R' = \frac{1+S}{1-80\lambda} R_a \tag{3.11}$$

La relazione che intercorre tra C' e R' è la medesima utilizzata per il caso di cilindro isolato

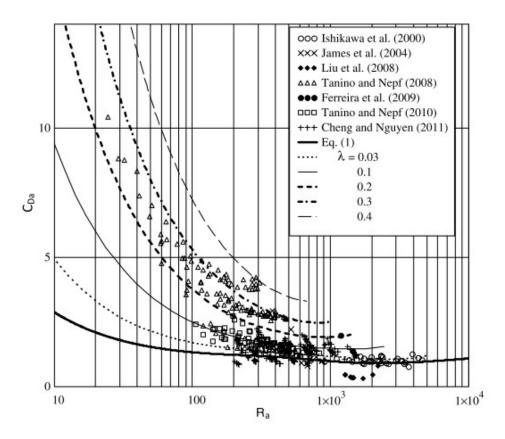


Figura 10 Valori del coefficiente di drag C_{Da} teorico (lenee tratteggiate) e misurato (simboli) al variare del numero di Reynolds R_a e della densità di vegetazione λ

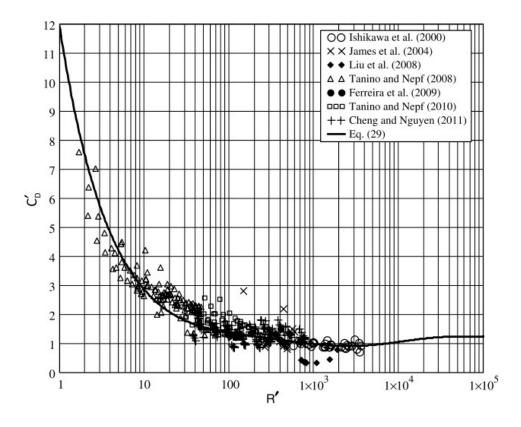


Figura 11 Valori del coefficiente di drag secondo Cheng C'_d teorico (linea continua) e misurato (simboli) al variare del numero di Reynolds significativo R'

I valori sperimentali considerati da Cheng appaiono considerevolmente medo dispersi sul piano C'-R' rispetto che sul piano $C_{Da}-R_a$ confermando l'efficacia della parametrizzazione proposta all'interno del range di numero di Reynolds considerato $20 < R_a < 5E3$ oppure 1 < R' < 3E3. Secondo l'autore la relazione C'(R') è esprimibile in forma analoga

3.2.5 Wang et al 2015

Wang nel 2015 ha condotto uno studio su correnti in moto permanente attraverso vegetazione rigida emergente allo scopo di descrivere la superficie libera in flussi su terreni pianeggianti a seguito di intense precipitazioni. Le prove sono state condotte su un canale a sezione rettangolare di 0.30 m di larghezza e 10 m di lunghezza per differenti densità della vegetazione ϕ_v . La superficie libera è stata modellata attraverso le equazioni di DSV sotto le ipotesi di moto permanete, per cui l'equazione di equilibrio della quantità di moto assume la forma:

$$U\frac{\partial U}{\partial x} + g\frac{\partial H}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$
(3.12)

Con U velocità media S_0 pendenza del fondo, S_f pendenza motrice ed H è il tirante. Il valore S_f è stato calcolato sulla base del coefficiente di drag C_d secondo la seguente relazione:

$$S_f = \frac{C_d m D}{1 - \phi_v} \frac{U^2}{2g} \tag{3.13}$$

Per la definizione invece del valore di C_d viene proposta una definizione sulla base del numero di Reynolds, ripercorrendo quanto definito per cilindri isolati [44] e quanto invece definito per canopy di cilindri [24] dove il valore di C_d è definito come:

$$C_{d,a} = 50Re_v^{-0.43} + 0.7 \left[1 - exp\left(-\frac{Re_v}{15000} \right) \right]$$
 (3.14)

Dove

$$Re_v = \frac{\pi (1 - \phi_v)}{4\phi_v} Re_d \tag{3.15}$$

Alla parametrizzazione sulla base del numero di Reynolds caratteristico della bacchetta Re_d si sostituisce una parametrizzazione in funzione del numero di Reynolds Re_v che tiene conto anche della densità della vegetazione. Per analizzare ulteriormente le deviazioni in C_d dal comportamento definito precedentemente, dovute alla non uniformità del flusso, le variazioni spaziali in C_d sono state descritte utilizzando una procedura di inversione delle equazioni di DSV, in modo da ottenere una ulteriore definizione del coefficiente di drag, $C_{d,new}(x)$ variabile lungo la direzione della corrente:

$$C_{d,new} = \frac{2g(1 - \phi_v)}{mD} (P^* - A^*)$$
 (3.16)

Con

$$P^* = \left(-\frac{\partial h}{\partial x}\right) \frac{1}{U^2} \tag{3.17}$$

е

$$A^* = \left(-\frac{\partial h}{\partial x}\right) \frac{1}{gh} \tag{3.18}$$

Il modello è stato validato sulla base del confronto tra le misure di tirante h(x) e quanto ottenuto analiticamente attraverso le equazioni di DSV sotto le ipotesi di moto permanente. Di seguito è riportato il confronto tra le misure effettuate ed i tiranti valutati attraverso le tre definizioni di \mathcal{C}_d descritte.

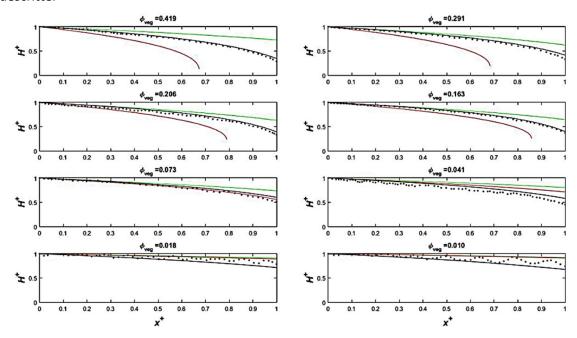


Figura 12 Confronto tra il livello dell'acqua normalizzato $H^+=h(x)/h_0$ lungo la direzione del flusso normalizzata $x^+=x/L$, valori misurati e previsti utilizzando l'equazione DVS, ogni grafico è relativo ad una differente densità di vegetazione ϕ_v . I punti indicano i valori misurati dalla telecamera laterale, le linee verdi sono previsioni fatte usando $C_{d,iso}$, le linee rosse sono previsioni fatte usando $C_{d,a}$ e le linee nere si basano sul nuovo modello $C_{d,new}$.

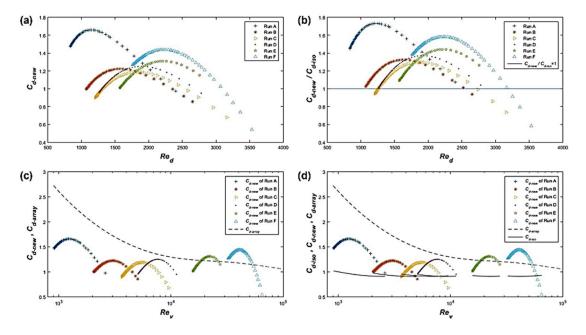


Figura 13 (a) $C_{d,new}$ empirico ricavato utilizzando i dati sperimentali al variare di $Re_d = UD/\nu$. (b) Coefficiente di drag normalizzato $C_{d,new} \setminus C_{d,iso}$ variare di $Re_d = UD/\nu$. (c) Confronto tra $C_{d,new}$ e $C_{d,a}$ al variare di $Re_v = UR_v/\nu$. (d) Confronto tra $C_{d,iso}$, $C_{d,new}$ e $C_{d,a}$ al variare di $Re_v = UR_v/\nu$

3.2.6 Etminan 2017

Lo studio condotto da Etminan et al. nel 2007 si pone l'obiettivo di investigare i meccanismi che determinano la resistenza attraverso canopy di bacchette parzialmente sommerse e proporre un modello predittivo del coefficiente di drag. La corrente è stata modellata attraverso simulazione LES delle equazioni di Navier-Stokes nello spazio utilizzando una chiusura della turbolenza standard alla Smagorinsky. Le simulazioni sono state condotte in OpenFOAM versione 2.3.0 ed è stato utilizzato l'incompressive solver pimpleFoam. Il modello di vegetazione scelto è un canopy di tipo staggered. Le densità di vegetazione prese in considerazione in questo studio sono λ = 0.016, 0.04, 0.08, 0.012, 0.020 e 0.25, e le simulazioni sono state eseguite per quattro numeri di Reynold caratteristico della bacchetta Re_p = 200, 500, 1000 e 1340.

Sono state considerate da Etminan definizioni alternative della velocità; oltre alle velocità comunemente utilizzate, ovvero la velocità media della corrente U_b e la velocità al netto della frazione volumica occupata dalla vegetazione U_p , legate dalla nota relazione:

$$U_p = \frac{U_b}{1 - \lambda} \tag{3.19}$$

Sono state considerate: la velocità al confine della regione di scia U_s e la velocità della sezione trasversale ristretta U_c . Le relazioni U_s e U_c sono espresse nelle seguenti forme:

$$U_c = \frac{1 - \lambda}{1 - \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi}}} U_p \tag{3.20}$$

$$U_s = U_b \sqrt{1 - C_{p,b}} {(3.21)}$$

Dove $C_{p,b}$ è il coefficiente di pressione di base, ottenuto mediando lungo la zona del flusso separata dal cilindro il coefficiente di pressione $C_p = (p - p_{infty})/0.5\rho U_b^2$, con p pessione locale media e p_{∞} pressione locale nel flusso indisturbato.

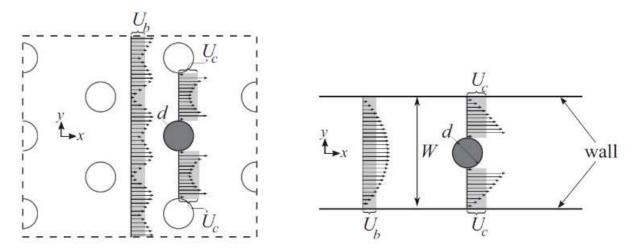


Figura 14 Rappresentazione grafica di U_c ed U_h nel caso di una schiera di cilindri (sinistra) e di cilindro isolato (destra)

Sulla base di quanto detto Etminan utilizza la medesima definizione di \mathcal{C}_d per confrontare l'efficacia delle differenti velocità prese in considerazione nella predizione di \mathcal{C}_d . Il valore di coefficiente di

drag secondo Etminan è espresso nella forma proposta da White (1992). Sia $C_{d,i}$ il valore di coefficiente di drag valutato attraverso la velocità U_i , vale la relazione:

$$C_{d,i} = 1 + 10 \left(\frac{U_i d}{v}\right)^{-2/3} \tag{3.22}$$

Dove U_i è una generica velocità tra le quattro precedentemente definite; si noti come $U_i d/\nu$ corrisponda al numero di Reynolds caratteristico delle bacchette Re_i valutata con la i-esima velocita. Sulla base dei risultati ottenuti U_c risulta la velocità maggiormente efficace nella definizione di C_d .

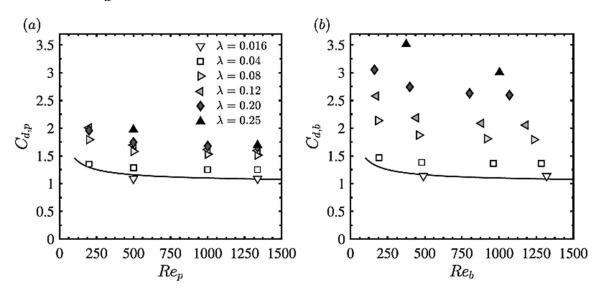


Figura 15 Valori di Coefficiente di drag misurato e teorico (linea continua) rispetto al numero di Reynolds al variare della densità della vegetazione λ , grafico (a) valori calcolati attraverso U_p , grafico (b) valori calcolati attraverso U_b .

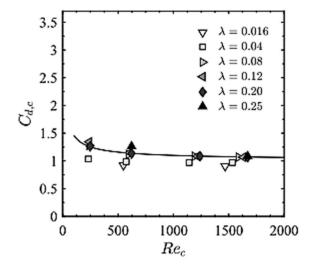


Figura 16 Valori di Coefficiente di drag misurato e teorico (linea continua) rispettivo al numero di Reynolds calcolati attraverso la velocità della sezione ristretta U_c .

3.2.7 Sonnenwald et al 2019

Tra i più recenti studi analitici incentrati sulla definizione del coefficiente di drag in presenza di vegetazione emergente, vi è il lavoro di Sonnenwald et al. (2019), dove viene proposta una parametrizzazione alternativa della relazione di Ergun (1952). I noti parametri α_0 e α_1 che tengono rispettivamente conto degli effetti viscosi ed inerziali, vengono definiti in ragione di due parametri

oggettivi, ovvero il diametro d delle bacchette e la densità della vegetazione ϕ secondo le seguenti relazioni:

$$\alpha_0 = 6475d + 32 \tag{3.23}$$

$$\alpha_1 = 17d + 3.2\phi + 0.50 \tag{3.24}$$

Attraverso una banale sostituzione si ricava C_d che ne risulta espresso dalla seguente relazione:

$$C_d = 2\left(\frac{6475d + 32}{Re_d} + 17d + 3.2\phi + 0.50\right)$$
 (3.25)

La relazione proposta è stata confrontata dall'autore attraverso una seria di dati sperimentali ottenuti precedentemente in campagne di prove su canopy di bacchette sia staggered sia random [41], [52], [66], [70]–[73]

Study	Distribution	φ (–)	d (mm)	R _d (-)	Method
Ferreira et al. (2009)	Random	0.022-0.04	10	1185–1452	Equation (1)
Kim and Stoesser (2011)	Staggered	0.022 - 0.087	10	761-1738	Equation (1)
Tanino and Nepf (2008a)	Random	0.091 - 0.35	6.4	24-507	Equation (1)
Tinoco and Cowen (2013)	Random	0.005 - 0.08	3-25	55-3838	Direct force measurement
Meftah and Mossa (2013)	Square	0.003	3	234-607	Equation (2)
Koch and Ladd (1997)	Random	0.05 - 0.4	_a	12-99	2D CFD (LBMb)
Stoesser et al. (2010)	Staggered	0.015-0.251	6.4	133–1789	3D CFD (LES ^c)

Figura 17 Sommario dati sperimentali considerati. ^a Diametro non disponibile; ^b Lattice Boltzmann Method, ^c Large Eddy Simulation.

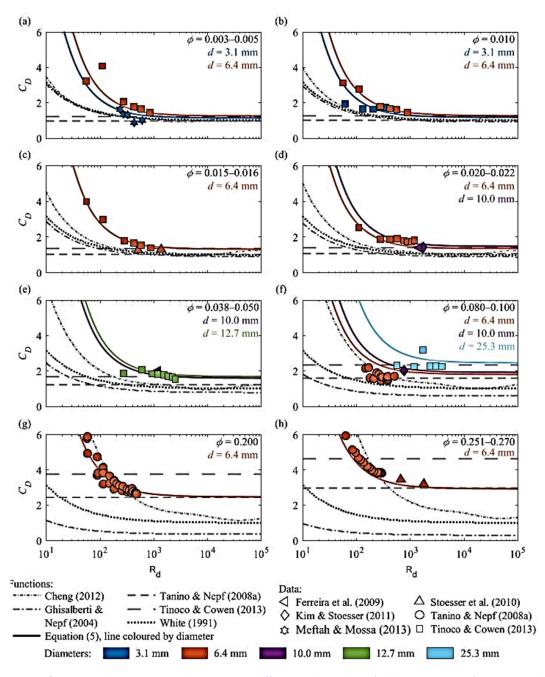


Figura 18 Confronto tra valori sperimentali e stimati per differenti valori di densità della vegetazione ϕ e diametro delle bacchette d (riportati per ogni grafico in alto a sinistra

4 STRUMENTAZIONE

Di seguito si intende dare un sunto dell'impianto sperimentale sul quale sono state condotte le prove in oggetto e sulla strumentazione di misura utilizzata. Le prove sono state condotte all'interno del laboratorio G. Bidone, laboratorio di idraulica del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente del Territorio e delle Infrastrutture presso il Politecnico di Torino, su di un canale a pendenza variabile il cui fondo è stato sofisticato con un *canopy* artificiale in bacchette di acciaio.

4.1 SETUP SPERIMENTALE

Il canale sul quale sono stati condotti gli esperimenti è a pendenza variabile e sezione rettangolare con una lunghezza complessiva di 11.6 m, larghezza di 0.5 m ed un'altezza delle sponde di 0.6 m, realizzato in acciaio; le pareti risultano finestrate per una lunghezza di 6 m a partire da 2,70 m dal fondo. La pendenza del canale può essere modificata per mezzo di un meccanismo a vite e il canale può essere alimentato in forma continua attraverso una tubazione di mandata raccordata a monte con un divergente, come è stato fatto per le prove in moto permanente; tuttavia, per le prove di maggiore interesse, ovvero in dam-break, viene alimentato pompando acqua da una vasca di scarico posta a valle, al fine di riutilizzate ciclicamente la medesima.

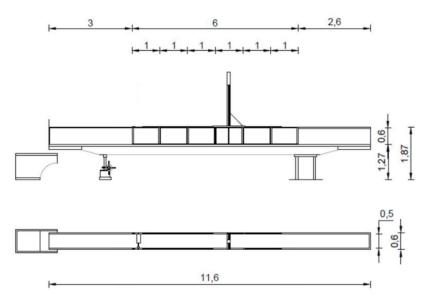


Figura 19 Pianta e prospetto laterale del canale con paratoia

Al fondo originale in calcestruzzo è stato aggiunto un fondo realizzato in pannelli plastici di PMMA (Plexiglas) sostenuti e sopraelevati da un telaio in acciaio inossidabile; il fondo ne è risultato in tal modo rialzato per un'altezza complessiva di 7 cm. La struttura di panelli in plastica è stata preforata per alloggiare il *canopy* di bacchette in acciaio inossidabile del diametro di 0.6 cm emergenti dal fondo per una lunghezza di 14 cm, a simulazione della vegetazione. Sono stati predisposti fori per allocare differenti densità di bacchette; nella configurazione nella quale sono state eseguite le prove, le bacchette sono disposte per file sfalsate parallele alla sezione, nella singola fila le bacchette sono poste a distanza di 10 cm e le singole file hanno un interasse di 5.15 cm; ne risulta una densità di 194 bacchette per metro quadro. I fori non utilizzati sono sigillati tramite un film adesivo in plastica di modo che il fondo nell'intorno delle bacchette risulti sufficientemente liscio da poterne considerare la scabrezza trascurabile in ragione della macroscabrezza indotta dal *canopy* artificiale. L'onda di dam-break viene generata attraverso l'azionamento di una paratoia in legno per mezzo di un pistone pneumatico. La paratoia si costituisce di un pannello di legno impermeabilizzato di 50 cm per 163 cm di altezza avvitato ad un supporto metallico che gli

permette di essere messo in collegamento con un pistone pneumatico e di scorrere all'interno di un binario solidale al telaio che lo mantiene ancorato al canale. In testa al telaio metallico è posto il pistone pneumatico alimentato da un compressore d'aria che, esercitando una pressione di 11 atm, permette alla paratoia di aprirsi istantaneamente (la completa apertura della paratoia avviene all'incirca i 0,1 s). La paratoia divide il canale a valle dal serbatoio a monte, il fondo a monte della paratoia è mantenuto liscio ed il canopy artificiale si estende a valle della paratoia per una lunghezza di 4,00 m.

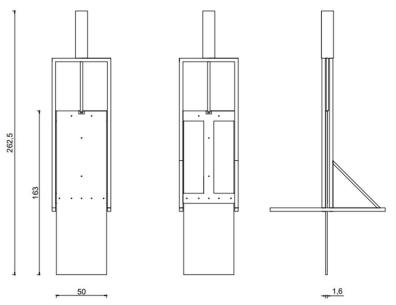


Figura 20 Paratoia, telaio di supporto e pistone idraulico in sommità; da sinistra: prospetto lato valle, prospetto lato monte, vista laterale



Figura 21 Paratoia fotografata lato monte con particolare della sigillatura laterale

Oltre al complesso del canale è stata poi successivamente realizzata una seconda struttura in alluminio, solidale al terreno, sulla quale sono state alloggiate le celle di carico per la misura della forza agente sulle bacchette; la struttura si costituisce di elementi modulari prefabbricati assemblati in laboratorio. La struttura è composta da due telai piani larghi 1,78 m di altezza pari a 3,00 m perpendicolari all'asse del canale, collegati da travi secondarie di lunghezza pari a 2,82 m, le

quali possono essere posizionate ad altezza variabile; su di esse poggiano tre traverse in alluminio sulle quali sono fissati oltre alle celle di carico i tre laser, uno per traversa, che permettono di generare il piano di luce che investe la corrente. Le tre traverse possono traslare nella direzione dell'asse del canale così da poter posizionare i piani strumentati in una qualsiasi sezione.

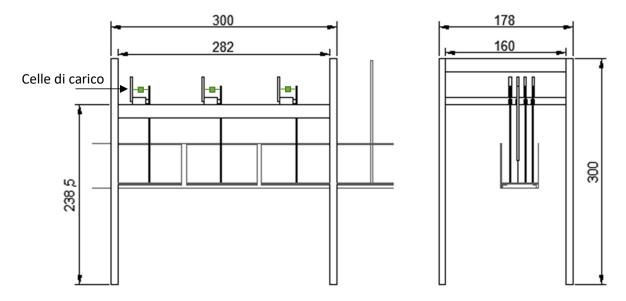


Figura 22 Prospetti struttura di supporto celle di carico

Parallelamente al canale ad una distanza di 1,67 m dalle pareti vetrate si trova il supporto sul quale sono montate le quattro videocamere per la misura della superficie libera (numerate da 1 a 4 da monte verso valle). Le prove sono state eseguite riprendendo interamente quattro delle sei aperture vetrate sul lato del canale, registrando la corrente per una lunghezza di circa 4,00 m a partire da 0,6 m a monte della paratoia fino a 3,60 m a valle della medesima. Mentre le camere permettono una misura precisa della posizione della superficie libera, in buona sostanza, solo a valle della paratoia, per quanto riguarda il serbatoio a monte la misura del tirante idraulico è garantita da otto sensori ad ultrasuoni (numerati da 1 a 8 da valle verso monte), posizionati su traversine di alluminio lungo l'asse del canale, ad una distanza l'uno dall'altro crescente all'allontanarsi dalla paratoia. Tali sensori, essendo in numero limitato, non sono posti al fine di descrivere la natura della superficie libera, bensì lo svuotamento del serbatoio nel tempo, con l'intenzione di ricostruire da esso la portata in ingresso nel tratto ripreso dalle camere nel corso della prova.

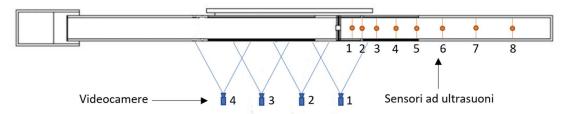


Figura 23 Posizionamento delle camere e dei sensori ad ultrasuoni lungo il canale

4.2 STRUMENTI DI MISURA

Come accennato precedentemente le misure sono state effettuate per mezzo di tre differenti apparecchiature. In primo luogo, la misurazione della superficie libera a valle della paratoia che viene ricavato, attraverso varie tecniche di *image processing* che verranno approfonditamente discusse nel seguito, dal girato di quattro diverse videocamere; in secondo luogo, la misurazione

delle spinte idrodinamiche agenti sulle bacchette attraverso celle di carico; infine, la misurazione del livello all'interno del serbatoio a monte tramite sensori ad ultrasuoni. Di seguito una descrizione delle tre diverse misurazioni effettuate e della relativa strumentazione.

4.2.1 Misurazione della superficie libera

La superficie libera viene descritta in funzione di spazio e tempo attraverso le riprese effettuate con le quattro camere a disposizione. Le videocamere utilizzate sono SONY Handycam modello FDR-AX700 con Sensore CMOS Exmor RS tipo 1.0 da 14,2 Megapixel, Zoom a immagine nitida 18x(4k) e 24x(HD) ed obiettivo grandangolare Zeiss 29.0 mm. I video sono stati acquisiti in formato High-Definition con una risoluzione di 1920x1080 pixel ed una frequenza di 100 fps; le camere sono state inoltre tutte settate per acquisire con sensibilità ISO1250, tempo di esposizione di 1/150 s e apertura del diaframma f2.8. Le quattro camere sono fissate ad un supporto orizzontale ad una distanza di 1 m l'una dall'altra.



