

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Studio degli effetti della propagazione dell'onda di dam break mediante un nuovo set-up sperimentale

Relatore

Prof. Ing. Davide Poggi

Candidato

Cristian Sales

Correlatore

Ing. Andrea Cagninei

Ing. Roberto Bosio

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

Alla mia famiglia

Abstract

Gli sbarramenti artificiali per la ritenuta idrica, siano essi dighe di ritenuta o traverse, sono assoggettate ad una attività di controllo pubblica, la quale può essere di livello regionale o statale, sulla corretta gestione dell'opera da parte del concessionario, ai fini della tutela della pubblica sicurezza. Il criterio di suddivisione delle dighe, al fine di definirne la competenza, è di tipo geometrico, e riguarda l'altezza dello sbarramento e/o la capacità di invaso: sono di competenza statale le dighe con un'altezza superiore ai 15 metri o con invaso superiore al milione di metri cubi. I rimanenti sbarramenti sono di competenza regionale, dai piccoli serbatoi a scopo irriguo o atti all'alimentazione delle stazioni sciistiche ai più grandi impianti per la produzione di energia idroelettrica. Per questa categoria di invasi non esiste un atto normativo dedicato che garantisca implicitamente la sicurezza, siccome non esiste una metodologia di valutazione del rischio associabile allo specifico invaso. Da questa premessa muove la volontà di indagare sperimentalmente le caratteristiche dell'onda che si genera in seguito ad uno scenario di collasso (onda di dam-break).

Il presente studio, condotto in collaborazione con il collega Roberto Napoli, affronta la questione della valutazione del rischio attraverso la costruzione in Laboratorio di un modello fisico in scala ridotta, costituito da un serbatoio di dimensioni $3.4 \times 0.9 \times 0.5$ m, dotato di breccia di forma variabile a seconda del modello evolutivo adottato. La chiusura ermetica del serbatoio è assicurata da un sistema di elettrocalamite, la cui disattivazione comporta l'apertura istantanea di una paratoia, simulando lo scenario di collasso parziale di dighe in terra e il conseguente svuotamento dell'invaso. A valle è prevista la realizzazione di un light box, caratterizzato alla base da una superficie liscia e piana di dimensioni 3.4×6.3 m e condizioni di illuminamento uniforme, sulla quale l'acqua è libera di espandersi. La necessità di riprodurre gli esperimenti su un piano perfettamente orizzontale, la possibilità di regolare la sua pendenza longitudinale e la ridotta deformabilità del pannello sono i motivi principali che hanno spinto a predisporre il nuovo set-up, oltre alla possibilità di investigare il comportamento dell'onda su una superficie trasversale più ampia, per acquisire maggiori informazioni. L'elaborato intende proseguire un percorso già avviato in precedenza ed arricchire il catalogo di dati a disposizione, al fine di stimare la vulnerabilità associata allo scenario di rischio.

Particolare importanza assume la metodologia di acquisizione dati basata sul processamento di immagini digitali, strumento con il quale saranno successivamente dedotti il campo di altezze d'acqua e la posizione del fronte d'onda, una volta completata la costruzione del modello fisico. Così, al fine di testare la metodologia e riconoscerne limiti e criticità, si è deciso di applicare la tecnica ad una realtà locale che caratterizza l'onda di dam break: l'attenzione è rivolta a quella frazione di onda comunemente indicata come vena effluente, che si genera durante il fenomeno idrodinamico ed è localizzata in prossimità della breccia e prospiciente il territorio di valle. L'analisi è condotta attraverso un approccio di tipo euleriano, soffermandosi sullo studio della traiettoria delle particelle che costituiscono la vena, allo scopo di verificare la validità del teorema di Torricelli.

Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Cenni sul progetto RESBA.....	2
1.2	La Valutazione del Rischio Idraulico	4
1.2.1	Curve di vulnerabilità	7
1.3	Finalità del lavoro di tesi	9
2	Stato dell'arte.....	10
2.1	"Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling" ⁶	11
2.2	"An image processing technique for measuring free surface of dam-breaks flows" ⁷	15
2.3	"Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows" ⁸ ...	20
2.4	"A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom" ⁹	24
2.5	"Three-dimensional evolution of a dam-break flow: construction and calibration of a physical model" ¹⁰	27
3	Riproduzione in scala del fenomeno.....	29
3.1	Equazioni che regolano il fenomeno.....	30
3.2	Modelli fisici nell'ingegneria idraulica.....	32
3.2.1	Teorema π	32
3.2.2	Le leggi di similitudine.....	35
3.2.3	Rapporti di scala del modello realizzato	37
4	Costruzione del modello fisico.....	39
4.1	Serbatoio di monte.....	40
4.2	Piano di valle	47
4.3	Light box	56
4.4	Assemblaggio e montaggio delle parti	67
5	Analisi di una vena effluente da breccia rettangolare	70
5.1	Concetti teorici	71
5.2	Set up sperimentale e procedura	75
5.3	Campagna di esperimenti	77
5.3.1	Calibrazione fotocamera Canon EOS 550D	78
5.3.2	Procedura pratica di calibrazione	82

5.3.3	Esecuzione degli esperimenti.....	86
5.4	Post-elaborazione delle immagini.....	91
5.5	Risultati.....	100
5.6	Analisi della traiettoria di un singolo getto	108
5.6.1	Sostanze fluorescenti	110
5.6.2	Risultati dell'esperimento	115
5.7	Dispositivi di acquisizione.....	119
6	Conclusioni	120
	Bibliografia	122
	Indice delle tabelle	124
	Indice delle figure.....	125
A.	Codici MATLAB.....	129

1 Introduzione

“Gli sbarramenti artificiali per la ritenuta idrica, siano essi dighe di ritenuta o traverse, sono assoggettate ad una attività di controllo pubblica, la quale può essere di livello regionale o statale, sulla corretta gestione dell’opera da parte del concessionario, ai fini della tutela della pubblica sicurezza”¹.

Il criterio di suddivisione delle dighe, al fine di definirne la competenza, è di tipo geometrico, e riguarda in particolare l’altezza dello sbarramento e/o la capacità di invaso: sono di competenza statale le dighe con un’altezza superiore ai 15 metri o con un invaso superiore al milione di metri cubi. Allo stato attuale, gli sbarramenti di competenza statale presenti in Piemonte sono circa 60 e l’ente addetto alla loro vigilanza è il *Ministero delle Infrastrutture e Trasporti* (ciò che riguarda la sicurezza delle grandi dighe su territorio italiano è definito nel *Decreto Legislativo 31 marzo 1998, n.112*).

I rimanenti sbarramenti sono di competenza regionale. Il numero di questi è notevole e supera le 700 unità su territorio piemontese: in questa categoria rientrano sbarramenti di varie dimensioni e molteplici utilizzi, dai piccoli serbatoi a scopo irriguo o atti all’alimentazione delle stazioni sciistiche ai più grandi impianti per la produzione di energia idroelettrica. Indipendentemente dall’utilizzo dell’invaso, la costruzione e la gestione di queste opere deve essere autorizzata da uno specifico ente che opera a livello regionale (in Piemonte è il settore *Difesa del suolo* della Regione Piemonte, secondo le modalità stabilite dal Regolamento regionale n. 12/R del 2004).

Per gli invasi sopra citati, di competenza regionale, non esiste un atto normativo dedicato che garantisca implicitamente la sicurezza, siccome non esiste una metodologia di valutazione del rischio associabile allo specifico invaso. Questo fatto fa sorgere un problema di non lieve importanza: infatti, sebbene questi sbarramenti possano accumulare volumi minori, le conseguenze di un eventuale collasso potrebbero essere non meno distruttive dell’effetto provocato da una grande diga, in termini relativi. Ciò è dovuto alle diverse caratteristiche dell’onda che si genera in seguito ad uno scenario di collasso (dam-break): nel caso di grandi dighe, l’onda assume carattere monodimensionale e l’invaso di accumulo è in genere allungato nella direzione del flusso, per cui si avranno grandi volumi riversati in una direzione pressoché delimitata. Nei piccoli invasi accade il contrario, considerando ad esempio un piccolo invaso a scopo irriguo, antistante una valle di morfologia aperta e pianeggiante: l’onda interesserà una porzione di territorio molto più estesa, e spesso densamente abitata. A questo si aggiunge il fatto che tra gli invasi di competenza regionale rientrano le opere posizionate in serie e quindi potenzialmente più distruttive; tra le quali compaiono opere costruite in materiali sciolti molti decenni fa, con metodologie semi-empiriche, per far fronte a esigenze costruttive diverse da quelle attuali (oggi si mira al contenimento dei costi economici e ambientali). Questi sono alcuni dei numerosi fattori che impongono di attribuire a questi sbarramenti un danno potenziale specifico elevato.

Ora, mentre per le grandi dighe esistono soluzioni analitiche sufficientemente accurate e scientificamente accettate (analisi di Ritter), che valgono nelle condizioni sopra citate, ovvero invaso ubicato a monte di una valle incisa e carattere monodimensionale dell’onda di dam-break, lo stesso non si può dire per i piccoli invasi. La soluzione analitica adottata dipende fortemente dalla morfologia

dell'alveo di valle: se l'invaso si trovasse a monte di una zona pedemontana o pianeggiante, l'onda non risentirebbe del confinamento laterale (che è in genere caratteristico di un alveo inciso in zona montana) e sarebbe libera di espandersi in direzione trasversale, in funzione della forma del territorio di valle.

Appurato il fatto che non esiste una metodologia di analisi del rischio per invasi di competenza regionale, è stato necessario affrontare il problema allo scopo di giungere ad una riduzione di tale rischio: con questo obiettivo è stato avviato nel 2014 il progetto *ALCOTRA - RESBA* (Resilienza sugli SBAramenti). Il programma RESBA è tutt'oggi ancora in corso d'opera e affronta la problematica della valutazione del rischio idraulico, passando attraverso la valutazione della vulnerabilità, nel quale si inserisce il presente lavoro di tesi.

1.1 Cenni sul progetto RESBA

RESBA consiste in un programma trans-frontaliero di cooperazione territoriale europea interregionale tra l'Italia e la Francia, tutt'oggi in corso d'opera, che ha come specifico obiettivo quello di

“...approfondire la conoscenza dei rischi legati alla presenza delle dighe sui territori alpini e migliorare la prevenzione, la comunicazione e la gestione della sicurezza dei territori a valle degli sbarramenti attraverso adeguate procedure di protezione civile, aumentando la resilienza del territorio. L'obiettivo generale è quello di aumentare la conoscenza, formare i tecnici e sensibilizzare gli amministratori locali e i cittadini sul tema delle dighe e sul tema della gestione dei rischi legati alle dighe e sulla loro prevenzione.”

come riportato sul sito della Città Metropolitana di Torino².

Il consorzio è coordinato dalla Regione Autonoma della Valle d'Aosta ed è composto da 6 partner italiani e francesi:

- VDA Regione Autonoma Valle D'Aosta;
- PIE Regione Piemonte;
- POLI Politecnico di Torino;
- METRO Città Metropolitana di Torino – Servizio Protezione Civile;
- IRSTEA *Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture*;
- DREAL *Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement*.

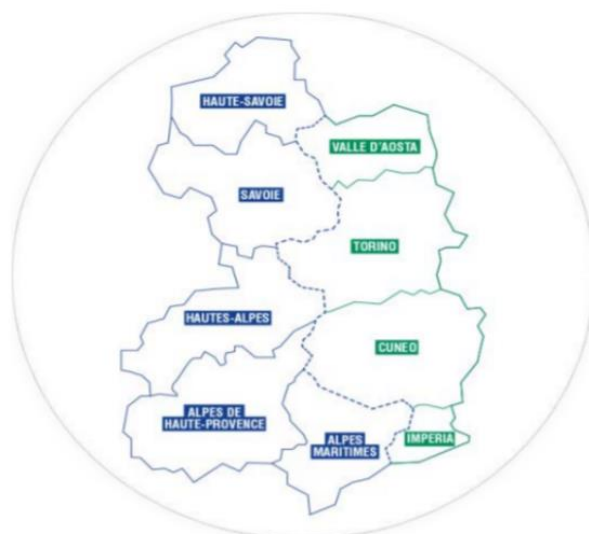


Figura 1.1 – Province partecipanti al programma trans-frontaliero

Il territorio trans-frontaliero è caratterizzato da zone per lo più collinari e montuose dell'arco alpino; in queste si inseriscono gli sbarramenti artificiali, in zone collinari ai piedi della catena alpina tra 500 e 1550 m di altitudine, e in zone di alta montagna tra i 1500 e i 3000 m. Questi vengono suddivisi in 3 categorie principali a seconda della localizzazione:

- Grandi sbarramenti in quota utilizzati per la produzione idroelettrica; questa classe comprende qualche decina di sbarramenti di altezza maggiore di 20 metri che accumulano volumi d'acqua imponenti (circa $10^6 m^3$);
- Sbarramenti in quota, situati in zone di alta montagna, all'interno di stazioni sciistiche e utilizzati soprattutto per la produzione di neve artificiale; sono circa 200 e hanno altezze comprese tra 10 e 20 metri, e media capacità di accumulo (tra 10^4 e $10^5 m^3$); questi presentano un elevato livello di rischio dovuto principalmente alla grande affluenza di persone nelle stazioni sciistiche in inverno e in estate;
- Piccoli e medi sbarramenti, ubicati in zone collinari di media quota e utilizzati in gran parte per fini agricoli; si contano un centinaio di opere in questo gruppo con altezze comprese tra i 3 e i 15 metri e con modesta capacità di accumulo (circa $10^3 m^3$); sono opere gestite da piccole collettività o enti, i cui mezzi tecnici e finanziari non sempre garantiscono un adeguato livello di sicurezza; inoltre il livello di rischio è superiore data la presenza di numerosi impianti posti in serie.

Il programma si pone come traguardo lo sviluppo di un sistema di valutazione della vulnerabilità e del monitoraggio degli sbarramenti, oltre a promuovere il coinvolgimento e la sensibilizzazione della popolazione esposta al rischio di collasso.

L'approccio impiegato per affrontare questa sfida è di tipo integrato: da un lato, elaborando metodi di valutazione della vulnerabilità delle opere e dei territori a valle con tecnologie all'avanguardia, e dall'altro, accorpare i risultati ottenuti con il documento *RISBA* per aggiornare ed incrementare le informazioni storiche sui collassi di bacini in territorio trans-frontaliero. Il *RISBA* (Rischio degli SBAramenti artificiali) si inserisce all'interno del progetto ALCOTRA come documento redatto da uno dei partner, il Politecnico di Torino.

Oggetto del documento *RISBA* è la definizione di *Metodi Speditivi per la mappatura delle aree vulnerabili per onde dovute a rottura di sbarramenti*,³ che si occupa della valutazione del rischio in termini numerici, argomento trattato nel successivo paragrafo.

1.2 La Valutazione del Rischio Idraulico

Parlando di sbarramenti di competenza regionale, è stata sottolineata l'importanza di avviare un processo decisionale che consiste nell'analisi di un'area per valutare gli effetti sull'uomo e sulle sue attività derivanti dall'esposizione all'azione di eventi presenti nell'ambiente considerato; il processo appena descritto viene definito analisi di rischio.

L'analisi del rischio si rende necessaria laddove le opere debbano adattarsi ai bisogni odierni di riduzione dei costi economici e ambientali, per le quali non possa operarsi un sovradimensionamento strutturale, fattore che probabilmente è rappresentativo della longevità di molte opere di sbarramento realizzate in passato, su basi per lo più empiriche. In questo senso le opere moderne devono essere "mirate" a rispettare tali criteri.

All'interno dell'analisi si riconosce quindi uno scenario di rischio (nel nostro caso rappresentato dal collasso dell'opera e il conseguente rilascio dell'onda), ma in generale si tratta di fenomeni potenzialmente pericolosi che hanno origine naturale ma sono indirettamente legati all'azione antropica, ovvero rischi naturali ma indotti dall'uomo. Inoltre, si esaminano gli elementi esposti al rischio (presenze umane, proprietà, infrastrutture, attività industriali, beni culturali, risorse naturali) a cui viene associato un valore monetario. A questo proposito, il rischio rappresenta la misura di un costo su base statistica, espresso in termini monetari, in modo da considerare la sua dipendenza funzionale dal soggetto o dal territorio di indagine⁴.

Il rapporto UNESCO, redatto da Varnes & IAEG nel 1984, introduce una definizione, scientificamente adottata, che rappresenta il prodotto di più fattori che concorrono a comporre il rischio:

$$R = P \cdot D_p \cdot V$$



Figura 1.2 - Rappresentazione grafica dei parametri che concorrono alla definizione di rischio

- P = Pericolosità, rappresenta la probabilità che un dato fenomeno potenzialmente dannoso, di data intensità, si verifichi in una data area e in un determinato periodo di tempo. Dal momento che si tratta di una probabilità, questo fattore assumerà diversi valori dipendenti dalla base temporale annua considerata, o più precisamente, dal tempo di ritorno (numero medio di anni che intercorrono tra il verificarsi di due eventi successivi). Il tempo di ritorno cioè indica l'intensità dell'evento in una certa area.
- D_p = Danno Potenziale, è il valore economico o il numero degli elementi esposti al rischio nella data area (in particolare, per un certo oggetto materiale, la valutazione si basa sul valore dell'oggetto ammortato nel tempo). Gli elementi a rischio, come già detto, sono i soggetti, i beni e le attività esistenti nell'area che possono subire danni a seguito del realizzarsi dell'evento, ma l'impossibilità di attribuire un valore monetario alla vita umana impone di scindere il computo del rischio tra beni materiali e persone. Per questo motivo esistono diversi metodi di valutazione, dall'utilizzo speditivo di carte tematiche dell'uso del suolo (CORINE) alla stima qualitativa del valore complessivo per una certa porzione di territorio (analisi di tipo *aggregated*), dall'impiego di funzioni di utilità o di formule empiriche fino ad un'analisi discreta, in cui si moltiplica il valore del singolo elemento per il numero di elementi della stessa categoria presenti sul territorio (analisi *object oriented*).
- V = Vulnerabilità, è la propensione degli elementi interessati a subire danneggiamenti in conseguenza alle sollecitazioni indotte da un evento di una certa intensità. Dalla definizione stessa di vulnerabilità è evidente come questo fattore non sia funzione delle sole caratteristiche fisiche dell'elemento oggetto di studio: è altresì importante l'intensità e la tipologia dell'evento. Una funzione complessa è derivata dalla stima di questo coefficiente, dove la difficoltà è dovuta principalmente alla vastità delle categorie di elementi esposti e alla specifica modalità con cui ogni elemento risponde all'evento. Per superare questa difficoltà si stabilisce un range di valori che il parametro può assumere, compreso tra 0 (nessuna perdita) e 1 (perdita totale). Stabilire un valore massimo consente di evitare di dover realizzare uno specifico studio di vulnerabilità, che risulta altrimenti obbligatorio quando si vuole indagare la relazione *intensità della piena-danno* per il singolo elemento.

Al fine di computare l'intensità della piena, in letteratura scientifica, è accettata la possibilità di descrivere l'evento mediante due semplici grandezze fisiche note dalle analisi idrauliche: altezza d'acqua h e velocità u dell'onda di dam-break. I valori locali raggiunti dalle due grandezze consentono di valutare le forze agenti sull'oggetto investito dall'onda ed infine estrarre dal modello un valore di V inferiore o pari all'unità.

Dunque, per un generico bene esposto al rischio si può scrivere:

$$V = c \cdot h^\alpha \cdot u^\beta$$

dove c, α, β sono coefficienti adimensionali funzione dell'oggetto. Più in generale:

$$V = h \cdot u$$

Tra i sistemi di classificazione che consentono di attribuire un livello di gravità, in base alla valutazione del danneggiamento dei beni materiali, sono di interesse per questa trattazione gli studi di Sangrey (1975), Black (1975), Clausen e Clark (1990) relativamente alle strutture murarie e lo studio Federal Emergency Management Office (1979) per ciò che riguarda i beni non

quantificabili in termini monetari. Di nuovo, sulla scelta degli studi considerati, pesa il criterio di separazione della valutazione del danneggiamento dei beni da quella relativa alle vite umane.

Una volta compreso il significato dei fattori che concorrono alla definizione del rischio, si deduce quanto sia importante, al fine di ottenere un'analisi completa: associare ad ogni sbarramento una probabilità di collasso, determinare l'intensità dell'onda di dam-break in funzione della distanza dallo sbarramento, quantificare la suscettibilità degli elementi esposti in base alle caratteristiche dell'onda, desumere in modo semplice il valore economico dei beni a valle della diga.

Non è semplice dunque conciliare questa quantità di dati, non sempre completa o addirittura insufficiente, con la necessità di disporre di un'analisi di rischio speditiva e allo stesso tempo robusta. A questo si aggiunge il fatto che quella sulla vulnerabilità sia un'ipotesi forte, che sì, considera le forze di galleggiamento verticale e di trascinamento orizzontale subite dal corpo, tuttavia trascura fenomeni importanti come l'erosione e il deposito del materiale solido, oppure la presenza di elementi solidi flottanti investiti dalla piena, come anche la durata e la rapidità dell'evento.

Quelli appena citati rappresentano quindi i maggiori limiti dell'analisi; non è raro allora dover ricorrere ad un'analisi degenerare in cui uno solo dei tre parametri (in genere P oppure V oppure una loro combinazione) diventi rappresentativo del livello di rischio globale: con questa assunzione si introducono forzatamente degli errori sistematici che è necessario stimare. Dal momento che il fattore più complesso e laborioso da determinare risulta essere il D_p , in molte formulazioni viene sostituito dal grado di esposizione E , che risulta vantaggioso sull'aspetto della rapidità di valutazione. La formulazione diventa:

$$R = P \cdot V \cdot E$$

Il carattere speditivo risiede nella possibilità di acquisire le informazioni dedotte da più fonti, quali fotografie aeree, informazioni note dalla cartografia tecnica e dagli elaborati di pianificazione urbanistica e territoriale, oppure raccolte durante i sopralluoghi. Da qui si associano alle aree con caratteristiche comuni dei livelli crescenti di esposizione, che possono essere più numerosi in base al livello di dettaglio da raggiungere:

- E1: aree disabitate o non produttive;
- E2: case sparse, infrastrutture viarie minori, zone agricole o a verde pubblico;
- E3: nuclei abitati, insediamenti industriali/artigianali/commerciali e turistici, infrastrutture viarie.

1.2.1 Curve di vulnerabilità

Si è visto quanto la vulnerabilità possa essere un fattore complesso da determinare, a causa della diversa natura e connotazione fisica degli elementi esposti al rischio, il che comporta la scelta di normalizzare il range di valori rispetto ad un valore limite, per il quale si assume V pari all'unità, e di stimare i due parametri fisici h, u per avere un indicatore sufficientemente esaustivo.

La difficoltà di correlare l'intensità di piena al danno e quindi giungere alla costruzione di curve di vulnerabilità è un argomento dibattuto e oggetto di sviluppo in letteratura. Usualmente la relazione che intercorre tra l'intensità di piena e il danno prende il nome di funzione di danno o curva di vulnerabilità. Le funzioni o curve di vulnerabilità correlano dunque l'intensità dell'evento, espresso in termini di prodotto fra velocità e profondità del tirante idrico, al conseguente danno in relazione alla tipologia di elementi esposti.

Considerando un piano cartesiano sulle cui ascisse si pongono le velocità u e sulle ordinate le profondità d'acqua h corrispondenti, si otterrà una famiglia di curve iperboliche rappresentative di tutti gli stati possibili di vulnerabilità, una volta noti h e u . Nell'espressione precedente $V = c \cdot h \cdot u$, il termine c rappresenta un coefficiente di forma della curva. Si osservano inoltre delle soglie limite:

- $V = 0$ si verifica quando uno dei due fattori è nullo, pertanto corrisponde ai due assi cartesiani;
- $V = 1$ rappresenta la condizione di massima vulnerabilità per l'oggetto in studio, in virtù dell'intervallo $0 \div 1$ adottato;
- $0 < V < 1$ racchiude tutti gli stati intermedi tra le due soglie appena citate.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi, vengono adottati i valori estratti da differenti studi³ che sono riassunti nelle tabelle seguenti e riportano la vulnerabilità nei confronti di correnti di diversa intensità, distinguendo tra soggetti umani (analisi condotte presso la Colorado University e la Helsinki University of Technology) e beni materiali (elaborazioni di Clausen e Clark⁵ per strutture in mattoni e cemento armato, mentre relativamente alle aree non urbanizzate sono stati estrapolati valori maggiori in quanto le aree sono meno sensibili).

RISCHIO PERDITA DI VITE UMANE	
$u \cdot y \text{ [m}^2 / \text{s]}$	
Semplice inondazione	< 0.5
Danni strutturali limitati	$0.5 \div 1.5$
Distruzione totale	> 1.5

	RISCHIO BENI AREE URBANIZZATE	RISCHIO BENI AREE NON URBANIZZATE
	$u \cdot y \text{ [m}^2 / \text{s]}$	$u \cdot y \text{ [m}^2 / \text{s]}$
Danno limitato	< 3	< 5
Danno parziale	$3 \div 7$	$5 \div 10$
Danno totale	> 7	> 10

Tabella 1.1 - Soglie di vulnerabilità in funzione della velocità e della profondità di corrente

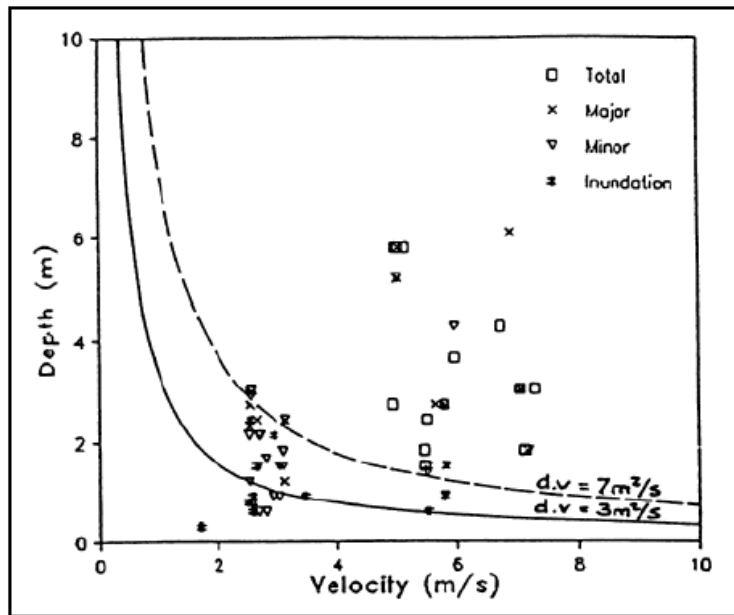


Figura 1.3 - Esempio di distribuzione dei dati sperimentali rispetto alle curve elaborate da Clausen & Clark

Il valore massimo del prodotto $u \cdot y$ rilevabile in corrispondenza di ogni sezione a valle dello sbarramento risulta fondamentale, perché consente di stimare la distanza minima dallo sbarramento cui collocare, in funzione del rischio accettato, insediamenti produttivi e umani. Dati essenziali sono dunque la forma della breccia e dell'invaso, nonché la geometria e i parametri idraulici dell'alveo.