Figura 24 SONY Handycam FRD-AX700

Al fine di migliorare l'identificazione della superficie libera, l'acqua utilizzata nel corso delle prove viene tinta con del colorante, per l'esattezza della Rodamina B, ed illuminata da un piano di luce verticale parallelo alla direzione del moto e posto ad una distanza di 5 cm dalla sponda del canale sul lato esposto alle camere; il piano di luce è emesso da tre emettitori laser a luce verde da 200 mW di potenza, ognuno dei quali emette un fascio di 30° di ampiezza; il colorante Rodamina B illuminato dal fascio di luce coerente del laser emette una specifica fluorescenza di luce che pone in evidente contrasto il piano delle misure rispetto al resto della corrente. In aggiunta sono stati disposti teli neri attorno al canale, ed è stato tinto del medesimo colore il fondo in modo da evitare riflessi luminosi o eccessivo illuminamento ambientale così da far risaltare il piano laser.

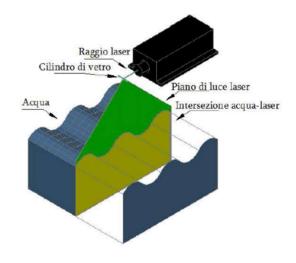


Figura 25 Schema di funzionamento del laser

4.2.2 Calibrazione camere

Per ottenere un'informazione metrica dai fotogrammi registrati è necessario realizzare la trasformazione da coordinate immagine $\{j \ k\}$ alle coordinate globali $\{X \ Y \ Z\}$. Per fare ciò è necessaria la determinazione di una serie di parametri; essi si distinguono in parametri estrinsechi, intrinsechi e di distorsione. I parametri intrinsechi e di distorsione sono caratteristici della camera. I primi sono sei e permettono il passaggio dei punti nel piano dell'immagine dal sistema delle coordinate immagine, bi-dimensionale, al sistema di riferimento spaziale solidale alla camera centrato nel fuoco di proiezione; essi sono contenuti all'interno della matrice dei parametri intrinsechi.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F * s_x & 0 & 0 \\ s & F * s_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix}$$
(4.1)

Dove:

s è il parametro di skewness;

 c_x e c_y sono le coordinate pixel del contro di proiezione;

F è la distanza focale espressa in [mm];

 s_x ed s_y sono il numero di pixel per unità di lunghezza nella direzione x e y rispettivamente

I secondi permettono la correzione di vari errori di distorsione come, ad esempio, gli errori di proiezione delle lenti. Sia i parametri intrinsechi sia di distorsione sono stati determinati in un'unica soluzione attraverso l'apposita applicazione del software MATLAB, "Simple Camera Calibrator App", la quale si avvale di un congruo numero di fotogrammi di uno stesso pannello di calibrazione rettangolare a griglia quadrata, in questo caso 13, scattati dà diverse angolazioni. Il programma identifica in ogni fotogramma, attraverso il contrasto, gli angoli dei quadratini costituenti la griglia di calibrazione e, nota la dimensione dei quadrati della griglia (in questo caso 20,17 mm), determina, attraverso una stima ai minimi quadrati, i parametri sopracitati. Quanto determinato viene infine salvato in una struttura ed essendo tali parametri propri della camera essi si mantengono inalterati.

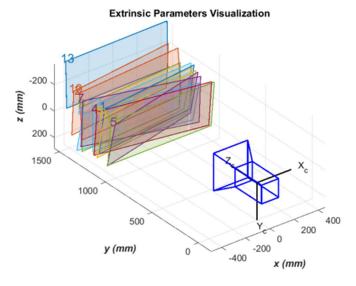


Figura 26 Localizzazione dei fotogrammi di calibrazione all'interno del sistema di riferimento solidale alla camera

Per quanto riguarda i parametri estrinsechi, essi descrivono la rototraslazione che permette il passaggio dal sistema di riferimento solidale alla videocamera al sistema di riferimento globale (in questo caso solidale al canale), localizzando la posizione e l'orientamento della camera nello spazio rispetto al canale; essi vanno determinati ogni qual volta vi è uno spostamento reciproco tra canale e videocamera. Tale trasformazione è espressa nella forma:

$${x \brace y} = {X \brace Y} * [R] + \{t\}$$
 (4.2)

Dove:

 $\{x \ y \ z\}$ sono le coordinate del sistema di riferimento solidale alla videocamera;

- [R] la matrice di rotazione nello spazio;
- $\{t\}$ il vettore di traslazione;

La procedura prevede il posizionamento del pannello di calibrazione nel canale in corrispondenza del piano del laser; il pannello viene ripreso per qualche istante. Sempre attraverso il software MATLAB, viene acquisito un fotogramma dal video e vengono identificati i punti del pannello di calibrazione attraverso il comando "DetectCheckerboardPoints"; note le coordinate pixel dei punti del pannello, vanno definite le coordinate globali dei medesimi attraverso il comando "generateCheckerboardPoints". In questo modo il sistema di riferimento globale viene automaticamente definito come terna destrorsa centrata nel primo punto in basso a sinistra del pannello di calibrazione, con gli assi x e y paralleli alle dimensioni rispettivamente maggiore a minore del pannello (in questo caso asse x parallelo all'asse del canale e asse y perpendicolare al fondo) si farà di seguito riferimento al sistema di riferimento così definito come $SR_{p,i}$ con $i \in [1,4]$ indice relativo alla camera. Infine, si ricavano i 12 parametri estrinsechi [R] e $\{t\}$ attraverso il comando "exstrinsics".

Fatto ciò, l'operazione di passaggio da coordinate immagine a coordinate globali e viceversa può essere effettuata automaticamente attraverso i comandi "pointsToWorld" e "WorldToImage".

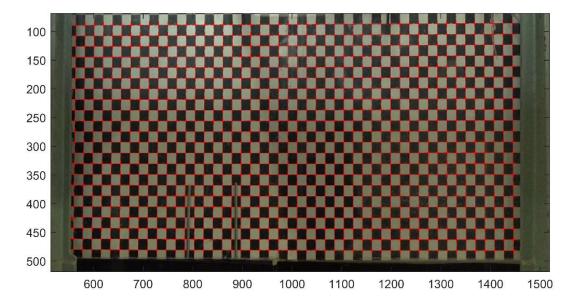


Figura 27 Pannello di calibrazione con sovrapposti i punti della griglia ottenuti con comando "WorldToImage" e verifica della genuinità dei parametri estrinsechi determinati e nel complesso della calibrazione della camera.

4.2.3 Misurazione delle spinte idrodinamiche

Le forze agenti sulle bacchette sono state misurate attraverso celle di carico a trazione. Sono state predisposte tre sezioni strumentate con quattro celle in ogni sezione per un totale di 12 celle di misura. Le singole celle di carico sono posizionate orizzontalmente con asse parallelo alla direzione della corrente al di sopra delle traverse in alluminio, l'estremità di valle è incernierata con uno snodo sferico alla struttura, mentre l'estremità di monte è incernierata con uno snodo identico ad una asta di misura. L'asta di misura è a sua volta vincolata per mezzo di una cerniera rotazionale, realizzata con una coppia di cuscinetti a sfera, e si costituisce di un profilato di alluminio a sezione quadrata 20x20 mm di 98 cm di lunghezza culminante in una bacchetta del medesimo diametro delle bacchette sul fondo del canale per una lunghezza di 30 cm. L'asta di misura permette di trasferire il carico esercitato dalla corrente in punta alla cella di carico all'estremo opposto. In ragione della sua geometria, l'asta applica un fattore di amplificazione di circa dieci volte al carico applicato; tale fattore di amplificazione varia leggermente in funzione del tirante ed in funzione del posizionamento delle celle; L'amplificazione permette di rendere il carico applicato alla cella confrontabile con il range di misura dello strumento.

Sono state utilizzate due differenti celle di carico:

Celle Leane modello DBBSM-1kg-003-000 con carico nominale massimo FS (full scale) di 1 kgf a trazione e compressione, e accuratezza dello 0,03%/FS. Alimentabili in un range di 2-15 V con output gain di 2.7 mV/V. Le celle sono completate con amplificatori di segnale modello SGA-D della Mantracourt Electronics settate per funzionare con output in voltaggio +/- 10 V, filtro in frequenza 1000 Hz, gain di 2.63 mV/V ed alimentazione a 18-24 V.



Figura 28 Da sinistra: cella di carico Leane DBBSM-1kg-003-000, amplificatore Mantracourt Electronics SGA-D

Celle Instrumentation Devices modello kD40s con carico nominale massimo FS di 10N a trazione e compressione, carico operativo pari al 400% di FS e accuratezza dello 0,1%. Alimentabili in un range da 1 a 10 V con output range di 0.5 mV/V/FS. Le celle sono completate con amplificatori di segnale modello GSV-1H della ME-Meßsyteme con output in corrente 12 +/- 8 mA, filtro in frequenza a 250 Hz ed alimentazione a 11-28 V. L'output in corrente 4-20 mA è stato convertito con resistenze da 220 ohm in un range in tensione 88-440 mV.



Figura 29 Da sinistra: Cella di carico Instrumentation Devices kD402, amplificatore ME- Meßsyteme GSV-1H

In entrambi i casi, il sistema cella-amplificatore è stato alimentato a 12 V e restituisce un segnale sempre in volt legato da una proporzione lineare al carico applicato alla cella, sia esso a trazione o a compressione. Il segnale viene registrato tramite una scheda di acquisizione della Natyonal Instruments modello USB-6353 attraverso il software LabVIEW ad una frequenza di 1kHz.

4.2.4 Calibrazione delle celle di carico

L'obiettivo della calibrazione è quello di ricavare una relazione lineare tra il segnale in volt fornito dallo strumento ed il momento applicato all'asta di calibrazione, in quanto il centro di spinta della corrente varia nel tempo assieme al tirante rendendo la ricerca di una relazione forza-tensione a priori impraticabile. Per ragioni di praticità è stata prima effettuata una calibrazione delle celle isolate (ovvero scollegate dalla struttura) per determinare una relazione tra tensione registrata e carico applicato misurato in grammi. Tale relazione, infatti, è caratteristica della singola cella e non influenzata dalla geometria del sistema "cella-asta di misura". La prima calibrazione è stata effettuata con pesi tarati da 100, 50, 20 e 10 g e le curve di calibrazione ottenute per le 12 celle sono state implementate del software di acquisizione in modo da registrare direttamente carichi in grammi, i quali vendono salvati in un file di testo formato ".txt".

Carico Instrumentation Devices					Leane							
[g]	Calla 1	Calla 2	Calla 3	Calla 4	Calla 5	Calla 6	Calla 7	Calla 8	Calla 9	Calla 10	Calla 11	Calla 12
0	0,634	2,625	2,637	2,861	-0,280	-3,116	2,154	0,128	-1,279	-0,259	1,932	-0,630
10	0,651	2,643	2,654	2,878	-0,373	-3,212	2,061	0,036	-1,369	-0,350	1,844	-0,708
20	0,668	2,660	2,672	2,895	-0,466	-3,308	1,968	-0,056	-1,460	-0,441	1,755	-0,809
50	0,719	2,711	2,722	2,945	-0,744	-3,603	1,688	-0,333	-1,731	-0,714	1,488	-1,106
100	0,804	2,795	2,805	3,027	-1,207	-4,060	1,224	-0,795	-2,206	-1,168	1,042	-1,602
а	588,2	589,7	595,9	602,9	-107,9	-105,7	-107,5	-108,3	-107,9	-110,0	-112,3	-101,9
R^2	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabella 4 Valori di tensione registrati; con: a rapporta $\Delta g/\Delta V$ e R^2 coefficiente di determinazione

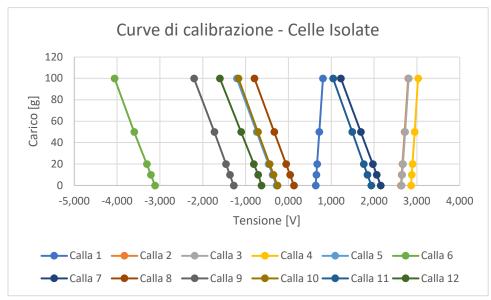


Figura 30 Curve di calibrazione ottenute per le 12 celle isolate

La calibrazione definitiva viene effettuata applicando con una delle celle di carico una trazione sulla bacchetta a distanza dal centro di rotazione dell'asta di misura nota ed è stata ripetuta ad ogni variazione di pendenza del canale.

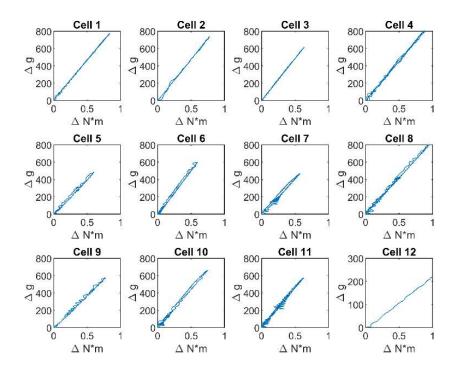


Figura 31 Curve di calibrazione

4.2.5 Misurazione del livello nel serbatoio di monte

Il livello a monte della paratoia è stato misurato tramite sensori ad ultrasuoni modello BUS004W della Balluff. Il sensore può essere alimentato con una tensione variabile tra 10 ... 30 V, ha un range di operatività da 65 a 600 mm di distanza ed emette un segnale in output da 4 a 20 mA; la precisione di misura è pari al 0.15% del fondo scala ed ha una ed ha una risoluzione di <0.069 mm. In questo caso i sensori sono stati posti ad una distanza di 550 mm dal fondo; sono stati alimentati con una tensione di 12V e l'uscita in corrente 4 ... 20 mA è stata convertita, tramite resistenze da

220 ohm, in un range in tensione 88 ... 440 mV. Le misure sono state acquisite con la medesima scheda di acquisizione National Instruments utilizzata per le celle di carico alla medesima frequenza di campionamento di 1 kHz. La calibrazione dei sensori stata effettuata con il canale in posizione orizzontale riempito a diversi livelli. Ottenute le curve di calibrazione, esse sono state implementate direttamente nel software di acquisizione LabVIEW.

Livello	Tensione [V]											
[cm]	Sens 1	Sens 2	Sens 3	Sens 4	Sens 5	Sens 6	Sens 7	Sens 8				
31,5	1,451	1,427	1,435	1,456	1,427	1,420	1,424	1,436				
27,1	1,941	1,914	1,926	1,951	1,918	1,903	1,901	1,920				
22,7	2,328	2,310	2,320	2,344	2,310	2,288	2,290	2,311				
18,6	2,702	2,680	2,693	2,724	2,686	2,658	2,665	2,688				
12,7	3,244	3,211	3,226	3,260	3,221	3,188	3,200	3,218				
6,9	3,777	3,731	3,757	3,793	3,753	3,715	3,719	3,744				
0,8	4,315	4,265	4,292	4,331	4,293	4,243	4,252	4,276				
а	-10,82	-10,93	-10,85	-10,78	-10,82	-10,98	-10,95	-10,91				
R^2	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999				

Tabella 5 Valori di tensione registrati; con: a rapporta $\Delta cm/\Delta V$ e R^2 coefficiente di determinazione

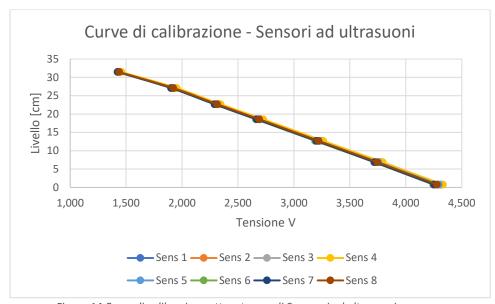


Figura 14 Curve di calibrazione ottenute per gli 8 sensori ad ultrasuoni

5.1 Prove in moto permanente

Le prove in moto permanente sono state eseguite per quattro differenti pendenze ($S_0 = 0\%, 1\%, 2\%, 3\%$); sono state condotte sette diverse prove a portata crescente per le pendenze 0% e 1%, e sei per le restanti. In totale sono state condotte 26 prove al variare di pendenza e portata, e le portate ad ogni pendenza sono state scelte affinché garantissero un sommergimento delle bacchette all'incirca dal 30% al 100% nelle tre sezioni strumentate. Durante le prove è stata pompata una portata d'acqua costante agendo su una valvola a saracinesca nella condotta di mandata e misurata con un misuratore di portata posto sulla medesima. Al raggiungimento della stazionarietà sono stati misurati manualmente i tiranti in corrispondenza delle sezioni strumentate; per ognuna delle prove sono state eseguite dieci letture di tirante per ogni sezione nel tempo, le quali sono state successivamente mediate.

	S ₀ [%]											
Q [L/S]		0			1			2			3	
	Sz-1	Sz-2	Sz-3	Sz-1	Sz-2	Sz-3	Sz-1	Sz-2	Sz-3	Sz-1	Sz-2	Sz-3
5	5,0	4,7	4,3									
7,5	6,5	5,9	5,5									
10	7,5	7,1	6,7	5,3	5,1	4,9						
15	10,1	9,3	8,5	7,2	6,9	6,6	5,7	5,6	5,5			
20	12,1	11,0	9,9	9,2	8,9	8,3	7,4	7,3	7,2	4,4	5,5	7,7
25	13,8	12,5	11,5	11,2	10,5	9,8	9,2	8,5	8,3	4,75	7,1	7,5
30				13,2	12,3	11,1	10,7	10,2	9,8	5,75	8,25	8,6
35	16,4	15,0	13,8	14,4	13,5	12,4	11,9	11,6	11,2	6,3	9,5	9,8
40							13,6	13,1	12,7	10,7	11,3	11,3
45										12,0	12,3	12,0
46				16,7	15,8	14,6						

Tabella 6 Valori medi del tirante misurato in cm per le prove condotte, nelle tre sezioni strumentate (Sz-1, Sz-2, Sz-3, numerate da monte verso valle.)

La lettura della coppia applicata alle aste di misura è stata ottenuta campionando per circa 60s alla frequenza di 1kHz. Dalle letture di momento torcente applicato alle aste sono stati ricavati successivamente i valori di forza.

5.2 PROVE DI DAM-BREAK

Le prove in regime di dam-break sono state condotte per quattro differenti pendenze ($S_0 = 0\%, 1\%, 2\%, 3\%$) e quattro diversi carichi d'acqua misurati immediatamente a monte della paratoia ($h_0 = 15$ cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm) per un totale di 16 combinazioni. Ogni combinazione è stata ripetuta tre volte per un totale di 48 prove. L'esecuzione delle prove ha seguito una meticolosa procedura al fine di non inficiare la ripetibilità delle misure. L'iter di realizzazione delle prove prevede una serie di operazioni preliminari necessarie ad ogni cambio di pendenza, nella fattispecie viene rimossa la paratoia dal suo telaio per permettere il posizionamento del pannello di calibrazione a favore della prima camera, dopodiché si effettua la calibrazione di tutte e quattro le camere e viene riposizionata la paratoia. Al termine della calibrazione delle camere vengono regolate le aste di misura in modo che siano nella corretta posizione, ovvero in luogo di tre file di quattro bacchette precedentemente rimosse, perpendicolari al fondo del canale e sollevate di 1

mm dal fondo in modo che siano libere di muoversi; regolata la posizione e l'orientamento delle bacchette vengono, con cautela, agganciate le celle di carico e se ne effettua la calibrazione. Infine, si posizionano i laser affinché il piano di luce coincida con il piano della calibrazione delle camere e l'illuminamento risulti il più possibile omogeneo. Avvenuto il posizionamento dei laser si concludono le operazioni preliminari, quanto viene descritto di seguito riguarda l'esecuzione del singolo dam-break. Innanzitutto, viene sigillata la paratoia applicando su entrambi i lati 33 cm di nastro adesivo telato, per due terzi della larghezza sulla paratoia e per un terzo sul vetro del canale, e in aggiunta gli angoli vengono ulteriormente sigillati applicando del mastice a tenuta idraulica; è condizione necessaria alla corretta esecuzione della prova che mastice e nastro adesivo restino aderenti alla paratoia a seguito dell'apertura. Sigillata la paratoia viene pompata l'acqua colorata; raggiunto il carico necessario, misurato a ridosso della paratoia, si attende che la superficie libera raggiunga una condizione di quiete verificando l'assenza di perdite, e al raggiunto equilibrio vengono nell'ordine: avviate le registrazioni, avviato il programma di acquisizione e aperta la valvola del compressore. Al completo svuotamento del canale vengono interrotte le riprese e l'acquisizione dei sensori. Una volta acquisiti, riprese e misure dei sensori vengono processate attraverso un algoritmo Matlab; l'analisi dei dati acquisiti durante la prova si articola in tre fasi principali: inizialmente avviene la sincronizzazione della strumentazione in cui le registrazioni vengono sincronizzate alla registrazione dei sensori contestualmente alla identificazione dell'istante di apertura, successivamente avviene l'identificazione della superficie libera all'interno del fotogramma, ed infine le misure grezze di tirante ricavate dalla fase precedente e le misure di celle e sensori vengono raffinate attraverso varie metodologie di post-processing. Nei seguenti paragrafi verranno discusse approfonditamente le tre fasi sopracitate.

5.2.1 Sincronizzazione della strumentazione

Le registrazioni vengono avviate con un telecomando singolarmente e non risultano pertanto sincronizzate tra di loro né tanto meno con la scheda di acquisizione; per garantire la sincronizzazione degli strumenti sono state predisposte due luci led collegate alla scheda di acquisizione. L'accensione delle luci led avviene contestualmente all'avvio dell'acquisizione delle misure dei sensori. Per individuare l'istante di accensione del led all'interno del video viene definita la posizione in coordinate pixel del centro del led; l'algoritmo apre dieci secondi di video per volta salvandolo in una matrice 1080x1920x3x1000, del video viene selezionato un sotto video dalla risoluzione di 11x11 pixel centrato nel centro del led, e per ogni frame di questo sotto-video viene calcolato lo scarto quadratico medio tra i valori RGB del frame rispetto al primo, nel quale con certezza il led è spento. Lo scarto quadratico medio tra due fotogrammi codificati in RGB è un valore compreso tra 0 e 16, è stata considera come soglia un valore pari a 8 al di sopra del quale il led viene considerato acceso. Allorché non venga superato il valore di soglia all'interno dei 1000 frame estratti il software procede all'estrazione di 10 secondi successivi.

Identificato l'istante di accensione per tutte e quattro le videocamere la stessa procedura è stata utilizzata per individuare l'istante di apertura della paratoia semplicemente definendo come coordinate pixel anziché il centro del led un punto della paratoia il più possibile rasente il fondo. All'istante di incipiente movimentazione della paratoia viene posto $t_0=0$ e si determina il frame corrispondente $F_{0,i}$ nelle restanti camere. Da t_0 si è scelto di analizzare 15 secondi di evento per tutte le prove per un totale di 1500 frame; in tale lasso di tempo si è potuto osservare, nel corso dell'esecuzione delle prove, come sia stato raggiunto ampliamente il tirante massimo all'interno del canale per tutto le configurazioni di pendenza e carico.

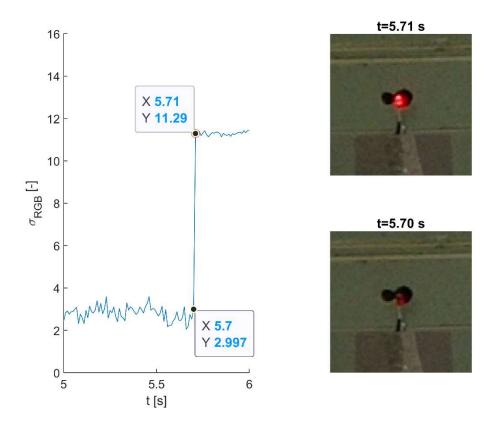


Figura 32: Identificazione accensione led (prova $S_0=3\%~h_0=15cm~run~1$); a sinistra evoluzione nel tempo dello scarto quadratico rispetto al frame iniziale, a destra particolare led prima e dopo l'accensione

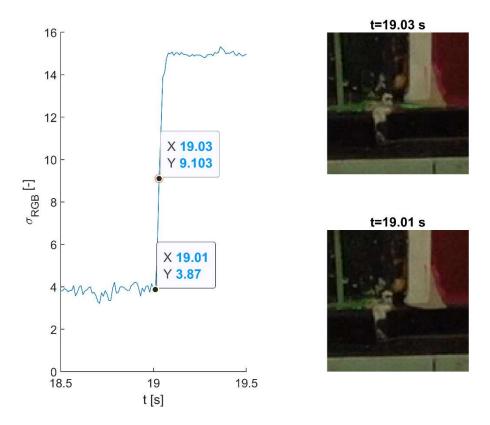


Figura 33 Identificazione movimentazione paratoia (prova $S_0=3\%\ h_0=15cm\ run\ 1$); a sinistra evoluzione nel tempo dello scarto quadratico rispetto al frame iniziale, a destra particolare base paratoia prima e dopo la movimentazione

5.2.2 Identificazione della superfice libera

Successivamente alla sincronizzazione delle camere viene eseguita l'identificazione della superficie libera. L'obiettivo di questa fase è ricavare le coordinate pixel dei punti appartenenti alla superficie per mezzo del forte contrasto della corrente attraversata dal piano del laser rispetto al resto dell'immagine. Al fine di limitare l'onere computazionale i frame vengono precedentemente ritagliati, la zona di interesse per ogni camera è definita nel sistema di riferimento globale della camera i-esima $SR_{p,i}$, solidale al pannello di calibrazione, come un rettangolo esteso dalla prima all'ultima colonna di punti del pannello nella direzione X e da $-s_p$ a h_0 nella direzione Y. Viene estratta la più piccola sotto immagine di dimensioni m x n che racchiude detto rettangolo; le dimensioni della sotto immagine non sono note a priori dipendendo dal carico iniziale, dalla larghezza di pannello visibile alla videocamera e dall'inclinazione del canale.

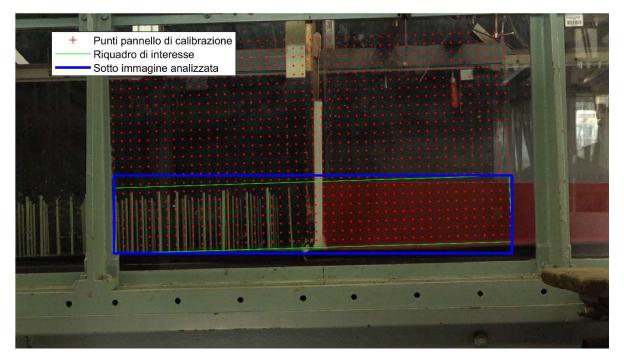


Figura 34 Particolare selezione area di interesse da analizzare (camera 1 prova $S_0=3\%\ h_0=15cm\ run\ 1$).

Una volta ritagliati i frame vengono identificati i pixel appartenenti alla corrente nel piano del laser filtrando quelli rientranti in un dato range di colore; esso è codificato in RGB (Red Green Blue) attraverso tre livelli di colore definiti da tre interi compresi tra 0 e 255 per ogni pixel. Il range di colore ottimale viene precedentemente definito avvalendosi dell'applicazione di Matlab "Color Thresholder", viene importata un'unica immagine creata unendo quattro differenti istanti della prova e per ogni livello di colore si seleziona il range che meglio circoscrive la corrente. La pratica ha mostrato come l'utilizzo di un differente spazio di codifica del colore rispetto al classico RGB rendesse più efficace l'identificazione dei punti della corrente; di fatto si è optato per lo spazio HSV (Hue, Saturation, Value) dove i tre parametri rappresentano il tono, inteso come colore dell'iride, espresso da un numero reale tra 0 e 360, la saturazione e la luminosità, entrambi descritti da reali compresi tra 0 e 1; l'applicazione restituisce il range di colore come un valore di minimo e di massimo per ogni livello di colore in una matrice 3x2. Definiti i range di colore *una tantum* esso viene applicato ai singoli frame; si effettua il passaggio da sistema RGB ad HSV attraverso il comando "rgb2hsv", si identificano i pixel che soddisfano il range di colore generando una matrice di valori di verità della dimensione dell'immagine.

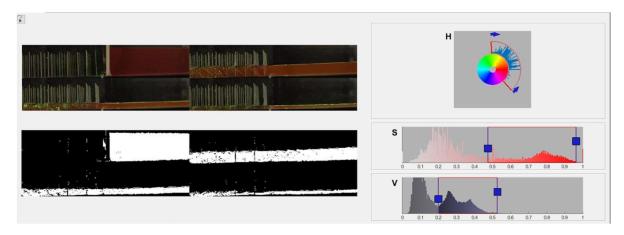


Figura 35 Definizione del range di colore tramite Color Thresholder (camera 1 prova $S_0=3\%\ h_0=15\ cm\ run\ 1$).

Le matrici di verità di ogni frame vengono unite in un'unica matrice m x n x 1500, a cui viene applicato un filtro a mediana mobile con uno spam di tre pixel, la mediana mobile sostituisce in ogni posizione il valore più comune nel volume di pixel della dimensione dello spam centrato nel punto. La principale fonte di errore nell'individuazione della corrente è rappresentata dai riflessi della luce del laser sulle bacchette seguita dalla presenza di bolle d'aria che vengono inglobate nel flusso della corrente. Il filtro a mediana mobile permette di eliminare parte degli errori di identificazione, che siano essi pixel mancanti nel volume della corrente o riflessi delle bacchette.

Ottenuti i pixel appartenenti alla corrente, viene considerato pixel appartenente alla superficie libera il primo pixel di corrente dall'alto per ogni colonna del fotogramma. Gli nx1500 punti della superficie libera in coordinate immagine vengono riportati nel $SR_{p,i}$ e ne risultano due matrici nx1500 contenenti le coordinate X e Y in millimetri; la risoluzione delle misure metriche del tirante così ottenute è di 0.01 s nel tempo, funzione della frequenza di campionamento, mentre nello spazio corrisponde alla dimensione metrica del singolo pixel nel piano del laser, in media 1,069 mm

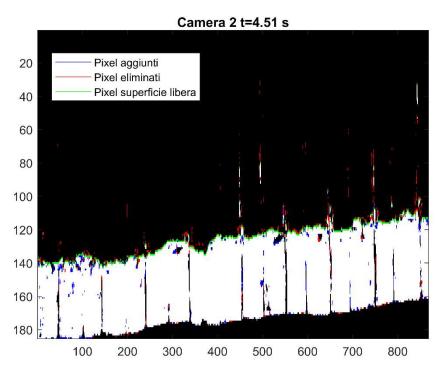


Figura 36 Pre-filtro a mediana mobile e definizione dei pixel di superficie (camera 2 prova $S_0=3\%$ $h_0=15$ cm run 1).

in X e Y. I risultati della fase di identificazione assieme al vettore dei tempi vengono salvati in una struttura per le successive fasi.

Una unica definizione di range di colore per il singolo video spesso non è stata sufficiente, questo perché si verifica generalmente che la luminosità della superficie libera appaia intensificata sia nel primo tratto di fronte d'onda per effetto delle bolle d'aria inglobate nel flusso dalla corrente sia quando la superficie libera attraversa l'asse di proiezione della videocamera, momento in cui la luce laser viene rifratta in direzione del punto di presa. Per ovviare alla variazione di luminosità sono stati definiti all'occorrenza più range di colore; l'algoritmo esegue l'identificazione per ogni livello di colore e successivamente per ogni colonna di pixel seleziona tra le n superfici libere identificate quella con uno scarto quadratico medio inferiore su uno spam di 30 pixel centrato nel punto. Nella pratica non si sono resi necessari più di de livelli di colore.

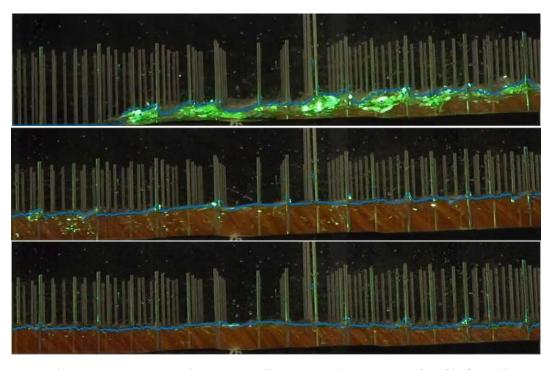


Figura 37 Profilo rilevato sovrapposto ai frame per tre differenti istanti (camera 2 prova $S_0=3\%$ $h_0=15$ cm run 1).

5.2.3 Algoritmo e metodologie di post processing

Le misure di tirante ottenute dalle riprese delle quattro camere sono tra di loro svincolate e presentano ancora numerosi *outlier* dovuti alla presenza di riflessi della luce del laser; le registrazioni dei sensori risultano invece generalmente disperse a causa del rumore strumentale. Nella seguente fase verranno acquisite le varie misure e verranno applicate alcune tecniche di post processing al fine di ottenere una descrizione corretta ed efficace delle grandezze di interesse.

5.2.3.1 Misure del tirante

Le misure di tirante grezze vengono acquisite dalla fase precedente. Le due matrici $n_i x 1500$ contenenti, per ogni camera, le coordinate X e Y in millimetri nel proprio $SR_{p,i}$ vengono unite tra di loro in due matici $n_i x 1500$ riportate del sistema di riferimento solidale al canale SR_c centrato in corrispondenza della faccia lato monte della parata con asse X rivolto nella direzione della corrente. Le coordinate in Y non subiscono variazioni nella trasformazione da $SR_{p,i}$ a SR_c , la misura del tirante lungo la perpendicolare al fondo viene confusa con la misura h del tirante lungo la verticale; nel caso peggiore, ovvero con la pendenza del fondo $S_0 = 3\%$ si commette un errore relativo inferiore allo 0.05%, meno di 0.13 mm per un tirante di 0.3 m, circa un ordine di grandezza inferiore alla risoluzione strumentale nella definizione della superficie libera.

Dalle misure di tirante vengono eliminati eventuali errori; innanzitutto, per distinguere in maniera più efficace gli *outlier*, in particolar modo dove la superficie libera ha una curvatura elevata, viene utilizzato uno stimatore robusto: si è optato per una mediana mobile con uno spam di 100 punti nella direzione relativa allo spazio e 10 punti in quella relativa al tempo; vengono eliminati tutti i punti ad una distanza superiore a 0.01 m dalla superfice mediana. Per ogni istante di tempo le misure vengono a questo punto ricampionate nello spazio secondo le coordinate X dei punti del primo istante di tempo, questo passaggio permette di ridurre da n_tx1500 a n_tx1 le coordinate in x senza significative variazioni nelle misure di tirante, le quali ora hanno un supporto omogeneo sia per spazio che per tempo. Viene infine eseguito uno *smoothing* a media mobile con uno spam di 0.01 m per lo spazio e 0.25 s per il tempo. I dati vengono salvati per le operazioni successive.

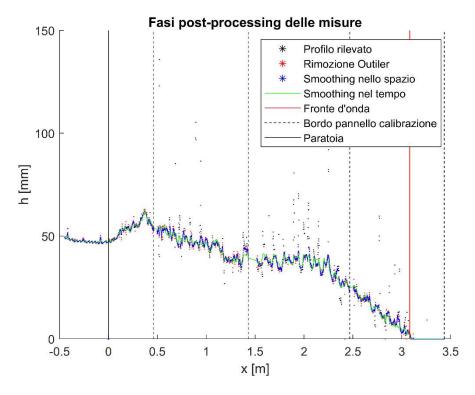


Figura 38 Fasi del post-processing sulle misure di tirante; (istante t=1.25s prova $S_0=3\%$ $h_0=15$ cm run 1)

5.2.3.2 Misure dei sensori

Per prima cosa vengono analizzate le misure dei sensori ad ultrasuoni; il loro scopo non è, come per le camere, la descrizione dell'evoluzione della superficie libera, quanto la definizione nel tempo del volume d'acqua contenuto nel tratto di canale occluso alle videocamere. Gli otto sensori sono stati disposti al centro del canale orientati perpendicolarmente al fondo e in maniera più fitta in prossimità della paratoia, dove ragionevolmente sono state previste pendenze maggiori della superficie libera. I sensori sono posti alle distanze di 0.205m, 0.404m, 0.720m, 1.018m, 1.607m, 2.005m, 3.012m e 4.003m; dalle misure si determina il volume contenuto nel canale a monte della sezione del primo sensore definito V_s , attraverso integrazione numerica con metodo dei rettangoli.

$$\int_{a}^{b} f(x) dx \approx (b - a) f\left(\frac{a + b}{2}\right)$$
 (5.1)

Per semplicità si farà di seguito riferimento con "serbatoio" al tratto a monte del primo sensore ad ultrasuoni e come "canale" al tratto a valle, distinzione più utile ai fini della trattazione essendo coerente con i differenti sistemi di misurazione utilizzati. Sebbene possa essere più corretto riferirsi

al serbatoio come al tratto a monte della paratoia all'atto pratico della definizione della velocità della corrente nelle sezioni di interesse non sussiste differenza alcuna. Il volume contenuto nel serbatoio V_s viene calcolato con le misure dei sensori ad ultrasuoni così come sono state acquisite, dopodiché viene applicato un filtro a media mobile su uno spam di 0.25 s analogamente alle misure di tirante.

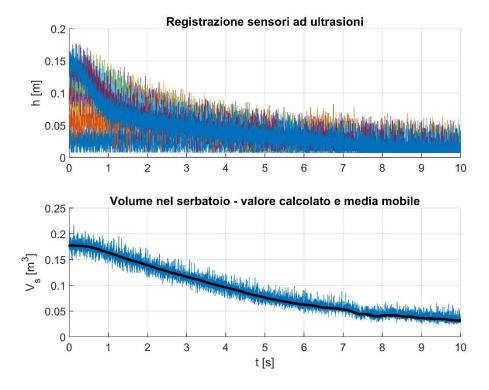


Figura 39 Misure sensori ad ultrasuoni e valutazione di V_s nel tempo (prova $S_0=3\%\ h_0=15\ cm\ run\ 1)$

Infine, vengono acquisite le misure relative alle celle di carico, e viene ad ognuna applicata la relativa curva di calibrazione ricavando in questo modo il momento applicato all'asta di misura. Il momento applicato iniziale C_0 viene calcolato come valore medio nel secondo antecedente all'apertura della paratoia. Il valore della forza di drag viene ricavata grazie alle misure di tirante in corrispondenza delle tre sezioni strumentate ricavate per interpolazione lineare dai punti noti di h(x,t) e ricampionate coerentemente con le misure dei sensori. Calcolati poi i valori medi per sezione tutte le curve vengono filtrate con media mobile con spam di 0.25 s come per il resto delle misure.

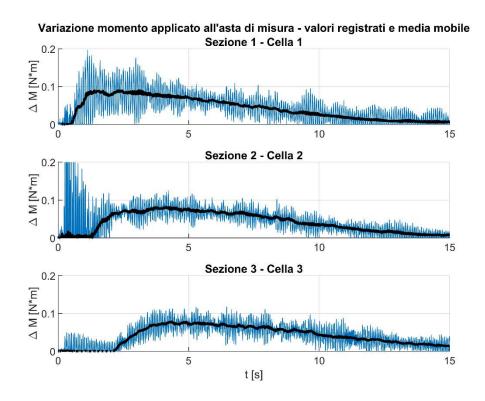


Figura 40 Momento indotto dalla corrente sulle aste di calibrazione (prova $S_0=3\%\,h_0=15\,cm$ run 1)

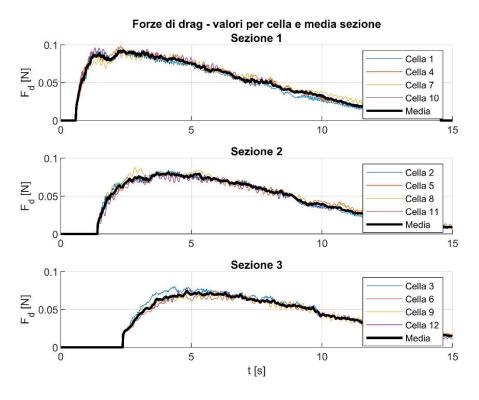


Figura 10 Forze di drag nel tempo (prova $S_0=3\%\ h_0=15\ cm\ run\ 1)$

5.2.4 Calcolo delle velocità medie

Le velocità nelle sezioni di interesse sono state calcolate applicando il principio di continuità idraulica su un tratto finito di corrente che va dalla sezione di interesse fino alla sezione di inizio del serbatoio. Volendo calcolate la velocità media della sezione i-esima $U_i(t) = U(x_i, t)$, si ha infatti:

$$U_{i} = \frac{Q_{i}}{bh_{i}} = \frac{1}{bh_{i}} \frac{d}{dt} (V_{in} - V_{i})$$
 (5.2)

Dove Q_i è la portata in uscita dalla sezione i-esima, V_i il volume interno al tratto finito di corrente, $h_i = h(x_i,t)$ e V_{in} il volume cumulato in ingresso. Il volume interno V_i viene ricavato per integrazione numerica secondo il metodo dei rettangoli, analogamente a quanto fatto per V_s ; per quanto riguarda invece il volume cumulato in ingresso V_{in} esso viene calcolato come il volume contenuto nell'intero canale visibile V_c integrato dalle misure delle camere fino a che il fronte d'onda è visibile (circa i primi 3 s dall'apertura della paratoia) dopodiché si passa al complementare all'intero di V_s .

$$V_{in} = \begin{cases} V_{s0} - V_s & t \ge t_w \\ V_c & t < t_w \end{cases}$$
 (5.3)

Con V_{s0} volume iniziale contenuto nel serbatoio e t_w istante in cui il fronte d'onda esce dal tratto di canale visibile; non vengono utilizzate le misure dei sensori ad ultrasuoni fin da subito per calcolare V_{in} in quanto per i primi istanti di prova esso risulta inferiore a V_c . La differenza dipende dal volume d'aria che viene inglobato nel primo tratto del fronte d'onda. L'ipotesi più forte che è stata adottata consiste nel supporre che, una volta che il fronte d'onda non risulta più visibile, la quantità d'aria nella corrente sia o nulla o comunque costante, in modo da non influire sul valore della porta in uscita Q_i . Una volta determinato il volume in uscita dalla sezione i-esima cumulato nel tempo $V_{out} = V_{in} - V_i$ esso viene ulteriormente filtrato attraverso una regressione lineare mobile su uno spam di 3 s. Il valore filtrato viene utilizzato come valore di calcolo per la differenziazione numerica per limitare la dispersione dei valori di portata.

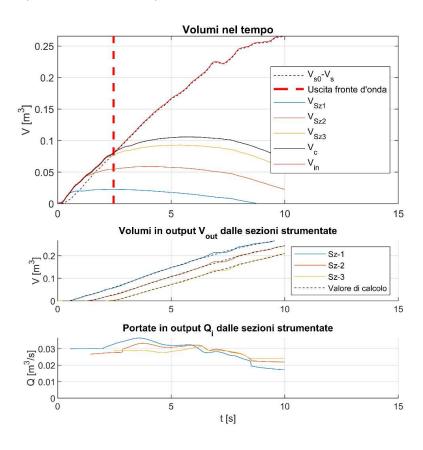


Figura 41 Volumi di interesse e portate per le sezioni strumentate (prova $S_0=3\%\,h_0=20\,cm$ run 1)

6.1 Prove in moto permanente

Le 26 prove in moto permanente hanno permesso di valutare la correttezza delle misure effettuate attraverso la strumentazione, di nuova introduzione, per la misura diretta delle forze di drag, essendo i risultati in moto permanente supportati da una più corposa base teorica. Le forze misurate sono state mediate su un congruo lasso di tempo al fine di eliminare fluttuazioni imputabili a fenomeni di natura turbolenta come, ad esempio, il distacco dei vortici di Von Karman. I valori sono stati confrontati con il valore teorico di forza di drag valutato attraverso un coefficiente di drag secondo la soluzione proposta da Cheng e Nguyen (2011). Di seguito sono riportati i risultati sperimentali delle forze di drag per unità di lunghezza F_d/h a confronto con il valore teorico. Come si può osservare i valori misurati non si discostano significativamente dal valore teorico, sebbene una certa dispersione rispetto al valore teorico imputabile nell'incertezza nella misura del tirante effettuata, come detto, attraverso un comune metro. Sulla base di quanto osservato l'errore in termini assoluti non appare correlato con la variazione della pendenza né tanto meno con la variazione della sezione di misura.

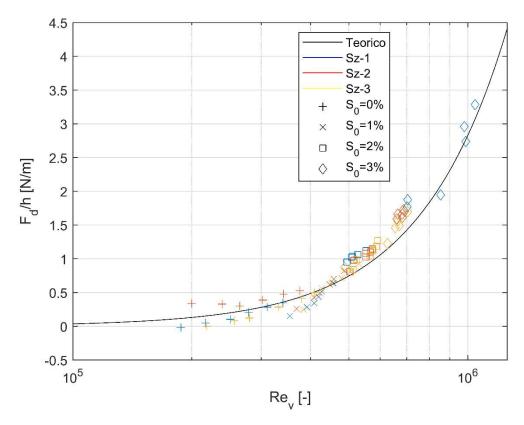


Figura 42 Valori misurati della forza di drag rapportata a tirante in funzione del numero di Reynolds caratteristico del canopy Re_v , per le diverse sezioni e le varie pendenze testate, confrontati con la soluzione teorica (linea nera) proposta da Cheng e Nguyen.

Di seguito è inoltre proposta una rappresentazione qualitativa dell'errore relativo sulla misura della forza di drag in funzione di tirante misurato h in metri, numero di Reynolds caratteristico del canopy Re_v e portata alla quale è stata condotta la prova Q in litri al secondo. Come auspicabile l'errore relativo appare correlato negativamente sia con il tirante che con il numero di Reynolds,

comportamento imputabile alla diminuzione in termini assoluti del valore della forza misurata diminuendo il tirante h e la velocità media U.

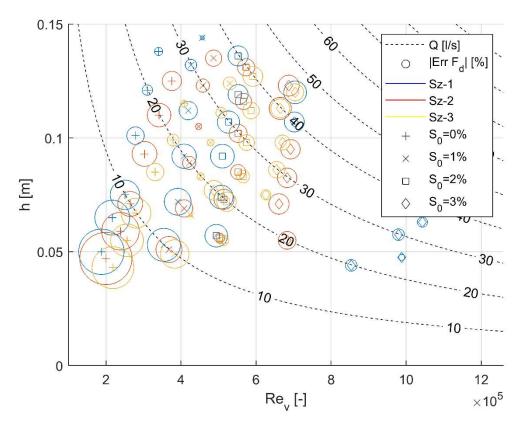


Figura 43 Rappresentazione qualitativa dell'errore relativo tra misurazioni e il valore teorico. L'entità dell'errore è espressa come dimensione della circonferenza attorno al punto relativo alla singola prova, punto di colore e forma coerente rispettivamente con la sezione e pendenza a cui la misura fa riferimento

6.2 PROVE DI DAM-BREAK

Per quanto riguarda invece le prove di maggiore interesse, condotte in regime di dam break, di seguito sono proposti i valori delle varie grandezze di interesse in funzione del tempo per i primi 15 secondi di evento. Le grandezze di interesse di seguito riportate sono il valore di forza di drag misurata F_d medio per le tre sezioni strumentate, il valore di tirante h sempre in corrispondenza delle sezioni strumentate ed il valore del volume V_r contenuto nel serbatoio a monte della paratoia misurato attraverso i sensori ad ultrasuoni.

Si è cercato di valutare la precisione delle misure sulla base dello scarto quadratico medio tra i profili temporali misurati, a seguito delle operazioni di post-processing; tale valore di scarto quadratico medio è stato valutato per ognuna delle 16 combinazioni di condizioni al contorno come riportato di seguito. Come si può osservare la precisione per le misure di tirante è dell'ordine di $10^{\circ}-4$ m, da un valore di $\sigma_h=0.389mm$ valutato nella sezione 2 all'1% di pendenza con un carico a monte di 15 cm fino ad un valore di $\sigma_h=1.975$ mm nella sezione 3 allo 0% di pendenza con un carico a monte di 30 cm, nelle condizioni peggiori la precisione è pari all'incirca l'1.3% del tirante massimo misurato e comunque confrontabile con la dimensione metrica del singolo pixel pari a 1,069 mm, confermando una buona precisione della metodologia di misurazione del tirante attraverso videocamere; per le misure di forza la precisione è dell'ordine di $10^{\circ}-3$ N da un valore di $\sigma_F=8.28E-04$ N valutato nella sezione 2 allo 0% di pendenza con un carico a monte di 15 cm e comunque inferiore al valore di $\sigma_F=1.36E-02$ N nella sezione 1 all'1% di pendenza con un

carico a monte di 30 cm, corrispondente circa al 4% della forza massima registrata nelle medesime condizioni; infine la misura del volume riporta una precisione che va da un valore di $\sigma_{\rm V}=6.29E-04m^3$ valutato al 2% di pendenza con un carico a monte di 15 cm fino ad un valore di $\sigma_{\rm V}=8.68E-03m^3$ all'1% di pendenza con un carico a monte di 30 cm corrispondente circa all'1.3% del volume iniziale nel serbatoio nelle medesime condizioni di pendenza e carico.