È quindi indispensabile studiare l'orografia del territorio e la propagazione dell'onda di piena.

1.3 Finalità del lavoro di tesi

Il presente lavoro di tesi affronta la questione della valutazione del rischio concentrandosi sull'aspetto fisico del problema, andando a simulare lo scenario di collasso per ottenere una descrizione dell'onda di dam-break in termini di grandezze fisiche. L'elaborato intende proseguire un percorso già avviato precedentemente ed arricchire il catalogo di dati a disposizione al fine della stima della vulnerabilità all'interno dello scenario di rischio. In particolare, si indaga il caso del collasso parziale di uno sbarramento rappresentativo della maggior parte degli invasi di competenza regionale sul territorio della regione Piemonte.

Il lavoro consiste nella realizzazione di modello fisico sperimentale, dalla fase iniziale di progetto alla sua costruzione. Il nuovo set-up sperimentale è concepito sullo stampo del set-up precedente in termini di dinamica e meccanismi, modificando solo gli aspetti che hanno presentato criticità. In particolare, viene affrontata la problematicità di un piano di valle poco esteso in direzione trasversale (rispetto all'asse della breccia) e la presenza di deformazioni del piano confrontabili con le altezze d'acqua misurate, frutto dell'impiego del legno come materiale costituente il piano di valle. Si dimostrerà che la configurazione adottata per il nuovo set-up è esente da questi limiti, risolti rispettivamente, ampliando il piano di valle allagabile e optando per una configurazione in cui il pannello che costituisce la superficie di scorrimento dell'acqua viene reso collaborante con le travi di alluminio su cui il pannello giace.

Il modello in scala ridotta, allestito nel *Laboratorio di Idraulica Giorgio Bidone* del Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture, è costituito da un serbatoio di dimensioni 3,4 x 0,9 x 0,5 metri, dotato di breccia di forma variabile a seconda del modello evolutivo adottato. La chiusura ermetica del serbatoio è assicurata da un sistema di elettrocalamite, la cui disattivazione comporta l'apertura istantanea di una paratoia, simulando lo scenario di collasso parziale di una diga in terra e il conseguente svuotamento dell'invaso. A valle è prevista la realizzazione di un light box, caratterizzato alla base da una superficie liscia e piana di dimensioni 3,4 x 6,3 metri e condizioni di illuminamento uniforme, sulla quale l'acqua è libera di espandersi. I dispositivi di acquisizione sono montati sul soffitto della camera e controllati da remoto.

Particolare importanza assume la metodologia di acquisizione dei dati basata sul processamento di immagini digitali, strumento con il quale saranno successivamente dedotti il campo di altezze d'acqua e la posizione del fronte d'onda, una volta completata la costruzione del modello fisico. Nell'ambito di questa tecnica, al fine di testare la metodologia e riconoscerne limiti e criticità, si è deciso di applicare il metodo ad una realtà locale che caratterizza l'onda di dam break: l'attenzione è rivolta a quella frazione di onda comunemente indicata come vena effluente, che si genera durante il fenomeno idrodinamico ed è localizzata in prossimità della breccia e prospiciente il territorio di valle. L'analisi è condotta attraverso un approccio di tipo euleriano, soffermandosi sullo studio della traiettoria delle particelle che costituiscono la vena, allo scopo di verificare la validità del teorema di Torricelli in questo contesto.

2 Stato dell'arte

Per condurre le sperimentazioni è stato necessario dapprima capire come affrontare i problemi inerenti alla strumentazione e alle operazioni pratiche da eseguire durante la costruzione e la campagna di esperimenti, ma anche come definire le condizioni teoriche per cui l'esperimento può essere considerato valido.

Dunque, è importante fin da subito definire le basi teoriche per le quali vale questo lavoro: in questo caso viene in aiuto la letteratura scientifica e l'insieme di studi affini che hanno già affrontato il problema della rappresentazione dell'onda di dam-break tridimensionale. I più importanti studi che trattano l'argomento vengono citati nel seguito; da questi sono state estratte informazioni sulla strumentazione, sulle procedure operative e in generale sulle accortezze necessarie al corretto svolgimento del lavoro. Agli aspetti più significativi e utili per questa trattazione è stato dedicato un sotto-paragrafo.

Gli articoli considerati sono i seguenti:

- Aureli, Maranzoni, Mignosa, Ziveri (2008) "Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling." ⁶
- Aureli, Maranzoni, Mignosa, Ziveri (2011) "An image processing technique for measuring free surface of dam-breaks flows." ⁷
- LaRocque, Imran, Chaudhry (2013) "Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows." ⁸
- Aureli, Dazzi, Maranzoni, Mignosa (2014) "A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom." ⁹
- Cordero, Cagninei, Poggi (2018) "Three-dimensional evolution of a dam-break flow: construction and calibration of a physical model." ¹⁰

2.1 “Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling” ⁶

Il primo studio esaminato ha l’obiettivo di simulare il fenomeno del dam-break tridimensionale, la cui procedura è la stessa riprodotta nel qui presente lavoro di tesi: imponendo il collasso improvviso della diga tramite la rimozione istantanea di una saracinesca, si studia la variazione rapida di livello in canali o valli a superficie libera, al fine di ottenere dati relativi a velocità e altezze d’acqua, e allo scopo ultimo di calcolare il rischio di alluvione causato dall’evento catastrofico.

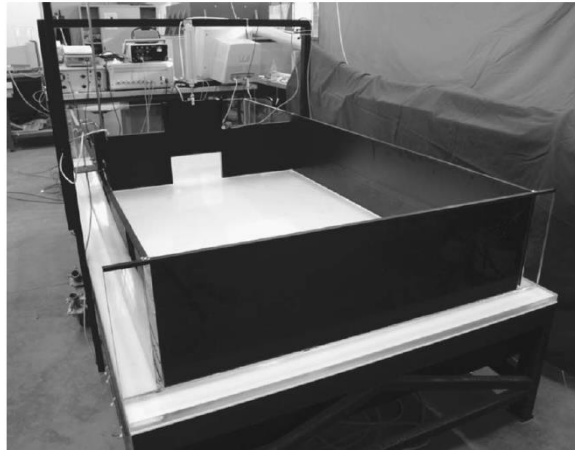


Figura 2.1 - Set-up sperimentale utilizzato da Aureli et al.

Le condizioni del letto di valle non sono fisse, in quanto è noto dall’idraulica che il tipo di flusso che si instaura è condizionato dalla topografia del territorio: contrazioni ed espansioni delle valli, il fondo d’alveo irregolare e variabile, la presenza di strutture ed ostacoli e altri fattori inducono improvvisi cambiamenti nel flusso, che si concretizzano in urti, collisioni, riflessioni d’onda, nonché fenomeni più complessi come i risalti idraulici. Per esplorare questi fenomeni fisici sono state condotte quattro prove con differenti caratteristiche dell’area inondata di valle, ovvero un piano orizzontale confinato da pareti verticali che provocano la riflessione dell’onda qualche istante dopo l’apertura della paratia e l’espansione dell’onda nel piano; ogni prova differisce in base ai caratteri specifici da investigare:

- Condizioni di letto asciutto
- Condizioni di letto umido
- Sistemazione di un ostacolo sommergibile in condizioni di letto asciutto
- Sistemazione di un ostacolo affiorante in condizioni di letto asciutto

I dati sperimentali raccolti in questo studio riguardano esclusivamente il campo di altezze d’acqua raggiunto dall’onda, mentre non si va ad indagare il campo di velocità. Per estrarre queste informazioni è stata utilizzata una tecnica di *imaging* che permette di ottenere misure spazialmente distribuite (sul piano), caratteristica di particolare importanza, come si riporterà più volte in questa trattazione. La tecnica, spiegata in semplici passaggi, consiste nel raccogliere una serie di scatti dell’area allagabile di valle attraverso una fotocamera montata qualche metro al di sopra del piano, e

convertire i fotogrammi acquisiti in scala di grigi in valori di profondità d'acqua tramite le funzioni derivanti dalla calibrazione statica. La buona qualità delle immagini scattate è garantita dal contrasto ottico che si crea utilizzando per l'area di valle una superficie opaca retroilluminata, e per l'acqua un colorante (blu di metilene).

Successivamente alla conversione in valori numerici, le profondità d'acqua sono confrontate con i dati forniti da alcune sonde a ultrasuoni, per verificare l'attendibilità della tecnica di imaging: sul totale delle osservazioni effettuate, il 95% di queste ha presentato una deviazione standard non superiore al 20%.

Infine, è stato impiegato un modello numerico ai volumi finiti (MUSCL-Hancock 2D), il quale risolve in modo integrale le equazioni shallow-water 2D, per eseguire un'analisi globale delle distribuzioni di frequenza relative alla deviazione tra risultati numerici e sperimentali: la conclusione raggiunta è che il modello è in grado di riprodurre con sufficiente precisione il campo di moto e le sue caratteristiche, malgrado si evidenzino delle differenze locali da ricondurre a una discreta tendenza del modello a sottovalutare la profondità dell'acqua.

Nel seguito vengono esaminate nel dettaglio le caratteristiche più rilevanti dello studio.

- **L'aspetto sperimentale dello studio**

Il modello 2D impiegato in questo studio ha lo scopo di predire le caratteristiche dell'inondazione spingendosi oltre la stima delle altezze d'acqua, raccogliendo informazioni anche sull'estensione delle aree alluvionate, sui tempi di inondazione e, fattore non meno importante, sulle velocità del fronte d'onda. La teoria che sta alla base del calcolo si riconduce all'ipotesi shallow-water 2D, (SW2D, letteralmente "acque basse", che si materializza in un sistema di equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto) e descrive un campo di flusso in un alveo caratterizzato da sezioni con larghezza superiore al tirante idrico di circa un ordine di grandezza.

La complicazione esiste dal momento che, sebbene le equazioni SW2D siano soddisfatte, non lo sono invece completamente le equazioni di De Saint Venant, in particolare nelle immediate vicinanze della paratia e in corrispondenza di forti curvature. Proprio a causa di questo aspetto, è necessario procedere risolvendo le SW2D numericamente. L'attendibilità dei risultati numerici a questo punto andrebbe confrontata con soluzioni analitiche mono e bi-dimensionali, e le conclusioni sarebbero tratte di conseguenza. Tuttavia, non sono state trovate soluzioni analitiche 2D concernenti fenomeni di dam-break dagli autori dello studio.

Da qui emerge la necessità di realizzare prove di laboratorio, a conferma della tesi esposta qui sopra. Lo stesso bisogno accomuna il presente lavoro di tesi con la trattazione realizzata dagli autori dello studio.

L'importanza della disponibilità di dati sperimentali non risiede esclusivamente nella possibilità di validare codici numerici, ma è un tratto indispensabile per una completa comprensione del concetto fisico e la previsione dei fenomeni di flusso superficiale libero.

- **La tecnica di misurazione**

Per simulare il fenomeno dell'onda di piena è stata allestita una vasca rettangolare, nella quale è stata sistemata una barriera dotata di paratia mobile, che separa e trattiene il liquido contenuto nel serbatoio di monte (indeformabile per ipotesi) dall'area allagabile di valle. La saracinesca è realizzata in modo che la sua apertura possa ritenersi istantanea (0,08 secondi per il sollevamento dalla base al pelo libero).

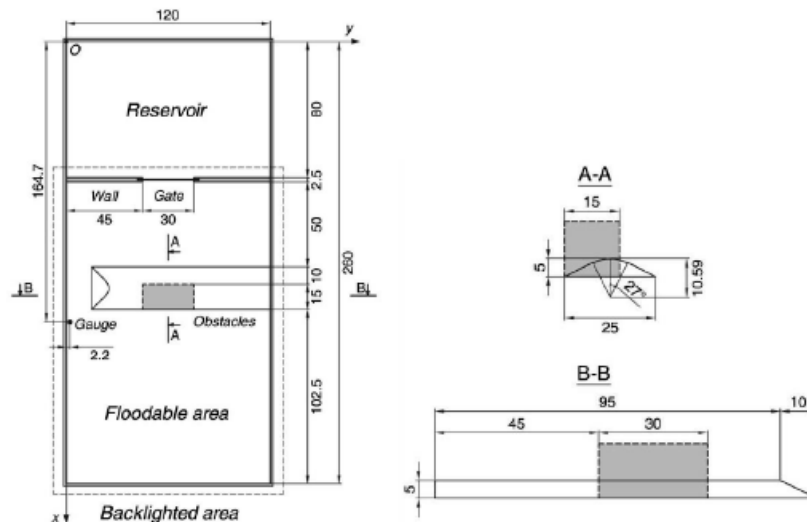


Figura 2.2 - Dimensioni (cm) dell'attrezzatura sperimentale impiegata

Le procedure seguite per ottenere i valori del tirante idrico sono l'aspetto più rilevante di questo studio.

In primo luogo, assume particolare importanza il modo in cui è stata preparata la zona allagabile:

- Fondo opaco retroilluminato con lampade fluorescenti, con intensità 6 f-stop, in modo che la luminosità risulti maggiore della luce naturale;
- Miscela di acqua e blu di metilene immagazzinata nel serbatoio, con lo specifico obiettivo di intensificare l'assorbimento della luce;
- Stanza oscurata per mezzo di tende posizionate sui lati della struttura per impedire l'ingresso della luce solare;
- Pareti interne del piano allagabile, saracinesca compresa, rivestite di materiale nero opaco per ridurre la riflessione della luce artificiale;

In secondo luogo, la bontà dei risultati finali dipende fortemente dalle capacità tecniche dei dispositivi di acquisizione dei dati:

- Impiego di una camera digitale SLR (Canon EOS 10D) posizionata sull'asse verticale dell'area di valle in modo da inquadrare l'intero piano; la fotocamera è stata preferita ad una videocamera per la possibilità di acquisire i fotogrammi in formato RAW (naturale), quindi senza alterazione del valore dei pixel (introdotta per esempio da una compressione JPEG);

- La fotocamera è in grado di acquisire 9 frame a circa 3 Hz, oppure 1 frame a 0,56 Hz con il riempimento del buffer (memoria temporanea);
- Immagini nel formato originale RGB 16 bit convertite in immagini in scala di grigi a 8 bit.

Prima di avviare la simulazione attraverso l'apertura della saracinesca, è stato necessario compiere una calibrazione spaziale della fotocamera. La taratura infatti è una fase indispensabile, dalla quale è possibile apprezzare i disturbi esterni o disturbi locali dovuti ad anomalie nell'assorbimento della luce, ad ostacoli o alla disuniformità nell'illuminazione. La calibrazione è stata effettuata sulla superficie retroilluminata in presenza di acqua colorata a riposo, per spessori d'acqua compresi tra 1 e 15 cm.

Dalla calibrazione si deriva infine la funzione di trasformazione tra i toni di grigio (0 – 255 bit) e i valori di tirante (0 – 15 cm).

Sebbene nella tecnica di Imaging siano state adottate le misure più appropriate per eliminare le possibili fonti di errore (ad esempio, la scelta di annerire pareti e saracinesca per evitare riflessi anomali della luce contro la parete), alcuni fenomeni prescindono da una buona conduzione dell'esperimento e devono essere trattati a posteriori mediante la post-elaborazione dei dati. Una prima causa è l'intrappolamento di bolle d'aria di dimensioni non trascurabili che provocano riflessi anomali che scuriscono i bordi: in termini di funzione di trasformazione, ciò equivale ad una sovrastima della profondità d'acqua, ed ha come unica possibile soluzione, escludendo un banale scarto del dato, la manipolazione dei pixel nell'intorno del punto in questione.

2.2 “An image processing technique for measuring free surface of dam-breaks flows” ⁷

Il secondo studio si collega direttamente al primo, in quanto realizzato dagli stessi autori sullo stesso set-up e con l'intento di sviluppare un metodo di *imaging* per la misura della superficie dell'acqua, basato sull'assorbimento della luce, in flussi rapidamente variabili con carattere bidimensionale. L'esperimento si realizza tramite l'acquisizione di immagini che registrano l'evoluzione nel tempo della superficie per mezzo di una fotocamera; una volta effettuata l'elaborazione delle immagini in diversi formati, si attua il confronto dei dati ottenuti con le misure fornite da dispositivi a ultrasuoni; ciò è utile per giudicare la validità del processo adottato.

A partire da due diversi formati di immagine, si osserva come la precisione di questa tecnica di *imaging* sia paragonabile a quella dei convenzionali trasduttori a ultrasuoni, pertanto si mostra strumento efficace per la validazione di dati sperimentali.

La misura della profondità d'acqua è già da anni oggetto di numerosi studi che hanno proposto le più svariate tecniche di acquisizione, ognuna con i propri vantaggi e aspetti critici. Un criterio di scelta che induce a preferire una tecnica a discapito di un'altra è la capacità di evitare l'interferenza con il flusso. Per questo motivo tutte le tecniche di seguito citate sono metodi ottici non invasivi.

Tra queste, si va dai trasduttori a ultrasuoni comunemente utilizzati per misure in campo reale ai sistemi di scansione laser, dalla stereoscopia ad alta velocità alla più semplice videoregistrazione laterale dei canali di laboratorio, o ancora dalla stereogrammetria ai metodi ottici basati sulla collimazione della luce e sulla matrice di microlenti. Infine, sono noti in letteratura metodi basati sulla riflessione della luce, a cui si preferiscono però quelli basati sulla rifrazione della luce.

Per questi ultimi, il principio fisico consiste nell'uso dell'assorbimento della luce trasmessa attraverso un mezzo liquido per misurare il campo di altezza. Questo rappresenta il punto di partenza per gli autori, che sviluppano un metodo basato sull'assorbimento della luce: a causa dello scarso coefficiente di assorbimento dell'acqua nello spettro del visibile (circa 10^{-2} cm^{-1} a 715 nm), si adotta una soluzione colorata che funge da filtro a densità variabile. Considerato che la distribuzione di luminanza spaziale, prodotta da una sorgente di luce diffusa, dipende dalla lunghezza di penetrazione dei raggi nel corpo idrico, la profondità d'acqua locale viene stimata a partire dai valori RGB registrati applicando un'adeguata funzione di trasformazione, derivata da una calibrazione preliminare distribuita.

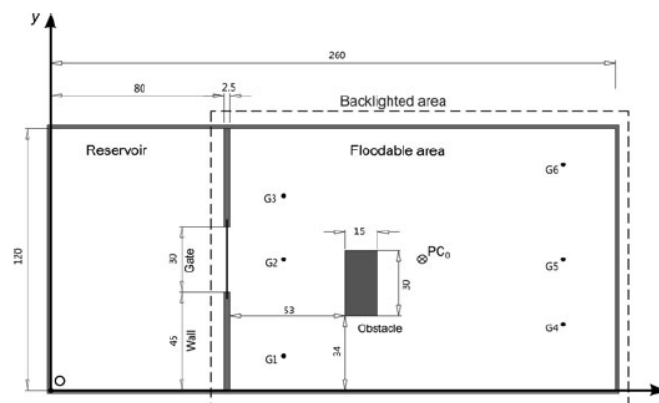


Figura 2.3 - Dimensioni (cm) dell'attrezzatura sperimentale. PC indica la proiezione ortogonale del centro della camera

- **La tecnica di misurazione**

Il set-up sperimentale rimane lo stesso dello studio precedente⁶ mentre è diverso il dispositivo digitale per caratteristiche tecniche e formato di acquisizione. Anche qui l'esito positivo della sperimentazione è affidato in gran parte alle capacità della fotocamera, in termini di risoluzione spaziale e temporale; tuttavia questa tecnica risulta più semplice e meno costosa di altre tecniche di Imaging superficiale.

- Impiego di una fotocamera DSLR commerciale (Canon EOS 40D) posizionata al di sopra del piano allagabile, con l'asse ottico normale al piano retroilluminato;
- l'acquisizione tramite sensore CMOS (22,4 mm × 14,6 mm) permette di registrare il singolo scatto in uno dei due formati seguenti o in entrambi: formato RAW 14 bit e formato JPEG in RGB 8 bit;
- alla risoluzione spaziale di 2,5 MP la fotocamera è in grado di acquisire 25 frame a 6,5 Hz, modificabile in 1 frame e a 0,21 Hz con il riempimento del buffer.

La procedura di calibrazione spaziale precede l'esecuzione del test e dà modo di apprezzare la diversa penetrazione dei raggi obliqui nel corpo idrico, oltre a soppesare le perturbazioni locali conseguenti a disturbi intrinseci del metodo o ad altri disturbi esterni. Questa si realizza attraverso una procedura di acquisizione automatica di una serie di scatti che catturano l'area retroilluminata sommersa da acqua in quiete, la cui profondità varia dalla superficie del piano al massimo previsto durante i test. È importante osservare che la cattura delle immagini avviene durante lo svuotamento quasi-statico dell'impianto, limitando al minimo il disturbo sulla superficie dell'acqua.

Le immagini sono raccolte nel formato RAW 14 bit e convertite in valori RGB 16 bit, oppure nel formato JPEG vengono convertite internamente alla fotocamera e sottoposte a compressione. È da questi che si derivano le funzioni di trasferimento locali per i canali Red, Green, Blue e per la Luminanza, rappresentate da curve non lineari che esprimono la relazione tra tono di colore e altezza d'acqua. Si osserva che la concentrazione di colorante è stata scelta in modo tale da sfruttare la massima sensibilità nella gamma di profondità d'acqua prevista (0 – 6 cm), ma che il campo di misura può essere aumentato riducendo la concentrazione dell'agente colorante. Tuttavia, una riduzione di concentrazione porta con sé lo svantaggio di una minore sensibilità complessiva.

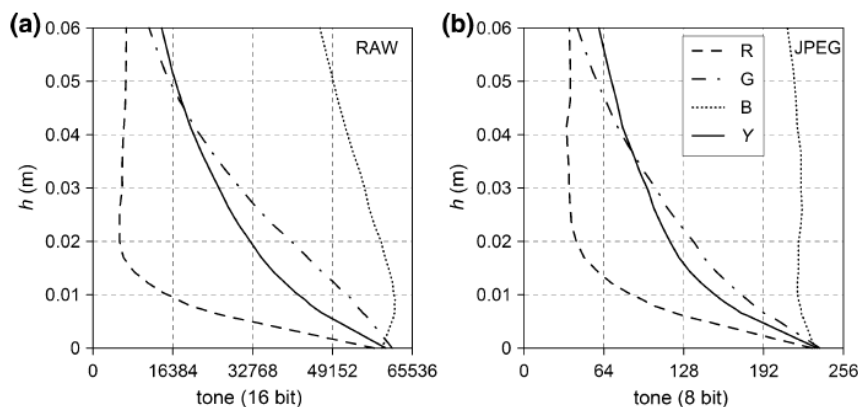


Figura 2.4 - Funzioni di trasferimento per i canali R, G, B e per la Luminanza Y nei formati RAW (a) e JPEG (b)

Una volta terminata la calibrazione, è possibile avviare il test eseguendo diverse prove sul flusso in movimento: le prove di dam-break differiscono tra loro in base alle condizioni imposte a monte e a valle della saracinesca, che corrispondono a quelle eseguite nello studio di Aureli e al. (2008)⁶. In questa fase viene acquisita, per ciascuna prova, una raffica di immagini per tracciare l'evoluzione spazio-temporale del fenomeno.

Note le funzioni di trasferimento dalla calibrazione spaziale, non resta che processare i dati acquisiti nelle prove per ricostruire il campo di profondità del flusso: ciò significa trasformare le immagini digitali in ortofoto, il che avviene associando ad ogni pixel della superficie del sensore le corrispondenti equazioni di collinearità, da cui infine si stima il campo di altezze.

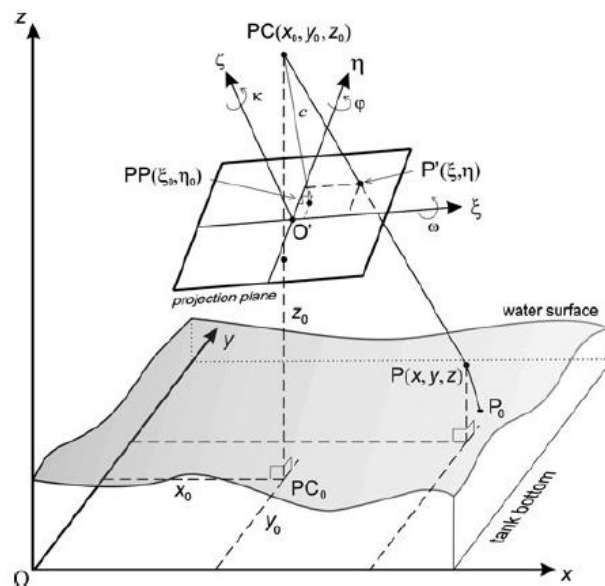


Figura 2.5 - Schema rappresentativo della relazione che intercorre tra coordinate del punto oggetto (P), coordinate del punto immagine (P') e centro di presa (PC)

- **Effetto della pendenza superficiale del corpo idrico**

Dal momento che il principio di misura della tecnica di Imaging si basa sull'assorbimento della luce da parte del liquido, non si può prescindere dall'effetto di rifrazione che inevitabilmente si crea durante il flusso. In particolare, si osserva che la luminanza relativa ad un generico punto di rifrazione dipende tanto dall'altezza d'acqua quanto dalla pendenza della superficie: proprio a causa della pendenza, la superficie libera rifrange i raggi che penetrano nell'acqua estendendo il loro percorso.