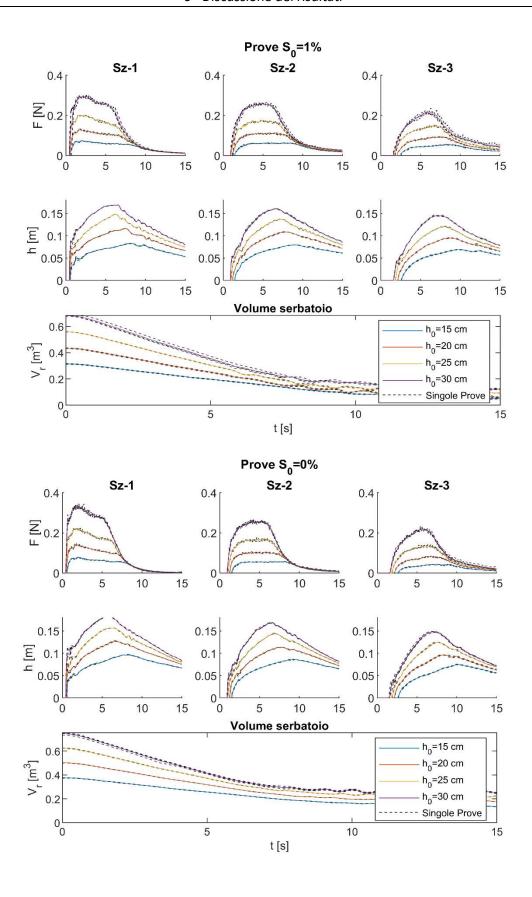
C	h_0	$\sigma_F[N]$				σ_V		
S_0	[<i>cm</i>]	Sz_1	Sz_2	Sz_3	Sz_1	Sz_2	Sz_3	$[m^3]$
	15	9,49E-04	8,28E-04	9,23E-04	8,66E-04	5,00E-04	5,83E-04	1,17E-03
0	20	1,29E-03	1,25E-03	1,15E-03	6,99E-04	6,69E-04	7,69E-04	7,91E-04
	25	1,75E-03	1,94E-03	1,88E-03	7,69E-04	6,64E-04	5,60E-04	1,28E-03
	30	3,52E-03	2,93E-03	3,95E-03	1,91E-03	1,06E-03	1,98E-03	6,34E-03
	15	9,42E-04	9,68E-04	9,43E-04	8,07E-04	3,86E-04	4,93E-04	2,23E-03
1	20	1,49E-03	1,48E-03	1,17E-03	6,68E-04	6,30E-04	5,26E-04	3,08E-03
1	25	1,49E-03	1,56E-03	1,44E-03	5,73E-04	7,48E-04	7,67E-04	2,18E-03
	30	1,36E-02	8,72E-03	7,34E-03	1,13E-03	9,42E-04	7,64E-04	8,68E-03
	15	9,51E-04	9,11E-04	1,07E-03	4,43E-04	5,99E-04	7,61E-04	6,29E-04
2	20	1,86E-03	1,54E-03	1,57E-03	1,35E-03	7,94E-04	7,95E-04	7,76E-04
	25	2,57E-03	2,28E-03	2,89E-03	9,68E-04	8,28E-04	6,56E-04	9,70E-04
	30	3,66E-03	3,40E-03	3,53E-03	7,35E-04	1,03E-03	6,74E-04	1,35E-03
	15	1,36E-03	9,67E-04	8,83E-04	7,63E-04	5,94E-04	1,24E-03	5,97E-03
,	20	1,98E-03	1,61E-03	1,48E-03	7,68E-04	5,04E-04	1,06E-03	6,40E-04
3	25	2,71E-03	2,23E-03	2,07E-03	1,00E-03	7,19E-04	1,28E-03	6,73E-04
	30	5,07E-03	3,86E-03	2,74E-03	1,00E-03	8,04E-04	1,07E-03	1,17E-03

Tabella 7 Valori di scarto quadratico medio valutati su tre prove per ognuna delle condizioni al contorno, con σ_F , σ_h e σ_V valori di scarto quadratico medio per le misure di forza di drag, tirante e volume nel serbatoio, rispettivamente

Valutando complessivamente tutte le prove effettuate, ne risulta una deviazione standard di $\sigma_h=0.9~mm$ su misure di tirante dell'ordine di $10^{\circ}-2~m$, confrontabile con la dimensione metrica del singolo pixel; una deviazione standard di $\sigma_F=3.32E-3~N$ su misure di forza dell'odine di $10^{\circ}-1~N$ ed una deviazione standard di $\sigma_V=3.35E-3~m^3$ su un volume inizialmente contenuto nel serbatoio dell'ordine di $10^{\circ}-1~m^3$. Risultano per tirante e volume precisioni confrontabili e complessivamente superiori alla precisione nella valutazione delle forze di drag. Volendo confrontare la precisione ottenuta nelle misure di forza con la precisione strumentale si può considerare un fattore di moltiplicazione del carico dato dall'asta di misura di circa 10; ne consegue che una fluttuazione pari alla deviazione standard nella lettura della forza si traduce in una fluttuazione $\sigma_F{\sim}3E-2N$ di carico alla cella, un ordine di grandezza superiore all'errore strumentale mentale pari a $\sigma_S=2.9E-3N$ per le celle Leane e $\sigma_S=9.8E-3N$ per le celle della Instrumentation Devices.

Per una valutazione qualitativa del comportamento globale delle grandezze misurate si è scelto di riportare i valori medi delle prove omogenee sovrapposti ai valori delle singole prove, generalmente per tutte le grandezze misurate i valori delle singole prove non si distaccano significativamente dai valori medi, evidenziando una buona ripetibilità delle misure. Per meglio apprezzare l'influenza delle condizioni al contorno ovvero pendenza del fondo S_0 e carico iniziale nel serbatoio h_0 le grandezze misurate sono state rappresentate sia a parità di pendenza al variare del carico iniziale, sia a parità di carico al variare della pendenza del fondo. Confrontando le prove al variare del carico iniziale si osservano chiaramente valori più bassi di forza e tirante al diminuire

del carico iniziale h_0 ; risulta tuttavia interessante constatare come, mentre i valori del tirante risultano differenti per tutta la durata dell'osservazione coerentemente con il carico iniziale, i valori di forza misurata tendono ad un valore comune lungo il tratto discendente perdendo la dipendenza da h_0 , tale comportamento asintotico si manifesta in maniera più significativa tanto più ci si avvicina alla paratoia e tanto più diminuisce la pendenza.



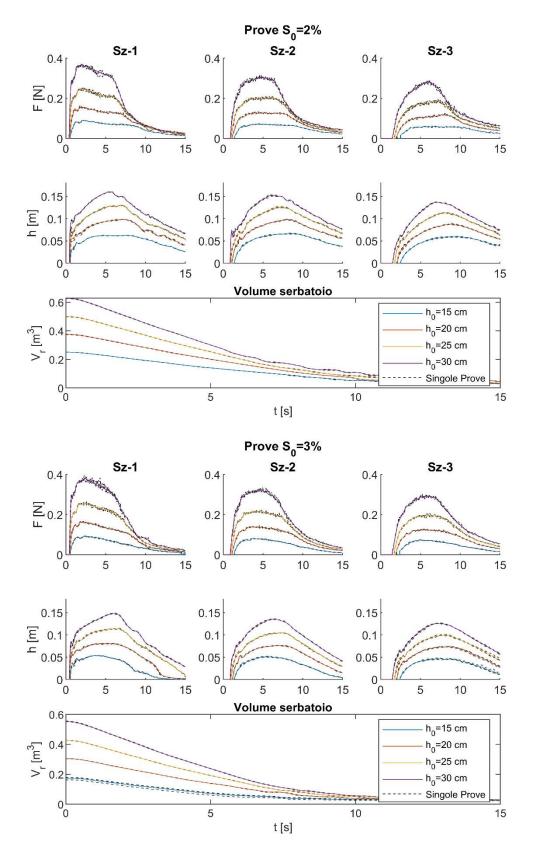
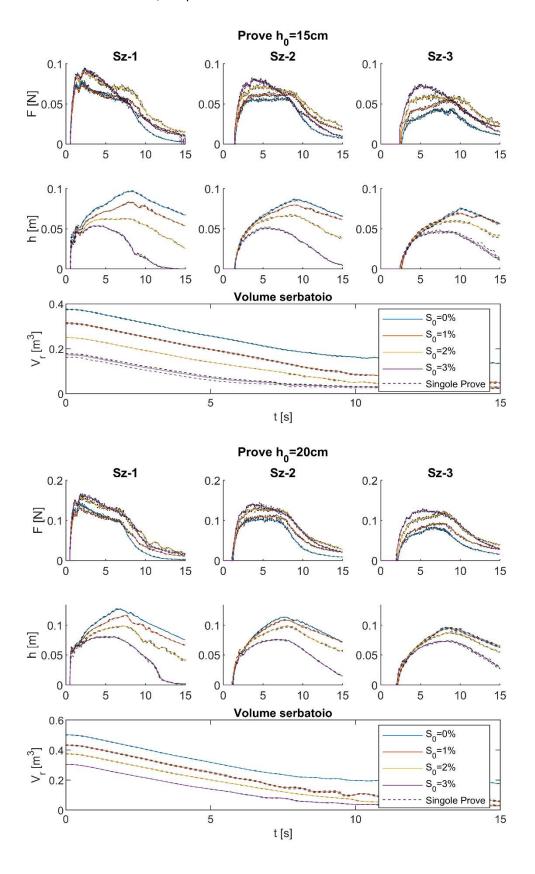


Figura 44 Effetto della variazione del carico iniziale sulle grandezze misurate; valori medi di prove simili (linee continue) sovrapposti ai valori delle singole prove (linee nere tratteggiate)

Confrontando viceversa le grandezze al variare della pendenza S_0 di osserva un generale aumento della forza di drag all'aumentare della pendenza differenza che appare più vistosa all'allontanarsi dalla paratoia, il quale si traduce in termini di tirante come un manifestarsi anticipato, ed una diminuzione in valore assoluto, del picco di carico.



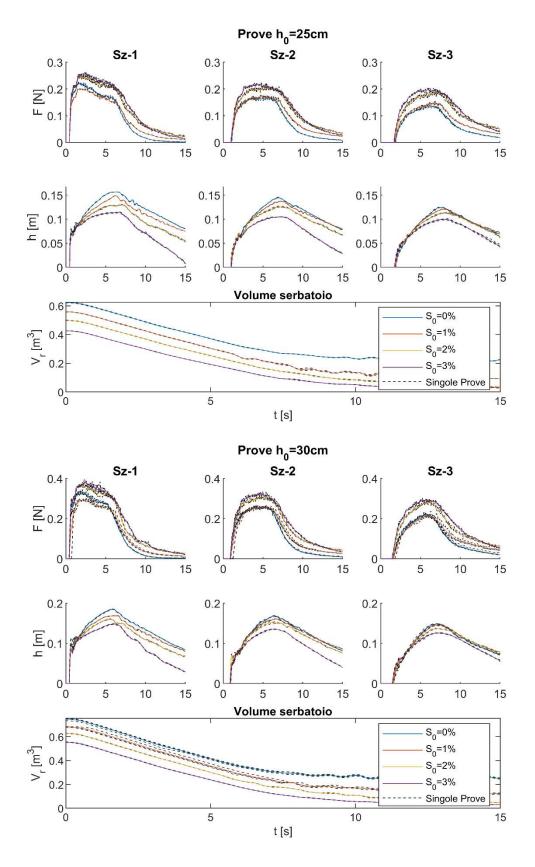
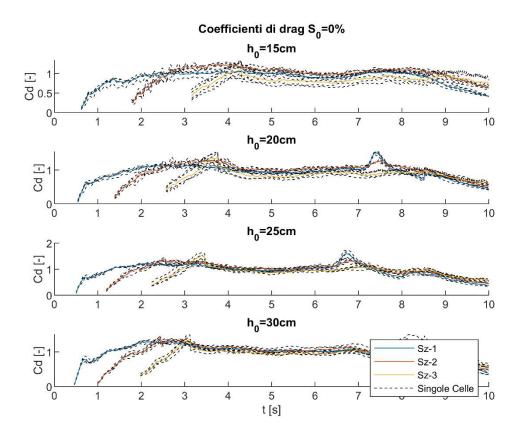


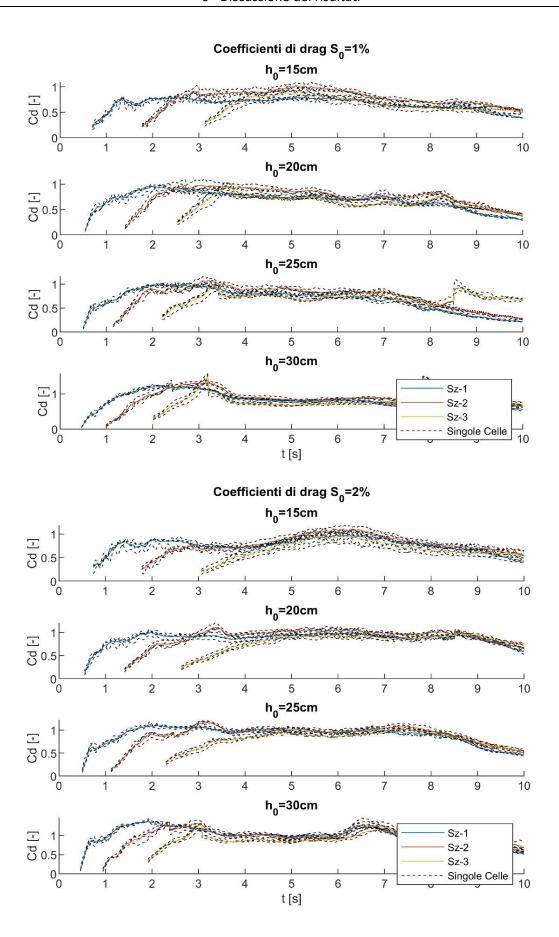
Figura 45 Effetto della variazione della pendenza del fondo sulle grandezze misurate; valori medi di prove simili (linee continue) sovrapposti ai valori delle singole prove (linee nere tratteggiate)

6.2.1 Coefficienti di drag

Di seguito sono riportati i valori di coefficiente di drag per i primi 10 secondi di evento. I valori riportati sono i valori mediati sia sulla sezione sia su prove in condizioni omogenne sofrapposti ai valori misurati nelle singole celle di carico analogamente a quanto fatto per le grandezze direttamente misurate. Si osserva come l'evoluzione nel corso della prova di C_d abbia un comportameto crescente all'incirca nel primo secondo a seguito del passagio del fronte d'onda, per poi stabilizzarsi su un valore grossomodo costatante; inoltre i valori di C_d risultano simili tra le varie sezioni, se non per uno sfasamento temporale coerente con la velocità di propagazione del fronte d'onda, non mostrando una significativa dipendenza di C_d con la distanza dalla paratoia.

Non è chiaro da cosa sia indotta la prima fase crescente nell'evoluzione del coefficiente di drag, essa risulta compatibile con una variazione della densità globale del fluido causata dal consistente inglobamento di aria, il quale si manifesta in maniera preponderante nel primo tratto del fronte d'onda; infatti, a parità di forza misurata una sovrastima del valore di densità comporta una sottostima del coefficiente di drag. Tale inglobamento d'aria, evidente nelle riprese video, ha inoltre un effetto di disturbo sull'identificazione della superficie l'ibera, la presenza delle bolle d'aria all'interno della corrente induce intatti una variazione di tononalità, un errore nella valutazione del tirante di riperquote sia sulla determinazione delle forze che delle volocità. In ultima analisi essendo tale comportamento così ripetibile, risulta più ragionevole pensare che esso derivi da una variazione di un parametro idraulico come la densità, supposto costante, più che da un errore di misura, sebbene non sia possibile a priori scartare l'ipotesi di un bias nelle misure.





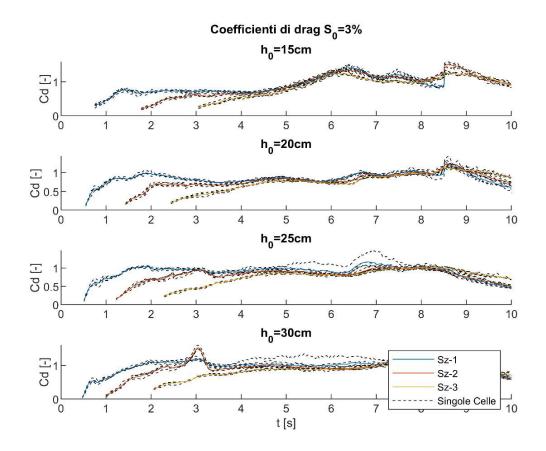


Figura 46 Evoluzione nel tempo del coefficiente di drag nelle tre sezioni strumentate

È inoltre necessario notare come nel tratto finale riportato, all'incirca dal secondo 7 al 10, i valori di coefficiente di drag si facciano più incerti, presentando in taluni casi brusce variazioni; il comportamento più comune tra le prove effettuate, nel tratto finale dell'evento analizzato, è un comportamento debolemente decrescente. Tale tratto finale è soggetto ad una forte incertezza nella valutazione della velocità della corrente, indotta da un difetto nella lettura del volume nel serbatoio. La lettura del volume è infatti disturbata dal passagio di un treno di onde, che si muovono dalla paratoia verso il fondo di monte, per poi essere riflesse; tale treno di onde ha una lunghezza d'onda confrontabile con l'interasse dei sensori, inducendo perciò fluttuazioni nel volume del serbatoio non ripecchianti la realtà. Tale comportamento si è verificato per tutte le condizioni testate, ed è indotto dalla repentina variazione di scabrezza del fondo in corrispondenza della paratoia, la quale induce un risalto che si traduce in un treno di onde controcorrente.

Oltre all'evoluzione nel tempo dei valori di \mathcal{C}_d , essendo emerso un comportamento stazionario, salvo i tratti iniziale e finale, sono stati valutati i valori caratteristici \mathcal{C}_d della singola prova mediando lungo il tempo, nel tratto a stabilità raggiunta. Di seguio sono riportati i valori di \mathcal{C}_d relativi al valore medie delle singole sezioni ed al valore medio dell'intera prova, sia in funzione dell'altezza iniziale nel serbatoia h_0 sia al variare della pendenza S_0 . Considerando i valori di \mathcal{C}_d rappresentativi dell'intera prova esso è compreso tra un valore di 0.7 ed 1.1, in generale si osserva un debole incremento del valore di \mathcal{C}_d all'aumentare del carico iniziale h_0 , apparentemente tale è più significativo per basse pendenze; osservando invece la dipendenza da S_0 risulta una diminuzione del valore di coefficiente di drag all'aumentare della pendeza.

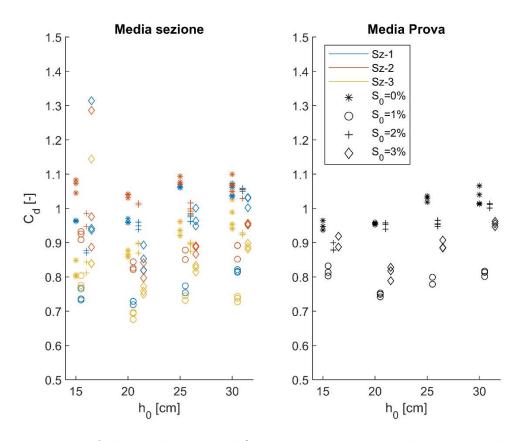


Figura 47 Calori di C_d al variare del carico iniziale h_0 , da sinistra a destra: valori medi per sezione e valori medi dell'intere prova; Il simbolo indica la pendenza il colore indica la sezione (come da legenda)

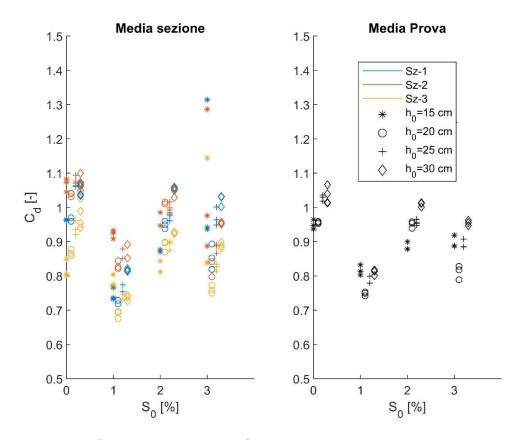


Figura 48 Calori di C_d al variare del carico iniziale h_0 , da sinistra a destra: valori medi per sezione e valori medi dell'intere prova; Il simbolo indica la pendenza il colore indica la sezione (come da legenda)

Come si può osservare dalla figura 48, i valori di C_d per le pendenze 0%, 2% e 3% appaiono allineati; si discostano visibilmete dal trend le prove eseguite all'1%, condizione a cui corrispondono i valori di C_d più bassi registrati.

6.2.2 Valore di picco dalla forza di drag

Oltre al valore di C_d si è ritenuto significativo valutare il valore di picco della forza di drag, per ognuna delle condizioni studiate è stato valutato il valore massimo di F_d ovvero $F_{d,max}$ per verificare come il valore massimo della spinta fosse influenzato da: i) distanza della paratoia, ii) carico iniziale nel serbatoio h_0 e iii) pendenza del fondo S_0 . Di seguito sono proposti due grafici all'interno dei quali $F_{d,max}$ è proposto al variare di h_0 e S_0 , l'influenza della distanza della paratoia per entrambi è espressa attraverso il colore. Osservando figura 49 appare chiara la dipendenza lineare del valore di $F_{d,max}$ da h_0 , si nota inoltre, un effetto indotto dalla distanza dalla paratoia per cui tanto è superiore tanto è inferiore la pendenza con i quali i punti misurati si allineano, l'aumentare del carico iniziale di traduce anche, come auspicabile, in un aumento della dispersione dei valori misurati. Osservando invece la figura seguente, si nota come l'aumento della pendenza induce un, seppur debole, aumento del valore di $F_{d,max}$, analogamente a quanto osservato per i valori di C_d i punti risultano ben allineati al variare della pendenza ad eccezione dei valori relativi all'1% che appaiono, come nel caso precedente, inferiori rispetto alla tendenza, in questo caso risulta anche evidente come tale disallineamento sia tanto maggiore tanto più è alto il carico iniziale nel serbatoio.

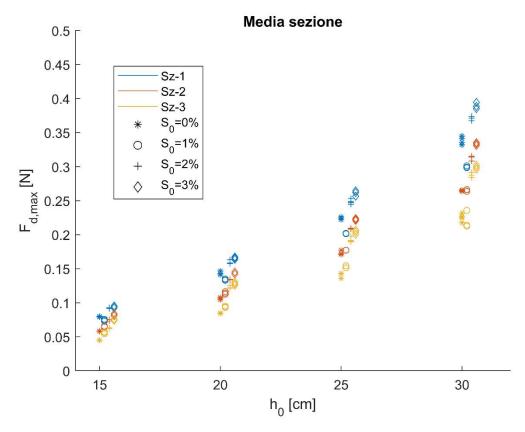


Figura 49 Influenza di h_0 su $F_{d,max}$ medi per sezione, la sezione è indicata dal colore mentre la pendenza è indicata attraverso il simbolo

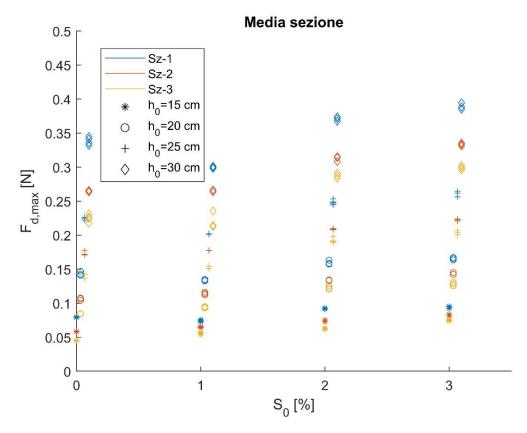


Figura 50 Figura 51 Influenza di S_0 su $F_{d,max}$ medi per sezione, la sezione è indicata dal colore mentre il carico iniziale è indicato attraverso il simbolo

7 Conclusioni

Lo studio qui presentato si è posto l'obiettivo di valutare sperimentalmente l'effetto indotto dalla presenza di vegetazione rigida sull'onda generata dal collasso di una diga, attraverso un canopy di bacchette in acciaio inossidabile; oltre alla descrizione della superficie libera, misurazioni dirette di forza di drag F_d sono state condotte per valutarne l'evoluzione durante l'evento e valutare l'entità del coefficiente di drag C_d . Le prove sono state condotte utilizzando quattro differenti pendenze del canale ($S_0=0\%,1\%,2\%,3\%$) e quattro diversi carichi d'acqua misurati immediatamente a monte della paratoia ($h_0=15\ cm,20\ cm\,,25\ cm\,,30\ cm$), testando le 16 combinazioni di condizioni al contorno per tre volte, per un totale di 48 prove.

Dalle misure di forza emerge, come auspicabile, un andamento nel tempo di F_d analogo all'evoluzione del tirante, con una prima fase di rapida crescita fino ad un valore di picco seguita da una fase più lenta di decrescita caratteristica della fase di svuotamento del canale, dove la corrente tende ad un comportamento uniforme, l'aumento del carico iniziale si traduce in un aumento dei valori di forza sebbene sia stato osservato come nel tempo i profili per diversi carichi iniziali tendano a convergere ad un valore comune perdendo, durante la fase di svuotamento successiva al passaggio dell'onda di piena, la dipendenza dal carico iniziale. Particolare attenzione è stata rivolta al valore di picco della forza di strascinamento, per le condizioni testate sono stati registrati valori di forza massima da poco medi di 0.05 N fino ad un massimo di 0.4 N osservando un'escursione di quasi un ordine di grandezza per le condizioni testate; tale valore di picco tende a ritardare rispetto all'istante di arrivo dell'onda di piena più ci si allontana dalla paratoia. Emerge inoltre un chiaro aumento del valore di picco al crescere della pendenza per le medesime condizioni di carico a monte. Oltre alle misure di forza sono stati valutati i coefficienti di drag C_d a partire alla definizione canonica dell'equazione di drag. Le misure effettuate mostrano un comportamento nel tempo ripetibile, caratterizzato da un incremento di C_d durante i primi secondi successivi al passaggio del fronte d'onda, seguito da una stabilizzazione a un valore costante; tale riduzione del valore di C_d , nei primi istanti dopo che le bacchette sono state investite dalla corrente, potrebbe essere imputabile ad una riduzione della densità globale del fluido indotta all'aria inglobata dal fronte d'onda, tale inglobamento d'aria da parte della corrente è fenomeno di entità consistente, chiaramente visibile nelle riprese video effettuate e confermato dal confronto tra volumi in ingresso e volumi contenuti nel canale. Sebbene avvenga un'apparente stabilizzazione dei valori di C_{d_t} , al protrarsi del tempo, emergono dei difetti nella valutazione della portata in ingresso, i quali inficiano la stima di C_d ; attenendosi ai valori misurati per i primi 7 secondi di prova, escludendo il tratto crescente, si osservano valori di C_d compresi tra 0,6 e 1,1, generalmente inferiore al valore di circa 1 [43], [44] relativo a una corrente uniforme su cilindri sfalsati ma superiori al valore di 0.4 precedentemente calcolato da Melis [39] sul medesimo canale, sempre in condizioni di dam break attraverso le sole misurazioni di tirante. I risultati mostrano come \mathcal{C}_d sia correlato positivamente all'aumentare del livello iniziale dell'acqua nel serbatoio e una riduzione di C_d con l'aumento della pendenza, tale correlazione con la pendenza di osserva chiaramente per $S_0 = 0\%, 2\%$ e 3%mentre per la pendenza dell'1% risultano valori anomali significativamente più bassi, tale anomalia proviene probabilmente da una non efficace valutazione della forza di drag la quale risulta, per la medesima pendenza, inferiore rispetto al tendenza generale.

Infine, una breve considerazione rispetto all'impianto strumentale introdotto in questa tesi: l'utilizzo di celle di carico per la misurazione diretta delle forze ha mostrato incoraggianti risultati, e sebbene dai risultati sia emerso una certa incertezza nelle misure, si ritiene vi siano ampi margini di miglioramento in termini di precisione ad accuratezza.