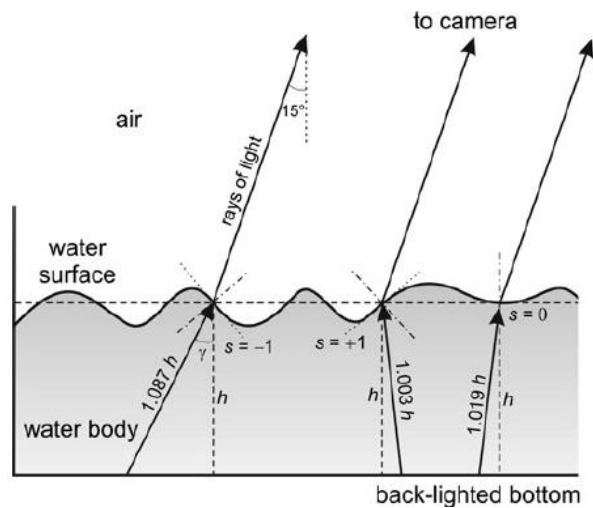


Figura 2.6 - Effetto della pendenza superficiale sulla stima della profondità d'acqua

Per limitare l'effetto è opportuno adottare un sistema di Imaging telecentrico, in cui vengono rifratti solo i raggi collimatori verticali, come se il punto di presa della fotocamera fosse posizionato a distanza infinita. Nelle condizioni ideali di distanza infinita però, la porzione di superficie catturata dall'immagine non potrebbe essere più grande dell'area corrispondente alla lente frontale della fotocamera; questo renderebbe la tecnica non adatta ad una vasca di dimensioni maggiori di circa 10 cm, a meno di costi e difficoltà tecniche elevate. Di conseguenza, dato che nella realtà la condizione esposta non è raggiungibile, la soluzione più consona sembra essere quella di posizionare la camera il più in alto possibile dalla superficie del piano di valle. A causa di limiti operativi che non consentono di raggiungere altezze superiori a qualche metro, l'effetto può essere ridotto ma non eliminato completamente.

L'errore complessivo commesso a causa della pendenza superficiale è del 6,7%, che equivale a 2 mm per un'altezza d'acqua di 3 cm. Infine, a causa dell'ottica non telecentrica, è necessario effettuare la procedura di calibrazione e correggere l'errore di parallasse.

- **Verifica della validità del test**

Scopo principale dello studio è dimostrare l'efficacia della tecnica di Imaging adottata confrontandola con i valori di profondità d'acqua forniti da una serie di sonde a ultrasuoni distanziometriche, posizionate in diversi punti dell'area inondabile.

A meno di un elevato numero di *outlier* dovuti a perdite di segnale causate da forti pendenze superficiali (che è necessario rilevare e rimuovere nella fase di processamento dati), è possibile affermare, dal confronto tra i risultati derivati dall'elaborazione immagini e le serie temporali della profondità acquisite dai trasduttori, che la precisione raggiunta sia simile. Questa conclusione avvalorata la scelta di impiegare una tecnica di imaging non intrusiva e capace di fornire informazioni su un campo di flusso esteso, e accredita la tesi per la quale essa sia preferibile ai

misuratori puntuali in quanto consente un'indagine approfondita di flussi caratterizzati da un'elevata variabilità spaziale.

Riguardo alla modalità di acquisizione delle immagini, si osserva che entrambi i formati sono in grado di riprodurre in modo accettabile le serie temporali, in tutte le posizioni del piano e per tutta la durata del transitorio, finché l'acqua non torna a riposo. Nonostante la compressione a perdita di dati delle immagini in formato JPEG, i risultati relativi alle immagini in formato JPEG 8 bit sono paragonabili al formato RAW 16 bit.

2.3 “Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows”⁸

Il terzo articolo tratta il fenomeno fisico del dam-break in forma mono-dimensionale, allo scopo di trarre risultati che indagano diversi campi di interesse. L’apertura improvvisa di una paratoia all’interno di un canale allestito in laboratorio genera un’onda di piena in rapido movimento che si propaga verso valle: da quest’onda si traggono dati relativi alle sue caratteristiche spazio-temporali, in particolare misure sperimentali di profili di velocità, altezze d’acqua e informazioni sui fenomeni di turbolenza che si creano a monte e a valle dello sbarramento. In parallelo alle prove sperimentali, il fenomeno del dam-break viene riprodotto attraverso un solutore numerico di fluido dinamica (*FLUENT*), basato sul modello del volume di fluido (VOF), per valutarne la veridicità.

I risultati dello studio si possono sintetizzare in cinque punti:

- La modellazione della turbolenza non influenza il profilo di velocità nel serbatoio di monte, mentre assume un peso significativo sulla previsione della velocità a valle;
- Il modulo della velocità in punti noti dello spazio si modifica nel tempo, mentre la forma dei profili di velocità si mantiene simile;
- Rendendo i profili adimensionali, lo spessore dello strato di taglio dei profili di velocità lato serbatoio è pari a circa il 5% del carico totale, nelle diverse posizioni e condizioni di carico iniziali;
- Si è giunti ad una soluzione analitica per flussi di dam-break in condizioni di piano inclinato e assenza di attrito e ad una soluzione numerica per mezzo dell’approccio Large Eddy Simulation (LES), ed entrambe si mostrano in accordo con le misure sperimentali;
- L’approccio LES utilizzato per modellare la turbolenza mostra risultati soddisfacenti e può rappresentare un valido metodo per la previsione dei flussi di dam-break.

Per entrare nel merito di ciascuna di queste considerazioni è necessario capire come è stata allestita la struttura e quali condizioni sperimentali sono state adottate dagli autori. All’interno di un canale liscio di legno con pendenza mantenuta costante, viene stabilito di eseguire tre diversi test in cui viene fatto variare il carico nel serbatoio di monte, per ipotesi indeformabile. Al momento dell’apertura della saracinesca, attivata da un meccanismo a contrappeso e considerata istantanea, l’acqua viene rilasciata sul fondo asciutto del canale di valle.

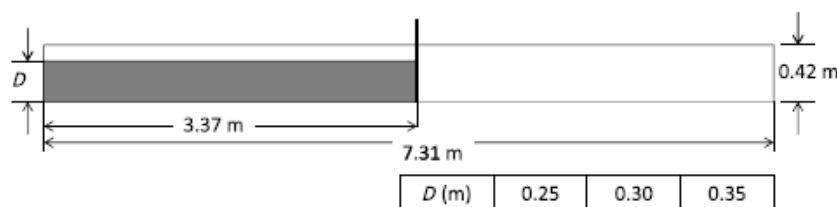


Figura 2.7 - Set-up sperimentale utilizzato da LaRocque et al.

- **Misura sperimentale del campo di altezze**

In questo studio non sono stati impiegati metodi di analisi per immagini per la misura delle altezze d'acqua nell'area inondabile: il rilevamento della superficie dell'evento di dam-break su piano inclinato, asciutto e privo di attrito è stata affidata a sensori di misurazione della distanza a ultrasuoni (Baumer); per questi il principio teorico di misura si basa sull'emissione di un segnale a frequenza sonora di 290 KHz per distanze comprese tra 60 e 400 mm.

Le misure così acquisite sono state impiegate per la validazione dei risultati ottenuti: un primo confronto è stato quello con la soluzione analitica fornita dall'equazione elaborata da Chanson¹¹, che esprime la variazione della profondità d'acqua nel tempo lungo la lunghezza del canale. Il secondo riguarda la collocazione dell'interfaccia aria-acqua calcolata nel modello numerico. Entrambi i confronti si mostrano in accordo con le misure sperimentali.

- **Misura sperimentale dei profili di velocità**

I risultati ottenuti riguardo al campo di velocità rappresentano l'aspetto più significativo dello studio. In particolare, si vogliono ricavare profili di velocità in un flusso altamente transitorio a canale aperto, per mezzo di misuratori ultrasonici doppler (UVP), e in parallelo implementare i risultati stimati dal modello numerico.

Questi sensori sono stati disposti a monte e a valle della saracinesca in diverse posizioni per acquisire i profili attraverso il principio di rilevamento degli impulsi ultrasonori riflessi dalle particelle sospese nel fluido. Esponendo il concetto in modo più chiaro, la sonda emette un fascio ultrasonoro lungo il suo asse e colpisce una particella sospesa, quindi una parte dell'energia del segnale si ripercuote sulla particella e riecheggia in direzione della sorgente: nota la velocità del suono nel liquido, lo strumento deriva la distanza e la velocità della particella. Questo fenomeno presuppone la presenza di una quantità sufficiente di piccole particelle sospese nel liquido, che nel caso in esame risultano essere particelle organiche miscelate nel serbatoio di valle.

Nonostante la presenza di superfici riflettenti, quali i lati e il fondo del canale, la corrispondente lettura di velocità può essere facilmente esclusa, in quanto identificata da picchi significativi. In ogni caso un processo a posteriori sui dati rilevati dalle sonde risulta necessario, visto il carattere transitorio dell'esperimento: è possibile che i misuratori UVP possano contenere rumore bianco e oscillazioni nei dati grezzi, che devono essere manipolati mediante tecniche di filtraggio dei dati.

I risultati dell'analisi sui profili di monte e sui profili di valle danno esito molto diverso: se il confronto mostra un'ottima corrispondenza tra misure e analisi numerica lato monte, lo stesso non si può dire lato valle, dove a causa della bassa profondità d'acqua non è possibile ricavare i profili di velocità.

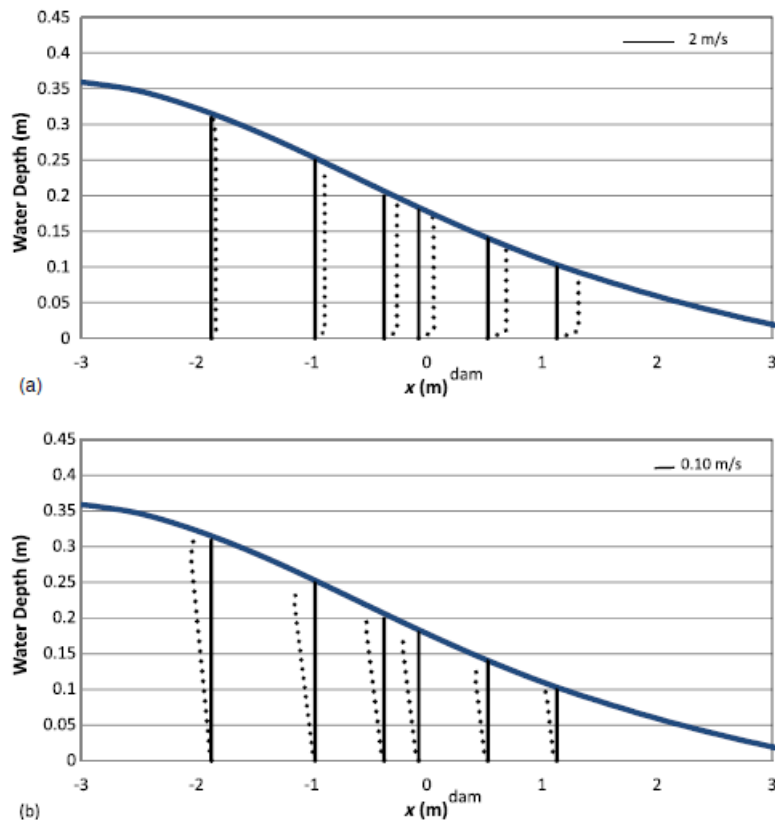


Figura 2.8 - Valori ottenuti dall'analisi numerica delle velocità u (figura a) e v (figura b)

Dai risultati numerici si ottengono informazioni interessanti sui profili di velocità orizzontale $u(x)$ e i profili di velocità verticale $v(x)$. Si osserva che u in un generico punto si mantiene relativamente uniforme in direzione verticale e che il modulo della velocità aumenta gradualmente in direzione del flusso. La velocità v si mostra invece massima vicino alla superficie e decresce linearmente verso il fondo, in corrispondenza del quale si annulla; la sua intensità è massima nel serbatoio.

- **Effetto della turbolenza**

Un ultimo aspetto rilevante riguarda l'effetto della turbolenza sul campo di moto dell'onda di dam-break. È di comune accordo che la turbolenza non giochi un ruolo importante nei flussi altamente transitori dominati dalla gravità, e che si possa applicare al serbatoio di monte la teoria del moto potenziale, mentre a valle si produce un flusso ad alta turbolenza. Sulla base di numerosi studi teorici, gli autori hanno deciso di effettuare le simulazioni con tre approcci distinti: un primo test senza considerare la turbolenza, un secondo con il modello di turbolenza $k - \varepsilon$ e l'applicazione delle equazioni di Navier-Stokes mediate, e infine adottando il modello LES (Large Eddy Simulation) per la modellazione della turbolenza. Per ciascuno di essi il criterio di accettabilità si basa sul valore del RRMSE (errore quadratico medio relativo alla radice).

I risultati ottenuti nello studio evidenziano come il modello $k - \varepsilon$ e il modello con assenza di turbolenza producano una sottostima della velocità a valle della diga e di conseguenza valori RRMSE elevati.

Per contro, l'approccio LES offre una buona corrispondenza con le misure sperimentali sia a monte che a valle dello sbarramento. In particolare, essendo la distribuzione della velocità pressoché uniforme nel serbatoio di monte, la modellazione della turbolenza si rivela non necessaria, e i profili di velocità risultano prevedibili con o senza questa analisi. Al contrario, per la corretta stima del campo di moto a valle della diga, la modellazione deve essere fedele e accurata: la strategia LES prevede con successo la variazione spaziale e temporale dei profili di velocità, e consente di affermare che i profili, a diverse distanze dalla diga e sotto diversi carichi iniziali, si mantengono "autosimili" per quanto riguarda la forma.

Si conclude lo studio affermando che una previsione affidabile è possibile, combinando la soluzione derivante dalle equazioni di Navier-Stokes, la modellazione della turbolenza tramite approccio LES e il modello VOF per il tracciamento della superficie.

2.4 “A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom”⁹

L'articolo seguente si concentra sullo sviluppo di una tecnica di imaging che consiste nella misurazione da remoto della profondità e della pendenza della superficie d'acqua su fondo fisso non orizzontale, basandosi sul principio della rifrazione e dell'assorbimento della luce, e sull'elaborazione simultanea di immagini nel visibile e nell'infrarosso. I risultati ottenuti dall'applicazione della tecnica ad una serie di test in condizioni statiche (modificando l'inclinazione del piano, le forme di fondo e altri fattori) confermano il carattere robusto e preciso della metodologia adottata.

Gli autori dello studio avvalorano il carattere non intrusivo del metodo, giustificando la scelta di una tecnica basata sulla rifrazione piuttosto che sulla riflessione, sulla stereovisione o su metodi acustici, per la capacità con cui essa si adatta a superfici d'acqua rapidamente variabili e pendenze superficiali significative. In particolare, gli autori riprendono un loro studio precedente (qui presentato al capitolo 2.2), in cui il vantaggio di ottenere una precisione paragonabile a quella dei trasduttori a ultrasuoni è però svalutata da una calibrazione spaziale laboriosa e dalla difficoltà di trattare superfici inclinate: è accettabile confondere la profondità di penetrazione del fascio nel mezzo assorbente con la profondità verticale, ma per forti pendenze l'errore non può più essere trascurato.

Quando la tecnica è applicata ad un fondo continuo non orizzontale, si ricorre ad una elaborazione simultanea delle immagini digitali a diverse lunghezze d'onda. Ciò conduce a più osservazioni: le immagini nello spettro del visibile permettono di valutare l'effetto di rifrazione indotto dalla superficie dell'acqua, mentre dalle immagini nell'IR vicino si ricava una stima della profondità di penetrazione del fascio, sfruttando l'elevata capacità di assorbimento dell'acqua in questo intervallo di lunghezze d'onda.

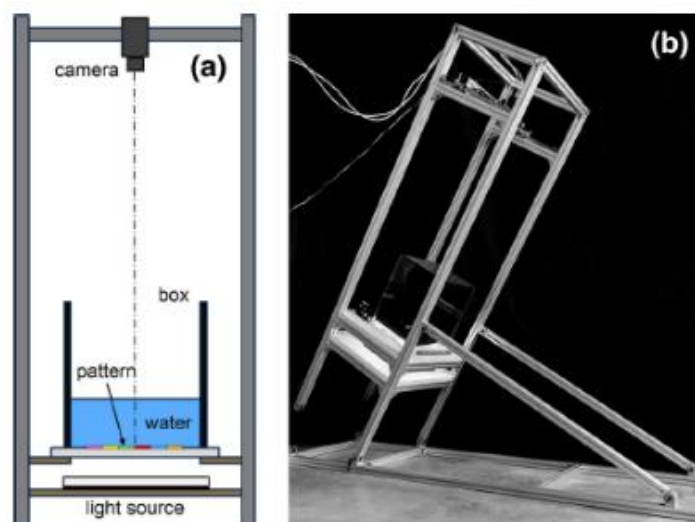


Figura 2.9 - Schema del set-up sperimentale (a) e vista dello stesso in configurazione inclinata (b)

- **Principio di misura**

Per svolgere il test sperimentale, una fotocamera digitale è stata montata su un supporto regolabile e posizionata sopra la superficie dell'acqua con l'asse ottico rivolto verticalmente verso il basso, in modo approssimativamente parallelo alle pareti della struttura. Come già anticipato, l'acquisizione delle immagini avviene simultaneamente nello spettro del visibile e nello spettro degli IR vicino (750 - 1000 nm), rispettivamente attraverso matrice Bayer RGB e sensore monocromatico. Questa scelta è dovuta al fatto che l'uso di IR più vicini alle frequenze della luce rossa si adatta a maggiori profondità, qui dell'ordine dei 50 cm. Sul fondo trasparente della vasca è stato invece applicato uno schermo a colori costituito da un pattern regolare e ben riconoscibile.

Le immagini registrate in condizioni asciutte e successivamente sul piano bagnato danno risultati ben diversi: lo stesso punto A situato sullo schermo a colori corrisponde a diverse posizioni nello spazio immagine, a seconda dell'assenza di rifrazione (A') o in sua presenza (A''). Ciò significa che la rifrazione produce uno spostamento, in corrispondenza dell'interfaccia aria-acqua, di ogni punto del pattern ripreso sul fondo con conseguente modulazione della struttura del pattern stesso.

Quanto appena detto vale per la radiazione nello spettro del visibile; ma anche la radiazione IR subisce la rifrazione all'interfaccia aria-acqua. Si possono tuttavia considerare i due segnali sovrapposti perché l'indice di rifrazione dell'acqua nello spettro IR è circa pari a quello del visibile, che vale 1,33.

È possibile stimare la pendenza superficiale in un generico punto di rifrazione a partire da considerazione geometriche espresse dalla Legge di Snell, che appunto correla gli angoli di rifrazione e incidenza all'interfaccia tra due mezzi:

$$\frac{\sin(\theta - \alpha)}{\sin(\theta - \beta)} = n_w$$

dove α è l'angolo di rifrazione, β è l'angolo di incidenza, n_w l'indice di rifrazione del mezzo liquido e θ la pendenza incognita.

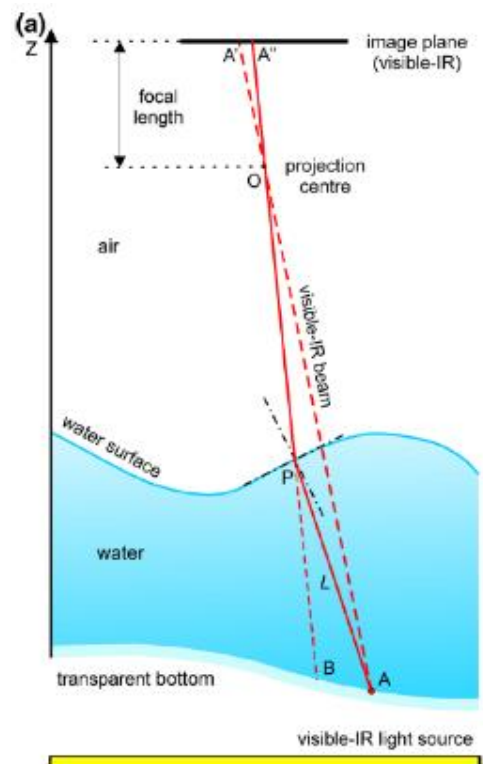


Figura 2.10 - Rappresentazione geometrica del principio di misura

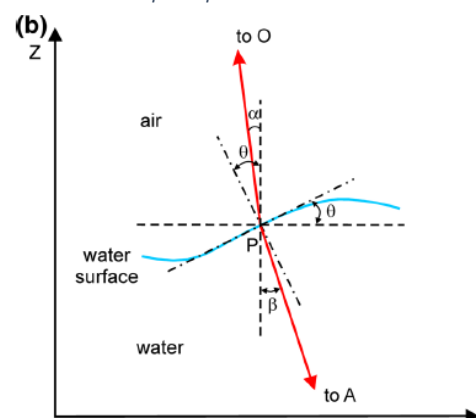


Figura 2.11 - Rappresentazione dei parametri della legge di Snell

- **Procedura sperimentale**

La procedura si compone di tre fasi ed è simile a quella adottata negli studi precedenti: dopo una calibrazione preliminare del sensore del sistema di imaging della fotocamera si eseguono i test in condizioni statiche facendo variare i parametri del sistema, ed infine si elaborano i dati raccolti per la ricostruzione dei campi di profondità e di pendenza locale su tutta la superficie.

La fase di calibrazione è ancora separata in calibrazione interna e calibrazione esterna: la prima, da valutare una sola volta, serve a definire lunghezza focale, i parametri di distorsione radiale e tangenziale e le coordinate del punto principale nel sistema di coordinate dello spazio immagine; la seconda ha lo scopo di valutare, con le equazioni di collinearità, i 6 gradi di libertà del centro di proiezione della fotocamera rispetto al sistema di coordinate dell'oggetto. Questa operazione è da ripetere prima di ogni test, diversamente dalla calibrazione interna, per svincolarsi da eventuali cambiamenti nell'orientamento della fotocamera causati da disturbi esterni.

Il passo successivo è la messa a punto di un sistema che correli l'assorbimento registrato dal sensore IR con la profondità del corpo idrico: ciò si realizza compiendo misure crescenti di profondità d'acqua in condizioni statiche. Dall'attenuazione della radiazione passante attraverso un mezzo assorbente, descritta dalla legge di Lambert-Beer e corretta da un modello di regressione lineare, derivano le curve di profondità – luminanza del modello di assorbimento.

Terminata la calibrazione vengono effettuati i test: si osserva che la stima della lunghezza di penetrazione è meno accurata per strati d'acqua maggiori; per contro, l'errore sistematico relativo (al valore di riferimento) aumenta in modulo per spessori inferiori.

Una volta acquisite le immagini dalla fotocamera, rimane da ricavare le misure, tramite un algoritmo automatico di elaborazione che esegue le operazioni:

- rilevamento degli angoli del pattern colorato nelle immagini a colori (RGB), in entrambe le condizioni asciutte (immagini reali) e bagnate (immagini modulate);
- correlazione degli angoli corrispondenti tra le immagini reali e modulate;
- estrazione delle informazioni riguardanti la lunghezza di profondità locale dalle immagini acquisite nell'IR vicino, attraverso il modello di assorbimento definito;
- ricostruzione del campo di profondità e della pendenza locale dei punti rilevati.

Le conclusioni tratte dallo studio indicano che questa tecnica di misurazione fornisce buoni risultati considerando la semplicità dell'apparato, il carattere non invasivo della tecnica e la capacità di fornire misure spazialmente distribuite su un campo di flusso esteso, su superficie liscia e non necessariamente piana.

Inoltre, considerando le migliori proprietà di assorbimento del IR vicino, non è necessaria l'aggiunta di colorante all'acqua. Infine, dal momento che l'inquadramento dell'immagine è stato circoscritto al pattern posizionato sul fondo, il sistema risulta non telecentrico, il che rende la tecnica applicabile a strutture di grandi dimensioni.

2.5 “Three-dimensional evolution of a dam-break flow: construction and calibration of a physical model” ¹⁰

L’ultimo studio preso in esame è stato condotto nel *Laboratorio di Idraulica Giorgio Bidone* del Politecnico di Torino e fa da precursore al presente lavoro di tesi, in quanto analizza la propagazione dell’onda di dam-break lungo il versante attraverso un modello fisico e una tecnica di analisi per immagini.

L’analisi pone l’attenzione sui potenziali danni causati da inondazioni conseguenti al collasso di dighe in terra, e ribadisce l’importanza di sviluppare un sistema in grado di prevedere l’estensione dell’area allagata e l’intensità dell’onda di dam-break. In particolare, per piccole dighe e serbatoi (più in generale la categoria di invasi di competenza regionale) che solitamente non hanno apporti naturali a monte, o valli su cui lo sbarramento si affaccia, non può essere applicato il modello di flusso mono-dimensionale o bi-dimensionale a profondità mediata. L’aspetto chiave del problema allora diventa la previsione della diffusione lungo la direzione perpendicolare all’asse di rottura. In altre parole, si valutano diversi fattori, tra cui dinamica del collasso, pendenza a valle e scabrezza di valle, per stimare l’evoluzione della larghezza del fronte d’onda; tutto ciò si riconduce ancora una volta alla stima della velocità e della profondità del flusso di dam-break, su modello fisico di laboratorio, mediante procedura di analisi delle immagini basata sull’assorbimento della luce.

- **Set-up sperimentale**

La sperimentazione è condotta su modello fisico allestito in laboratorio, le cui caratteristiche principali e la strumentazione impiegata sono riportati di seguito:

- La struttura si compone di un serbatoio a monte (nelle varianti a cuneo e prismatica), di una superficie piana a valle costituita da pannelli lisci di legno, e di una serie di telai di altezza pari a 3 metri che hanno il compito di sorreggere i dispositivi di acquisizione delle immagini; la diga è materializzata da una saracinesca che viene alzata istantaneamente mediante un sistema a puleggia per simulare il collasso improvviso.
- Pendenza variabile tra 0° e 12° del piano di valle, largo 3 metri.
- Un pannello in PVC bianco posto sul tavolato di legno e 20 proiettori LED da 60 W provvedono a fornire l’illuminazione necessaria sul piano di valle; per evitare riflessioni localizzate sulla superficie dell’acqua e garantire un’illuminazione uniforme, i proiettori sono puntati verso i diffusori posizionati sul soffitto, mentre per isolare il piano dalle condizioni di luminosità esterna sono state posizionate tende oscuranti tutt’intorno alla struttura.
- Il dispositivo di acquisizione è una telecamera (Andor Zyla 5.5) dotata di sensore monocromatico sCMOS da 2560 x 2160 pixel, con massimo frame rate 100 fps; per evitare che le distorsioni spaziali compromettano il risultato, si utilizza il *Global Shutter Mode*.

- **Risultati del test**

La tecnica di misurazione è piuttosto semplice: i raggi di luce penetrano la superficie dell'acqua e vengono riflessi dal fondo in PVC, ma la proprietà dell'acqua di attenuazione dei raggi luminosi dà luogo a diverse colorazioni acquisite nei fotogrammi, ciascuna delle quali può essere associata con sufficiente precisione ad un valore di altezza d'acqua. Questa tecnica impone di effettuare preliminarmente una calibrazione spaziale e successivamente l'acquisizione delle misure.