CODIE PRINCIPALE PER L'ANALISI

Prove in moto permanente

```
clc; clear all; close all;
SV=0;
% global Report
% Report struct;
SR=1000; spam=100;
pr=1; fig=1;
list=dir('Prove');
%Geometric Idraulic Parameters;
D=0.006; %[m] %Cylinders diameter
nu=0.91e-6; %[m^2*s^-1] kinematic viscosity
B=0.500; %[m] Channel width
rho=1000; %[kg/m^3] % Density
m=194; %Number of cylinders per unit area
phi v=m*pi*D^2/4; ;%m^2 Solid volume fraction per ground area
%Function for thioretical Drag coefficient
C Da=@(Re) 50./(Re.^0.43)+0.7*(1-exp(-Re/15000));
C_Da=0 (Re) 2*((6475*D+32)./Re+17*D+3.2*phi_v+50);
for j=3:size(list,1); %Single Test loop
    %% Slope and flow definition from file name
    S=eval(list(j).name(2));
    if strcmp(list(j).name(4:5),'7 ')
        Q=eval('7.5')/1000; % [m^3/s]
        Q=eval(list(j).name(4:5))/1000; % [m^3/s];
    Report(pr).Slope=S;
    Report (pr) .Flow=Q*1000;
    %% Inport data
    % Import record head of water
    H=ImportTiranti;
    % Import Cells Records
    VI=ImportCellsRecords([list(j).folder '\' list(j).name]);
    % Import Cells' Calibrations
    load('CalibrazioneCelle\CellsCalibrations.mat');
    % Import Cells' Parameters
    load('CalibrazioneCelle\CellsParameters.mat');
    %% Data processing
    %filtering;
    V=movmean(VI, spam).*sign(mean(VI));
```

```
F m=[];
    % Analissi by section
    for Section=1:3
        Cells=find(CellsParameters.Positions(:,1) == Section);
        % head determination from water head records
        tmp=H.S==S & H.q==O*1000;
        h=eval(['H.T' int2str(Section) '(tmp)/100;']);
        % lever harm definition from cells' parameters
       b=CellsParameters.LeverArms(S+1, Section)/100-0.5*h;
        Re=pi*D/(4*phi v*B*nu)*Q/h*(1-phi v);
        %Re=D/(B*nu)*Q/h;
        Cd teo=C Da(Re);
        F teo=Cd teo*(rho*D*Q^2)/(2*(1-phi v)^2*B^2*h);
        % applied moment determination from cells' records
       M=[]; V0=[];
        for k=1:size(Cells,1);
            x0=V(:,Cells(k));
            t=[0:size(x0,1)-1]'/SR;
            [t \times dx] = deriva(t, x0, 2, 1000);
           method=1;
            fitto=CellsCalibrations(S+1,Cells(k),method).p;
           M(:,k) = stima(x,dx(:,1),dx(:,2),fitto,method);
            V0(:,k)=0*x0-fitto.p2/fitto.p1;
        end
        %Force [N] determination
        F=M/b; %[N];
        %Measured Drag Force
        F std=std(mean(F')');
        F_mean=mean(F,'All');
        Cd_m = (2*(1-phi_v)^2*B^2*h*F_mean)/(rho*D*Q^2);
       Err=abs(F_mean-F_teo)/abs(F_teo)*100;
        %Save results on report
        Var=[h Q/(B*h) Re F mean F std F teo Err (F mean-F teo)];
        eval(['Report(pr).Sec' int2str(Section) '=Var;']);
        Var=[Re\ Cd\ m\ mean(mean(V(:,Cells)-V0))\ F\ mean/(rho*nu^2*h/D)];
        end
    pr=pr+1;
end
writetable(struct2table(Report), 'Report5.xlsx');
figure(1);
CC=lines(3);
 x=linspace(5,6.1); x=10.^x; y=C Da(x);
semilogx(x,y,'k'); hold on; grid on;
for j=1:3
    for k=1:length(Report2)
       X=eval(['Report2(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        Y=eval(['Report2(k).Sec' int2str(j) '(2);']);
        S=Report(k).Slope;
        semilogx(X,Y,Marker(S),'Color',CC(j,:));
    end
```

```
end
legenda0; legend('Location','Best')
xlabel('Re v'); xlim([x(1) x(end)]);
ylabel('Cd')
figure(2);
x=linspace(5,6.1); x=10.^x; y=2*(2*phi_v/(pi*(1-
phi v)))^2*C_Da(x).*x.^2*rho*nu^2/D*;
semilogx(x,y,'k'); hold on; grid on;
for j=1:3
    for k=1:length(Report2)
        X=eval(['Report2(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        Y=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(4);']);
        h=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        S=Report(k).Slope;
        semilogx(X,Y/h,Marker(S),'Color',CC(j,:));
    end
end
legenda0; legend('Location','Best')
xlabel('Re \ v \ [-]'); \ xlim([x(1) \ x(end)]);
ylabel('F \overline{d}/h [N/m]');
figure(3);
hold on; grid on;
for j=1:3
    for k=1:length(Report2)
        X=eval(['Report2(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        Y=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(7);']);
        S=Report(k).Slope;
        semilogx(X,abs(Y),Marker(S),'Color',CC(j,:));
    end
end
legenda1; legend('Location','Best')
xlabel('Re_v [-]'); xlim([x(1) x(end)]);
ylabel('|Err F d| [%]');
figure (4);
hold on; grid on;
for j=1:3
    for k=1:length(Report2)
        Y=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(7);']);
        h=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        S=Report(k).Slope;
        semilogx(h,abs(Y),Marker(S),'Color',CC(j,:));
    end
end
legenda1; legend('Location','Best')
xlabel('h [m]'); xlim([0 0.150]);
ylabel('|Err F d| [%]');
figure(5);
hold on; grid on;
y=linspace(0,0.15)';
Q=x.*y/(pi*D/(4*phi_v*B*nu))*1000;
contour(x,y,Q,'k--','ShowText','on')
for j=1:3
    for k=1:length(Report2)
        X=eval(['Report2(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        Y=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(7);']);
        h=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        S=Report(k).Slope;
```

```
scatter(X,h,Y*10,'MarkeredgeColor',CC(j,:));
        scatter(X,h,Marker(S),'MarkerEdgeColor',CC(j,:));
    end
end
legenda2;
xlabel('Re \ v \ [-]'); \ xlim([x(1) \ x(end)]);
ylabel('h [m]'); ylim([0 0.150]);
figure(6);
hold on; grid on;
for j=1:3
    for k=1:length(Report2)
        Y=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(4);']);
        h=eval(['Report(k).Sec' int2str(j) '(1);']);
        S=Report(k).Slope;
        semilogx(h,Y,Marker(S),'Color',CC(j,:));
    end
end
legenda1; legend('Location', 'Best')
xlabel('F d [N]'); xlim([0 0.150]);
ylabel('Err F d [N]');
for j=1:6
    figure(j)
    print(gcf,'-dpng','-r600');
end
function [leg]=legenda0
pl = zeros(7,1);
pl(1) = plot([-1 -2], [0 0], 'k-'); hold on
pl(2) = plot([-1 -2], [0 0], 'b-'); hold on
pl(3) = plot([-1 -2],[0 0],'r-');
pl(4) = plot([-1 -2],[0 0],'y-');
pl(5) = plot([-1 -2],[0 0],'k+');
pl(6) = plot([-1 -2], [0 0], 'kx');
pl(7) = plot([-1 -2], [0 0], 'ks');
pl(8) = plot([-1 -2], [0 0], 'kd');
leg=legend(pl,'Teorico','Sz-1','Sz-2','Sz-
3','S 0=0%','S 0=1%','S 0=2%','S 0=3%')
end
function [leg]=legenda1
pl = zeros(7,1);
pl(1) = plot([-1 -2], [0 0], 'b-'); hold on
pl(2) = plot([-1 -2],[0 0],'r-');
pl(3) = plot([-1 -2], [0 0], 'y-');
pl(4) = plot([-1 -2],[0 0],'k+');
pl(5) = plot([-1 -2], [0 0], 'kx');
pl(6) = plot([-1 -2], [0 0], 'ks');
pl(7) = plot([-1 -2], [0 0], 'kd');
leg=legend(pl,'Sz-1','Sz-2','Sz-3','S 0=0%','S 0=1%','S 0=2%','S 0=3%')
end
function [leg]=legenda2
pl = zeros(7,1);
pl(1) = plot([-1 -2], [0 0], 'k--');
pl(2) = plot([-1 -2], [0 0], 'ko');
pl(3) = plot([-1 -2], [0 0], 'b-'); hold on
pl(4) = plot([-1 -2], [0 0], 'r-');
pl(5) = plot([-1 -2], [0 0], 'y-');
pl(6) = plot([-1 -2], [0 0], 'k+');
pl(7) = plot([-1 -2], [0 0], 'kx');
pl(8) = plot([-1 -2], [0 0], 'ks');
```

```
pl(9) = plot([-1 -2], [0 0], 'kd');
leg=legend(pl,'Q [1/s] ','|Err F d| [%]','Sz-1','Sz-2','Sz-
3','S_0=0%','S_0=1%','S_0=2%','S_0=3%')
end
function [mar] = Marker(S);
if S==0
    mar='+';
elseif S==1
   mar='x'
elseif S==2
   mar='s';
elseif S==3
   mar='d';
end
end
function [V] = ImportCellsRecords(file)
%% Import data from text file
% Script for importing data from the following text file:
     filename: C:\Users\Elia\Google Drive\Poli\Tesi\ForceRecord\Nuovi
record\Moto Permanente\Prove\S0Q5 - 2020.12.14 - 15.01.17.txt
% Auto-generated by MATLAB on 21-Dec-2020 14:00:36
%% Setup the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 11);
% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [1, Inf];
opts.Delimiter = "\t";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName11"];
opts. Variable Types = ["double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double"];
% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";
% Specify variable properties
opts = setvaropts(opts, ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName11"], "DecimalSeparator", ",");
% Import the data
V = readtable(file, opts);
%% Convert to output type
V = table2array(V);
%% Clear temporary variables
clear opts
end
function [H]=ImportTiranti()
%% Import data from spreadsheet
% Script for importing data from the following spreadsheet:
```

```
Workbook: C:\Users\Elia\Google Drive\Poli\Tesi\ForceRecord\Nuovi
record\Moto Permanente\Corrente (Salvato automaticamente).xlsx
     Worksheet: Tiranti Registrati
% Auto-generated by MATLAB on 22-Dec-2020 13:55:31
%% Setup the Import Options and import the data
opts = spreadsheetImportOptions("NumVariables", 5);
% Specify sheet and range
opts.Sheet = "Tiranti Registrati";
opts.DataRange = "A2:E27";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["S", "q", "T1", "T2", "T3"];
opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double", "double"];
% Import the data
H = readtable("Corrente (Salvato automaticamente).xlsx", opts, "UseExcel",
false);
%% Clear temporary variables
clear opts
end
   Prove di dam break
clear all; close all; clc;
ChanIdenFlag=0; %if true enable definition of color channel
%Definition test to analize
%ProNum=[1];
%%% SINGLE TEST PROCESSING
for S=0
    Slo=['Slope-' int2str(S) '\']; %tests' folder detinition
    list=dir([Slo 'SensRecords']);
    Pro=14%[1:length(list)-2]+2; %Position of the tests in to the folder
    Cam=[1]; %Cameras to be analyzed
    %% Start Time Identification;
    for j=Pro;
        %StartIdentifier(j,Slo);
    end
    %% Color Channel Definition
    Colors=[1]; %Colors number
    if ChanIdenFlag==1
        for j=Pro
             % Color channel range identificaion
            tmps=LoadOrCreate('ColorSettings',[Slo 'Calibration\Data']);
            ColorSettings=tmps.ColorSettings;
            for k=Cam;
                 flag=1;
                 for m=Colors;
                     if flag==1; tmp=PicForColorSetting(j,Cam,Slo); flag=0; end;
                     %Stop here and use the color thresholder app for
                     % color rages manual selection of the image tmp then
                     %select "Export Function" and evaluates the lines 16
                     %to 26 only from the generated function. Now go on
```

```
ColorSettings(j,k).ChannelRange(1,1,m)=channel1Min;
                    ColorSettings(j,k).ChannelRange(1,2,m)=channel1Max;
                    ColorSettings(j,k).ChannelRange(2,1,m)=channel2Min;
                    ColorSettings(j,k).ChannelRange(2,2,m)=channel2Max;
                    ColorSettings(j,k).ChannelRange(3,1,m)=channel3Min;
                    ColorSettings(j,k).ChannelRange(3,2,m)=channel3Max;
                end
            end
            save([Slo 'Calibration\Data\ColorSettings.mat'],'ColorSettings');
        end
    end
    %% Test Processing
    for j=Pro
        %ProfileDetecter(j,Slo,Cam);
        %ProfileMerger(j,Slo);
        %SensProcessing(j,Slo);
        %DragCoefEval(j,Slo)
    end
end
%%% OMOGENIOUS TESTS AVERAGE GENERATION
 for Slope=0:3
     for Head=15:5:30
        %% Mean Profile
        MeanProfile(['Slope-' int2str(Slope) '\'], [Head])
    end
 end
load('Average\Results\Statistics.mat')
writetable(struct2table(Statistics),'Average\Results\Statistics.xlsx')
%%% AVERAGE TESTS PROCESSING
Slo=['Average\']; %tests' folder detinition
Pro=[1:16]+2; %Position of the tests in to the folder
%% Test Processing
for j=Pro
    DragCoefEval(j,Slo)
%%% PROT SECTION
PlotCose1
PlotCose2
PlotCose3
%%% INTERNAL FUNCTION FOR PROCESS' STEPS
function StartIdentifier(Pro,Slope)
%This section finds the test's start frame on each camera by the
%identification of led's lightning and dam's opening
tmps=LoadOrCreate('StartTime',[Slope 'Calibration\Data']);
StartTime=tmps.StartTime;
%% Led lighting identification
opt.p0=1; opt.min=8; opt.pend=3000; opt.size=5; opt.step=1000; opt.spam=1;
for Cam=[]%:4
    %Video opening
    list=dir([Slope 'Video\Camera' int2str(Cam)]);
    Video=VideoReader([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
    imagesc(read(Video, 3000)); %Plot a generic frame
    %Start finding: save on structure the number of the first frame with the led
torned on
    StartTime.Led(Pro, Cam) = ColorDiffFinder(Video, StartTime.LedPos(Cam,:),opt); %
```

```
end
%% Dam opening identification:
opt.size=5; opt.spam=5; opt.min=8;
for Cam=1
    opt.p0=StartTime.Led(Pro,Cam)+1000;
    opt.pend=opt.p0+2000;
    %Video opening:
    list=dir([Slope 'Video\Camera' int2str(Cam)]);
    Video=VideoReader([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
    %Start finding: save on the structure the number of the first frame where
the dam were mooving
    StartTime.Dam(Pro,1) = ColorDiffFinder(Video, StartTime.DamPos, opt);
end
%% Definition of the test start frame for all the camera
StartTime.SF(Pro,:)=StartTime.Led(Pro,:)+(StartTime.Dam(Pro)-
StartTime.Led(Pro,1));
%% Creation and plot of 50*50 pixel pictures of leds and dam's corner for start
time identification check
for Cam=1:4
    %Start saving
    list=dir([Slope 'Video\Camera' int2str(Cam)]);
    Video=VideoReader([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
    pic=StartTime.Led(Pro,Cam);
    tp=StartTime.LedPos(Cam,:);
    F=read(Video,[pic-2 pic]); F=F(:,:,:,[1,3]);
    StartTime.LedPic(Pro,Cam,:,:,:)=F(tp(1)-50:tp(1)+50,tp(2)-
50:tp(2)+50,:,:);
    if Cam == 1;
        pic=StartTime.Dam(Pro,1);
        tp=StartTime.DamPos;
        %Start saving
        F=read(Video,[pic-2 pic]); F=F(:,:,:,[1,3]);
        StartTime.DamPic(Pro,:,:,:)=F(tp(1)-50:tp(1)+50,tp(2)-
50:tp(2)+50,:,:);
    end
end
figure(1)
for k=1:4;
    subplot(2,5,k)
    imshow(permute(StartTime.LedPic(Pro,k,:,:,:,1),[3,4,5,1,2,6]));
    title(['Cam' int2str(k) ' ' num2str((StartTime.Led(Pro,k)-2)/100,4) 's']);
    subplot(2,5,5+k)
    imshow(permute(StartTime.LedPic(Pro,k,:,:,:,2),[3,4,5,1,2,6])); hold on;
    scatter(51,51,'+b');
    title(['Cam' int2str(k) ' ' num2str(StartTime.Led(Pro,k)/100,4) 's']);
end
subplot(2,5,5)
imshow(permute(StartTime.DamPic(Pro,:,:,:,1),[2,3,4,1,5]));
title(['Cam1 ' num2str((StartTime.Dam(Pro)-2)/100,4) 's']);
subplot(2,5,10)
imshow(permute(StartTime.DamPic(Pro,:,:,:,2),[2,3,4,1,5])); hold on;
scatter(51,51,'+b');
title(['Cam1 ' num2str(StartTime.Dam(Pro)/100,4) 's']);
print(gcf,[Slope 'QualityCheck\StartTimeIdentification\' list(Pro).name(1:end-
4)],'-dpng','-r600');
%% Save the structure with all the start time information
save([Slope 'Calibration\Data\StartTime.mat','StartTime']);
```

```
end
function ProfileDetecter (Pro, Slope, Cam)
FN=1500; %Number of frames to analize
%% Data loading phase:
load([Slope 'Calibration\Data\StartTime.mat']);
load([Slope 'Calibration\Data\ColorSettings.mat']);
load([Slope 'Calibration\Data\ChannelParameters.mat']);
load([Slope 'Calibration\Cam\CalibrationCam.mat']);
for k=Cam
    %% Loading Video:
    list=dir([Slope 'Video\Camera' int2str(k)]);
    Video=VideoReader([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
    filename=list(Pro).name(1:end-4);
    FR=Video.FrameRate;
    %% Frames extraction:
    t=StartTime.SF(Pro,k)*[1 1]+[0 FN-1];
    V=read(Video,t); %4-D array with inside FN frames.
    %save time support
    DetectedProfile.t=[0:FN-1]/Video.Framerate;
    %% Interest area extraction:
    %it will analized a portion of image only, within the calibraion pannel
    %edges in length and from 0 to the water level in the reservoire plus
    %one calibration square's size in height
    CamCall=Calibration(k);
    SS=ChannelParameters.CalibrationPannelSquareSize;
    pw=[0 -SS 0; max(CamCall.CalPoints(:,1)) -SS 0; 0 eval(filename(4:5))*10
0; max(CamCall.CalPoints(:,1)) eval(filename(4:5))*10 0];
   pi=round(PicWorldConversion(pw,CamCall)); %pixel coordinates of the four
corners
    SRPos=[min(pi(:,1)) min(pi(:,2))];
    V=V(\min(pi(:,2)):\max(pi(:,2)),\min(pi(:,1)):\max(pi(:,1)),:,:); %extract the
smallest subpicture that countain all the corners;
    SRPos=[min(pi(:,1)) min(pi(:,2))]; %Pixel coordinates of subpicture in
original picture
    %% Color Filtering and profile detection
    CS=ColorSettings(Pro,k).ChannelRange;
    for m=1:size(CS,3) %repete the water level identification for each color
range defined
        tpCS=CS(:,:,m);
        tp=CreateMask(V,tpCS);
        for p=1:size(V,4)
            BW=tp(:,:,p);
            [DT(:,p,m,2) DT(:,p,m,1)] = find(BW);
            DT(:,p,m,:) = DT(:,p,m,:) + permute(SRPos,[1,3,4,2]);
DT(:,p,m,:)=PicWorldConversion(permute(DT(:,p,m,:),[1,4,2,3]),CamCall);
    end
    %save x and h coordinates, in mm, on the calibration panne's reference
    %sistem the .x and .h arrays dimensions is for [pixel's column,time,color]
    DetectedProfile.x=DT(:,:,:,1);
    DetectedProfile.h=DT(:,:,:,2);
    %% Create video for quality check:
    %it will plot the detected profiles for each color range over the frame
    %and creat a 10 fps video for quality check
```

```
Video=VideoWriter([Slope 'QualityCheck\ProfileDetection\Camera' int2str(k)
'\' filename '.MP4'], 'MPEG-4');
    Video.FrameRate=FR;
    open (Video);
    CC=lines(size(CS,3));
    for p=1:10:size(V,4)
        figure(1);
        hold off
        imshow(V(:,:,:,p)); hold on;
        for m=1:size(CS,3)
            tp=[DetectedProfile.x(:,p,m) DetectedProfile.h(:,p,m)];
            tp=round(PicWorldConversion([tp 0*tp(:,1)],CamCall));
            tp=tp-SRPos;
            scatter(tp(:,1),tp(:,2),2,'*','MarkerEdgeColor',CC(m,:));
        end
        tp1=getframe(gcf);
        writeVideo(Video,tp1.cdata);
    end
    close (Video);
    %% save detected profile structure
    save([Slope 'Results\DetectedProfiles\Camera' int2str(k) '\' filename
'.mat'], 'DetectedProfile');
end
end
function ProfileMerger(Pro, Slope)
%% Import Parameters
load([Slope 'Calibration\Cam\CalibrationCam.mat']);
load([Slope 'Calibration\Data\ChannelParameters']);
xdam=ChannelParameters.Dam XCor;
%% Profile Merging
MP.x=[]; MP.h=[];
flag=true;
for k=1:4
    %% Import Detected Profile
    dx(k)=Calibration(k).PannelXPosition; % CPRS centre's x coor on CRS1
    list=dir([Slope 'Video\Camera' int2str(k)]);
    filename=list(Pro).name(1:end-4);
    load([Slope 'Results\DetectedProfiles\Camera' int2str(k) '\' filename
'.mat'])
    DP=DetectedProfile;
    DP.h=DP.h+ChannelParameters.CalibrationPannelSquareSize; % the CPRS is one
control pannel square's size highter than channel floore
    DP.h(DP.h<1)=0; %put to 0 each point detected below channel floore
    if flag; MP.t=DP.t; flag=false; end;
    %% Condizioni Particolari
    if k==1;
        T = [1:size(DP.h, 2)];
        X = [450:size(DP.h, 1)];
        ps1=false(size(DP.h));
        ps1(X,T,1) = DP.h(X,T,2) > DP.h(X,T,1);
        ps2=ps1(:,:,end:-1:1);
        DP.x(ps1) = DP.x(ps2);
        DP.h(ps1) = DP.h(ps2);
    end
    if k>1 && size(DP.h,3) == 2;
        T=[110:290];
        X = [1:size(DP.h, 1)];
        tp=movstd(DP.h,30,1);
        ps1=false(size(tp));
        ps1(X,T,1) = tp(X,T,2) < tp(X,T,1) & DP.h(X,T,2);
```

```
ps2=ps1(:,:,end:-1:1);
        DP.x(ps1) = DP.x(ps2);
        DP.h(ps1) = DP.h(ps2);
    end
    MP.x = [MP.x; DP.x(:,:,1) + dx(k)];
    MP.h=[MP.h; DP.h(:,:,1)];
end
%% Merged profiles rearrange
for k=1:size(MP.t,2);
    MP.x(:,k) = -(MP.x(:,k) - xdam); %passage to CRS1 to CRS2
    % sort x and h coordinates according to x increasing order
    [MP.x(:,k) I] = sort(MP.x(:,k));
    MP.h(:,k) = MP.h(I,k);
end
dx=-(dx-xdam);
%% Outliers elimination: delete all poits farest 10 mm from move median
%surface with 0.1 seconds time spam and 100 points x spam
MP.ho=MP.h;
tp=smoothdata(MP.h,1,'movmedian',100);
tp=smoothdata(tp,2,'movmedian',10);
tp=find(abs(MP.h-tp)>5);
MP.ho(tp)=nan;
%% Smoothing in x direction with move mean of 10 mm spam
MP.hsx=MP.ho;
for k=1:size(MP.ho,2)
    MP.hsx(:,k) = smooth(MP.x(:,k), MP.ho(:,k), 10, 'moving');
end
%% Wave front determination;
WF.t=[]; WF.x=[];
for k=1:size(MP.x,1)
    tp=find(MP.hsx(k,1:500)==0,1,'last');
    if size(tp, 2) == 0 \mid \mid tp > 500
        WF.t(k)=0;
        WF.x(k)=0;
    else
        WF.t(k) = MP.t(tp);
        WF.x(k) = MP.x(k, tp);
    end
end
[WF.x I] = sort (WF.x);
WF.t=WF.t(I);
I=find(abs(WF.t-movmean(WF.t,50))<0.05 & WF.x>0);
WF.t=WF.t(I); WF.x=WF.x(I);
WF.t=smooth(WF.x,WF.t,300,'lowess')';
WF.xf = [-1000 \ 0 \ WF.x];
WF.tf=[-1*10^-6\ 0\ WF.t];
I=find(diff(WF.xf) == 0 | diff(WF.tf) == 0);
WF.xf(I) = []; WF.tf(I) = [];
%% Resampling accros x
xsup=MP.x(:,1);
for k=1:size(MP.hsx,2)
    tp=retime(timetable(seconds(MP.x(:,k)),MP.hsx(:,k)),seconds(xsup),'linear');
    h(:,k) = tp.Var1;
MP.xr=xsup; MP.hr=h;
```

```
%% Smoothing t direction
MP.hst=0*MP.hr;
for k=1:size(MP.h,1);
    tw=round(interp1(WF.xf,WF.tf,MP.x(k))*100)+1;
    if tw<1 || isnan(tw); tw=1; end;
    T=[tw:size(MP.h,2)];
    MP.hst(k,T) = smooth(MP.t(T), MP.hr(k,T), 25, 'moving');
end
MergedProfile.t=MP.t;
MergedProfile.x=MP.xr;
MergedProfile.h=MP.hst;
% Figura
figure(1);
pl=1;
for p = [250]
%subplot(4,1,pl); pl=pl+1
hold off; grid on;
scatter(MP.x(:,p)/1000,MP.h(:,p),.5,'*k'); hold on;
scatter(MP.x(:,p)/1000,MP.ho(:,p),.5,'*r'); hold on;
scatter(MP.x(:,p)/1000,MP.hsx(:,p),.5,'*b'); hold on;
plot(MP.xr/1000, MP.hst(:,p), '-g'); hold on;
for k=1:size(dx,2)
    plot([dx(k) dx(k)]/1000,[0 300],'--k');
end
plot([0 0],[0 300],'-k');
pos=interp1(WF.tf,WF.xf,(p-1)/100);
plot([pos pos]/1000,[0 300],'-r');
ylim([0 eval(filename(4:5))*10]);
xlim([-500 3500]/1000);
ylabel(['h [mm]']);
xlabel(['x [m]'])
title(['Fasi post-processing delle misure'])
tp=getframe(gcf);
pl(1) = scatter(0,0,.5,'*k','DisplayName','Profilo rilevato');
pl(2) = scatter(0,0,1,'*r','DisplayName','Rimozione Outiler');
pl(3)=scatter(0,0,1.5,'*b','DisplayName','Smoothing nello spazio');
pl(4)=plot(0,0,'-g','DisplayName','Smoothing nel tempo');
pl(5)=plot(0,0,'-r','DisplayName','Fronte d''onda');
pl(6)=plot(0,0,'--k','DisplayName','Bordo pannello calibrazione');
pl(7) = plot(0,0,'-k','DisplayName','Paratoia');
legend(pl);
print(gcf,['Plot\Mergedprofile1'],'-dpng','-r600');
figure(2);
subplot(2,2,[2 4]);
imagesc(MP.t,MP.xr/1000,MP.hst); hold on;
xlabel('t [s]');
ylabel('x [m]');
title('Superficie processata')
subplot(2,2,[1 3]);
imagesc(MP.t,MP.xr/1000,MP.h); hold on;
xlabel('t [s]');
ylabel('x [m]');
title('Superficie rilevata')
print(gcf,['Plot\Mergedprofile2'],'-dpng','-r600');
%% Video
```

```
Video=VideoWriter([Slope 'QualityCheck\ProfileMerging\' filename([1:5 8:end])
'.MP4'],'MPEG-4');
Video.FrameRate=100;
open (Video);
for p=1:1:size(MergedProfile.h,2);
    figure(1);
    hold off; grid on;
    scatter(MP.x(:,p),MP.h(:,p),.5,'*k'); hold on;
    scatter(MP.x(:,p),MP.ho(:,p),1,'*r'); hold on;
    scatter(MP.x(:,p),MP.hsx(:,p),1,'*y'); hold on;
    scatter(MP.xr,MP.hst(:,p),1,'*g'); hold on;
    for k=1:size(dx,2)
        plot([dx(k) dx(k)],[0 300],'-k');
    end
    pos=interp1(WF.tf,WF.xf,(p-1)/100);
    plot([pos pos],[0 300],'-r');
    ylim([0 eval(filename(4:5))*10]);
    xlim([-500 3500]);
    tp=getframe(gcf);
    writeVideo(Video, tp.cdata);
end
close (Video);
save([Slope 'Results\MergedProfiles\' filename([1:5 8:end])
'.mat'], 'MergedProfile');
function SensProcessing(Pro, Slope)
%% Data loading
load([Slope 'Calibration\Data\StartTime']);
load([Slope 'Calibration\Data\ChannelParameters']);
load([Slope 'Calibration\Sens\CalibrationSens']);
load([Slope 'Calibration\Sens\SensParameter']);
list=dir([Slope 'Results\MergedProfiles']);
load([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
filename=list(Pro).name(1:end-4);
%% import sens record
list=dir([Slope 'SensRecords']);
S=ImportSensRecords([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
head=eval(list(Pro).name(4:5))/100;
slope=eval(Slope(7))/100;
%% Preliminar records processing
Sn=SensParameter.USoundNum;
Sr=SensParameter.SampleRate;
b=ChannelParameters.Width; % mm
D=0.006; % m
xdam=ChannelParameters.Dam XCor; %mm
%% Evaluation time support
tp=[(StartTime.Dam(Pro)-StartTime.Led(Pro,1))-1]/100;
SR.t=[0:size(S,1)-1]'/Sr-tp;
%% Evalutation water level
tp=MergedProfile.t';
SR.xC=-(SensParameter.Cells_XCor'-xdam)*10^-3;
for j=1:size(tp,1)
    SR.hC(j,:)=interp1(MergedProfile.x,MergedProfile.h(:,j),SR.xC*10^3)*10^-3;
tp=retime(timetable(seconds(tp),SR.hC),seconds(SR.t),'linear');
SR.hC=tp.Var1;
```

```
T=find(SR.t>=MergedProfile.t(end));
SR.hC(T,:)=nan;
%% Cells Record Processing
spam=250;
C=S(:,Sn+1:end)*9.81/1000; %Cells Records: Recorded Force in N
for j=1:size(C,2)
    M(:,j) = stima(C(:,j),1,1,Calibration(j,1).Par,1);
end
T=find(SR.t <= 0);
M=M-mean(M(T,:));
M0=M;
M=movmean (M0, spam);
w=1./movstd(M, spam);
for j=1:size(SensParameter.CellsPosition,1)
    tp=SensParameter.CellsPosition(j,:);
    SR.Sez(tp)=j;
    Mm(:,j) = sum((M(:,tp).*w(:,tp))')'./sum(w(:,tp)')';
end
SR.F=Mm./(SensParameter.CellsLeverArmsLength-.5*SR.hC);
SR.F(SR.hC==0)=0;
SR.Fs=M./(SensParameter.CellsLeverArmsLength(SR.Sez)-.5*SR.hC(:,SR.Sez));
SR.Fs(SR.hC(:,SR.Sez) == 0) = 0;
%% Cell Procesisng Plot
figure(1);
for n=[1:3];
    subplot(3,1,n); hold on; grid on;
    plot(SR.t,M0(:,n));
    plot(SR.t,M(:,n),'k','LineWidth',2);
    xlim([0 15]);
    ylim([0 0.2]);
    ylabel('\Delta M [N*m]');
end
subplot(3,1,1);
title([{'Variazione momento applicato all''asta di misura - valori registrati e
media mobile'},{'Sezione 1 - Cella 1'}]);
subplot(3,1,2);
title([{'Sezione 2 - Cella 2'}]);
subplot(3,1,3);
title([{'Sezione 3 - Cella 3'}]);
xlabel('t [s]');print(gcf,['Plot\SensProCelle1'],'-dpng','-r600');
figure(2);
for n=[1:3];
    subplot(3,1,n); hold on; grid on;
    plot(SR.t,SR.Fs(:,SensParameter.CellsPosition(n,:)));
    plot(SR.t,SR.F(:,n),'k','LineWidth',2);
    xlim([0 15]);
    ylim([0 0.1]);
    ylabel('F d [N]');
end
subplot(3,1,1);
title([{'Forze di drag - valori per cella e media sezione'}, {'Sezione 1'}]);
legend('Cella 1','Cella 4','Cella 7','Cella 10','Media','Location','East')
subplot(3,1,2);
title([{'Sezione 2'}]);
legend('Cella 2','Cella 5','Cella 8','Cella 11','Media','Location','East')
subplot(3,1,3);
title([{'Sezione 3'}]);
legend('Cella 3','Cella 6','Cella 9','Cella 12','Media','Location','East')
```

```
xlabel('t [s]');
print(gcf,['Plot\SensProCelle2'],'-dpng','-r600');
%% Ultrasoud record processing
spam=250;
SR.xU=SensParameter.USound XCor/1000;
SR.hU=S(:,1:Sn)/100;
SR.hU0=mean(S(T,1:Sn)/100);
ft = fittype('poly1');
opts = fitoptions( 'Method', 'LinearLeastSquares' );
SR.hU0= feval(fit(SR.xU', SR.hU0', ft, opts), SR.xU);
SR.hU=SR.hU-mean(SR.hU(T,:))+SR.hU0';
[SR.xU I]=sort(SR.xU);
SR.hU=SR.hU(:,I);
dx=diff(SR.xU);
dx=[dx(1) (dx(1:end-1)+dx(2:end)) dx(end)]*0.5;
dx(1) = dx(1) + 1.170;
SR.Vs=sum((SR.hU.*dx*b)')'*10^-3; %m^3
Vs0=SR.Vs;
M=movmedian(SR.Vs, 2*spam);
SR.Vs(find(abs(SR.Vs-M)>0.01))=nan;
SR.Vs(1:T(end)) = smoothdata(SR.Vs(1:T(end)), 'movmean', spam);
SR.Vs(T(end):end) = smoothdata(SR.Vs(T(end):end), 'movmean', spam);
M=movmedian(SR.Vs, 2*spam);
SR.Vs(find(abs(SR.Vs-M)>0.001))=nan;
tp=retime(timetable(seconds(SR.t),SR.Vs),seconds(SR.t),'linear');
SR.Vs=tp.Var1;
%% Figura volumi
figure (3)
subplot(2,1,1); hold on; grid on;
plot(SR.t,SR.hU);
xlim([0 10]);
%xlabel('t [s]');
ylabel('h [m]')
title('Registrazione sensori ad ultrasioni')
subplot(2,1,2); hold on; grid on;
plot(SR.t, Vs0)
plot(SR.t,SR.Vs,'k','LineWidth',2);
xlim([0 10]);
xlabel('t [s]');
ylabel('V s [m^3]')
title('Volume nel serbatoio - valore calcolato e media mobile')
print(gcf,['Plot\SensProVolume'],'-dpng','-r600');
CC=lines(size(SR.hC,2));
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(SR.t,SR.Fs,'--k'); hold on
for j=1:size(SR.hC,2)
    \verb"plot(SR.t,SR.F(:,j),'Color',CC(j,:),'LineWidth',2)"
end
title(['Output sensori prova - ' filename])
ylabel('F [N]')
xlim([0 15])
subplot(3,1,2)
plot(SR.t,SR.hC); hold on
ylabel('h [m]')
```

```
xlim([0 15])
subplot(3,1,3)
plot(SR.t, SR.Vs, 'k'); hold on
xlim([0 15])
ylabel('V r [m^3]')
xlabel('t [s]')
%% Saving
SensProcessed=SR;
save([Slope 'Results\SensProcessing\' filename '.mat'],'SensProcessed');
print(gcf,[Slope 'QualityCheck\SensProcessing\' filename],'-dpng','-r600');
close all;
end
function MeanProfile(Slope, Head);
LoadOrCreate('Statistics','Average\Results');
Statistics=ans.Statistics;
S=eval(Slope(7));
pos=(S*4+(Head/5-2));
Statistics(pos).Slope=S;
Statistics (pos) . Head=Head;
%% Average h Profile
% Omogeneous tests detection
    list=dir([Slope '\Results\MergedProfiles']);
    Pro=[];
    for j=3:size(list,1)
        if Head == eval(list(j).name(4:5))
          Pro=[Pro; j];
        end
    end
% Test opening
for j=1:size(Pro,1)%% Profile Merging
    load([list(Pro(j)).folder '\' list(Pro(j)).name]);
    TP.h(:,:,j) = MergedProfile.h;
end
% Average
MergedProfile.h=mean(TP.h,3);
% Eval statistics
Statistics(pos).h=sqrt(mean((TP.h-MergedProfile.h).^2,'all'));
% Plot 4 quality check
Video=VideoWriter(['Average\QualityCheck\MergedProfiles\' list(j).name([1:5])
'.MP4'],'MPEG-4');
Video.FrameRate=100;
open (Video);
for j=1:10:size(TP.h,2)
    figure(1)
    hold off;
    for k=1:size(TP.h,3)
        plot(TP.x, TP.h(:, j, k));
                                 hold on;
    plot(TP.x, TP.hm(:, j), 'k');
    ylim([0 300])
    tp=getframe(gcf);
    writeVideo(Video, tp.cdata);
close (Video);
```

```
save(['Average\Results\MergedProfiles\' list(Pro(j)).name([1:5])
'.mat'],'MergedProfile');
%% Average Cells Record
% Omogeneous tests detection
    list=dir([Slope '\Results\SensProcessing']);
    spam=[-3 18]; %[start second period]
% Test opening
for j=1:size(Pro,1)%% Profile Merging
    load([list(Pro(j)).folder '\' list(Pro(j)).name]);
    tp=find(SensProcessed.t>=spam(1));
    tp=tp(1)+[0:spam(2)*1000];
    TP.F(:,:,j) = SensProcessed.F(tp,:);
    TP.Fs(:,:,j) = SensProcessed.Fs(tp,:);
    TP.hC(:,:,j) = SensProcessed.hC(tp,:);
    TP.hU(:,:,j) = SensProcessed.hU(tp,:);
    TP.hU0(:,:,j) = SensProcessed.hU0;
    TP.Vs(:,:,j) = SensProcessed.Vs(tp);
end
SensProcessed.t=SensProcessed.t(tp);
SensProcessed.F=mean(TP.F,3);
SensProcessed.Fs=mean(TP.Fs, 3);
SensProcessed.hC=mean(TP.hC,3);
SensProcessed.hU=mean(TP.hU,3);
SensProcessed.hU0=mean(TP.hU0,3);
SensProcessed.Vs=mean(TP.Vs,3);
save(['Average\Results\SensProcessing\' list(Pro(j)).name([1:5])
'.mat'], 'SensProcessed');
Statistics(pos).F=sqrt(mean((TP.F-SensProcessed.F).^2,[1 3],'omitnan'));
Statistics(pos).Fs=sqrt(mean((TP.Fs-SensProcessed.Fs).^2,[1 3],'omitnan'));
Statistics(pos).hC=sqrt(mean((TP.hC-SensProcessed.hC).^2,[1 3],'omitnan'));
Statistics(pos).hU=sqrt(mean((TP.hU-SensProcessed.hU).^2,[1 3],'omitnan'));
Statistics(pos).hU0=sqrt(mean((TP.hU0-SensProcessed.hU0).^2,3,'omitnan'));
Statistics(pos).Vs=sqrt(mean((TP.Vs-SensProcessed.Vs).^2,[1 3],'omitnan'));
save(['Average\Results\Statistics.mat'],'Statistics');
end
function DragCoefEval(Pro,Slope);
%% Data loading
load([Slope 'Calibration\Data\ChannelParameters']);
list=dir([Slope 'Results\MergedProfiles']);
load([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
list=dir([Slope 'Results\SensProcessing']);
load([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
filename=list(Pro).name(1:end-4);
b=ChannelParameters.Width/1000; %[m] Channel width
D=ChannelParameters.RodDiameter/1000; %[m] Rod's diameter
m=ChannelParameters.RodsPerUnitArea;
nu=0.91e-6; %[m^2*s^-1] Kinematic viscosity
rho=1000; %[kg/m^3] Specific mass
lambda=m*D^2/4*pi;
%% Time support definition
DC.t=[0:0.01:10]';%MergedProfile.t';
T=find(SensProcessed.t>=DC.t(1) & SensProcessed.t<=DC.t(end));</pre>
T2=find(MergedProfile.t>=DC.t(1) & MergedProfile.t<=DC.t(end));</pre>
DC.x=MergedProfile.x'/1000;
DC.xC=SensProcessed.xC';
```

```
DC.Sez=SensProcessed.Sez;
tp=retime(timetable(seconds(SensProcessed.t(T)),SensProcessed.Fs(T,:)),seconds(D
C.t),'linear');
DC.Fs=tp.Var1;
tp=retime(timetable(seconds(SensProcessed.t(T)),SensProcessed.F(T,:)),seconds(DC
.t),'linear');
DC.F=tp.Var1;
tp=retime(timetable(seconds(MergedProfile.t(T2)'),MergedProfile.h(:,T2)'),second
s(DC.t), 'linear');
DC.h=tp.Var1/1000;
tp=retime(timetable(seconds(SensProcessed.t(T)),SensProcessed.hC(T,:)),seconds(D,:)
C.t),'linear');
DC.hC=tp.Var1;
tp=retime(timetable(seconds(SensProcessed.t(T)),SensProcessed.Vs(T,:)),seconds(D
C.t),'linear');
DC.Vi=tp.Var1(1)-tp.Var1; DC.Vi(DC.Vi<0)=0;</pre>
%% Flow volume evaluation
X=DC.x>=SensProcessed.xU(end);
dx=diff(DC.x(X)); dx=[dx(1) (dx(1:end-1)+dx(2:end)) dx(end)]*0.5;
DC.Vc=sum(DC.h(:,X)'.*dx'*b)';
DC.Vc0=DC.Vc(1);
% Rod volme calcolation
X=DC.x>=0;
tp=DC.h(:,X);
tp(tp>140)=140;
dx=diff(DC.x(X)); dx=[dx(1) (dx(1:end-1)+dx(2:end)) dx(end)]*0.5;
tp=lambda*sum((tp.*dx)'*b)';
DC.Vc=DC.Vc-tp;
DC.Ve=max([DC.Vc-DC.Vc0 DC.Vi]')';
%% Flow velocity evaluation
dt=diff(DC.t); dt=[dt(1); (dt(1:end-1)+dt(2:end)); dt(end)]*0.5;
for j=1:size(DC.xC,2);
    X=DC.x>=SensProcessed.xU(end) & DC.x<=DC.xC(j);</pre>
    x=DC.x(X);
    dx=diff(x); dx=[dx(1) (dx(1:end-1)+dx(2:end)) dx(end)]*0.5;
    DC.VC(:,j) = sum(DC.h(:,X)'.*dx'*b)';
    DC.VCo(:,j) = DC.Ve-(DC.VC(:,j)-DC.Vc0);
          DC.VCor(:,j) = DC.VCo(:,j);
    T=DC.hC(:,j) \le 0.02 \& DC.t \le 5;
    DC.VCor(\simT,j)=smoothdata(DC.VCo(\simT,j),'rlowess',300);
    DC.VCor(T, j) = nan;
    DC.VCor(DC.hC(:,j)<0.02 \mid DC.VCor(:,j)<=0,j)=nan;
    dx=diff(DC.VCor(:,j)); dx=[dx(1); dx(1:end-1)+dx(2:end); dx(end)]*.5;
    DC.QC(:,j)=dx./dt;
    DC.QC(T,j) = nan;
    DC.uC(:,j) = DC.QC(:,j)./(DC.hC(:,j)*b*(1-lambda));
end
%% Drag coefficient from force measured
DC.Cd=(2*(1-lambda)^2*b^2*DC.hc.*DC.F)./(rho*D*DC.QC.^2);
DC.Cds = (2*(1-lambda)^2*b^2*DC.hC(:,DC.Sez).*DC.Fs)./(rho*D*DC.QC(:,DC.Sez).^2);
DC.F norm=DC.F./DC.hC;
DC.Re vC=pi*D/(4*lambda*b*nu)*DC.QC./DC.hC;
%% Some plot
CC=lines(size(DC.xC,2));
%% Plot solo coefficienti di drag:
% un grafico per S 0, un sulplot h o media sezione e singole celle
for p=[];
```

```
S=eval(filename(2));
    H=eval(filename(4:5))
    nH=H/5-2;
    figure (S+1)
    subplot(4,1,nH); hold on
    plot(DC.t,DC.Cds,'--k'); hold on
    CC=lines(size(DC.hC,2));
    for j=1:size(DC.hC,2)
        plot(DC.t, DC.Cd(:,j), 'Color', CC(j,:))
    end
    if nH==1;
        title([{['Coefficienti di drag S 0=' int2str(S) '%']}, {['h 0='
int2str(H) 'cm']}]);
    else
        title(['h 0=' int2str(H) 'cm']);
    end
    ylabel('Cd [-]');
    xlim([0 10]);
    if nH==4;
        xlabel('t [s]');
        for k=1:length(CC);
            pl(k) = plot(-10, -10, 'Color', CC(k, :));
        end
        pl(4) = plot(-10, -10, '--k');
        legend(pl,'Sz-1','Sz-2','Sz-3','Singole Celle','Location','East')
    end
end
%% Plot solo volumi:
% un grafico per S 0, un sulplot h o media sezione e singole celle r p=[];
for p=[1];
    S=eval(filename(2));
    H=eval(filename(4:5))
    nH=H/5-2;
    CC=lines(size(DC.hC,2));
    twf=DC.t(find(DC.h(:,end)>0,1));
    figure(1)
    subplot(4,1,[1 2]);
    plot(DC.t,DC.Vi,'--k','DisplayName','V {s0}-V s'); hold on; grid on
    plot([1 1]*twf,[0 max(DC.Vi,[],'all')],'--
r', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Uscita fronte d''onda');
    for j=1:size(DC.hC,2)
        plot(DC.t,DC.VC(:,j)-DC.Vc0,'Color',CC(j,:),'DisplayName',['V {Sz'
int2str(j) '}'])
    end
    plot(DC.t,DC.Vc-DC.Vc0,'k','DisplayName','V {c}');
    plot(DC.t,DC.Ve+0.0012,'-r','DisplayName','V {in}'); hold on
    title([{['Volumi nel tempo']}]);
    legend('Location','east');
    xlim([0 15])
    ylim([0 max(DC.Vi,[],'all')])
    ylabel(['V [m^3]'])
    subplot(4,1,3); hold on; grid on
    for j=1:size(DC.hC,2)
        pl(j)=plot(DC.t,DC.VCo(:,j),'Color',CC(j,:),'DisplayName',['Sz-'
int2str(j)]);
    end
    plot(DC.t, DC.VCor, '--k');
    pl(j+1)=plot(-10,0,'--k','DisplayName','Valore di calcolo')
```

```
title(['Volumi in output V {out} dalle sezioni strumentate']);
    legend(pl,'Location','east');
    xlim([0 15])
    ylim([0 max(DC.Vi,[],'all')])
    ylabel(['V [m^3]'])
    subplot(4,1,4); hold on; grid on
    for j=1:size(DC.hC,2)
        plot(DC.t,DC.QC(:,j),'Color',CC(j,:))
    end
    title(['Portate in output Q i dalle sezioni strumentate']);
    xlim([0 15])
    xlabel(['t [s]'])
    ylabel(['Q [m^3/s]'])
    ylim([0 max(DC.QC,[],'all')]);
    print(gcf,[Slope 'QualityCheck\DragCoefficients\Volumi-' filename],'-
dpng','-r600');
    %close all;
end
DC.CdSez=mean(DC.Cd, 'omitnan');
DC.CdCel=mean(DC.Cds,'omitnan');
DC.CdPro=mean(DC.CdSez,'omitnan')
DragCoef=DC;
save([Slope 'Results\DragCoefficients\' filename '.mat'],'DragCoef');
end
function PlotCose1
% Test detect
k=1; for S=0:3;
    list=dir(['Slope-' int2str(S) '\Results\DragCoefficients']);
    for Pro=3:size(list,1)
        name=list(Pro).name(1:end-4);
        TestList(k,1).Slope=S;
        TestList(k,1).Head=eval(name(4:5));
        TestList(k,1).Name=name;
        TestList(k,1).Dir=['Slope-' int2str(S) '\'];
        TestList(k,1).Pos=Pro;
        TestList(k,1).DragCoeff=[list(Pro).folder '\' list(Pro).name];
        TestList(k,1).Date=list(Pro).date;
        k=k+1;
    end
end
CC=lines(4);
Markers='*o+d'
for j=1:size(TestList, 1)
    load(TestList(j).DragCoeff);
    nh=TestList(j).Head/5-3;
    nS=TestList(j).Slope;
    응응
    figure(1);
    subplot(1,3,1); hold on
    y=DragCoef.CdCel;
    x=0*y+TestList(j).Head+nS/10*5;
    z=DragCoef.Sez;
    for k=1:length(y)
        scatter(x(k),y(k),20,CC(z(k),:),Markers(nS+1));
```

```
end
    subplot(1,3,2); hold on
    y=DragCoef.CdSez;
    x=0*y+TestList(j).Head+nS/10*5;
    z=[1 \ 2 \ 3];
    for k=1:length(y)
        scatter(x(k),y(k),20,CC(z(k),:),Markers(nS+1));
    end
    subplot(1,3,3); hold on
    y=DragCoef.CdPro;
    x=0*y+TestList(j).Head+nS/10*5;
    for k=1:length(y)
        scatter(x(k), y(k), 20, 'k', Markers(nS+1));
    end
    if j==size(TestList,1); legende(1); end
    응응
    figure(2);
    subplot(1,3,1); hold on
    y=DragCoef.CdCel;
    x=0*y+TestList(j).Slope+nh/10;
    z=DragCoef.Sez;
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k),y(k),20,CC(z(k),:),Markers(nh+1));
    end
    subplot(1,3,2); hold on
    y=DragCoef.CdSez;
    x=0*y+TestList(j).Slope+nh/10;
    z=[1 \ 2 \ 3];
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k),y(k),20,CC(z(k),:),Markers(nh+1));
    end
    subplot(1,3,3); hold on
    y=DragCoef.CdPro;
    x=0*y+TestList(j).Slope+nh/10;
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k), y(k), 20, 'k', Markers(nh+1));
    end
    if j==size(TestList,1); legende(2); end
    응응
    figure(3);
    subplot(1,2,1); hold on
    y=DragCoef.CdCel;
    x=0*y+DragCoef.Sez+nS/10;
    for k=1:length(y);
        scatter (x(k), y(k), 20, CC(nh+1, :), Markers(nS+1));
    end
    subplot(1,2,2); hold on
    y=DragCoef.CdSez;
    x=0*y+[1 2 3]+nS/10;
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k),y(k),20,CC(nh+1,:),Markers(nS+1));
    if j==size(TestList,1); legende(3); end
end
```

```
for j=1:3;
    figure(j);
    print(gcf,['Plot\figure' int2str(j)],'-dpng','-r600');
end
close all
end
function PlotCose2
% Test detect
k=1:
for S=0:3;
    list=dir(['Slope-' int2str(S) '\Results\DragCoefficients']);
    for Pro=3:size(list,1)
        name=list(Pro).name(1:end-4);
        TestList(k,1).Slope=S;
        TestList(k,1).Head=eval(name(4:5));
        TestList(k,1).Name=name;
        TestList(k,1).Dir=['Slope-' int2str(S) '\'];
        TestList(k,1).Pos=Pro;
        TestList(k,1).DragCoeff=[list(Pro).folder '\' list(Pro).name];
        TestList(k,1).Date=list(Pro).date;
        k=k+1;
    end
end
CC=lines(4);
Markers='*o+d'
for j=1:size(TestList, 1)
    load(TestList(j).DragCoeff);
    nh=TestList(j).Head/5-3;
    nS=TestList(j).Slope;
    응응
    figure(4);
    subplot(1,3,1); hold on
    y=max(DragCoef.Fs);
    x=0*y+TestList(j).Head+nS/10*5;
    z=DragCoef.Sez;
    for k=1:length(y)
        scatter (x(k), y(k), 20, CC(z(k), :), Markers(nS+1));
    end
    subplot(1,3,2); hold on
    y=max(DragCoef.F);
    x=0*y+TestList(j).Head+nS/10*5;
    z=[1 \ 2 \ 3];
    for k=1:length(y)
        scatter(x(k),y(k),20,CC(z(k),:),Markers(nS+1));
    end
    subplot(1,3,3); hold on
    y=max(max(DragCoef.F));
    x=0*y+TestList(j).Head+nS/10*5;
    for k=1:length(y)
        scatter (x(k), y(k), 20, 'k', Markers(nS+1));
    end
    if j==size(TestList,1); legende(4); end
    응응
    figure(5);
    subplot(1,3,1); hold on
    y=max(DragCoef.Fs);
```

```
x=0*y+TestList(j).Slope+nh/10;
    z=DragCoef.Sez;
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k),y(k),20,CC(z(k),:),Markers(nh+1));
    end
    subplot(1,3,2); hold on
    y=max(DragCoef.F);
    x=0*y+TestList(j).Slope+nh/10;
    z=[1 \ 2 \ 3];
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k), y(k), 20, CC(z(k),:), Markers(nh+1));
    end
    subplot(1,3,3); hold on
    y=max(max(DragCoef.F));
    x=0*y+TestList(j).Slope+nh/10;
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k),y(k),20,'k',Markers(nh+1));
    end
    if j==size(TestList,1); legende(5); end
    응응
    figure(6);
    subplot(1,2,1); hold on
    y=max(DragCoef.Fs);
    x=0*y+DragCoef.Sez+nS/10;
    for k=1:length(y);
        scatter(x(k),y(k),20,CC(nh+1,:),Markers(nS+1));
    end
    subplot(1,2,2); hold on
    y=max(DragCoef.F);
    x=0*y+[1 2 3]+nS/10;
    for k=1:length(y);
        scatter (x(k), y(k), 20, CC(nh+1, :), Markers(nS+1));
    if j==size(TestList,1); legende(6); end
end
for j=4:6;
    figure(j);
    print(gcf,['Plot\figure' int2str(j)],'-dpng','-r600');
end
close all
function PlotCose3
% Test detect
k=1;
list=dir(['Average\Results\DragCoefficients']);
for Pro=3:size(list,1)
    name=list(Pro).name(1:end-4);
    S=eval(name(2))
    TestList(k,1).Slope=S;
    TestList(k,1).Head=eval(name(4:5));
    TestList(k,1).Name=name;
    TestList(k,1).Dir=['Slope-' int2str(S) '\'];
    TestList(k,1).Pos=Pro;
    TestList(k,1).DragCoeff=[list(Pro).folder '\' list(Pro).name];
    TestList(k,1).Date=list(Pro).date;
    k=k+1;
end
```

```
CC=lines(4);
Markers='*o+d'
for j=1:size(TestList,1)
    load(TestList(j).DragCoeff);
    nh=TestList(j).Head/5-3;
    nS=TestList(j).Slope;
    응응
    figure(7);
    y=DragCoef.Cd;
    x=DragCoef.Re vC;
    subplot(2,1,1);
    semilogx(x,y,'*','MarkerSize',.5,'Color',CC(nh+1,:)); hold on; grid on;
    subplot(2,1,2);
    semilogx(x,y,'*','MarkerSize',.5,'Color',CC(nS+1,:)); hold on; grid on;
    if j==size(TestList,1); legende(7); end
    figure(8);
    y=DragCoef.F norm;
    x=DragCoef.Re vC;
    subplot(2,1,1);
    semilogx(x,y,'*','MarkerSize',.5,'Color',CC(nh+1,:)); hold on; grid on;
    subplot(2,1,2);
    semilogx(x,y,'*','MarkerSize',.5,'Color',CC(nS+1,:)); hold on; grid on;
    if j==size(TestList,1); legende(8); end
end
for j=7:8;
    figure(j);
    print(gcf,['Plot\figure' int2str(j)],'-dpng','-r600');
end
close all
end
```

FUNZIONI DI SUPPORTO ALL'ANALISI DELLE PROVE

Idetificazione di variazioni di colore nei video

```
function Pic=ColorDiffFinder(Video, Pos, opt);
%Pic=ColorDiffFinder(Video,Pos,opt) The function analyzes the "Video" video
%and identifies the color variation frame "Pic" in a neighborhood of the
%point with pixel coordinate "Pos" according to the parameters defined in
%the "opt" structure
   opt.p0 star frame number;
    opt.pend stop frame number;
    opt.step frame's number extracts for each iteration;
응
    opt.min pixel's value variation threshold (from 0 to 16);
    opt.size neighborhood's half dimention;
Trg=[Pos(1) Pos(1) Pos(2) Pos(2)]+opt.size*[-1 1 -1 1];
V=read(Video,opt.p0);
RefPic=V(Trg(1):Trg(2),Trg(3):Trg(4),:);
p=opt.p0+1; flag=0; Pic=opt.p0;
while flag==0 && p<opt.pend;
    T=p+[0 \text{ opt.step-1}];
    V=read(Video,T);
    V=V(Trg(1):Trg(2),Trg(3):Trg(4),:,:);
    Sca=permute(sqrt(mean((V-RefPic).^2,[1,2,3])),[4,1,2,3]);
    Pic=find(Sca>opt.min,1);
```

```
if size(Pic, 1) > 0
        Pic=Pic+p;
        flag=1;
    end
    p=T (end);
if size(Pic, 1) == 0
    Pic=opt.p0+2;
end
end
   Identificazione pixel di corrente all'interno dei video
function [BW] = CreateMask(V, CS, opt)
%createMask Threshold RGB video's frames using pre-defined color ranges.
% [BW] = createMask(V,CS,opt) thresholds video V using color ranges
  defined on the 3x2 matrix CS according to the HSV color space. If
% opt='all' the 4D mask BW is true on all the pixels according with CS; if
  opt='surf' or omitted the 4D mask BW is true on the upper pixel for each
% column according with CS;
§_____
if nargin==2; opt='surf'; end;
for j=1:size(V,4)
    RGB=V(:,:,:,j);
    % Convert RGB image to chosen color space
    I = rgb2hsv(RGB);
    % Define thresholds for channel 1 based on histogram settings
    channel1Min = CS(1,1);
    channel1Max = CS(1,2);
    % Define thresholds for channel 2 based on histogram settings
    channel2Min = CS(2,1);
    channel2Max = CS(2,2);
    % Define thresholds for channel 3 based on histogram settings
    channel3Min = CS(3,1);
    channel3Max = CS(3,2);
    % Create mask based on chosen histogram thresholds
    sliderBW = ((I(:,:,1) >= channel1Min) | (I(:,:,1) <= channel1Max)) & ...
        (I(:,:,2) \ge channel2Min) & (I(:,:,2) \le channel2Max) & ...
        (I(:,:,3) >= channel3Min) & (I(:,:,3) <= channel3Max);
    BW(:,:,j) = sliderBW;
end
BW1=BW;
BW=BW1+0; spam=3; lim=.8;
for j=1:3
    BW=smoothdata(BW,j,'movmedian',spam);
end
BW=logical(BW);
tp=BW;
BW2=BW;
if strcmp(opt,'surf')
```

for m=1:size(V,4)
 BW=tp(:,:,m);

```
for j=1:size(BW,2)
                              for k=1:size(BW,3)
                                       p=find(BW(:,j,k),1);
                                       if length(p) > 0
                                                BW(:,j,k)=0;
                                                BW (p, j, k) = 1;
                                       else
                                                 BW (end, j, k) = 1;
                                       end
                             end
                    end
                    tp(:,:,m) = BW;
          end
          BW=tp;
elseif strcmp(opt,'all')
          BW=tp;
end
end
         Acquisizione dati sensori da file di testo
function S=ImportSensRecords(filename);
%S=ImportSensRecords(filename) Script for importing sensor's records data
%from the text file in filename directory; return nxm matrix S of n samples
%of m sensors.
%% Setup the Import Options and import the data
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 20);
% Specify range and delimiter
opts.DataLines = [1, Inf];
opts.Delimiter = "\t";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16",
"VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"];
opts.VariableTypes = ["double", "double", "dou
% Specify file level properties
opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
opts.EmptyLineRule = "read";
% Specify variable properties
opts = setvaropts(opts, ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16",
"VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"], "TrimNonNumeric", true);
opts = setvaropts(opts, ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName1", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"], "DecimalSeparator", ","); opts = setvaropts(opts, ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4", "VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"], "ThousandsSeparator", ".");
% Import the data
S = readtable(filename, opts);
```

```
%% Convert to output type
S = table2array(S);
%% Clear temporary variables
clear opts
end
   Creazione e apertura di strutture
function f = LoadOrCreate(file, folder)
%LoadOrCreate loading or creating a structure
    f = LoadOrCreate(file, folder) load the structure named "file" locate in
    "folder" if "file" exist; crate an empty structure named "file" in
    "folder" and load that if "file" do not exist in "folder".
list=dir(folder);
flag=0;
for j=3:size(list,1)
    if strcmp(list(j).name(1:end-4),file)
        f=load([list(j).folder '/' list(j).name]);
        flag=1;
    end
end
if flag==0
    f=struct;
    eval([file '=f;']);
    save([folder '/' file '.mat'], file);
    eval(['f.' file '=struct;']);
end
end
   Creazione di immagini per la definizione dei range di colore
function tmp=PicForColorSetting(Pro,Cam,Slope)
%PicForColorSettings: this function create a single picture from the test
%number "Pro" in the folder Slope merging four frames from camera number
%"Cam" equally spaced within the first 10 seconds after the dam opening.
%This picture is use for the color ranges' definition. Four different
%frames are merged to obtain a color ranges' definition more
%reappresenative of the whole event.
load([Slope 'Calibration\Data\StartTime.mat']);
load([Slope 'Calibration\Cam\CalibrationCam']);
CamCall=Calibration(Cam);
list=dir([Slope 'Video\Camera' int2str(Cam)]);
filename=list(Pro).name(1:end-4);
t=StartTime.SF(Pro,Cam)+[0 190 600 999]';
Video=VideoReader([list(Pro).folder '\' list(Pro).name]);
for p=1:size(t,1); V(:,:,:,p)=read(Video,t(p)); end;
%% Interest area extractio
pw=[0 -20 0; max(CamCall.CalPoints(:,1)) -20 0; ...
    0 eval(filename(4:5))*10-20 0; ...
    max(CamCall.CalPoints(:,1)) eval(filename(4:5))*10-20 0];
pi=round(PicWorldConversion(pw,CamCall));
SRPos=[min(pi(:,1)) min(pi(:,2))];
V=V(\min(pi(:,2)):\max(pi(:,2)),\min(pi(:,1)):\max(pi(:,1)),:,:);
tmp=[V(:,:,:,1) \ V(:,:,:,2); \ V(:,:,:,3) \ V(:,:,:,4)];
end
```

Passaggio da lettura delle celle a momento applicato

```
function [Fc] = stima(x, v, a, p, method)
% stima evalutation of dipenent variable using different parametrization
    [Fc] = stima(x, v, a, p, method) Fc(x) is the dipendent variable, x(t) is a
응
    time-pendent variable, v and a are the first and second order
    differienziation of \boldsymbol{x} by \boldsymbol{t}, method is the parametrization chosen
응
    defined by a number from 1 to 6 and p contains the parameters of the
응
    method
%% fit 1 Sigle linear interpolation
if method==1
    Fc=feval(p,x);
end
%% fit 2 Double linear interpolation
if method == 2
    Fc=x;
    %identifico pendenza
    c pos=find(v \ge 0);
    d pos=find(v<0);
    Fc(c pos)=feval(p\{1\},x(c pos));
    Fc(d pos)=feval(p\{2\}, x(d pos));
end
%% fit 3 Double cubic interpolation
if method==3
    Fc=x;
    %identifico pendenza
    c pos=find(v >= 0);
    d_pos=find(v<0);</pre>
    Fc(c pos)=feval(p\{1\},x(c pos));
    Fc(d_pos) = feval(p{2}, x(d_pos));
end
%% fit 4 Differential regression 1
if method == 4
    %Stima dei parametri
    A=[v \times ones(size(x,1),1)];
    Fc=A*p;
end
%% fit 5 Differential regression 2
if method==5
    A=[a v x ones(size(x,1),1)];
    Fc=A*p;
end
%% Differential regression 3
if method==6
    A=[a v v.*abs(v) x x.^2.*sign(v) ones(length(x),1)];
    Fc=A*p;
end
end
```

Conversione da coordinate pixel a spazio e viceversa

```
function [P]=PicWorldConversion(P,C)
% PicWorldConversion: this function convert pixel coordinates in
```

```
% world coordinates and viceversa with the camera calibration parameters
% conteined on the structure "C".
   if "P" is a nx2 matrix the function convert the n points \{J_i \ K_i\} from
       Pic to World
응
  if "P" is a nx3 matrix the function convert the n points {X i Y i Z i}
응
       from World to Pic
응
    if size (P, 2) == 2
P=pointsToWorld(C.CameraParameters, C.PicPositioning.R, C.PicPositioning.t, P);
        P=(C.RSCorrection.R*P'+C.RSCorrection.t')';
    end
    if size(P, 2) == 3
        X=P(:,1:2);
        Z=P(:,3);
        X=(inv(C.RSCorrection.R) * (X'-C.RSCorrection.t'))';
P=worldToImage(C.CameraParameters, C.PicPositioning.R, C.PicPositioning.t, [X Z]);
end
```