La calibrazione avviene in due fasi: nella prima si effettuano una serie di scatti ad una scacchiera, di dimensioni note, posizionata sul piano di valle. Ciò consente di convertire le immagini acquisite in pixel in immagini riferite ad un sistema di riferimento in metri e già depurate della deformazione dovuta alla lente. Nella seconda fase si registrano una serie di scatti per diverse altezze d'acqua nel piano di valle; in questo modo si stabilisce la relazione univoca tra intensità di grigio (tonalità di colore delle immagini) e profondità dell'acqua. Da qui si estraggono le funzioni di trasferimento locale, concludendo la fase di calibrazione.

I dati sono stati acquisiti ed elaborati per diverse sezioni a crescente distanza dalla saracinesca: per la sezione vicino alla breccia la forma dell'onda presenta un picco centrale molto pronunciato, mentre nelle sezioni successive il picco si riduce rapidamente, fino a scomparire completamente nelle ultime sezioni esaminate. Questo perché ad una certa distanza dalla breccia l'onda si diffonde in direzione trasversale e la profondità diviene circa la stessa su tutto lo sviluppo della sezione: si conclude che la massima larghezza del fronte d'onda, frutto di una tendenza a diffondere rapidamente nella direzione perpendicolare all'asse della breccia, dipende dal carico iniziale nel serbatoio.

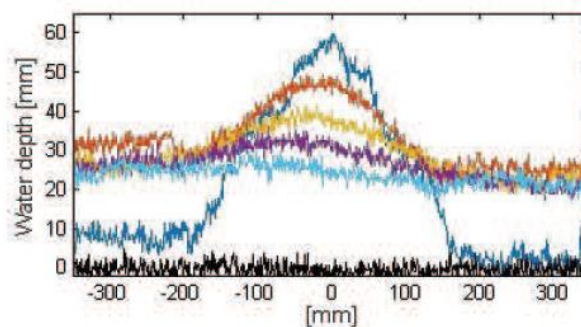


Figura 2.12 - Profondità d'acqua lungo le diverse sezioni parallele alla saracinesca, un secondo dopo l'apertura

3 Riproduzione in scala del fenomeno

La simulazione di onde di dam break tridimensionali è oggetto di analisi già da molti anni al Politecnico di Torino, che ha prodotto numerosi e interessanti studi al riguardo. In particolare, gli esperimenti vengono allestiti all'interno del *Laboratorio di Idraulica Giorgio Bidone* del Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture.

Una parte del Laboratorio è dedicata a questa tipologia di studio e recentemente sono state condotte simulazioni di dam-break su un modello in scala 1:20, indagando l'evoluzione dell'onda su superfici lisce e vegetate, al fine di estrarre le caratteristiche del fronte d'onda e dei campi di altezze e velocità. Sono di particolare rilevanza gli studi di Briano, J. (2019)¹² e di D'Oria, A. D. (2019)¹³.

Dai suddetti studi è stato possibile trarre informazioni molto utili, che spaziano dai fenomeni di instabilità del fronte al rilevamento del campo di altezze tramite tecniche di imaging, oppure la ricerca di una metodologia atta a rappresentare della scabrezza del piano, o ancora l'analisi delle caratteristiche della vena effluente dalla breccia. Il tutto fa parte del progetto, più esteso, che ha l'obiettivo di fornire una stima spaziale della vulnerabilità, nel modo definito in precedenza per la valutazione del rischio idraulico.

Procedendo in questa direzione si è deciso di riprodurre gli esperimenti adottando le stesse tecniche già impiegate, ma su un nuovo set-up sperimentale. La necessità di riprodurre gli esperimenti su un piano perfettamente orizzontale e la possibilità di regolare la sua pendenza longitudinale sono solo alcuni degli aspetti che hanno orientato verso questa scelta. Il problema principale del vecchio modello si individua nei materiali costituenti: l'utilizzo di un piano in legno comporta delle deformazioni che, seppur millimetriche, sono confrontabili con le altezze d'acqua misurate. Inoltre, dai risultati delle prove eseguite sul vecchio set-up emerge un forte limite nel descrivere l'onda nella direzione perpendicolare all'asse della breccia, perché la tecnica realizzativa del serbatoio di monte aveva causato delle inclinazioni del fondo, le quali sarebbero state in grado di condizionare la propagazione dell'onda verso valle nel caso si fosse utilizzata una breccia più ampia.

Il fenomeno di espansione dell'onda avviene così rapidamente da provocare la riflessione sulle pareti della struttura, entro due secondi dall'apertura della paratia. Ciò accade con breccia larga 3 cm, quindi volendo indagare dimensioni maggiori della stessa, il fenomeno non sarebbe in grado di descrivere esaustivamente le caratteristiche del fronte d'onda perché le misure risentirebbero della riflessione laterale dell'onda.

Da queste considerazioni si avverte l'esigenza di avere a disposizione una superficie piana, non deformabile e di dimensioni maggiori rispetto a quella usata precedentemente.

A questo scopo, nella sezione del Laboratorio riservata allo Sviluppo di ricerche applicate è stata avviata la costruzione del modello fisico in scala, sul quale si intende riprodurre il fenomeno idrodinamico. Il modello è stato eretto su un traliccio di ferro impiegato in precedenza per lo studio del trasporto solido innescato nelle colate detritiche, per cui la grandezza del modello è stata in parte vincolata dalle dimensioni di questa struttura.

3.1 Equazioni che regolano il fenomeno

Prima di parlare della riproduzione in scala del fenomeno è necessario concepirne la realtà, comprendendo quali siano le equazioni costituenti e come possa essere convenientemente semplificato.

Lo studio della propagazione di un'onda di piena generata dal collasso di uno sbarramento rientra nella categoria di moto vario di corrente a pelo libero. Il carattere di moto vario sta a indicare che le grandezze idrauliche che descrivono il fluido, in primis velocità media e profondità della corrente, variano nello spazio e nel tempo. La tipologia di corrente a pelo libero invece suggerisce il contatto tra fluido e atmosfera, oltre a variazioni graduali di sezione e velocità nello spazio e nel tempo.

Le equazioni che descrivono il fluido dal punto di vista macroscopico sono le complesse equazioni di Navier-Stokes, un sistema di cinque equazioni scalari differenziali alle derivate parziali che coinvolge venti variabili ed esprime al contempo il principio di conservazione della massa liquida e il principio di conservazione della quantità di moto.

L'introduzione di alcune ipotesi semplificative e l'ammissione della conservazione dell'energia (primo principio della termodinamica) consente di ridurre notevolmente la complessità del problema e di trattarlo con le equazioni di De Saint-Venant 2D, costituite dall'equazione di continuità affiancata all'equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \Omega}{\partial t} = 0 \\ i_f - \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{u^2}{\chi^2 R} + \frac{u}{g} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (3.1)$$

Le equazioni di De Saint-Venant si rivelano in grado di descrivere efficacemente le caratteristiche d'interesse del moto vario di una corrente a pelo libero, nonostante la loro semplicità.

Considerando la massa d'acqua in corrispondenza della breccia e immediatamente a monte del versante, si osserva un fluido con carattere fortemente tridimensionale. Questa frazione dell'onda è comunemente indicata come vena effluente e ad essa sarà dedicata una buona parte di questo lavoro di tesi.

Portando adesso l'attenzione sul territorio di valle, aperto e pianeggiante, si ha che a partire dal momento di innesco del collasso del corpo diga si sarà generata un'onda di piena la cui espansione non sarà in alcun modo limitata da confinamenti laterali, al contrario di quanto accade in un alveo inciso, tanto che le velocità nelle direzioni longitudinale e trasversale apparterranno allo stesso ordine di grandezza. In queste condizioni dinamiche rapidamente variabili è legittimo assumere le ipotesi *shallow water* ("acque basse") per l'onda in movimento, il che significa che le dimensioni del tirante idrico (Y) sono molto ridotte rispetto alle dimensioni dell'onda sul piano orizzontale (L_x, L_y), in genere di un ordine di grandezza inferiore:

$$Y \ll L$$

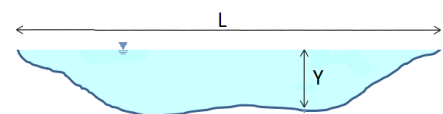


Figura 3.1 – Rappresentazione dell'ipotesi *shallow water* in un alveo inciso

Nel modello 2D si considerano due sole componenti di velocità $\bar{U}$ e $\bar{V}$, rispettivamente nelle direzioni x e y , calcolate operando una media nella direzione verticale z :

$$\bar{U} = \frac{1}{Y} \int_0^Y U(x, y, z, t) dz \quad \bar{V} = \frac{1}{Y} \int_0^Y V(x, y, z, t) dz \quad (3.2)$$

Con queste ipotesi di partenza, unite alle condizioni al contorno cinematiche al fondo ($z = 0$) e sulla superficie libera ($z = Y$), risolvendo le equazioni di Navier-Stokes nel caso bidimensionale si ottengono le (3.1), dove i_f rappresenta la pendenza del piano di valle nella direzione longitudinale e χ la sua scabrezza (coefficiente di Chezy).

3.2 Modelli fisici nell'ingegneria idraulica

Nell'idraulica, quando si devono analizzare fenomeni per i quali le leggi che ne regolano la dinamica evolutiva non siano sufficientemente note, oppure quando le ipotesi che condizionano la modellistica numerica sono poco attendibili, o ancora quando la definizione dei contorni del campo di moto in termini numerici risulta un problema, allora si ricorre a modelli in scala ridotta.

I modelli idraulici in scala ridotta, detti anche *modelli fisici*, trovano il loro ideale campo di applicazione nell'analisi dei fenomeni localizzati.

Essi indicano in genere la riproduzione in dimensioni ridotte di un prototipo, che sia una struttura, un tratto di corso d'acqua, una parte limitata di un'opera o talvolta semplicemente un fenomeno fisico. Il modello deve essere rappresentativo dell'originale, ovvero obbedire alle medesime leggi fisiche ed eventualmente mantenere la stessa geometria.

In base agli aspetti appena descritti i modelli fisici si distinguono in tre tipi, che si riducono a due se si escludono i modelli *analogici*, oggi non più utilizzati:

- Modelli *simili*: sono caratterizzati da similitudine geometrica (mantengono le proporzioni dell'originale) e similitudine meccanica;
- Modelli *distorti*: caratterizzati da affinità geometrica (non mantengono le proporzioni) e similitudine meccanica.

Ciò che distingue l'uno dall'altro è la possibilità, nei modelli distorti, di rappresentare fenomeni nei quali le differenze fra le tre dimensioni spaziali coinvolgono più ordini di grandezza, mantenendo la percezione fisica di queste grandezze. Ad esempio, in fenomeni per cui valgono le ipotesi shallow water, risulta conveniente aumentare la scala delle profondità rispetto alle due dimensioni sul piano orizzontale, alterando i rapporti di forma geometrici (attraverso il *rapporto di distorsione* n).

In ogni caso, per entrambe le categorie è necessario esprimere la similitudine meccanica, pertanto occorre definire un insieme di grandezze adimensionali, utili a descrivere il fenomeno, che si mantenga invariabile tra realtà e modello. I due raggruppamenti più noti in idraulica sono il numero di Reynolds (Re) e il numero di Froude (Fr), individuati mediante il *teorema Pi greco*.

3.2.1 Teorema π

Questo teorema, detto anche Teorema di Riabucinski-Buckingham, mostra che scegliendo opportunamente il sistema di misura, è possibile ridurre il numero di variabili indipendenti a 3 unità.

Si consideri la relazione:

$$g_0 = f(g_1, g_2, \dots, g_n) \quad (3.3)$$

che sussiste tra le grandezze $(g_1, g_2, \dots, g_n)$ (variabili indipendenti) e una grandezza di interesse g_0 (variabile dipendente), le quali caratterizzano un dato fenomeno. Sebbene la forma specifica della (3.3) possa in generale variare in relazione ai riferimenti o ai sistemi di misura adottati, la relazione fisica tra le grandezze considerate si mantiene la stessa.

Per sistemi definiti da sole grandezze meccaniche, come quelle che intervengono nel campo dell'idraulica, tra le $(g_1, g_2, \dots, g_n)$ variabili si scelgano 3 grandezze fra loro dimensionalmente indipendenti, atte a rappresentare una terna di grandezze base per un sistema di unità di misura.

Allora, scelte le grandezze (g_1, g_2, g_3) , si possono sempre esprimere le dimensioni di una generica grandezza g_i come prodotto di potenze delle tre grandezze base del sistema di unità scelto:

$$[g_i] = [g_1]^{\alpha_i} [g_2]^{\beta_i} [g_3]^{\gamma_i} \quad \text{con } i = 0, 1, \dots, n \quad (3.4)$$

Si definiscono poi le grandezze:

$$\Pi_i = \frac{g_i}{g_1^{\alpha_i} g_2^{\beta_i} g_3^{\gamma_i}} \quad (3.5)$$

che per loro stessa definizione sono grandezze adimensionali e rappresentano la misura delle g_i rispetto alla terna di riferimento (g_1, g_2, g_3) .

Allora la (3.3) può essere riscritta in funzione delle grandezze Π_i e ne risulta:

$$\Pi_0 = f(1, 1, 1, \Pi_4, \Pi_5, \dots, \Pi_n) \quad (3.6)$$

essendo pari all'unità la misura delle (g_1, g_2, g_3) rispetto a sé stesse.

Si può scrivere, in definitiva, in termini della variabile dimensionale g_0 :

$$g_0 = g_1^{\alpha_0} g_2^{\beta_0} g_3^{\gamma_0} \cdot f(\Pi_4, \Pi_5, \dots, \Pi_n) \quad (3.7)$$

Allora la generica grandezza g_i può essere espressa in funzione di 3 sole variabili indipendenti, dal momento che le Π_i sono funzionali di queste tre, e i coefficienti α, β, γ sono numeri puri.

I fenomeni di meccanica dei fluidi (escludendo effetti di tipo termodinamico, elettromagnetico e chimico) possono essere compiutamente descritti identificando 9 grandezze:

Grandezze della Meccanica dei Fluidi		
grandezza fisica	simbolo	unità di misura
lunghezza	L	m
tempo	T	s
velocità	v	m / s
accelerazione di gravità	g	m / s^2
pressione	p	N / m^2
densità di massa del fluido	ρ	kg / m^3
viscosità dinamica	μ	$kg / (ms)$
comprimibilità	K	N / m^2
tensione superficiale	σ	N / m

Tabella 3.1 - Grandezze fisiche nei fenomeni idrodinamici. Scelte tre grandezze fondamentali (evidenziate), le rimanenti sono esprimibili in funzione di queste tre

Poiché 3 di queste grandezze sono fondamentali (L, v, ρ), le rimanenti possono essere espresse in termini di rapporti adimensionali fra le 3 fondamentali. Da questa operazione si generano 6 numeri puri, ovvero i numeri di Reynolds, Froude, Weber, Mach, Eulero, Strouhal. Essendo adimensionali, questi numeri dovranno necessariamente assumere lo stesso valore nel modello e nel prototipo. Riprendendo quanto detto in precedenza, i raggruppamenti più noti in idraulica sono il numero di Reynolds e il numero di Froude, i quali possono essere interpretati, dal punto di vista dinamico, come rapporto tra la forza di inerzia, espressa dal termine $\rho L^2 v^2$, e le forze di diversa natura agenti su un assegnato volume di fluido.

Gruppo adimensionale			Rapporto dinamico
Numero di Reynolds	$Re = \frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot d}{\mu}$	ρ = densità del fluido $[kg / m^3]$ $\bar{u}$ = velocità media del fluido $[m / s]$ d = lunghezza caratteristica $[m]$ μ = viscosità dinamica del fluido $[kg / ms]$	$\frac{\text{forze d'inerzia}}{\text{forze viscosi}}$
Numero di Froude	$Fr = \frac{\bar{u}}{\sqrt{g \cdot d}}$	$\bar{u}$ = velocità media del fluido $[m / s]$ d = lunghezza caratteristica $[m]$ g = accelerazione di gravità $[m / s^2]$	$\frac{\text{forze d'inerzia}}{\text{forze di massa}}$

Tabella 3.2 - I due principali numeri puri indipendenti utilizzati nei modelli idraulici

I gruppi dimensionali citati contengono, per loro definizione, una grandezza caratteristica del fenomeno (d), che ha le dimensioni di una lunghezza. Considerando quanto detto finora, la dimensione caratteristica del fenomeno è l'altezza d'acqua, o battente (Y), in virtù dell'ipotesi shallow water.

Riguardo al significato fisico, il numero di Reynolds riveste importanza in tutti quei fenomeni idrodinamici dove le forze viscosi giocano un ruolo non trascurabile a fronte delle altre forze, ad esempio fenomeni di resistenza al moto per corpi arrotondati o pareti lisce. Il valore che assume questo parametro dà indicazione sul regime di moto che sviluppa il fluido: laminare, di transizione, turbolento o turbolento completamente sviluppato.

Il numero di Froude è invece il parametro a cui far riferimento nei casi in cui le trasformazioni tra energia potenziale in cinetica sono predominanti nel fenomeno. Questo numero distingue il tipo di corrente che si instaura: per $Fr > 1$ siamo in presenza di una *corrente veloce* (o supercritica), mentre per $Fr < 1$ si ha una *corrente lenta* (o subcritica).

In genere i modelli a Re costante sono adatti a rappresentare correnti in pressione, in cui la gravità non è direttamente influente sul moto; al contrario, i modelli a Fr costante sono impiegati per correnti a pelo libero e rappresentano la categoria maggiormente presente nell'ingegneria idraulica.

3.2.2 Le leggi di similitudine

La validità per il prototipo delle osservazioni compiute sul modello è assicurata dal rispetto delle leggi di similitudine. Queste possono essere rispettate anche quando il fluido utilizzato sul modello sia diverso da quello effettivo del prototipo, circostanza che può risultare in alcuni casi vantaggiosa (si pensi ad esempio allo studio del moto di fluidi particolari, come sostanze oleose o pericolose, che possono essere sostituite nel modello da fluidi di più agevole impiego o semplicemente più economici, quali ad esempio l'acqua o l'aria).

Al fine di assicurare una determinata similitudine, il valore del corrispondente numero deve risultare lo stesso sia per il prototipo che per il modello.

A questo scopo si definiscono i così detti *fattori di scala* λ , tramite i quali si esprimono le similitudini. Ad esempio, il fattore di scala delle lunghezze (λ_L) sarà definito dal rapporto tra la lunghezza nel modello (L_m) e la corrispondente lunghezza nell'originale (L_o):

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_o}$$

Supponiamo che nel problema in esame siano rilevanti le forze viscosi; è necessario quindi assicurare la conservazione del numero di Reynolds:

$$Re_o = Re_m \quad \left(\frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot d}{\mu} \right)_o = \left(\frac{\rho \cdot \bar{u} \cdot d}{\mu} \right)_m \quad (3.8)$$

Se nel modello e nell'originale il fluido è lo stesso, ρ e μ sono costanti. Definendo per semplicità di notazione il fattore di scala delle lunghezze $\lambda_L = \lambda$, si giunge alla scala delle velocità:

$$(\bar{u} \cdot d)_o = (\bar{u} \cdot d)_m \quad \lambda_u = \frac{\bar{u}_m}{\bar{u}_o} = \frac{d_o}{d_m} = \lambda^{-1} \quad (3.9)$$

Dalla relazione tra spazio, tempo e velocità si ricava la scala dei tempi:

$$\lambda_u = \frac{\lambda}{\lambda_t} \quad \lambda_t = \frac{\lambda}{\lambda_u} = \frac{\lambda}{\lambda^{-1}} = \lambda^2 \quad (3.10)$$

Mentre la scala delle forze è dedotta dal teorema dell'impulso:

$$\begin{aligned} \vec{F} \cdot dt &= dm \cdot \vec{u} & \vec{F} &= \rho \cdot \Omega \cdot \vec{u}^2 \\ \lambda_F &= \frac{F_m}{F_o} = \frac{(\rho \cdot \Omega \cdot \bar{u}^2)_m}{(\rho \cdot \Omega \cdot \bar{u}^2)_o} = \lambda^2 \cdot \lambda_u^2 = \lambda^2 \cdot \lambda_u^{-2} = 1 \end{aligned} \quad (3.11)$$

cioè le forze restano inalterate e l'intensità sarà la stessa nell'originale e nel modello.

Per ogni grandezza geometrica, cinematica e dinamica dunque è possibile definire il rispettivo fattore di scala. La realizzazione di un modello in scala ridotta perciò altera non già le unità di misura di queste grandezze coinvolte ma bensì le misure effettive delle stesse.

Allo stesso risultato si sarebbe giunti se si fosse conservato il numero di Froude, ovviamente con valori dei fattori di scala diversi, come si osserva nella successiva *Tabella 3.3*.

grandezza	Modelli a Re costante	Modelli a Fr costante	
	simile	simile	distorto
Lunghezza	$\lambda_x = \lambda$ $\lambda_y = \lambda$ $\lambda_z = \lambda$	$\lambda_x = \lambda$ $\lambda_y = \lambda$ $\lambda_z = \lambda$	$\lambda_x = \lambda$ $\lambda_y = \lambda$ $\lambda_z = n \cdot \lambda$
Velocità	$\lambda_u = \lambda^{-1}$	$\lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}}$	$\lambda_u = n^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda^{\frac{1}{2}}$
Tempo	$\lambda_t = \lambda^2$	$\lambda_t = \lambda^{\frac{1}{2}}$	$\lambda_t = n^{-\frac{1}{2}} \cdot \lambda^{\frac{1}{2}}$
Forza	$\lambda_F = 1$	$\lambda_F = \lambda^3$	$\lambda_F = n^2 \cdot \lambda^3$
Scabrezza	$\lambda_\chi = \lambda^{-\frac{3}{2}}$	$\lambda_\chi = 1$	$\lambda_\chi = n^{-\frac{1}{2}}$
Portata	$\lambda_Q = \lambda$	$\lambda_Q = \lambda^{\frac{5}{2}}$	$\lambda_Q = n^{\frac{3}{2}} \cdot \lambda^{\frac{5}{2}}$
n° Reynolds	$\lambda_{Re} = 1$	$\lambda_{Re} = \lambda^{\frac{3}{2}}$	$\lambda_{Re} = n^{\frac{3}{2}} \cdot \lambda^{\frac{3}{2}}$

*Tabella 3.3 - Rapporti di scala per i diversi modelli, in funzione della scala geometrica.
Il fattore n indica il rapporto di distorsione*

Sorge spontaneo a questo punto chiedersi perché non sia possibile conservare entrambi i numeri che caratterizzano il fenomeno. Imponendo la conservazione di Re dalla (3.8) e ricordando la definizione di viscosità cinematica di un fluido $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, si avrebbe:

$$\left(\frac{\bar{u}d}{\nu}\right)_O = \left(\frac{\bar{u}d}{\nu}\right)_m \quad \lambda_\nu = \frac{\nu_m}{\nu_O} = \frac{\bar{u}_m d_m}{\bar{u}_O d_O} = \lambda_u \cdot \lambda \quad (3.12)$$

Da questo risultato, se si volesse conservare anche Fr , per il quale $\lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}}$, avremmo infine:

$$\lambda_\nu = \lambda_u \cdot \lambda = \lambda^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda = \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (3.13)$$

Ciò significa che per rispettare entrambi i numeri dovremmo servirci, nel modello, di un fluido che abbia $\nu_m = \nu_O \cdot \lambda^{\frac{3}{2}}$. Utilizzando ad esempio un fattore di scala $\lambda = \frac{1}{10}$, si avrebbe $\lambda_\nu = \frac{1}{31,62}$, perciò dovremmo trovare una sostanza avente viscosità 31,62 volte inferiore a quella che caratterizza il fluido nell'originale. Nella pratica questo non è facilmente concretizzabile.

Ne segue che non è possibile avere un modello in scala ridotta perfettamente simile al prototipo ed occorre accettare dei modelli solo parzialmente simili, cioè per i quali siano rispettate le condizioni di similitudine con riferimento non a tutte ma solo ad alcune delle forze agenti. In sostanza occorre fare delle scelte, cioè identificare quali sono le forze dominanti sul fenomeno e mantenere solo queste in rapporto costante fra loro.

Nella maggior parte dei modelli, nei quali rientra anche il presente, per la rappresentazione del fenomeno di dam-break, le forze preponderanti sono la gravità e le forze di inerzia; la regola di scala che ne deriva allora è quella che permette la conservazione del numero di Froude.

3.2.3 Rapporti di scala del modello realizzato

In precedenza, la propagazione di un'onda di dam break è stata categorizzata come corrente a pelo libero in moto vario, condizione in cui le forze di natura viscosa giocano un ruolo marginale. Al contrario, assumono rilevanza lo specifico regime di moto che si instaura nella corrente e il carattere turbolento che connota i fenomeni di dam-break. Da qui la scelta di rinunciare alla similitudine di Reynolds in favore della conservazione del numero di Froude.

La decisione di realizzare un modello a Froude costante comporta anche dei notevoli vantaggi, primo fra tutti la sicurezza di riprodurre, senza possibilità di errore, lo stesso regime di moto (subcritico, critico o supercritico), che è la caratteristica distintiva di un modello a Fr costante.

Inoltre, i rapporti di scala individuati in un modello simile a Fr costante (*Tabella 3.3*) suggeriscono che il fenomeno risulta più semplice da padroneggiare sul modello sotto l'aspetto delle forze, delle portate e in particolare delle velocità, che nella realtà si presentano di elevata entità.

Tuttavia, i modelli realizzati in similitudine di Fr sono identificati da numeri di Reynolds inferiori nel modello rispetto al prototipo e di conseguenza se ne deduce che le forze viscosi nel modello hanno sempre una rilevanza maggiore che nel prototipo.

La difficoltà ora risiede nell'attribuire al modello un fattore di scala rappresentativo delle caratteristiche degli invasi di piccola e media dimensione presenti sul territorio regionale.

A questo proposito ricordiamo che gli invasi di competenza della Regione Piemonte analizzati nell'ambito del progetto RESBA hanno dimensioni relativamente variabili. Su un campione di 101 invasi³ sono stati rilevati:

- Carichi totali compresi nel range $H = (0,95 \div 10) \text{ m}$; più della metà degli invasi presenta altezze inferiori ai 6 m. Gli invasi con altezze di sbarramento inferiori ai 2 m sono 11.
- Volumi invasati nell'intervallo $V = (44 \div 92000) \text{ m}^3$; di questi, 16 invasi presentano un volume superiore ai 10000 m^3 , mentre 14 un volume inferiore a 500 m^3 .

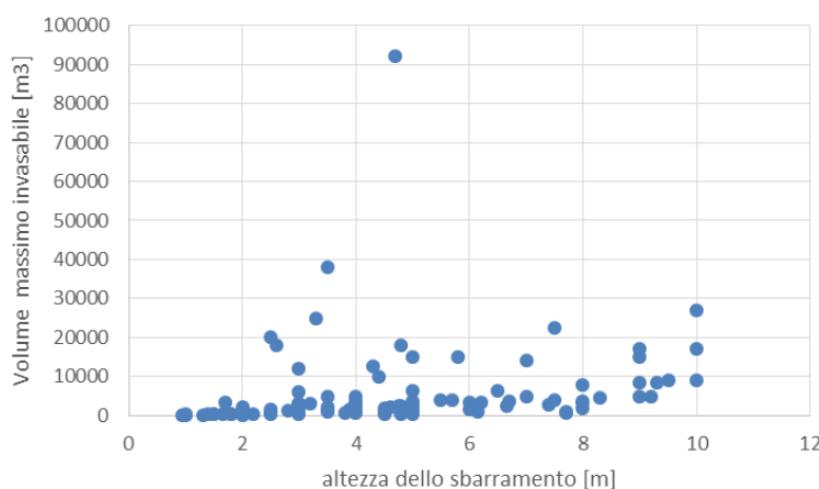


Figura 3.2 - Campione di invasi analizzati nello studio di Poggi e Cordero (2015)

Si tratta allora di imporre una scala di riduzione in modo che essa sia rappresentativa di questa categoria di sbarramenti. Per ragioni puramente tecniche risulta conveniente condurre esperimenti in cui l'altezza d'acqua del serbatoio assuma valori facilmente riproducibili, quindi compresi in un range contenuto. Il metodo più semplice è conservare il range già utilizzato sul set-up precedente^{12,13}, per altezze d'acqua comprese tra 20 e 40 cm.

Carico [m]			Volume invasato [m ³]		
Modello H_m	Fatt. scala $\lambda = \frac{H_m}{H_o}$	Originale H_o	Modello V_m	Fatt. scala $\lambda^3 = \frac{V_m}{V_o}$	Originale V_o
0,20	1	3	0,612	1	2081
0,40	15	6	1,224	3375	4161
0,20	1	4	0,612	1	4932
0,40	20	8	1,224	8000	9864
0,20	1	5	0,612	1	9633
0,40	25	10	1,224	15625	19266

Tabella 3.4 - Rapporti di scala per la riproduzione in laboratorio. In evidenza il rapporto scelto per questo studio

Adottando un fattore di scala $\lambda = \frac{1}{20}$ si possono indagare altezze comprese tra 4 e 8 m, in cui ricade la maggioranza degli invasi oggetto di analisi.

Per ciascun rapporto di scala dei carichi avremo i corrispondenti rapporti tra i volumi, riportati nella tabella, i quali saranno compresi in un intervallo che dipende dalle dimensioni del serbatoio utilizzato in laboratorio. Si osserva che con il serbatoio appositamente progettato, di dimensioni 3,4 x 0,9 x 0,5 m (di cui si parlerà nel dettaglio al *Capitolo 4.1*), alle altezze d'acqua che si ha desiderio d'indagare (20 ÷ 40 cm) corrispondono volumi compresi tra 0,612 e 1,224 m³. Sempre in riferimento alla scala $\lambda = \frac{1}{20}$, questi volumi nel modello sono equivalenti nell'originale a valori che ricadono nella fascia dove si concentra il maggior numero di invasi indagati, come si evince dalla *Figura 3.2*.

Oltre a ciò, va tenuto in conto che il fenomeno di dam-break interessa in special modo i primi istanti di tempo, cioè dal momento di apertura della paratia, passando per la formazione del fronte d'onda, fino al punto in cui tutto il piano di valle è allagato. Per riprodurre questo fenomeno è necessaria solo una piccola frazione del volume totale contenuto nel serbatoio, quindi sarebbe oltremodo inutile invasare volumi troppo imponenti.

Seguendo questa logica si è deciso di adottare una scala 1:20 per proseguire nella realizzazione del modello fisico.

4 Costruzione del modello fisico

Compreso il significato delle leggi di similitudine e fissati i rapporti di scala tra le varie grandezze, si passa ora a delineare alcuni aspetti del modello, in particolare definendo le caratteristiche del serbatoio di monte (strettamente correlate ai valori di carico e volume definiti in precedenza), ma riservando attenzione anche all'allestimento del piano di valle e alla realizzazione della struttura che delimita l'area di interesse e ha il compito di sostenere la strumentazione.

Come già accennato, si è ritenuto utile costruire il modello sfruttando una struttura preesistente in laboratorio. Il sistema in questione è costituito da un traliccio di ferro lungo circa 10 metri, a sezione rettangolare cava di dimensioni 60 x 80 cm. La travatura si trova in appoggio ad un'estremità, mentre dall'altro lato, quasi all'estremità, dispone di un sistema che le permette di scorrere all'interno di due guide verticali; in questo modo l'estremità risulta a sbalzo per una lunghezza di circa 3,40 m. Le guide verticali si sviluppano in altezza all'interno di due torri aventi base quadrata e altezza pari a circa 8 metri. Il sistema quindi consente al traliccio di assumere pendenze variabili.

Il serbatoio di monte è alloggiato alle spalle delle due torri, sullo sbalzo, mentre l'area allagabile di valle è stata allestita sul traliccio, in modo non diretto: dopo aver fissato su di esso delle travi di alluminio equamente distanziate, con asse longitudinale disposto in modo perpendicolare alla travatura di base, è stato fissato il piano d'appoggio dell'area allagabile.

Ricordando che l'obiettivo dello studio è la misura delle grandezze caratteristiche della corrente attraverso metodi di *Imaging*, sotto forma di dati distribuiti spazialmente, risulta necessario allestire una camera, o più in generale un ambiente, in cui le caratteristiche di illuminazione del modello si possano gestire facilmente. A questo proposito, si adottano soluzioni già sperimentate e approvate in precedenti studi che riguardano sia l'allestimento di un *light box*¹⁴ sia la scelta della strumentazione elettronica da utilizzare nelle condizioni di esercizio¹⁵.

Intorno alla struttura è stata quindi costruita una gabbia formata da *truss* e pannelli, allo scopo di ricreare un *light box*, indipendente dalle condizioni di illuminazione esterne. La struttura reticolare ha anche lo scopo di mantenere sospese le fotocamere e gli strumenti di acquisizione dei dati al di sopra della vasca di valle, oltre a delimitare gli spazi di lavoro.

In parallelo a questa tesi è stato svolto uno studio illuminotecnico per individuare la migliore disposizione delle luci all'interno del *light box* tramite il software professionale *Dialux*. Tale argomento non sarà oggetto di questa tesi, per il quale si rimanda al progetto di tesi "Nuovo set-up sperimentale per lo studio della propagazione di onda dovute al collasso di dighe" di Roberto Napoli (2020)¹⁶, collega di corso di studi con cui è stato affrontato e condotto l'intero percorso di tesi.

A causa dell'emergenza sanitaria globale, i laboratori sono stati chiusi e le relative ricerche sperimentali sono state momentaneamente sospese. Ciò ha impedito di continuare la costruzione del modello fisico, che si è arrestata con il posizionamento e fissaggio delle travi di alluminio sul traliccio in ferro, dopo che l'allestimento dello scheletro del *light box* era già stato completato.

Tutto ciò che verrà presentato qui di seguito e che non riguarda quanto appena citato (*truss* e travi di alluminio) è stato compiuto limitandosi a redigere il progetto esecutivo senza poterlo realizzare concretamente prima del termine di questa tesi, proprio a causa dell'arresto forzato.

4.1 Serbatoio di monte

La progettazione del serbatoio di monte è condizionata dal fattore di scala determinato in precedenza, in quanto il carico e il volume sono caratteristiche che dipendono esclusivamente dalla conformazione dell'invaso. Avendo assunto un fattore di scala 1:20 i valori dei carichi e volumi che si possono esplorare nelle simulazioni sono quelli riportati in *Tabella 3.4*. Lavorando con carichi compresi nel range $20 \div 40$ cm si può spaziare nel range di volumi $0,6 \div 1,2 \text{ m}^3$ che nella realtà sono valori rappresentativi di piccoli invasi regionali con volume inferiore a 10000 m^3 .

La struttura è stata collocata sull'estremità libera del traliccio, alle spalle delle due torri entro cui può scorrere il traliccio; esso quindi sostiene, oltre al piano di valle comprensivo delle travi di alluminio, anche il supporto su cui è montato il serbatoio e il serbatoio stesso.

Sul modello del precedente set-up, la geometria dell'invaso è stata schematizzata mediante un parallelepipedo di dimensioni $3,4 \times 0,9$ m e $0,5$ m in altezza, dimensioni tali da adattare il serbatoio allo spazio disponibile sul traliccio. La struttura è in acciaio inox, con fondo liscio e piano, ed è dotata di scarico di fondo regolabile mediante valvola a sfera. La struttura scatolare è rinforzata mediante *profilati a C* saldati sul fondo e *profilati a L* sui lati del serbatoio, a passo costante di 56 cm.

Il serbatoio non è posto a diretto contatto con il traliccio ma è stato allestito un apposito supporto di metallo capace di distribuire uniformemente il peso del serbatoio e tale da consentire il raggiungimento dell'orizzontalità del fondo del serbatoio, attraverso regolazioni sulle barre filettate che congiungono il supporto al serbatoio.

A parte le dimensioni, ciò che cambia nell'attuale set-up è la presenza di un'apertura su uno dei lati dello scatolare, ovvero quello prospiciente il piano di valle. Lo sbarramento viene installato a posteriori, realizzando la chiusura dello scatolare attraverso un pannello metallico sul quale è disegnata la breccia. In questo modo si può modificare la morfologia della breccia a piacimento, sostituendo il solo pannello.

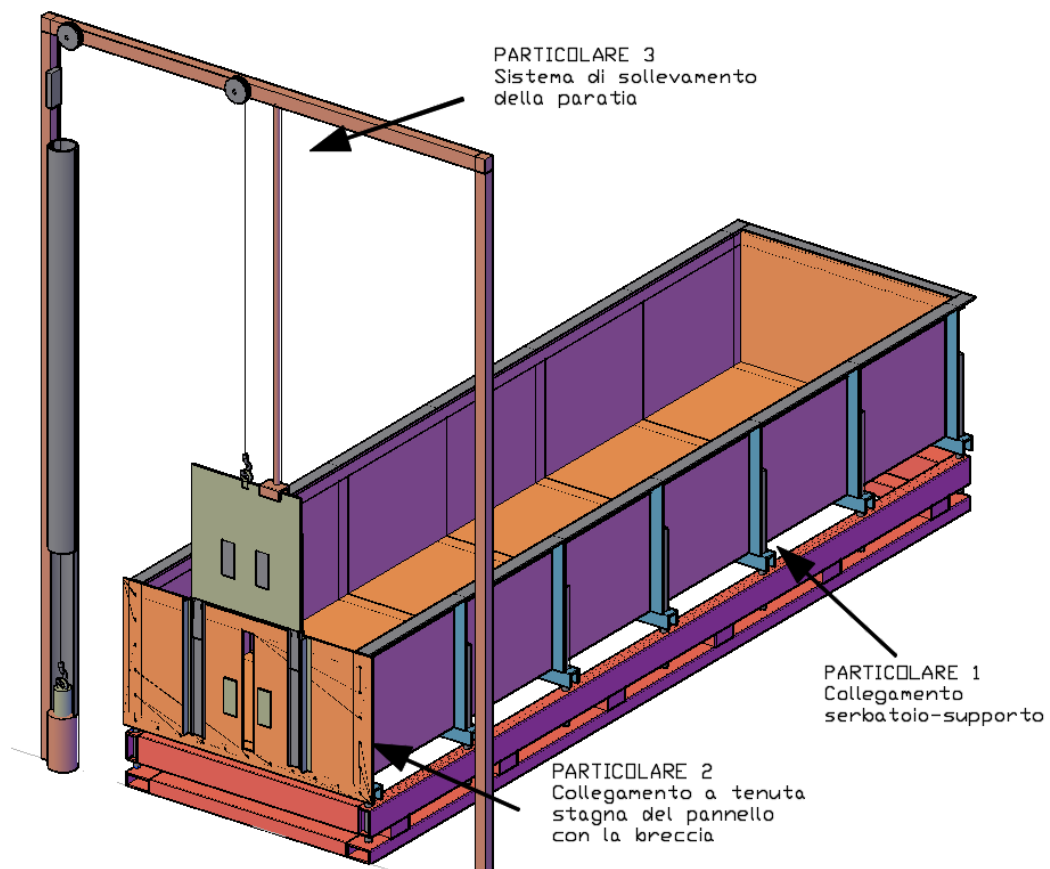


Figura 4.1 - Vista assonometrica del serbatoio di monte e del sistema di apertura

- **Collegamento tra serbatoio e supporto**

L'orizzontalità del fondo del serbatoio è raggiunta agendo su ognuna delle barre filettate che delimitano il perimetro della struttura. Una volta che il piano è registrato, si agisce sul contro-dado in basso per fissarne definitivamente la posizione.

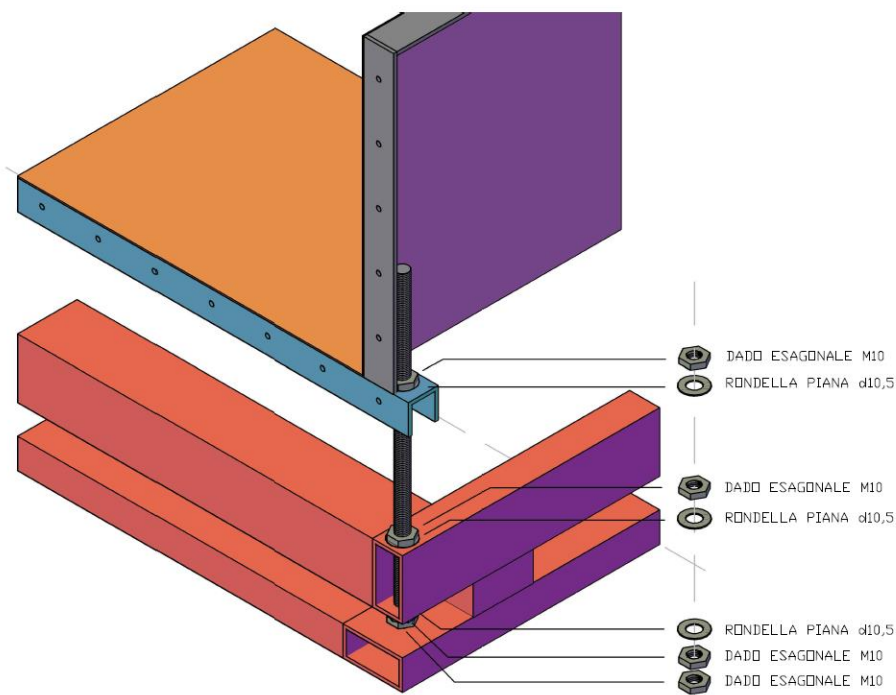


Figura 4.2 - Particolare 1: collegamento tra il serbatoio e il supporto

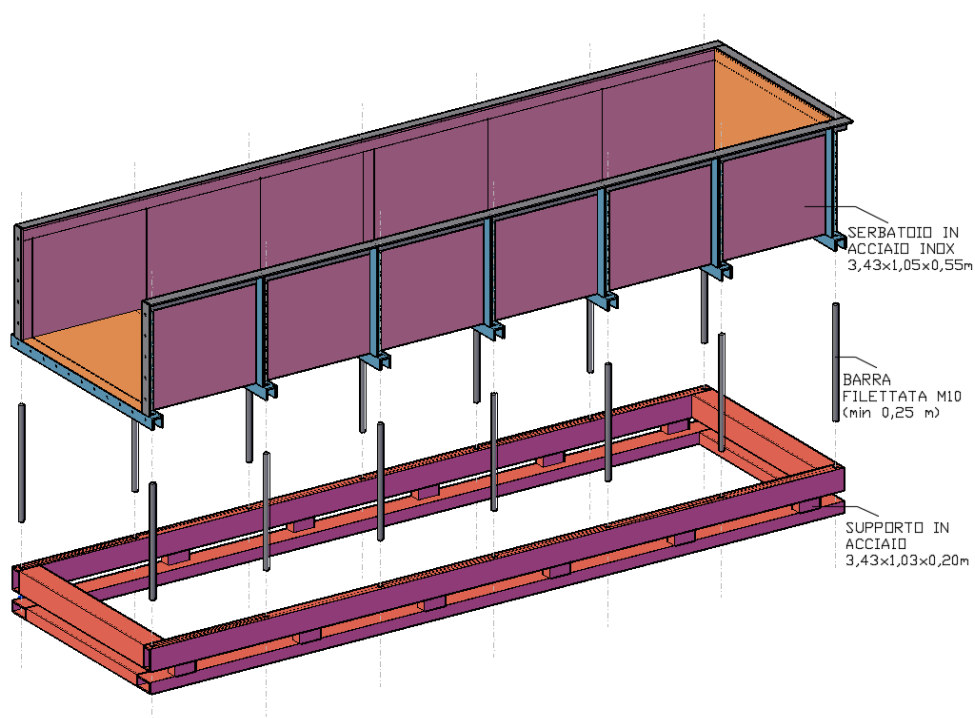


Figura 4.3 - Esploso assometrico del serbatoio di monte

- **Sbarramento e morfologia della breccia**

Per quanto riguarda la realizzazione dello sbarramento, si ricorda che per dighe in terra, oggetto di analisi di queste simulazioni, la modellazione della breccia incontra difficoltà sotto l'aspetto della morfologia, della sua evoluzione nel tempo e del relativo idrogramma delle portate massime in uscita.

I dati raccolti in letteratura e analizzati in "Metodi speditivi per la mappatura delle aree vulnerabili per onde dovute a rottura di sbarramenti" (Poggi e Cordero, 2015) ³ indicano che i crolli di dighe in terra comportano un'apertura della breccia di forma variabile e talvolta mutevole nel corso di uno stesso evento. Le forme della breccia assumono geometria rettangolare, trapezia o triangolare. La maggioranza dei casi presenta forma trapezoidale, ma il modello che meglio si adatta al collasso di dighe in terra è quello proposto da Froehlich (2008), che si mostra robusto anche nella stima del tempo di formazione della breccia.

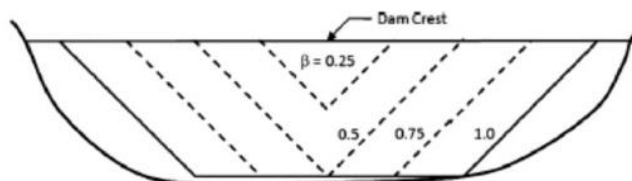


Figura 4.4 - Rappresentazione del modello empirico di formazione della breccia secondo Froehlich. Il parametro "beta" crescente dà un'idea dell'evoluzione nel tempo della forma.

Il modello di Froehlich applicato agli invasi regionali sostiene che la breccia si sviluppa dapprima con forma triangolare, aumentando di dimensioni fino al raggiungimento della quota minima (piede della diga), in corrispondenza della quale si espande lateralmente assumendo una forma a trapezio. Le osservazioni dei casi avvenuti in passato e successivi studi sperimentali danno credito a questo modello, che comunque deve essere calibrato in funzione del volume immagazzinato nell'invaso: infatti, a parità di altezza, una diga che racchiuda un serbatoio di grande volume potrà essere completamente erosa dal momento che le portate in uscita si manterranno elevate; al contrario, una diga contenente un volume limitato potrebbe non arrivare al punto di sviluppare la forma trapezia della breccia, perché il serbatoio sarà già svuotato prima che ciò avvenga.

Il set-up precedente era stato realizzato con la finalità di condurre un'analisi metodologica, i cui risultati hanno confermato la validità del metodo; tuttavia, il modello fisico presentava caratteri fortemente idealizzati: una breccia di forma rettangolare stretta associata ad un piano di valle senza costrizione laterale, condizioni ben diverse da quelle riscontrate in letteratura e sul campione di invasi analizzati.

Allora, suffragando l'ipotesi di una breccia evolvente nel tempo, si è deciso di realizzare lo sbarramento in maniera che fosse indipendente dal serbatoio: il pannello su cui è disegnata la breccia è fissato tramite bullonatura sul lato libero del serbatoio e del mastice/guarnizione ne conferisce la tenuta idraulica (Figura 4.6). Volendo condurre gli esperimenti modificando la morfologia della breccia, basterà rimuovere il pannello e sostituirlo con uno identico ma con forma della breccia differente.

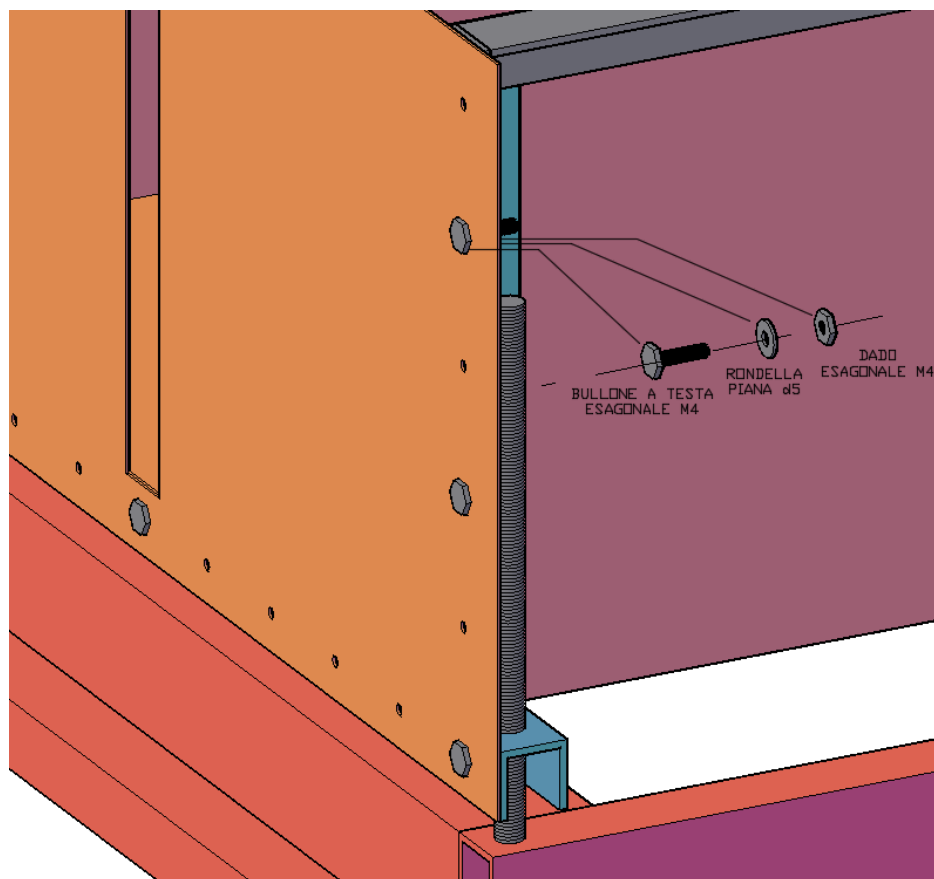


Figura 4.5 - Particolare 2: collegamento tra il pannello con la breccia e il serbatoio

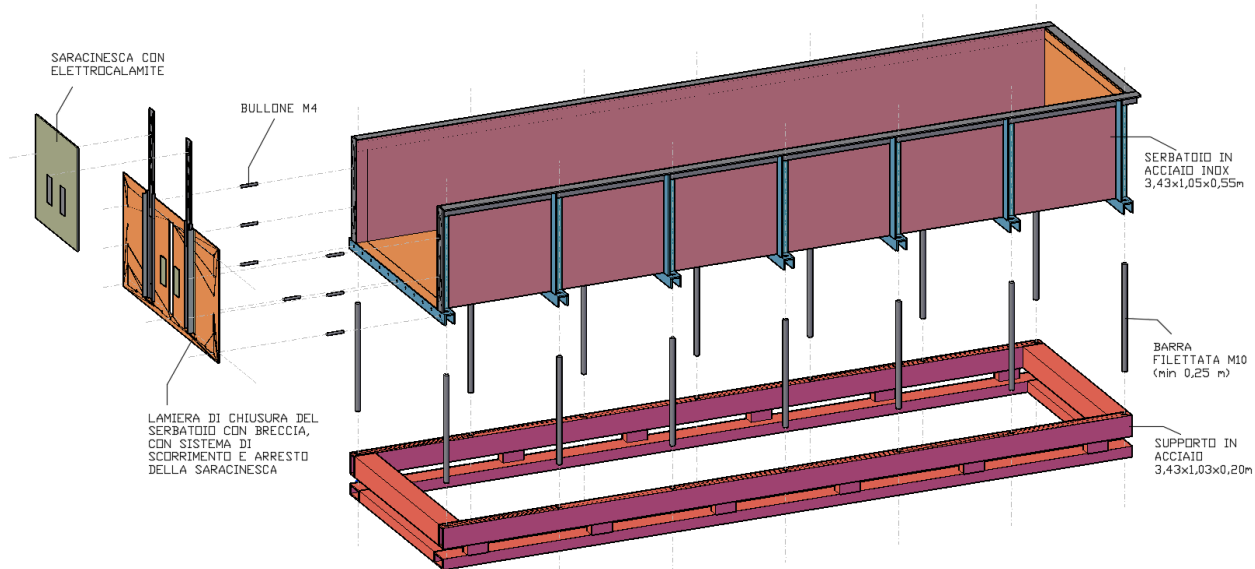


Figura 4.6 - Esploso assometrico del serbatoio e del pannello con la breccia

- **Meccanismo di apertura della saracinesca**

Il contenimento dell'acqua all'interno del serbatoio avviene tramite chiusura stagna per opera di una saracinesca posta in corrispondenza della breccia. La saracinesca, o paratoia, non è altro che un pannello di acciaio inox in grado di scorrere verticalmente all'interno di due guide: quando avviene l'apertura istantanea della saracinesca, l'acqua, inizialmente in quiete nel serbatoio, sarà libera di defluire dal serbatoio attraverso la breccia.

È necessario garantire la tenuta idraulica del serbatoio di monte, in modo che le condizioni del letto di valle prima dell'esperimento non siano disturbate dall'acqua eventualmente fuoriuscita dall'invaso. Per questo motivo risulta conveniente inserire del mastice nello spazio tra il pannello di chiusura del serbatoio e la paratia stessa prima di ogni esperimento.

L'apertura della paratoia è controllata da remoto per mezzo di un sistema di carrucole che sostiene un grave, mantenuto in sospensione da un'elettrocalamita. Allo stesso modo, la paratoia preme sulla breccia grazie ad un campo magnetico prodotto da elettrocalamite.