SCRIPT DI CALIBRAZIONE

Calibrazione delle camere

```
clear all; close all; clc; PL=1; SV=1;
FromVideo=0;
Camera=[1:4]; %all cams
Folder=['F:\Dam-Break 1D - Fasanella-Melis-Buono\Tesi Elia
Buono\OriginalCamCalibration']; %Original Calibration location
CamClipFolders=["E:\PRIVATE\M4ROOT\CLIP"; ...
                "E:\PRIVATE\M4ROOT\CLIP"; ...
                "D:\PRIVATE\M4ROOT\CLIP"; ...
                "E:\PRIVATE\M4ROOT\CLIP"];
dx=[2941 1985 946 0];
SquareOfset=[2 3.5 1.5 2.5];
%%Camera
for Cam=Camera;
    SquareSize = 464/23; % millimeters
    Clip=['CalCam' int2str(Cam)];
    load([Folder '\Camera' int2str(Cam) '\calibrationSession.mat']);
    lista = dir(CamClipFolders(Cam));
    %% ESTRAZIONE IMMAGINE DI CALIBRAZIONE DA CLIP IN POSIZIONE DEFINITIVA
    if FromVideo==1;% - Carico il video previa conversione in mp4
        Grid=VideoReader([lista(end-1).folder '\' lista(end-1).name]);
        Grid.CurrentTime=Grid.Duration;
        I=readFrame(Grid); % ottengo l'ultimo frame del video
        if SV==1; imwrite(I,[Clip '.png']); end
    else
        I=imread([Clip '.png']);
    end
    %% Map Image Points of Fisheye Image to World Coordinates
    [imagePoints,boardSize] = detectCheckerboardPoints(I);
    WorldPoints = generateCheckerboardPoints(boardSize,SquareSize);
```

```
Cut=round([min(imagePoints(:,2)), max(imagePoints(:,2)+20), min(imagePoints(:,1)),
max(imagePoints(:,1))]);
    [R,t] =
extrinsics (imagePoints, WorldPoints, calibrationSession.CameraParameters);
    PicPositioning.R=R;
    PicPositioning.t=t;
    WorldPoints =
pointsToWorld(calibrationSession.CameraParameters,R,t,imagePoints);
    xb = (boardSize(2) - 2) *20;
    yb = (boardSize(1) - 2) *20;
    if imagePoints(1,2)>0.5*(Cut(1)+Cut(2)) &&
imagePoints(1,1) < 0.5*(Cut(3) + Cut(4))
        R=eye(2); t=[0 0]
    elseif imagePoints(1,2)>0.5*(Cut(1)+Cut(2)) &&
imagePoints(1,1)>0.5*(Cut(3)+Cut(4))
        R=[-1 \ 0; \ 0 \ 1]; \ t=[xb \ 0];
    elseif imagePoints(1,2)<0.5*(Cut(1)+Cut(2)) &&
imagePoints(1,1)>0.5*(Cut(3)+Cut(4))
        R=-eye(2); t=[xb yb]
    else imagePoints(1,2)<0.5*(Cut(1)+Cut(2)) &&
imagePoints(1,1) < 0.5*(Cut(3) + Cut(4))
        R=[1 \ 0; \ 0 \ -1]; \ t=[0 \ yb];
    end
    RSCorrection.R=R;
    RSCorrection.t=t;
    for j=1:length(WorldPoints)
        WorldPoints(j,:)=WorldPoints(j,:)*R+t;
    end
    load('CalibrationCam.mat');
    Calibration (Cam) . PicPositioning=PicPositioning;
    Calibration(Cam).RSCorrection=RSCorrection;
    Calibration(Cam).CutPoints=Cut;
    Calibration (Cam) . CalPoints=WorldPoints;
    Calibration(Cam).CameraParameters=calibrationSession.CameraParameters;
    Calibration(Cam).PannelXPosition=dx(Cam)-SquareOfset(Cam)*SquareSize;
    if SV==1; save('CalibrationCam.mat','Calibration'); end;
    figure (Cam)
    imagesc(I); hold on
    scatter(imagePoints(:,1),imagePoints(:,2),'+r');
    end
   Calibrazione dei sensori
clc; clear all; close all; SV=0;
spam=1; SR=1000;
flag=0; % True enable automatic identification on loading phase
CalSens=import Cells record;
load('SensParameter.mat')
CR=movmean(CalSens(:,9:20),spam);
t=[0:size(CR,1)-1]'/SR;
```

```
load('LP.mat')
if flag==1;
for j=1:size(CR,2)
   [tp,I]=findpeaks(CR(:,j),'MinPeakHeight',400,'MinPeakWidth',50);
   [tp]=find(tp<900,1,'last');
   T=[I(tp)-6000:I(tp)+6000];
   MIN=mean(CR(T(end-500:end),j));
   LodPh(j).LS=find(CR(1:I(tp),j)-MIN<1,1,'last');
   LodPh(j).LE=I(tp)+find(CR(I(tp):end,j)-MIN<1,1);
end
end
figure(1)
for j=1:3
subplot(3,1,j)
plot(CR(:,SensParameter.CellsPosition(j,:)));
end
figure(2)
for j=1:SensParameter.CellsNum;
    x=CR(:,j);
    T=round([LodPh(j).LS:LodPh(j).LE]);
    LC=LodPh(j).LC;
    subplot(3,4,j);
    plot(x(T), CR(T, LC));
    title(['Cell ' int2str(j) ' Load Cell ' int2str(LC)]);
end
Calibration=struct;
for j=1:SensParameter.CellsNum;
tmp=ceil(find(SensParameter.CellsPosition==j)/size(SensParameter.CellsPosition,2
));
    b=SensParameter.CellsLeverArmsLength(tmp)-
SensParameter.CellsCalibrationToolHeight;
    t=[0:size(CR,1)-1]'/SR;
    T=round([LodPh(j).LS:LodPh(j).LE]);
    x=CR(T,j)*9.81/1000; x=x-x(1);
    C=CR(T, LodPh(j).LC)*9.81/1000*b; C=C-C(1);
    %Derivazione
    [tmp x dx] = deriva(t(T), x, 2, spam);
    a=dx(:,2); v=dx(:,1);
    [t C dF]=deriva(t(T),C,2,spam);
    dF = dF(:,1);
    for k=1;
        Calibration(j,k).Par=parametri(x,v,a,C,k);
    end
end
for j=1:12
tp(j)=Calibration(j).Par.p1
end
save('CalibrationSens.mat','Calibration')
save('LP.mat','LodPh')
```

```
function [CalSens]=import Cells record
list=dir;
flag=0;
for j=3:size(list,1)
          if strcmp(list(j).name, 'CalSens.mat');
                     flag=1;
          end
end
if flag==0
          %% Import data from text file
          % Script for importing data from the following text file:
                       filename: H:\Dam-Break 1D - Fasanella-Melis-Buono\Tesi Elia Buono\Prove
con celle\Slope-3%\Calibration\CalSens.txt
          % Auto-generated by MATLAB on 04-Mar-2021 11:57:54
          %% Set up the Import Options and import the data
          opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 20);
          % Specify range and delimiter
          opts.DataLines = [1, Inf];
          opts.Delimiter = "\t";
          % Specify column names and types
          opts.VariableNames = ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10", "VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"];
          opts.VariableTypes = ["double", "double", "double", "double", "double",
"double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "double", "doubl
          % Specify file level properties
          opts.ExtraColumnsRule = "ignore";
          opts.EmptyLineRule = "read";
          % Specify variable properties
          opts = setvaropts(opts, ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10",
"VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"], "DecimalSeparator", ","); opts = setvaropts(opts, ["VarName1", "VarName2", "VarName3", "VarName4",
"VarName5", "VarName6", "VarName7", "VarName8", "VarName9", "VarName10", "VarName11", "VarName12", "VarName13", "VarName14", "VarName15", "VarName16", "VarName17", "VarName18", "VarName19", "VarName20"], "ThousandsSeparator", ".");
          % Import the data
          CalSens = readtable("CalSens.txt", opts);
          %% Convert to output type
          CalSens = table2array(CalSens);
          save('CalSens.mat','CalSens');
else
          load('CalSens.mat');
end
%% Clear temporary variables
end
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Luino, G. Tosatti, and V. Bonaria, "Dam Failures in the 20th Century: Nearly 1,000 Avoidable Victims in Italy Alone," *J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 19–31, 2014.
- [2] C. Zarfl, A. E. Lumsdon, J. Berlekamp, L. Tydecks, and K. Tockner, "A global boom in hydropower dam construction," *Aquat. Sci.*, vol. 77, no. 1, pp. 161–170, Jan. 2015, doi: 10.1007/s00027-014-0377-0.
- [3] J. D. Pisaniello, "A Comparative Review of Environmental Policies and Laws Involving Hazardous Private Dams: 'Appropriate' Practice Models for Safe Catchments," William Mary Environ. Law Policy Rev., vol. 35, no. 2, 2011.
- [4] L. Zhang, Y. Xu, and J. S. Jia, "Analysis of earth dam failures: A database approach," *Georisk*, vol. 3, no. 3, pp. 184–189, 2009, doi: 10.1080/17499510902831759.
- [5] M. Morris, H. Hewlett, and C. Elliott, "Risk and Reservoirs in the UK," *Constr. Ind. Res. Inf. Assoc. Water Gr.*, pp. 1–21, 2000.
- [6] F. C. Dai, C. F. Lee, J. H. Deng, and L. G. Tham, "The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China," *Geomorphology*, vol. 65, no. 3–4, pp. 205–221, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.geomorph.2004.08.011.
- [7] J. L. Carrivick, "Dam break Outburst flood propagation and transient hydraulics: A geosciences perspective," *J. Hydrol.*, vol. 380, no. 3–4, pp. 338–355, 2010, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.009.
- [8] H. Chanson, "Application of the method of characteristics to the dam break wave problem," *J. Hydraul. Res.*, vol. 47, no. 1, pp. 41–49, 2009, doi: 10.3826/jhr.2009.2865.
- [9] I. Reid, J. B. Laronne, and D. M. Powell, "Flash-flood and bedload dynamics of desert gravel-bed streams," *Hydrol. Process.*, vol. 12, no. 4, pp. 543–557, 1998, doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19980330)12:4<543::AID-HYP593>3.0.CO;2-C.
- [10] S. Assouline, S. E. Thompson, L. Chen, T. Svoray, S. Sela, and G. G. Katul, "The dual role of soil crusts in desertification," *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, vol. 120, no. 10, pp. 2108–2119, Oct. 2015, doi: 10.1002/2015JG003185.
- [11] S. Kefi, M. Rietkerk, and G. G. Katul, "Vegetation pattern shift as a result of rising atmospheric CO2 in arid ecosystems," *Theor. Popul. Biol.*, vol. 74, no. 4, pp. 332–344, 2008, doi: 10.1016/j.tpb.2008.09.004.
- [12] A. Paschalis, G. G. Katul, S. Fatichi, G. Manoli, and P. Molnar, "Matching ecohydrological processes and scales of banded vegetation patterns in semiarid catchments," *J. Am. Water Resour. Assoc.*, vol. 5, no. 3, pp. 2–2, 1969, doi: 10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x.
- [13] S. Thompson, G. Katul, A. Konings, and L. Ridolfi, "Unsteady overland flow on flat surfaces induced by spatial permeability contrasts," *Adv. Water Resour.*, vol. 34, no. 8, pp. 1049–1058, 2011, doi: 10.1016/j.advwatres.2011.05.012.
- [14] J. Holden *et al.*, "Overland flow velocity and roughness properties in peatlands," *Water Resour. Res.*, vol. 44, no. 6, pp. 1–11, 2008, doi: 10.1029/2007WR006052.
- [15] A. E. Ajayi, N. van de Giesen, and P. Vlek, "A numerical model for simulating Hortonian overland flow on tropical hillslopes with vegetation elements," *Hydrol. Process*, vol. 22, no. November 2008, pp. 1107–1118, 2008, doi: 10.1002/hyp.
- [16] R. H. Kadlec, "Overview: Surface flow constructed wetlands," *Water Sci. Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 1–12, 1995, doi: 10.1016/0273-1223(95)00599-4.

- [17] J. K. Lee, L. C. Roig, H. L. Jenter, and H. M. Visser, "Drag coefficients for modeling flow through emergent vegetation in the Florida Everglades," *Ecol. Eng.*, vol. 22, no. 4–5, pp. 237–248, 2004, doi: 10.1016/j.ecoleng.2004.05.001.
- [18] H. Chanson, Applications of the Saint-Venant Equations and Method of Characteristics to the Dam Break Wave Problem, vol. Dept. of C. 2005.
- [19] A. Ritter, "Die fortpflanzung der wasserwellen," Zeitschrift des Vereines Dtsch. Ingenieure, vol. 36, no. 33, pp. 947–954, 1892, Accessed: Jun. 22, 2021. [Online]. Available: https://ci.nii.ac.jp/naid/10024474030.
- [20] R. F. Dressler, "Hydraulic resistance effect upon the dam-break functions," *J. Res. Natl. Bur. Stand.* (1934)., vol. 49, no. 3, p. 217, 1952, doi: 10.6028/jres.049.021.
- [21] G. B. Whitham, "The Effects of Hydraulic Resistance in the Dam-Break Problem," *R. Soc. Publ.*, vol. 203, no. 5244, p. 458, 1955, doi: 10.1016/S0140-6736(01)16090-3.
- [22] D. H. Peregrine and S. M. Williams, "Swash overtopping a truncated plane beach," *J. Fluid Mech*, 2001, Accessed: Jun. 22, 2021. [Online]. Available: https://www.proquest.com/openview/a46656e333911422d3c6a3f3a2c18eed/1?cbl=34769&pq-origsite=gscholar.
- [23] H. M. Nepf, J. A. Sullivan, and R. A. Zavistoski, "A model for diffusion within emergent vegetation," *Limnol. Oceanogr.*, vol. 34, no. 7, pp. 1366–1366, 1997, doi: 10.4319/lo.1989.34.7.1366.
- [24] N.-S. Cheng and H. T. Nguyen, "Hydraulic Radius for Evaluating Resistance Induced by Simulated Emergent Vegetation in Open-Channel Flows," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 137, no. 9, pp. 995–1004, 2011, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000377.
- [25] N.-S. Cheng, H. T. Nguyen, S. K. Tan, and S. Shao, "Scaling of Velocity Profiles for Depth-Limited Open Channel Flows over Simulated Rigid Vegetation," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 138, no. 8, pp. 673–683, 2012, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000562.
- [26] D. Liu, P. Diplas, J. D. Fairbanks, and C. C. Hodges, "An experimental study of flow through rigid vegetation," *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, vol. 113, no. 4, p. 4015, Dec. 2008, doi: 10.1029/2008JF001042.
- [27] P. K. Stansby, A. Chegini, and T. C. D. Barnes, "The initial stages of dam-break flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 374, pp. 407–424, 1998, doi: 10.1017/S0022112098009975.
- [28] A. A. Khan, P. M. Steffler, and R. Gerard, "Dam-Break Surges with Floating Debris," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 126, no. 5, pp. 375–379, May 2000, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2000)126:5(375).
- [29] I. M. Jánosi, D. Jan, K. G. Szabó, and T. Tél, "Turbulent drag reduction in dam-break flows," *Exp. Fluids*, vol. 37, no. 2, pp. 219–229, 2004, doi: 10.1007/s00348-004-0804-4.
- [30] G. Lauber and W. H. Hager, "Experiments to dambreak wave: Horizontal channel," *J. Hydraul. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 291–307, 1998, doi: 10.1080/00221689809498620.
- [31] G. Lauber and W. H. Hager, "Experiments to dambreak wave: Sloping channel," *J. Hydraul. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 761–773, 1998, doi: 10.1080/00221689809498601.
- [32] L. Fraccarollo and E. F. Toro, "Evaluation expérimentale et numérique d'un modèle de saint-venant bi-dimensionnel appliqué aux ruptures de barrages," *J. Hydraul. Res.*, vol. 33, no. 6, pp. 843–864, 1995, doi: 10.1080/00221689509498555.
- [33] M. Jovanović and D. Djordjević, "Experimental verification of the MacCormack numerical scheme," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 23, no. 1, pp. 61–67, 1995, doi: 10.1016/0965-9978(95)00053-T.

- [34] C. V. Bellos, V. Soulis, and J. G. Sakkas, "Etude experimental de l'écoulement bi-dimensionnel produit par la rupture d'un barrage," *J. Hydraul. Res.*, vol. 30, no. 1, pp. 47–63, 1992, doi: 10.1080/00221689209498946.
- [35] J. M. Townson and A. H. Al-Salihi, "Models of Dam-Break Flow in R-T Space," J. Hydraul. Eng., vol. 115, no. 5, pp. 561–575, 1989, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(1989)115:5(561).
- [36] J. G. Zhou, D. M. Causon, C. G. Mingham, and D. M. Ingram, "Numerical Prediction of Dam-Break Flows in General Geometries with Complex Bed Topography," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 130, no. 4, pp. 332–340, 2004, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2004)130:4(332).
- [37] M. Thomas and M. H. Chaudhry, "DEPTH-AVERAGED OPEN-CHANNEL FLOW MODEL," no. June, pp. 453–465, 1995.
- [38] G. O. D. Fasanella, "Studio sperimentale dell'influenza di macroscabrezze sulla propagazione di onde di piena piena," 2017.
- [39] M. Melis, D. Poggi, G. O. D. Fasanella, S. Cordero, and G. G. Katul, "Resistance to Flow on a Sloping Channel Covered by Dense Vegetation following a Dam Break," *Water Resour. Res.*, pp. 1–19, 2019, doi: 10.1029/2018WR023889.
- [40] D. Poggi, G. G. Katul, and J. D. Albertson, "Momentum transfer and turbulent kinetic energy budgets within a dense model canopy," *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 111, no. 3, pp. 589–614, Jun. 2004, doi: 10.1023/B:BOUN.0000016502.52590.af.
- [41] Y. Tanino and H. M. Nepf, "Laboratory Investigation of Mean Drag in a Random Array of Rigid, Emergent Cylinders," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 134, no. 1, pp. 34–41, 2008, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:1(34).
- [42] D. Poggi, C. Krug, and G. G. Katul, "Hydraulic resistance of submerged rigid vegetation derived from first-order closure models," *Water Resour. Res.*, vol. 45, no. 10, pp. 1–14, 2009, doi: 10.1029/2008WR007373.
- [43] W. J. Wang, W. X. Huai, S. Thompson, and G. G. Katul, "Steady nonuniform shallow flow within emergent vegetation," *Water Resour. Res.*, vol. 51, no. 12, pp. 10047–10064, Dec. 2015, doi: 10.1002/2015WR017658.
- [44] N.-S. Cheng, "Calculation of Drag Coefficient for Arrays of Emergent Circular Cylinders with Pseudofluid Model," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 139, no. 6, pp. 602–611, Jun. 2013, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000722.
- [45] F. Sonnenwald, V. Stovin, and I. Guymer, "Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation," *J. Hydraul. Res.*, vol. 57, no. 4, pp. 591–597, 2019, doi: 10.1080/00221686.2018.1494050.
- [46] V. Etminan, R. J. Lowe, and M. Ghisalberti, "A new model for predicting the drag exerted by vegetation canopies," *Water Resour. Res.*, vol. 53, no. 4, pp. 3179–3196, 2017, doi: 10.1002/2016WR020090.
- [47] H. M. Nepf, "Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation," *Water Resour. Res.*, vol. 35, no. 2, pp. 479–489, 1999, doi: 10.1029/1998WR900069.
- [48] F. Ayaz and T. J. Pedley, "Flow through and particle interception by an infinite array of closely-spaced circular cylinders," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 18, no. 2, pp. 173–196, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0997-7546(99)80021-1.
- [49] Y. Mazda, E. Wolanski, B. King, A. Sase, D. Ohtsuka, and M. Magi, "Drag force due to vegetation in mangrove swamps," *Mangroves Salt Marshes*, vol. 1, no. 3, pp. 193–199, 1997, doi:

- 10.1023/A:1009949411068.
- [50] S. Petryk, "DISSERTATION DRAG ON CYLINDERS IN OPEN CHANNEL FLOW Submitted by," 1969.
- [51] B. M. Stone and H. T. Shen, "Hydraulic Resistance of Flow in Channels with Cylindrical Roughness," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 128, no. 5, pp. 500–506, May 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:5(500).
- [52] D. L. Koch and A. J. C. Ladd, "Moderate Reynolds number flows through periodic and random arrays of aligned cylinders," *J. Fluid Mech.*, vol. 349, pp. 31–66, Oct. 1997, doi: 10.1017/S002211209700671X.
- [53] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, vol. 48. 1952.
- [54] F. M. White, Viscous fluid flow, 2nd ed. McGwaw-Hill, Inc, 1992.
- [55] F. López and M. H. García, "Mean Flow and Turbulence Structure of Open-Channel Flow through Non-Emergent Vegetation," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 127, no. 5, pp. 392–402, May 2001, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2001)127:5(392).
- [56] N. Kouwen, T. E. Unny, and H. M. Hill, "Flow Retardance in Vegetated Channels," *J. Irrig. Drain. Div.*, vol. 95, no. 2, pp. 329–342, Jun. 1969, doi: 10.1061/jrcea4.0000652.
- [57] D. G. Meijer and E. H. Van Velzen, "Prototype-scale flume experiments on hydraulic roughness of submerged vegetation," *Pap. Present. 28th Int. Conf. Int. Assoc. Hydraul. Eng. Res.*, 1999.
- [58] M. Ghisalberti and H. M. Nepf, "The limited growth of vegetated shear layers," *Water Resour. Res.*, vol. 40, no. 7, Jul. 2004, doi: 10.1029/2003WR002776.
- [59] E. Murphy, M. Ghisalberti, and H. Nepf, "Model and laboratory study of dispersion in flows with submerged vegetation," *Water Resour. Res.*, vol. 43, no. 5, p. 5438, May 2007, doi: 10.1029/2006WR005229.
- [60] M. J. Baptist, L. V. van den Bosch, J. T. Dijkstra, and S. Kapinga, "Modelling the effects of vegetation on flow and morphology in rivers.," *Large Rivers*, vol. 15, no. 1–4, pp. 339–357, Dec. 2003, doi: 10.1127/lr/15/2003/339.
- [61] H. M. Nepf and E. R. Vivoni, "Flow structure in depth-limited, vegetated flow," *J. Geophys. Res. Ocean.*, vol. 105, no. C12, pp. 28547–28557, Dec. 2000, doi: 10.1029/2000jc900145.
- [62] Z. Shi, J. S. Pethick, and K. Pye, "Flow Structure in and above the Various Heights of a Saltmarsh Canopy: A Laboratory Flume Study," *J. Coast. Res.*, vol. 11, no. 4, pp. 1204–1209, 1995.
- [63] J. Järvelä, "Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance," *J. Hydrol.*, vol. 307, no. 1–4, pp. 233–241, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.013.
- [64] F. G. Carollo, V. Ferro, and D. Termini, "Flow Velocity Measurements in Vegetated Channels," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 128, no. 7, pp. 664–673, 2002, doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:7(664).
- [65] Y. Ishikawa, K. Mizuhara, and S. Ashida, "Effect of density of trees on drag exerted on trees in river channels," *J. For. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 271–279, 2000, doi: 10.1007/BF02767121.
- [66] R. M. Ferreira, A. M. Ricardo, and M. J. Franca, "Discussion of 'Laboratory Investigation of Mean Drag in a Random Array of Rigid, Emergent Cylinders' by Yukie Tanino and Heidi M. Nepf," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 135, no. 8, pp. 690–693, Aug. 2009, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000021.
- [67] C. S. James, B. D. Barkdoll, S. Vittilam, S. J. Bennett, and C. V. Alonso, "Flow resistance of emergent vegetation," in *Proceedings of the 2004 World Water and Environmetal Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmetal Resources Management*, 2004, vol. 42, no. 4, pp. 1398–1406, doi: 10.1080/00221686.2004.9641206.

- [68] L. G. Gibilaro, *Fluidization-dynamics: The formulation and appli- cations of a predictive theory for the fluidized state.* Oxford, UK, 2001.
- [69] Z. Wan and Z. Wang, *Hyperconcentrated flow*. Rotterdam, The Netherlands, 1994.
- [70] T. Stoesser, S. J. Kim, and P. Diplas, "Turbulent Flow through Idealized Emergent Vegetation," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 136, no. 12, pp. 1003–1017, 2010, doi: 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000153.
- [71] S. J. Kim and T. Stoesser, "Closure modeling and direct simulation of vegetation drag in flow through emergent vegetation," *Water Resour. Res.*, vol. 47, no. 10, p. 10511, Oct. 2011, doi: 10.1029/2011WR010561.
- [72] R. O. Tinoco and E. A. Cowen, "The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements," *Exp. Fluids*, vol. 54, no. 4, pp. 1–16, Apr. 2013, doi: 10.1007/s00348-013-1509-3.
- [73] M. Ben Meftah and M. Mossa, "Prediction of channel flow characteristics through square arrays of emergent cylinders," *Phys. Fluids*, vol. 25, no. 4, p. 45102, Apr. 2013, doi: 10.1063/1.4802047.

RINGRAZIAMENTI

Giunto alla fine di questo elaborato, nonché del mio percorso universitario, ritengo quantomeno doveroso ringraziare tutti coloro che mi hanno accompagnato in questi anni, e reso possibile questo traguardo. Innanzitutto, vorrei ringraziare il professor Davide Poggi, che in veste di relatore ha seguito la stesura di questa tesi permettendomi di concludere con estrema soddisfazione il mio percorso al Politecnico. Allo stesso modo, ringrazio infinitamente Andrea e i Roberto per le entusiasmanti ore in laboratorio, senza le quali questo studio non avrebbe mai visto la luce. Non credo esistano parole adatte per ringraziare degnamente i miei genitori e mio fratello, ma proverò comunque: senza il loro continuo sostegno, in ogni aspetto possibile e immaginabile, non avrei mai potuto essere qui oggi, e questo raggiungimento è anche un po' loro. Un ringraziamento speciale va alla mia llaria che mi ha sopportato e spronato in questi cinque meravigliosi anni assieme.

Infine, non posso non ringraziare i miei amici tutti, famiglia putativa che in questi anni a Torino mi è

Infine, non posso non ringraziare i miei amici tutti, famiglia putativa che in questi anni a Torino mi è stata accanto in ogni successo e fallimento, e ha rappresentato un punto di riferimento imprescindibile per ben più della mia carriera universitaria.