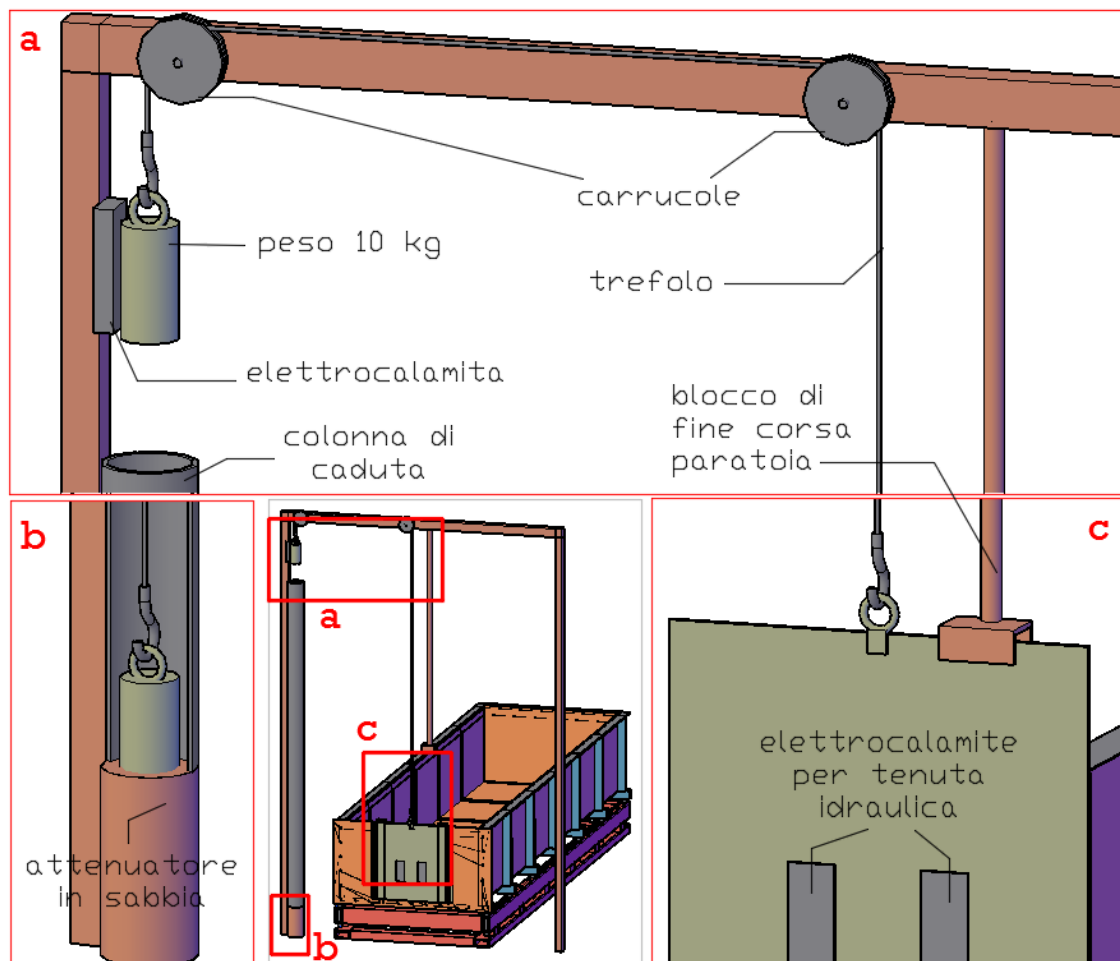


Figura 4.7 - Particolare 3: sistema di sollevamento della paratoia

Dalla *Figura 4.7* si osserva che il sistema meccanico di apertura consiste in un trefolo di acciaio in tensione in grado di scorrere attraverso due carrucole, fissate su un portale indipendente allestito al di sopra del serbatoio. Il cavo collega la paratia (alla quale si aggancia mediante un robusto anello d'acciaio) ad un peso da 10 kg, il quale è vincolato a precipitare all'interno di una colonna di caduta e a colpire infine l'attenuatore in sabbia posto alla base della colonna. La caduta del grave implica l'apertura della paratoia. Il portale che sostiene il sistema meccanico non è solidale con la struttura del serbatoio, al fine di evitare la trasmissione delle vibrazioni causate dalla caduta del peso.

Finché il campo magnetico è attivo tutte le elettrocalamite sono in funzione, perciò il peso rimane pensile e la paratoia aderisce al serbatoio, favorendo altresì la tenuta idraulica della vasca; nel momento in cui si realizza il simultaneo distacco delle calamite tramite interruzione elettrica, la paratoia è libera di scorrere verso l'alto all'interno delle guide, trascinata dal peso in caduta libera, provocando quindi l'apertura della saracinesca.

Se il tempo di sollevamento, t_s , è inferiore ad un valore funzione del carico nel serbatoio, H , allora l'apertura si può considerare istantanea, secondo Lauber e Hager (1998):

$$t_s \leq \sqrt{\frac{2H}{g}}$$

che risulta pari a 0,28 secondi per un carico massimo nel serbatoio $H = 0,4$ m.

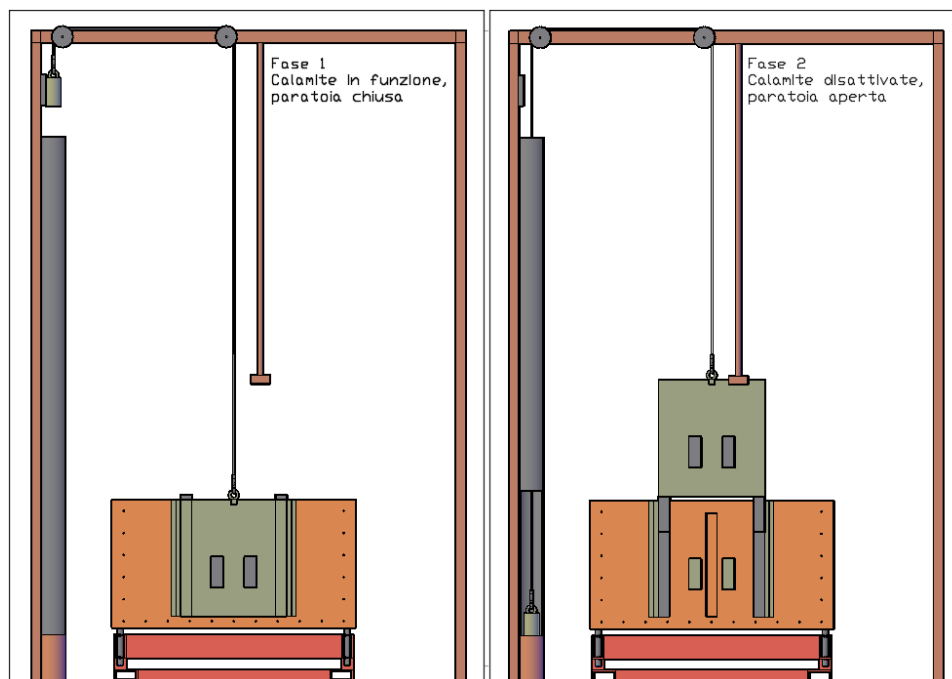


Figura 4.8 - Fasi di apertura della saracinesca: nella fase 1 le calamite sono attive, quindi la paratia aderisce al serbatoio e il grave è mantenuto sospeso; nella fase 2 le calamite sono disattivate, perciò il grave precipita in fondo alla colonna ed innesca l'apertura della paratia

4.2 Piano di valle

Il piano di valle è la regione di spazio entro cui si riversa l'onda di collasso e quella da cui si estraggono le informazioni riguardanti la velocità e la profondità del flusso.

Per adempiere a questo compito la superficie deve risultare il più possibile piana, regolare e priva di imperfezioni, per evitare che disturbi indesiderati possano in qualche modo inficiare i risultati della simulazione. Si identifica come criterio di progetto l'assoluta indeformabilità del piano su cui scorre l'acqua, in modo che l'onda di dam-break non sia influenzata, nel suo moto, da variazioni di pendenza del fondo.

Si tratta allora di progettare il piano di scorrimento in modo che il materiale che lo compone possieda proprietà di leggerezza e indeformabilità.

Il criterio di resistenza assume certamente primaria importanza, ma risulta già verificato nel momento in cui il piano rispetta l'indeformabilità: se la struttura è sovradimensionata al punto di risultare indeformabile, la resistenza è insita nella struttura stessa. Per quanto riguarda i carichi che tale piano dovrà sopportare, essi sono limitati ad un ridotto volume d'acqua (di estensione in pianta pari a quelle del piano e di altezza massima di 10 cm), in aggiunta al peso proprio della struttura che rappresenta la regione allagabile.

Infine, la precisione costruttiva e le perfette condizioni dei materiali giocano un ruolo fondamentale nel determinare la regolarità geometrica della struttura.

A queste richieste rispondono prodotti creati in stabilimento, attraverso macchinari che garantiscano la stabilità e la durabilità delle proprietà. Dunque si è pensato di allestire un piano orizzontale impermeabile costituito da pannelli sandwich alveolari di diverse dimensioni, che, adeguatamente serrati tra di loro, andassero a comporre una superficie rettangolare di dimensioni 3,40 x 6,30 m.

I pannelli non sono stati disposti direttamente sulla trave in acciaio; sono stati invece appositamente fissati a delle travi in alluminio, le quali fungono da piano d'appoggio dei pannelli per tutta la loro estensione nelle due direzioni ortogonali.

L'assemblaggio di queste due componenti permette di materializzare una struttura che sia leggera e al contempo sufficientemente rigida.

- **Travi di alluminio**

Le travi di alluminio hanno la funzione di garantire una base d'appoggio piana e perfettamente regolare su cui alloggiare i pannelli, oltre a sopportare il peso dei pannelli stessi e del volume d'acqua. Per raggiungere quest'obiettivo si è stabilita una soglia di deformabilità minima a pieno carico, pari a 1 mm, sull'estremità libera delle travi. In questo modo il naturale scorrimento del fluido non è condizionato dalla deformazione elastica che manifestano le travi sotto carico, la quale verrebbe trasferita ai pannelli, dal momento che questi due elementi (travi e pannelli) sono assemblati in modo da lavorare come un tutt'uno.

Allo stesso scopo, dopo aver disposto le travi di alluminio sul traliccio bisognerà garantire l'orizzontalità del piano, ed eliminare eventuali imperfezioni geometriche registrate nella fase di montaggio

della struttura.



Figura 4.9 - Configurazione del piano di valle prima del posizionamento dei pannelli:
la trave può essere considerata come doppiamente appoggiata sul traliccio

Nota la configurazione statica, identica per tutte le travi di alluminio, è necessario risolvere l'equazione della linea elastica per estrarre le caratteristiche geometriche della sezione che deve possedere la trave, e così garantire un abbassamento massimo di 1 mm all'estremità.

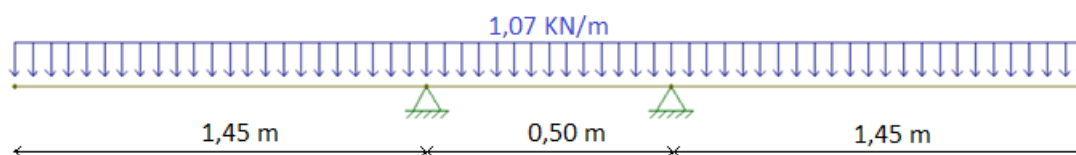


Figura 4.10 - Schema statico della generica trave di alluminio che sorregge il piano d'appoggio. Il contatto trave-terreno è schematizzabile tramite incastri, in virtù della bullonatura che collega la trave in alluminio al traliccio d'appoggio

Si ricorda l'equazione differenziale della linea elastica¹⁷, che esprime la freccia $v(z)$, o abbassamento, in funzione del momento flettente M_x sollecitante e della rigidezza flessionale (EI_x) della trave:

$$\frac{d^2v}{dz^2} = -\frac{M_x}{EI_x} \quad (4.1)$$

Riconducendo lo sbalzo ad uno degli schemi strutturali elementari, quello di una mensola sottoposta a carico uniformemente distribuito q , si può integrare l'equazione della linea elastica e ottenere la soluzione analitica del problema. La sollecitazione di flessione a cui è sottoposta la trave è schematizzata in figura.

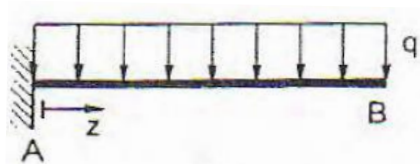


Figura 4.11 - Schema strutturale di mensola lunga l , con carico distribuito uniforme

In questo caso l'equazione differenziale assume la forma:

$$\frac{d^2v}{dz^2} = \frac{q(l-z)^2}{2EI} \quad (4.2)$$

Una volta integrata, fornisce:

$$v'(z) = \frac{q}{2EI} \left(\frac{z^3}{3} - lz^2 + l^2z + C_1 \right) \quad (4.3)$$

$$v(z) = \frac{q}{2EI} \left(\frac{z^4}{12} - l\frac{z^3}{3} + l^2\frac{z^2}{2} + C_1z + C_2 \right) \quad (4.4)$$

Le due costanti C_1 e C_2 sono ottenibili dalle condizioni al contorno:

$$v(0) = v'(0) = 0 \quad (4.5)$$

le quali esprimono l'annullamento rispettivamente della freccia e della rotazione all'incastro. Quindi:

$$C_1 = C_2 = 0 \quad (4.6)$$

e pertanto la freccia all'estremità B vale:

$$v_B = \frac{ql^4}{8EI} \quad (4.7)$$

Allora, partendo dall'equazione (4.7) nella quale sono noti il carico distribuito q , la lunghezza dello sbalzo l , il modulo elastico dell'alluminio E e la freccia massima consentita $v_B = 1 \text{ mm}$, è possibile calcolare il minimo momento d'inerzia $I_{\min}$ in grado di soddisfare la relazione:

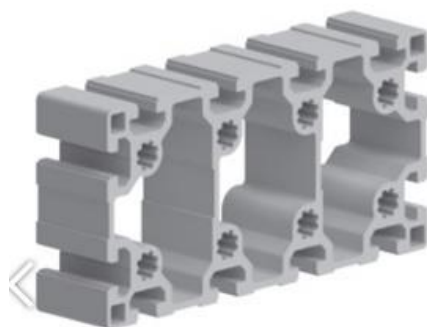
$$I_{\min} = \frac{qL^4}{8Ev_B} = 860,19 \text{ cm}^4$$

Per la fornitura del materiale ci si è affidati ad una ditta esterna (*Alusic*) specializzata nella realizzazione di profilati e strutture in lega di alluminio primario, per le quali sono disponibili le sezioni dei profili di alluminio commerciali, con relativa indicazione del momento d'inerzia I .

È stata scelta una sezione rettangolare di dimensioni 90 x 180 mm, le cui caratteristiche sono riportate nella figura seguente e per la quale è stata effettuata la verifica dell'abbassamento massimo all'estremità, prima con i soli carichi permanenti agenti e poi a pieno carico.

90x180BH
105
45

CODICE	$I_x \text{ cm}^4$	$I_y \text{ cm}^4$	$W_x \text{ cm}^3$	$W_y \text{ cm}^3$	$A \text{ mm}^2$	Kg/m
084.105.013	1430,10	418,90	158,33	93,09	4323	11,67



Alluminio anodizzato
 Anodised aluminium - Aluminium anodisé
 Aluminio anodizado - Eloxiertes Aluminium
Colore naturale
 Natural colour - Couleur naturelle
 Color natural - Natürliche Farbe
L=6,040m

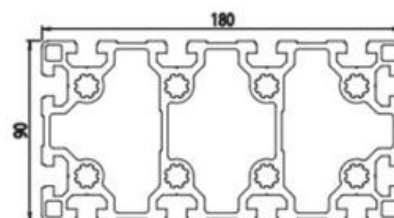


Figura 4.12 - Caratteristiche geometriche della sezione impiegata. Immagine estratta dal catalogo online Alusic

Come si legge sul sito dell'azienda¹⁸, "tutti i profili Alusic realizzati per estrusione di lega di alluminio primario EN-AW 6060 possiedono stato metallurgico T5/T6 in modo da garantire l'assoluta stabilità del materiale nel tempo". Le barre fornite sono anodizzate.

In genere questa lega è utilizzata in ambienti corrosivi in cui però non si pretendono requisiti di resistenza troppo elevati.

Adottando lo schema a mensola e impiegando le travi sul lato corto (in modo da sfruttare il momento di inerzia massimo), la soglia imposta sulla freccia all'estremità è rispettata:

Caratteristiche sezione		Carichi agenti sulla trave			
		Interasse (o competenza trave) [m]		0,57	
$E [N / mm^2]$	69000				
$I [mm^4]$	$14,3 \cdot 10^6$		$[kg / m]$	coeff. azioni	$[N / m]$
$\Omega [mm^2]$	4323	peso proprio	11,67	$\gamma_g = 1,3$	151,71
Peso $[kg / m]$	11,67	pannelli sandwich	5,19		67,43
		10 cm acqua	57,00	$\gamma_q = 1,5$	855,00
Verifica freccia all'estremità					
		Carico $[N / m]$	Freccia [mm]		
Carico permanente (trave + pannello)		219,14	0,123 < 1		
Carico permanente (trave + pannello + acqua)		1074,14	0,601 < 1		

Tabella 4.1 - Abbassamento agli estremi della trave adottando lo schema a mensola

Con questi valori, sono necessarie 12 travi disposte parallelamente secondo il loro asse longitudinale, con interasse pari a 0,57 m, per creare il piano d'appoggio del pannello superiore.

È stata elaborata un'analisi strutturale più approfondita per verificare l'esattezza del calcolo analitico della freccia all'estremità della trave, effettuando un'analisi agli elementi finiti della singola trave di alluminio sottoposta al carico in esercizio.

A tal fine è stato utilizzato il programma di calcolo agli elementi finiti *SAP2000*.

Il primo passo per modellare la trave consiste nel fissarne le caratteristiche geometriche e le condizioni di vincolo esterne: nella realtà la trave è ancorata al traliccio mediante bullonatura, perciò i vincoli alla base possono essere ipotizzati come cerniere o incastri. Risulta conveniente imporre le condizioni di vincolo meno stabili, quindi due semplici appoggi che consentono la rotazione (cerniere), piuttosto che due vincoli più condizionanti, che bloccano spostamenti e rotazioni (incastri).

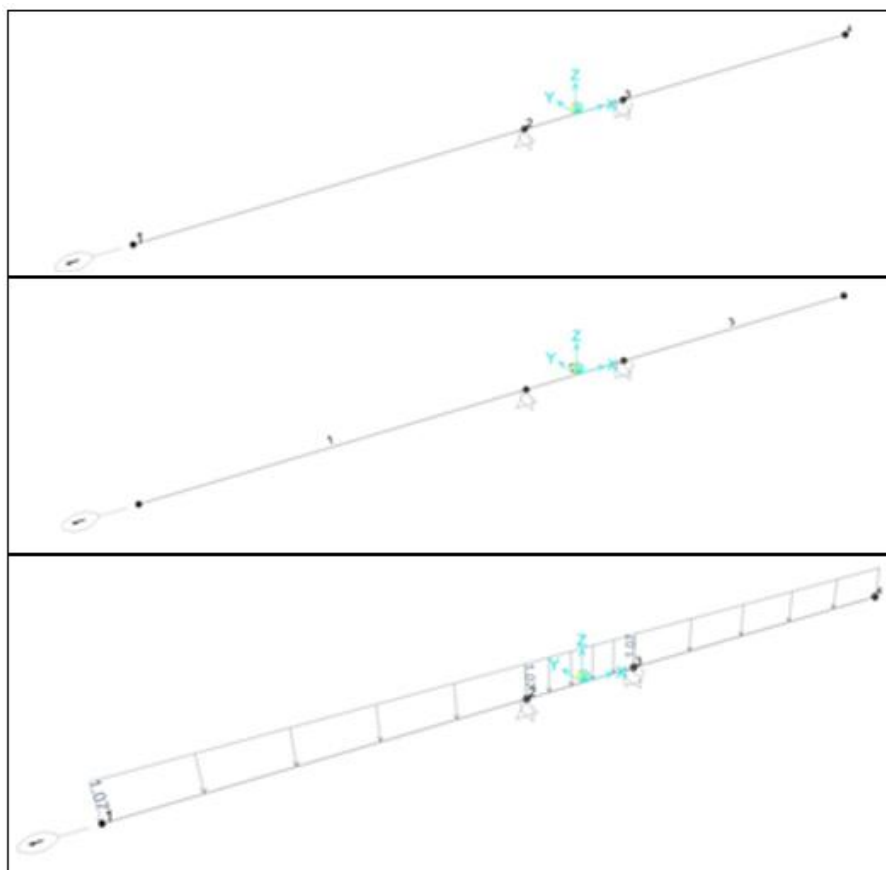


Figura 4.13 - Fasi della modellazione in SAP2000, dall'alto: definizione dei vincoli esterni, della lunghezza delle aste e dei carichi

Successivamente si definiscono i materiali, le proprietà della sezione ed infine i carichi agenti (Kg/cm). Data la complessità geometrica della sezione, si è deciso di adottare una sezione scatolare delle medesime dimensioni, ponendo attenzione a mantenere le stesse proprietà meccaniche (modulo elastico, momento d'inerzia, rigidezza flessionale).

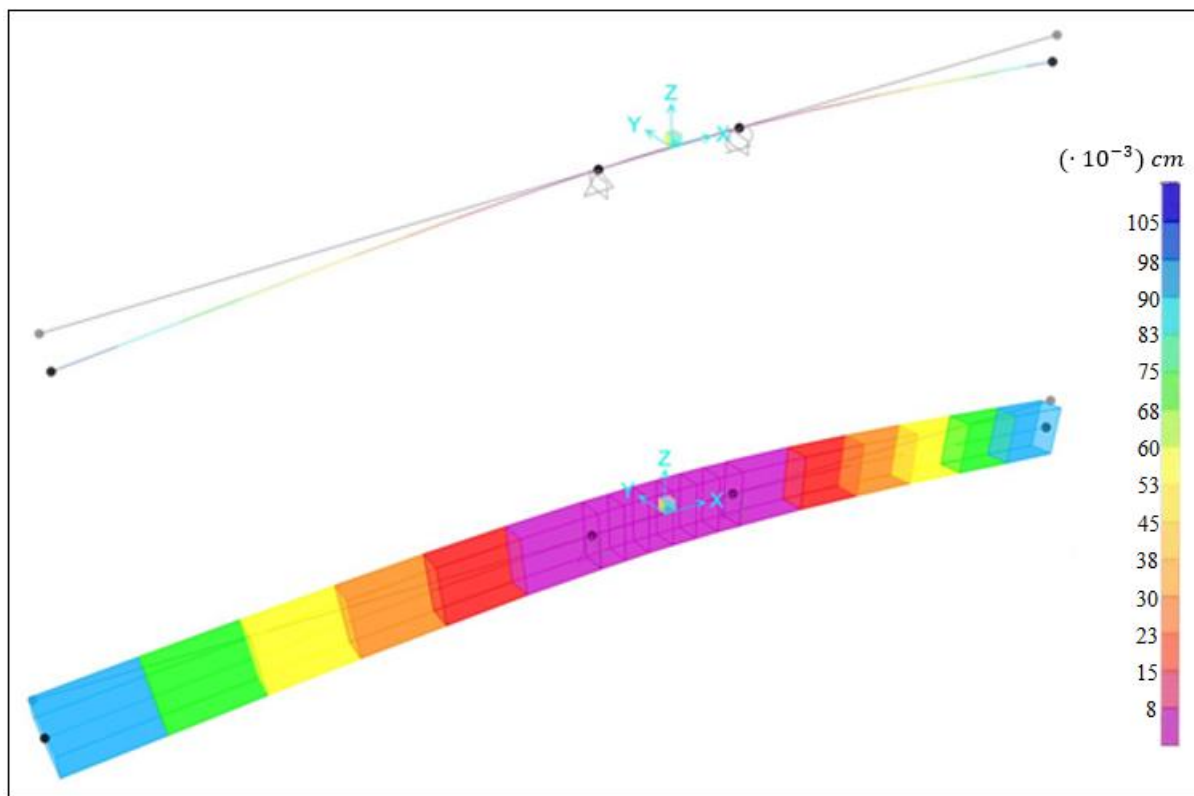


Figura 4.14 - Deformata elastica della trave sottoposta a peso proprio, peso dei pannelli e 10 cm di acqua a riposo

La modellazione FEM ha restituito valori in accordo con i risultati analitici, mostrando una deformazione massima inferiore a $100 (\cdot 10^{-3})$ cm, ovvero inferiore a 1 mm.

- **Pannelli per la base del piano**

Per comporre il piano orizzontale si è pensato di adottare pannelli di tipo composito che potessero unire diverse proprietà in un unico materiale: il piano orizzontale si troverà a contatto diretto con il fluido durante gli esperimenti, pertanto è fondamentale che i pannelli siano lisci e impermeabili, oltre a dover essere sufficientemente rigidi in modo da sopportare il peso dell'acqua in condizioni di massimo carico.

Così come alle travi, ai pannelli è richiesta altrettanta regolarità, in special modo sulla superficie a contatto con l'acqua, e, visto il collegamento diretto alle travi sottostanti, anche una deformazione limite in mezzera pari a 1 mm (come per le travi di alluminio).

La soluzione è stata individuata nell'applicazione di pannelli metallici coibentati, anche denominati pannelli sandwich, costituiti da tre parti¹⁹:

- Pelli, o lamine superficiali, svolgono la funzione strutturale di resistenza alle sollecitazioni di flessione e trazione;
- *Core*, o anima, leggero e di spessore esiguo, funge da collegamento tra le due lamine e garantisce il trasferimento dello sforzo di taglio tra esse;
- Adesivo, assolve il compito fondamentale di resistere alle sollecitazioni tangenziali che intercorrono tra core e pelli.

Le proprietà che sono in grado di offrire complessivamente i pannelli dipendono quindi dalla resistenza meccanica dei laminati e dalla capacità di una struttura leggera e strutturalmente debole come il core di trasferire gli sforzi e mantenere inalterata la distanza tra i piani delle pelli.

Sono stati impiegati pannelli sandwich forniti da *CEL Components S.r.l.*²⁰

In particolare si tratta di pannelli di spessore 50 mm, con pelli da 1 mm in alluminio grezzo e anima in alveolare di alluminio, aventi celle a nido d'ape (*honeycomb*) di diametro 6 mm.

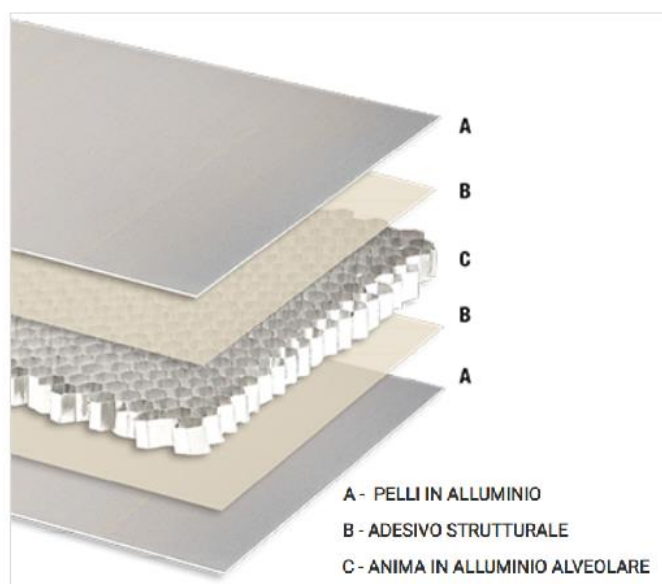


Figura 4.15 - Schema dei materiali componenti un Pannello Sandwich COMPOCEL AL

La leggerezza è garantita dal fine strato di alluminio (circa $50\ \mu\text{m}$) che compone l'alveolare e dallo spazio vuoto all'interno degli alveoli. La rigidità è dovuta alla particolare struttura interna dei pannelli, il cui comportamento meccanico può essere equiparato ad una trave a doppia T, dove le pelli rappresentano le flange della trave e il core l'anima verticale.

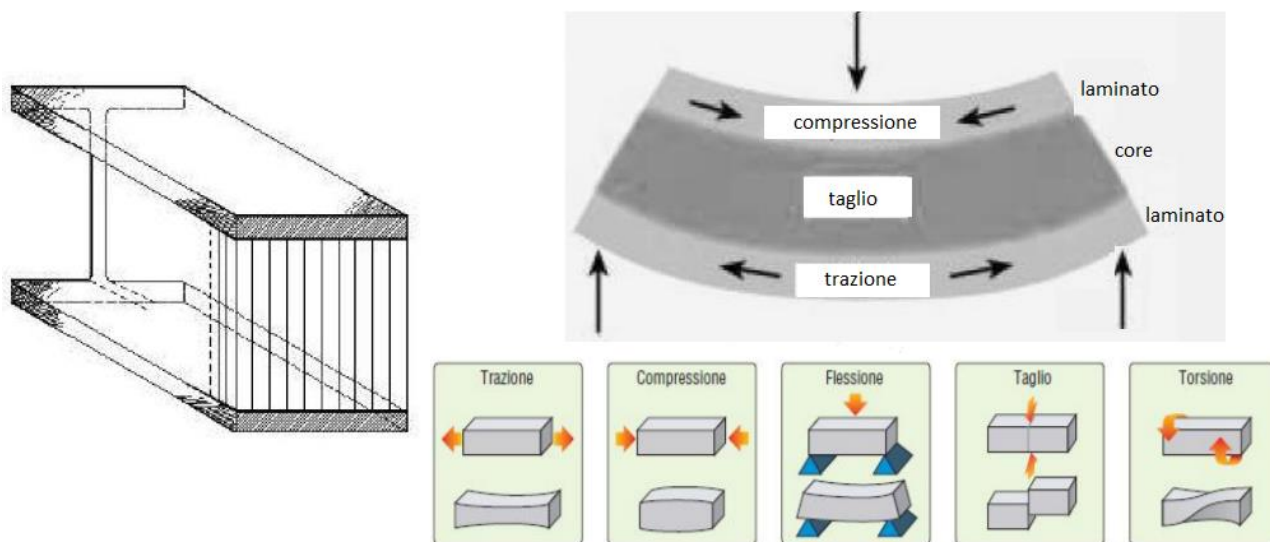


Figura 4.16 - Pannello sandwich comparato a trave a doppia T, e relativo comportamento meccanico a flessione

Quando il pannello è sottoposto ad un carico di flessione, le pelli (superiore ed inferiore) sono soggette a sollecitazioni meccaniche antitetiche, rispettivamente di compressione e trazione. Il core trasferisce gli sforzi di taglio derivanti dall'azione delle due facce superficiali, che variano la loro lunghezza a causa dell'azione dei carichi applicati e dei vincoli presenti. Inoltre, il core assorbe gran parte dei carichi in direzione perpendicolare. L'adesione tra core e pelli è assicurata dalla presenza dell'adesivo strutturale, senza il quale non avrebbero luogo le tensioni tangenziali utili a impedire lo scorrimento della lamina, né un aumento del momento di inerzia.

Come per la trave a doppia T, il momento di inerzia del pannello è direttamente proporzionale al cubo della distanza tra le lamine, perciò incrementando lo spessore del core si aumenta notevolmente il momento di inerzia.

Le caratteristiche costruttive del pannello e le sue prestazioni meccaniche sono riportate nella scheda tecnica del fornitore.

All'interno di essa sono già presenti le informazioni di cui abbiamo bisogno, in particolare il momento d'inerzia e la freccia relativa al carico massimo sopportabile dalla struttura. Per pannelli di spessore 50 mm il peso del pannello è di $9,1\ \text{Kg} / \text{m}^2$.

Per quanto riguarda la verifica di abbassamento in mezzeria allora, la si può considerare superata se ci si affida a questi valori.

Compocel® AL

Composizione del pannello

PELLI IN ALLUMINIO

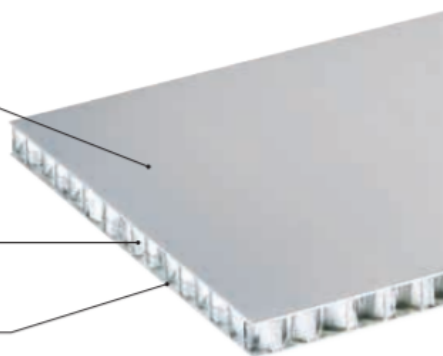
Spessore mm: 0,5 - 0,8 - 1 (standard)

ANIMA

Alveolare in alluminio (Lega Serie 3000*) con celle esagonali

Diametro: Ø1/4", Ø3/8" Ø1/2", Ø3/4"

Spessore Foil: da 50 a 70 microns



* Appartengono alla serie 3000: Alluminio Lega 3003, Alluminio Lega 3005, Alluminio Lega 3103, Alluminio Lega 3104.

Scheda tecnica per pannelli standard (dimensioni, materiali e finiture speciali su richiesta)

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL PANNELLO	dimensioni pannello	mm	standard 1250 x 2500 / 1250 x 3000 / 1500 x 3000; su richiesta fino a 2000 x 7000							
	tolleranza spessore	mm	± 0,3							
	tolleranze dimensione	mm	± 30							
	planarità ***	mm/m	+/-1							
	spessore pelli	mm	da 0,5 a 5,0							
	lega alluminio pelli		serie 1000, serie 3000, serie 5000							
	lega alluminio honeycomb		serie 3000, serie 5000							
	spessore foil honeycomb	µm	50 e 70							
	dimensioni celle esagonali honeycomb	Ø = mm	da 3 a 19							
	densità honeycomb	Kg/m³	da 20 a 163							
PRESTAZIONI FISICO - MECCANICHE DEL PANNELLO	adesivo		poliuretanico bicomponente / film termoplastico / film epossidico / epossidico bicomponente							
	qualità della superficie		grezza / primer / poliestere / PVDF / anodizzata							
	tipologia pannello (alcuni esempi)	spessore pannello mm	6	10	15	10	15	20	25	
		spessore lamiera mm	0,5 + 0,5			1,0 + 1,0				
	peso pannello ‡	Kg/m²	3,8	4,0	4,3	6,7	7,0	7,3	7,6	
	resistenza a compressione stabilizzata ** ‡	ASTM C 365-365 M	Mpa							
			2,9							
	carico massimo ** ‡	ASTM C 393 †	N	190	340	520	600	1.000	1.350	1.700
	freccia a carico massimo ‡	ASTM C 393 †	mm	14	8	6	8	6	4	3
	modulo di elasticità E delle lamiere	Mpa	68.000 - 70.000							
	momento di inerzia I **	mm⁴/m	7.600	22.000	52.000	40.000	98.000	181.000	288.000	
	resistenza media alla delaminazione ** ‡	ASTM D1781-98 (2012)	> 280 N/76 mm oppure 40 Nmm/mm							
	temperatura massima di servizio **	°C	- 40 / + 60; a richiesta + 80 / + 100 / + 150							
	coefficiente dilatazione termica **	°C⁻¹	2,3 x 10⁻⁵							

** valore testato da Laboratorio Interno

*** valore indicativo

† dimensioni provino con 4 punti di appoggio (L, W) 540 mm x 50 mm distanza tra i punti di appoggio inferiori di 500mm
e distanza dai punti di appoggio superiori di 250mm.

‡ valori riferiti a pannello con nido d'ape Ø6 56kg/m³ (Ø 1/4")

Figura 4.17 - Scheda tecnica di un Pannello Sandwich COMPOCEL AL standard

4.3 Light box

L'acquisizione delle informazioni riguardanti la corrente generata dal dam-break e l'analisi delle immagini ad alta risoluzione, scattate da fotocamere professionali, sono possibili grazie al posizionamento dei dispositivi in questione al di sopra del piano dove avviene il flusso. I dispositivi infatti saranno fissati sul pannello orizzontale che funge da soffitto della camera, oppure direttamente sulle *truss* che costituiscono lo scheletro della struttura.

Il motivo principale che spinge ad allestire tale camera resta comunque quello di ottenere una distribuzione dell'illuminazione omogenea al suolo (che corrisponde al piano di scorrimento dell'acqua). Nella pratica ciò si realizza con pareti bianche opache leggermente grezze, che non producano un "effetto specchio". La scelta dunque è orientata verso pannelli di dimensioni elevate (per avere un numero minimo di giunzioni, le quali rappresentano delle discontinuità) e leggeri (pannelli autoportanti, ad eccezione del pannello di copertura).

- **Travatura reticolare**

Lo scheletro della stanza è composto da tralicci di alluminio di diverse dimensioni, propriamente assemblati tra di loro a formare una gabbia di dimensioni 4,30 x 6,80 x 6,35 m che possa contenere interamente il piano di valle.

I supporti di metallo hanno il compito di mantenere sospesi gli impianti luce e i dispositivi di registrazione, i quali dovranno essere installati sulle travi e poi comandati da remoto. Le pareti e il soffitto della stanza sono invece formate da pannelli, il cui peso si scarica direttamente sulle *truss* e infine a terra attraverso i montanti.

La tipologia di *truss* utilizzate è della serie *Heavy* di *Protruss*, comunemente impiegate per la costruzione di palchi per spettacoli o concerti, dove svolgono funzioni di supporto di impianti audio e luce di peso considerevole, oltre a delimitare gli spazi.

Il singolo modulo di una struttura è composta da quattro tubi portanti di alluminio con diagonali di rinforzo, saldati, caratterizzati da:

- Tubi correnti: tubo estruso Ø 50x3 mm 6082 T6
- Diagonali: tubo estruso Ø 20x2 mm 6082 T6

Il materiale è stato acquistato da *Audio-Luci-Store*, fornitore di attrezzature professionali per teatri ed impianti di illuminazione²¹.

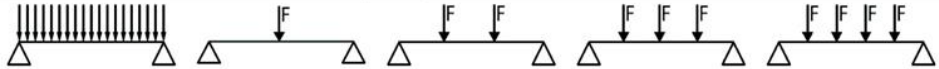
MDTRUSS		TRQ40-S2 TRUSS SERIES														
																
Descrizione/Description		Specifiche/Specifications														
Dimensioni esterne/External dimensions		389 x 389 mm														
Distanze tra gli assi/Distance between axis		339 x 339 mm														
Tubi longitudinali/Main tubes (longitudinal)		Alluminio estruso/Extruded aluminium EN AW 6005 AT6 Ø50 x 2 mm														
Tubi trasversali/Cross tubes (braces)		Alluminio estruso/Extruded aluminium EN AW 6005 AT6 Ø25 x 2 mm														
Particolari torniti/Parts turned on lathe (machined from a single piece)		Alluminio estruso/Extruded aluminium EN AW 6005/6082AT6														
Processo saldatura/Welding Process		Saldatura a filo robotizzata/Robotized arc welding														
Lunghezze disponibili mt./Available lengths m		0,50 – 1,00 – 1,50 – 2,00 – 2,50 – 3,00 – 3,50 – 4,00														
Sistemi di connessione/Coupling systems		TRAK Series														
Compatibilità/Compatibility		Litec System														
																
geometry		evenly distributed load			central point load			two points load (load per point)			three points load (load per point)			four points load (load per point)		
truss composition	span [m]	load [Kg/m]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]
1 x 1m	1	2500	2500	1	2100	2100	1	1100	2200	1	780	2340	1	600	2400	1
1 x 2m	2	1240	2480	1	1500	1500	1	860	1720	1	700	2100	1	530	2120	1
1 x 3m	3	820	2460	2	1200	1200	1	720	1440	1	560	1680	2	480	1920	2
2 x 2m	4	583	2332	7	1000	1000	5	628	1256	6	520	1560	6	420	1680	6
2 x 2m + 1 x 1m	5	422	2110	10	870	870	7	556	1112	7	432	1296	8	360	1440	8
2 x 3m	6	320	1920	13	760	760	10	494	988	9	388	1164	10	300	1200	10
1 x 4m + 3 x 1m	7	240	1680	21	678	678	16	446	892	17	358	1074	19	290	1160	19
2 x 4m	8	190	1520	29	602	602	23	406	812	24	322	966	27	262	1048	27
3 x 3m	9	150	1350	31	548	548	23	370	740	26	302	906	28	238	952	27
5 x 2m	10	120	1200	52	500	500	41	338	676	45	280	840	49	214	856	47
5 x 4m + 1 x 1m	11	100	1100	58	452	452	47	310	620	51	260	780	55	200	800	54
4 x 3m	12	80	960	64	416	416	52	286	572	57	230	690	62	180	720	62
4 x 3m + 1 x 1m	13	70	910	95	382	382	70	266	532	82	210	630	75	166	664	70
7 x 2m	14	58	812	111	350	350	94	250	500	100	190	570	87	150	600	75
5 x 3m	15	49	732	116	326	326	102	228	456	106	180	540	95	140	560	112
4 x 4m	16	42	672	135	300	300	121	214	428	122	164	492	124	130	520	125
- Measurements are in accordance with UNI ENV 1999-1-1 (Eurocode 9). - Figures are valid for static loads with spans supported at each end and indicated loading setup. - Loads have been applied aligned with the central line of the truss. - The values herein detailed show the allowable static loads which can be applied to the truss (payload or live load). If dynamic loads or wind loads are involved, please contact a structural engineer to get new figures. The self-weight of the truss has been taken into account. - Measurements have been taken in ideal loading conditions. In other loading conditions User should check the truss accordingly to the application being considered.																

Figura 4.18 - Scheda tecnica dei tralicci serie TRQ40-S2 costituenti lo scheletro del light box



TRP40-S2 TRUSS SERIES



Descrizione/Description	Specifiche/Specifications
Dimensioni esterne/External dimensions	389 x 389 mm
Distanze tra gli assi/Distance between axis	339 x 339 mm
Tubi longitudinali/Main tubes (longitudinal)	Alluminio estruso/Extruded aluminium EN AW 6005 AT6 Ø50X2 mm
Tubi trasversali/Cross tubes (braces)	Alluminio estruso/Extruded aluminium EN AW 6005 AT6 Ø25X2 mm
Particolari torniti/Parts turned on lathe (machined from a single piece)	Alluminio estruso/Extruded aluminium EN AW 6005/6082AT6
Processo saldatura/Welding Process	Saldatura a filo robotizzata/Robotized arc welding
Lunghezze disponibili mt./Available lengths m	0,50 - 1,00 - 1,50 - 2,00 - 2,50 - 3,00 - 3,50 - 4,00
Sistemi di connessione/Coupling systems	TRAK Series
Compatibilità/Compatibility	Litec System

geometry		uniformly distributed load			central point load			two point load			three point load			four point load		
component	span [m]	load [Kg/m]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]	point load [Kg]	full load [Kg]	central deflection [mm]
1pz x 1m	1	1220	1220	0,9	910	910	1,0	500	1000	0,9	350	1050	0,9	270	1080	0,9
1pz x 2m	2	540	1080	1,5	626	626	1,4	410	820	1,4	290	870	1,4	230	920	1,4
1pz x 3m	3	230	690	1,7	320	320	1,7	230	460	1,4	170	510	1,7	155	620	1,7
2pz x 2m	4	120	480	2,8	210	210	2,5	148	296	2,6	126	378	3,0	110	440	3,2
2x2 + 1m	5	41	205	3,3	82	82	2,8	70	140	2,8	60	180	3,1	46	184	3,6
2pz x 3m	6	22	132	3,8	50	50	3,1	34	68	3,0	26	78	3,2	26	104	3,9
2x3 + 1m	7	15	105	6,7	26	26	5,6	22	44	5,9	20	60	6,0	18	72	6,5
4pz x 2m	8	8	64	8,6	20	20	7,0	21	42	7,9	15	45	7,9	13	52	8,1
3pz x 3m	9	6	54	9,9	14	14	8,9	10	20	9,2	8	24	9,3	8	32	9,6
5pz x 2m	10	3	30	16,5	10	10	15,4	6	12	15,4	6	18	16,0	7	28	16,2

- Measurements are in accordance with UNI ENV 1999-1-1 (Eurocode 9).
- Figures are valid for static loads with spans supported at each end and indicated loading setup.
- Loads have been applied aligned with the central line of the truss.
- The values herein detailed show the allowable static loads which can be applied to the truss (payload or live load). If dynamic loads or wind loads are involved, please contact a structural engineer to get new figures. The self-weight of the truss has been taken into account.
- Measurements have been taken in ideal loading conditions. In other loading conditions User should check the truss accordingly to the application being considered.

Figura 4.19 - Scheda tecnica dei tralicci serie TRP40-S2 costituenti lo scheletro del light box

- **Pannelli di copertura e di ricoprimento**

La struttura del *light box* è completata dal fissaggio dei pannelli, che rappresentano le pareti ed il soffitto della stessa. Le proprietà ottiche dei pannelli assumono estrema importanza se si pensa che lo scopo è quello di ottenere l'uniformità spaziale sulla superficie allagabile in termini di illuminazione; dunque oltre a dover essere una struttura rigida e leggera, in grado di sostenere l'impianto di illuminazione e di registrazione, il pannello dovrà anche possedere una superficie adeguata a creare un ambiente altamente riflettente.

Ad eccezione del pannello di copertura (soffitto), i carichi che graveranno sui pannelli sono limitati al peso proprio degli stessi e all'impianto video e luci, perciò si è pensato di impiegare pannelli sandwich il cui *core* sia composto di balsa o schiume, per i quali le prestazioni sono naturalmente inferiori rispetto a quelle espresse dai pannelli sandwich con alveolare in alluminio.

A questo scopo si propongono diverse soluzioni, dato che ci si trova ancora nella fase di progettazione.

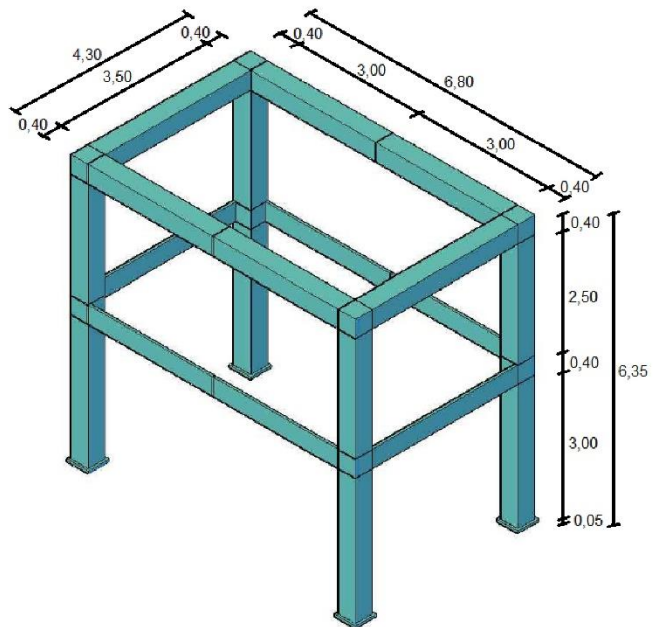
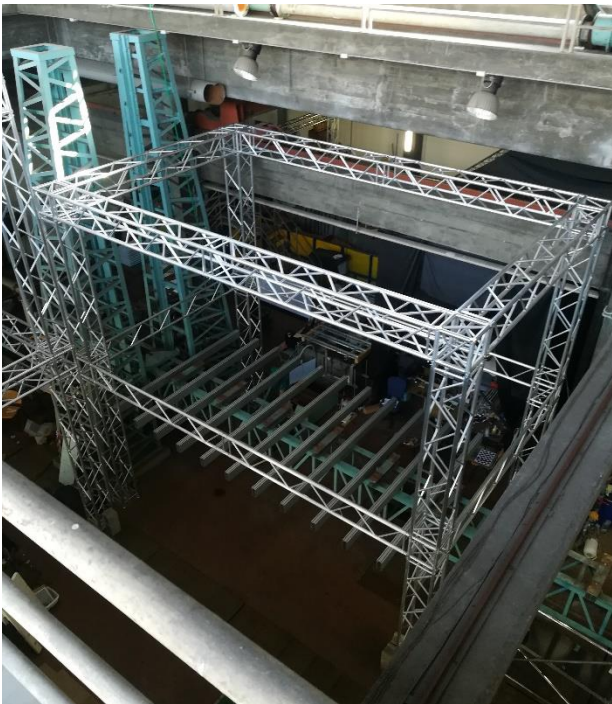


Figura 4.20 - Scheletro del *light box* prima dell'installazione dei pannelli e relativo schema geometrico (misure in metri)

– Pannelli di tamponamento laterali

Per quanto riguarda i pannelli laterali, non sono necessari requisiti stringenti, a meno delle proprietà ottiche sulla parete interna: il singolo pannello deve essere autoportante, non deve esibire inflessioni eccessive quando posto in opera, e deve offrire resistenza e durabilità nel caso debba essere movimentato o rimosso. Il colore della parete interna deve essere obbligatoriamente Bianco puro (RAL 9010) per diffondere uniformemente la luce all'interno del light box.

Il fatto che l'intera struttura si trovi in ambiente chiuso consente di trascurarne le caratteristiche termiche ed acustiche, proprietà che del resto non sono rilevanti per il tipo di esperimenti che si vogliono effettuare. La scelta dunque ricade su pannelli sandwich con interposta schiuma poliuretanica, che presentano molteplici vantaggi, tra cui essere leggeri, economici e di semplice installazione.

Data la particolare geometria della gabbia portante costituita dalle truss (*Figura 4.16*), i pannelli saranno installati in verticale su 3 appoggi, con luci di 3,0 e 2,5 metri.

La prima possibilità presa in considerazione è offerta da *Lattonedil*²², produttore di pannelli isolanti per coperture e pareti, che offre un'ampia scelta di pannelli in poliuretano, ognuno con specifiche funzionalità. La soluzione più semplice risulta essere il pannello piano autoportante *ISOPAR*, adatto a pareti mobili grazie alla sua geometria semplice e regolare. I pannelli sono forniti in lastre di larghezza 1 m, pertanto saranno necessari 24 pannelli per coprire la superficie laterale della gabbia, considerando che alcuni dei pannelli dovranno subire un taglio per essere adattati alle pareti.

Le parti di lattoneria e accessori necessari per l'installazione che risultano visibili dall'interno della camera dovranno essere opportunamente verniciate di colore Bianco puro.

La versione *ELITE* dei pannelli *ISOPAR* (*Figura 4.17*) si rende particolarmente adatta alle nostre esigenze in quanto propone il fissaggio nascosto; in questo modo le giunzioni metalliche non disturbano la diffusione della luce con eventuali riflessioni localizzate.

Una possibile alternativa è stata trovata nel catalogo del produttore *Marcegaglia Buildtech*²³, gruppo industriale leader nella trasformazione dell'acciaio. Tra i suoi prodotti offre una gamma di pannelli coibentati per parete, in particolare pannelli sandwich in acciaio preverniciato con isolante in schiuma poliuretanica o lana di roccia.

Anche in questo caso ci si affida ad un pannello dalle caratteristiche semplici, leggero e dalle proprietà antigroscopiche e antimuffa: si tratta dei pannelli in poliuretano a fissaggio nascosto, con pelli in alluminio o in acciaio (*Figura 4.18*).



ISOPAR® ÉLITE

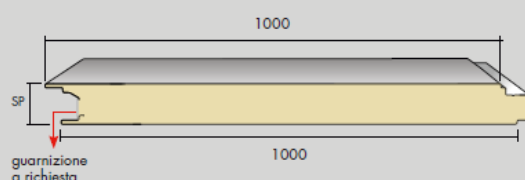
PANNELLO ISOLANTE PER PARETE CON FISSAGGIO NASCOSTO

Lattenedil consiglia, durante la fase di montaggio, di utilizzare la piastrina di fissaggio in acciaio. La piastrina ha lo scopo di distribuire gli sforzi derivanti dal fissaggio e di aumentare la resistenza alle sollecitazioni di compressione e di depressione che agiscono sui pannelli di parete. La posizione e il numero dei punti di fissaggio va definita, dal progettista, in fase progettuale, in base alle sollecitazioni esercitate sulla struttura.

LATO INTERNO
LIGHT BOX

LATO ESTERNO
LIGHT BOX

SPESSORE DA 40 A 120 MM



Proprietà statiche (kg/m²)

Facciata ESTERNA:

Alluminio 0,6 mm

Facciata INTERNA:

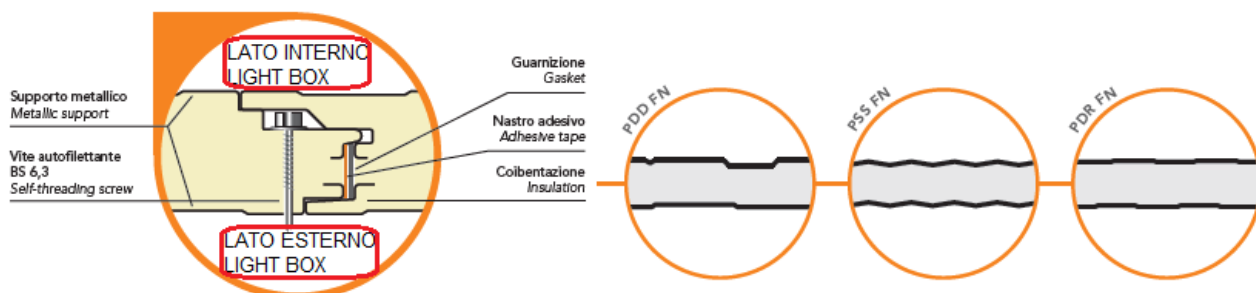
Acciaio 0,4 mm

Larghezza efficace
appoggio: 120 mm

SPESSORE PANNELLO (mm)	CAMPATA DOPPIA											PESO (Kg/m ²)
	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6		
25	115	85	65									5,53
30	135	105	75	60	50							5,71
35	160	120	85	65	60							5,89
40	185	135	95	70	65	50						6,07
50	230	165	110	80	65	65	50					6,46
60	280	190	125	95	75	75	65	50				6,85
80	380	235	160	115	90	70	75	65	50			7,63
100	465	280	185	135	105	85	70	75	65	55		8,41
120	530	320	215	155	120	95	80	70	75	65		9,19
150	620	380	255	185	140	115	95	80	70	68		10,36
180	705	440	300	215	165	130	110	90	80	70		11,53
200	745	480	325	235	180	145	115	110	85	75		12,31
220	785	520	365	245	200	155	125	115	90	80		13,10
240	825	560	405	275	220	165	135	120	95	85		13,87

Calcolo per dimensionamento statico eseguito secondo quanto contenuto nell'Allegato E della norma UNI EN 14509. Limite di freccia normale: 1/200 ℓ

Figura 4.21 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano ISOPAR ELITE. In rosso le caratteristiche



PDD FN - PSS FN - PDR FN										ACCIAIO - STEEL									
Spessore pannello Panel thickness	Spessore supporto Support thickness	Peso Weight	U		Distanza fra gli appoggi in m - Supports spacing (m)														
					▲ ▲ campata semplice - simple span					▲ ▲ ▲ campata multipla - multiple span									
mm	mm	kg/m²	W/m²K		2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5			
			EN 14509	EN ISO 6946	Carico massimo uniformemente distribuito in kN/m² acciaio - Max load capacity kN/m² steel														
50	0,4/0,4 0,5/0,5 0,6/0,6	9,33	0,46	0,39	1,14	0,89	0,66	0,45	0,33	1,95	1,29	0,91	0,68	0,48	0,33				
		11,18			2,25	1,75	1,30	0,88	0,65	3,85	2,55	1,79	1,34	0,95	0,65	0,50			
		13,03			2,40	1,87	1,39	0,94	0,70	4,00	2,80	1,92	1,44	1,02	0,70	0,54			
60	0,4/0,4 0,5/0,5 0,6/0,6	9,71	0,38	0,33	1,37	1,12	0,86	0,61	0,46	2,33	1,62	1,17	0,91	0,66	0,41	0,30			
		11,56			2,70	2,20	1,70	1,20	0,90	4,60	3,20	2,30	1,80	1,30	0,80	0,60			
		13,41			2,90	2,40	1,82	1,28	0,96	4,80	3,38	2,48	1,93	1,39	0,86	0,64			
80	0,5/0,5 0,6/0,6	12,32	0,27	0,25	3,50	2,50	1,90	1,50	1,20	5,65	4,35	3,25	2,42	1,85	1,40	1,15			
		14,17			3,70	2,70	2,10	1,61	1,28	5,80	4,50	3,45	2,60	1,98	1,50	1,23			
100	0,5/0,5 0,6/0,6	13,08	0,21	0,20	3,78	2,78	2,18	1,78	1,48	6,13	4,83	3,73	2,90	2,33	1,88	1,63			
		14,93			3,98	2,98	2,38	1,89	1,56	6,28	4,98	3,93	3,08	2,46	1,98	1,71			
120	0,5/0,5 0,6/0,6	13,84	0,18	0,17	4,16	3,06	2,40	1,96	1,63	6,74	5,31	4,10	3,19	2,56	2,07	1,79			
		15,69			4,38	3,28	2,62	2,08	1,72	6,91	5,48	4,32	3,39	2,71	2,18	1,88			

PDD FN - PSS FN - PDR FN										ALLUMINIO - ALUMINIUM									
Spessore pannello Panel thickness	Spessore supporto Support thickness	Peso Weight	U		Distanza fra gli appoggi in m - Supports spacing (m)														
					▲▲ campata semplice - simple span					▲▲▲▲ campata multipla - multiple span									
			W/m²K		2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5			
mm	mm	kg/m²	EN 14509	EN ISO 6946	Carico massimo uniformemente distribuito in kN/m² alluminio - Max load capacity kN/m² aluminium														
50	0,6/0,6	5,73	0,46	0,39	1,65	1,00	0,60			2,05	1,55	1,00	0,62						
60	0,6/0,6	6,11	0,38	0,33	1,80	1,40	0,80	0,40		2,23	1,80	1,30	0,90	0,60					
80	0,6/0,6	6,87	0,27	0,25	2,15	1,80	1,20	0,80	0,58	2,46	2,00	1,80	1,20	0,90	0,70	0,40			
100	0,6/0,6	7,63	0,21	0,20	2,48	2,13	1,53	1,13	0,91	2,79	2,33	2,13	1,53	1,23	1,98	1,71			
120	0,6/0,6	8,39	0,18	0,17	2,73	2,34	1,68	1,24	1,00	3,07	2,56	2,34	1,68	1,35	2,18	1,88			

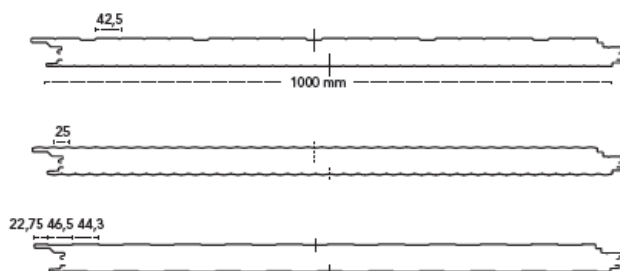
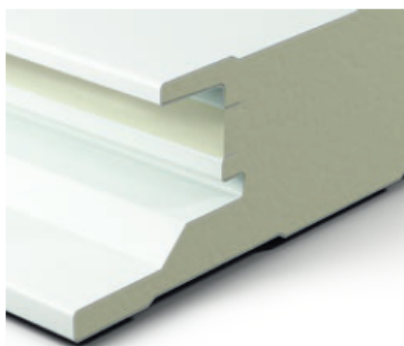


Figura 4.22 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano a fissaggio nascosto di Marcegaglia Buildtech.
In rosso le caratteristiche

– Pannelli di copertura

Quando i pannelli coibentati vengono utilizzati come elementi di copertura, essi costituiscono elementi strutturali a tutti gli effetti e come tali devono essere trattati nella fase di progettazione.

In aggiunta al peso proprio, la copertura deve sostenere il peso di almeno due persone, in previsione delle operazioni di installazione della telecamera o di altri dispositivi sulla sommità del box. L'acquisizione infatti avviene per mezzo di una telecamera fissata al di sopra dell'area allagabile, con l'asse ottico rivolto verticalmente verso il basso. In questo modo lo strumento è fissato definitivamente e gestito da remoto.

In virtù di questa funzione, la copertura si trova a dover rispettare per lo più requisiti strutturali, quali un'adeguata risposta alle azioni di taglio e flessione, la verifica ai limiti di deformabilità e la resistenza delle connessioni alle azioni taglianti e allo strappo, oltre al principale requisito funzionale connesso alla calpestabilità in fase di montaggio ed in esercizio.

Inoltre, il pannello superiore si trova a dover superare una luce di oltre 3,5 metri (pari alla larghezza del piano allagabile), che diventano 4,3 metri se si considera anche la copertura dei due montanti laterali, per cui le prestazioni richieste sono ovviamente superiori rispetto ai pannelli di tamponamento laterale. A differenza dei laterali, i pannelli di copertura risulteranno in campata semplice su due appoggi. Il minimo carico ammissibile che la copertura deve essere in grado di portare è fissato a 100 kg/m^2 , ovvero 1 kN/m^2 .

Dal momento che la copertura presenta una luce libera importante (almeno 3,5 metri), la cucitura del giunto longitudinale deve essere realizzata con interasse tra le viti non superiore al metro.

Per quanto riguarda il colore, si ribadisce l'importanza di avere una superficie interna altamente riflettente verniciata con colore Bianco puro (RAL 9010), con intradosso bianco, liscio e giunzioni possibilmente non visibili dall'interno della camera.

Non sono richieste speciali proprietà di isolamento termico, acustico o impermeabilità, dato che la struttura si trova in ambiente riparato, perciò si preferisce un core del pannello in schiuma poliuretanica piuttosto che in lana di roccia, il che conferisce migliori prestazioni meccaniche.

Una prima tipologia di pannelli scelta per la copertura è quella fornita da *Lattonedil*, pannello isolante a quattro o cinque greche (nelle varianti *EUROCOPE* e *EUROCINQUE*) con lamiera esterna in alluminio e lamiera interna in acciaio. La micronervatura interna (intradosso) deve essere liscia e di colore Bianco puro (*Figura 4.19*).

Anche il produttore *Marcegaglia* offre un pannello di fattura simile: la serie *TD5* offre pannelli in poliuretano a cinque greche. In alternativa si può optare per elementi di copertura grecati in acciaio o alluminio, sebbene essi presentino proprietà meccaniche inferiori rispetto ai pannelli in poliuretano e non garantiscano la planarità della superficie all'intradosso (*Figura 4.20*).

Tutti i tipi di copertura fin qui presentati considerano una luce libera di 4 metri, per facilitare il montaggio alle truss ed incrementare la base d'appoggio del pannello. Con le proprietà statiche indicate nelle tabelle si ammette una freccia massima in mezzeria inferiore a $L/200$.

Si riporta infine un'interessante soluzione dell'azienda *Italpannelli* ²⁴, che propone una tipologia di pannello autoportante piano e funzionale. Il pannello *MONO MEGA106 DECK* è costituito dalla parte interna da un supporto grecato che conferisce elevate prestazioni meccaniche, mentre sulla parte esterna è coperto da un manto in cartonfeltro bitumato, il che lo rende adatto alla calpestabilità.

Tuttavia, la presenza delle greche all'intradosso potrebbe compromettere la perfetta diffusione della luce (Figura 4.21).

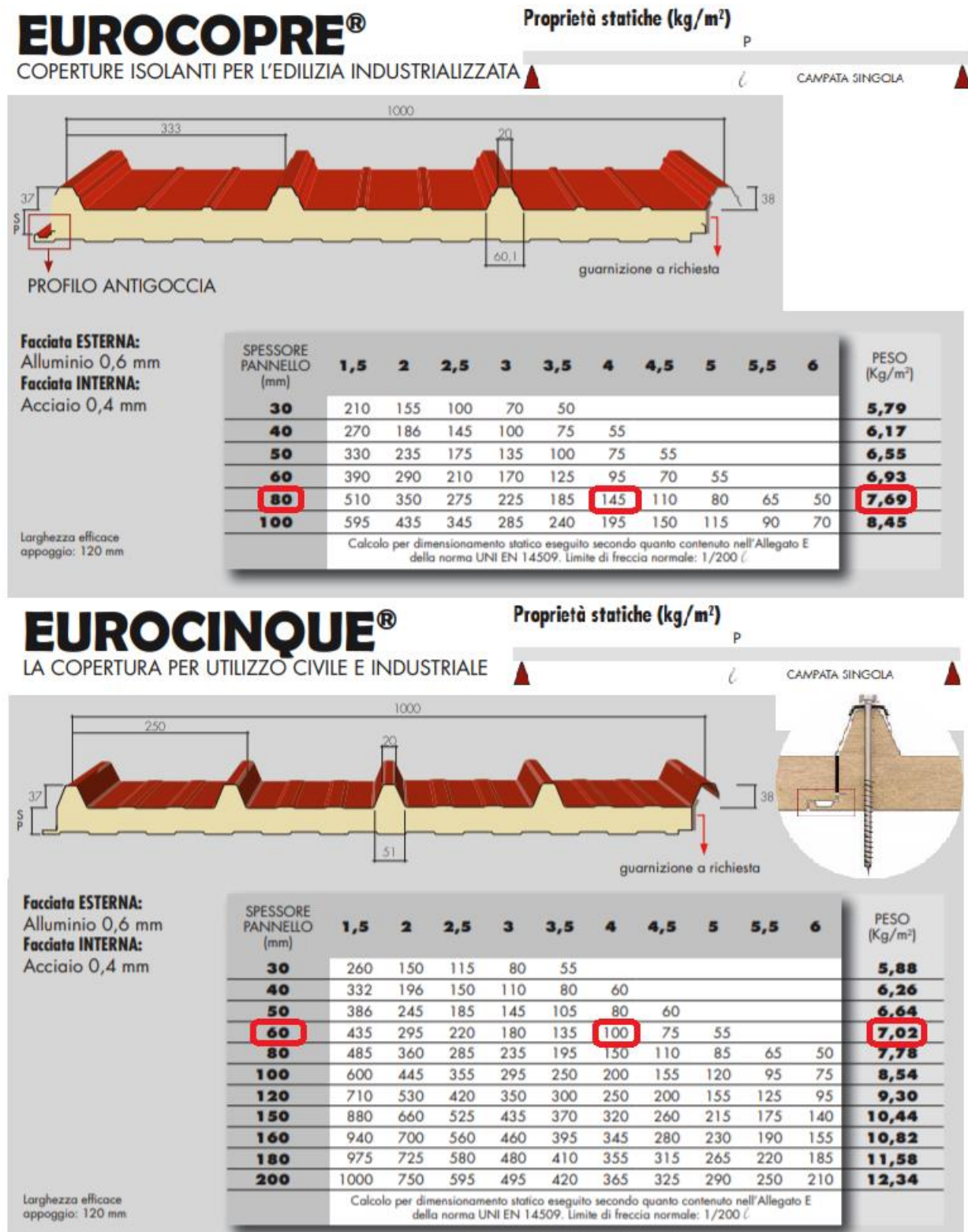
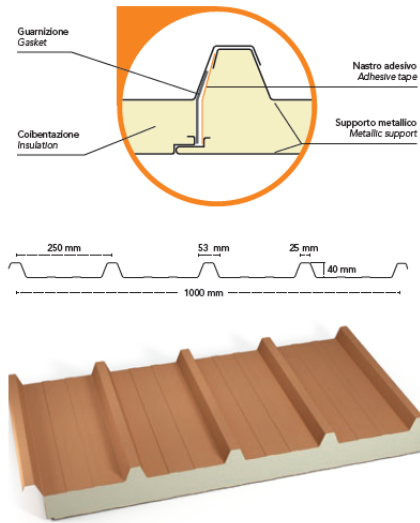


Figura 4.23 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano EUROCOPE e EUROCINQUE di Lattonedil. In rosso le caratteristiche

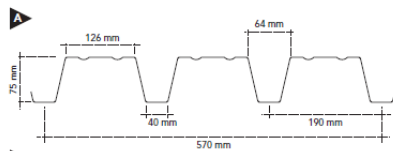
TD5



TD5				ACCIAIO - STEEL															
Spessore pannello Panel thickness	Spessore supporto Support thickness	Peso Weight kg/m ²	U		Distanza fra gli appoggi in m - Supports spacing (m)														
					▲ ▲ campata semplice - simple span								▲ ▲ ▲ ▲ campata multipla - multiple span						
			W/m ² K		2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	
mm	mm	kg/m ²	EN 14509	EN ISO 6946	Carico massimo uniformemente distribuito in kN/m ² acciaio - Max load capacity kN/m ² steel														
20	0,5/0,5 0,6/0,6	9,85 11,85	0,99	0,73	1,85	1,05	0,45					2,46	1,52	0,87	0,32				
					2,03	1,17	0,53					2,65	1,68	0,99	0,40				
30	0,4/0,4 0,5/0,5 0,6/0,6	8,42 10,23 12,04	0,67	0,54	1,43	0,97	0,63	0,43				1,48	1,06	0,77	0,52	0,36			
					2,50	1,70	1,10	0,75				3,29	2,35	1,70	1,15	0,80	0,55		
					2,68	1,82	1,18	0,80				3,48	2,51	1,82	1,23	0,86	0,59		
40	0,4/0,4 0,5/0,5 0,6/0,6	8,80 10,61 12,42	0,51	0,43	1,69	1,26	0,91	0,63	0,42			1,88	1,33	0,97	0,74	0,52	0,39		
					2,95	2,20	1,60	1,10	0,74	0,50		4,18	2,95	2,15	1,65	1,15	0,86	0,62	
					3,13	2,35	1,71	1,18	0,79	0,54		4,38	3,12	2,30	1,77	1,23	0,92	0,66	
50	0,4/0,4 0,5/0,5 0,6/0,6	9,18 10,99 12,80	0,41	0,35	1,97	1,51	1,14	0,80	0,54	0,40		2,16	1,67	1,22	0,90	0,68	0,47	0,37	
					3,45	2,65	2,00	1,40	0,95	0,70		4,81	3,72	2,70	2,00	1,50	1,05	0,82	
					3,61	2,84	2,14	1,50	1,02	0,75	0,50	5,00	3,88	2,98	2,14	1,61	1,12	0,88	
60	0,4/0,4 0,5/0,5 0,6/0,6	9,56 11,37 13,18	0,35	0,30	2,33	1,66	1,34	1,06	0,74	0,55	0,42	2,61	2,02	1,45	1,12	0,89	0,70	0,49	
					4,08	2,90	2,35	1,85	1,30	0,96	0,73	5,79	4,48	3,23	2,48	1,98	1,55	1,08	
					4,21	3,10	2,51	1,98	1,39	1,03	0,78	5,98	4,67	3,41	2,65	2,12	1,66	1,16	
80	0,5/0,5 0,6/0,6	12,13 13,94	0,26	0,23	5,10	3,74	2,80	2,25	1,78	1,30	1,10	7,03	5,31	4,43	3,38	2,50	2,10	1,50	
					5,30	3,90	2,98	2,41	1,90	1,39	1,18	7,19	5,52	4,62	3,59	2,68	2,25	1,61	
100	0,5/0,5 0,6/0,6	12,89 14,70	0,21	0,19	6,20	4,48	3,30	2,72	2,20	1,70	1,40	8,06	6,31	5,06	4,00	3,42	2,85	2,05	
					6,30	4,67	3,50	2,92	2,40	1,90	1,60	8,30	6,53	5,22	4,28	3,70	3,06	2,27	
120	0,5/0,5 0,6/0,6	13,65 15,46	0,18	0,16	6,51	4,98	3,61	3,03	2,51	2,01	1,71	8,34	6,59	5,34	4,28	3,70	3,13	2,33	
					6,61	5,19	3,81	3,23	2,71	2,21	1,91	8,58	6,81	5,50	4,56	3,98	3,34	2,55	

TDS				ALLUMINIO - ALUMINIUM																
Spessore pannello Panel thickness	Spessore supporto Support thickness	Peso Weight	U		Distanza fra gli appoggi in m - Supports spacing (m)															
					▲ ▲ campata semplice - simple span								▲ ▲ ▲ ▲ campata multipla - multiple span							
			W/m²K		2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5		
mm	mm	kg/m²	EN 14509	EN ISO 6946	Carico massimo uniformemente distribuito in kN/m² alluminio - Max load capacity kN/m² aluminium															
30	0,6/0,6	4,89	0,68	0,54	1,60	0,90						2,20	1,30	0,80						
40	0,6/0,6	5,27	0,51	0,43	2,10	1,25	0,70					2,80	1,90	1,15	0,76					
50	0,6/0,6	5,65	0,41	0,35	2,25	1,60	1,00	0,65				3,10	2,30	1,45	1,00	0,70				
60	0,6/0,6	6,03	0,35	0,30	2,70	2,10	1,32	0,90	0,62			3,40	2,75	2,00	1,28	0,90	0,68			
80	0,6/0,6	6,79	0,26	0,23	3,35	2,50	1,80	1,25	0,90	0,60		3,75	3,20	2,50	1,85	1,20	0,90	0,65		
100	0,6/0,6	7,55	0,21	0,19	3,90	3,00	2,45	1,90	1,40			4,15	3,65	2,90	2,40	1,90	1,10	0,85		

EGB 1200

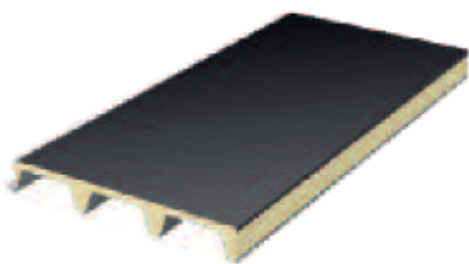


EGB 1200		
Caratteristiche del profilo Section properties		
Spessore Thickness	Peso Weight	
mm	kg/m ²	kg/m
0,6	8,26	4,71
0,7	9,64	5,50
0,8	11,02	6,28
1,0	13,77	7,85
1,2	16,53	9,42

EGB 1200		▲ ▲ 1 campata 1 span																	
Spessore	Distanza fra gli appoggi in m - Supports spacing (m)																		
Thickness																			
mm	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00
Carico massimo uniformemente distribuito in kN/m ² - Max load capacity kN/m ²																			
0,6	12,39	9,08	6,93	5,20	3,77	2,80	2,14	1,66	1,31	1,05	0,84	0,69	0,56	0,46	0,38	0,32	0,26	0,22	0,18
				5,45	4,40	3,62	3,03	2,57	2,20	1,91	1,66	1,46	1,30	1,15	1,03	0,93	0,84	0,76	0,69
0,7	14,87	10,89	8,32	6,21	4,50	3,35	2,55	1,98	1,56	1,25	1,01	0,82	0,67	0,56	0,46	0,38	0,32	0,26	0,22
				6,55	5,28	4,35	3,64	3,08	2,64	2,29	2,00	1,76	1,56	1,39	1,24	1,12	1,01	0,91	0,83
0,8	17,35	12,71	9,70	7,37	5,34	3,98	3,03	2,36	1,86	1,49	1,20	0,98	0,80	0,66	0,55	0,46	0,38	0,32	0,26
				7,64	6,17	5,08	4,25	3,60	3,09	2,67	2,34	2,05	1,82	1,62	1,45	1,31	1,18	1,07	0,97
1,0	21,06	15,43	11,78	9,20	6,66	4,96	3,78	2,94	2,32	1,86	1,50	1,22	1,00	0,83	0,69	0,57	0,47	0,39	0,33
				9,28	7,48	6,16	5,15	4,37	3,74	3,24	2,83	2,49	2,21	1,96	1,76	1,58	1,43	1,29	1,17
1,2	26,02	19,07	14,56	11,02	7,98	5,94	4,53	3,52	2,78	2,22	1,80	1,46	1,20	0,99	0,82	0,68	0,57	0,47	0,39
				11,46	9,25	7,61	6,37	5,40	4,63	4,01	3,50	3,08	2,73	2,43	2,18	1,96	1,77	1,60	1,46

I valori delle portate in grassetto con carichi uniformemente distribuiti, sono riferiti ad una freccia > 1/200 L.
The values shown in bold type with uniformly distributed loads refer to one deflection > 1/200 L.

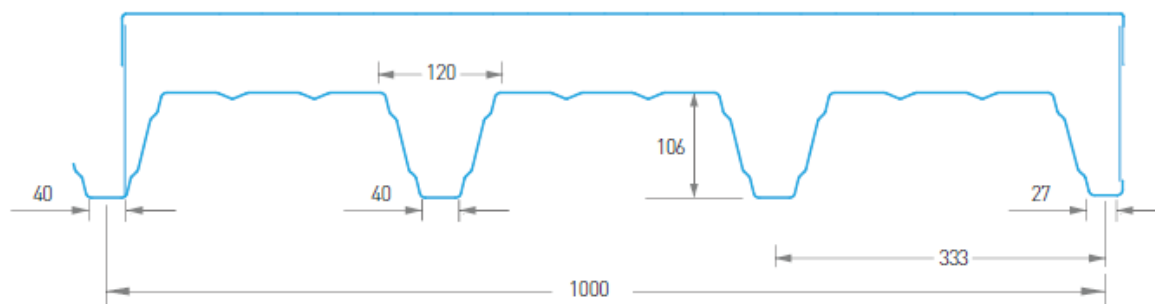
Figura 4.24 - Scheda tecnica dei prodotti TD5 e EGB 1200 di Marcegaglia Buildtech. In rosso le caratteristiche



italpannelli 

Mono MEGA 106 Deck

TABELLA PORTATE



Spessore nominale Supporto Acciaio (mm)	Larghezza efficace appoggio: 100 mm													
	l = cm	200	250	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550
0,50	$P = \text{kg/m}^2$	290	180	115	95	80	70	60	50					
0,60		420	260	175	145	125	105	90	75	65	55			
0,70		525	330	220	185	160	135	115	100	85	70	55		
0,80		680	425	290	245	205	175	155	130	105	85	70	60	
1,00		920	580	395	335	285	245	210	175	145	115	95	80	65

Spessore Pannello (mm)	Spessore Nominale Supporto Acciaio (mm)				
	0,50	0,60	0,70	0,80	1,00
	Peso Pannello (kg/m ²)				
50	8,4	9,6	10,8	12,0	14,3
60	8,8	10,0	11,2	12,4	14,7
80	9,6	10,8	12,0	13,2	15,5
100	10,4	11,6	12,8	14,0	16,3

- Valori in Nero: Stati Limite Ultimo
- Valori in Rosso: Stati Limite di Esercizio (freccia = 1/200 Luce)

Figura 4.25 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano MONO MEGA106 DECK di Italpannelli. In rosso le caratteristiche

4.4 Assemblaggio e montaggio delle parti

La realizzazione del modello ha visto come fase iniziale l'allestimento della vasca di contenimento ed espansione dell'onda di collasso.

Dopo aver disposto le 12 travi di alluminio in direzione perpendicolare al traliccio di base, le travi sono state fissate a passo costante su di esso (interasse pari a 0,57 m), procedendo da monte verso valle, in modo da ricoprire uniformemente un'area di estensione 3,40 x 6,40 m. Le travi poggiano sul lato corto della sezione, in modo da esprimere il massimo momento di inerzia sotto carico.

Il fissaggio trave - traliccio si realizza mediante bullonatura, dopo aver effettuato i fori sul traliccio in corrispondenza dei punti di appoggio.

A questo punto si è reso necessario raggiungere una condizione di planarità sulla superficie superiore delle travi, ovvero quella a contatto con il pannello sandwich costituente il piano allagabile. L'obiettivo è ottenere una base d'appoggio perfettamente orizzontale nelle due direzioni del piano in quanto il successo degli esperimenti sarà fortemente condizionato dalla precisione raggiunta in questa fase.

- **Primo tentativo: piattine di metallo**

Viste le condizioni di non perfetta linearità del traliccio di base si è pensato di evitare il fissaggio diretto trave – traliccio poiché la pendenza del secondo, nelle due direzioni longitudinale e trasversale, sarebbe stata trasferita alle travi e di conseguenza al piano di scorrimento del fluido.

Il modo più semplice per ristabilire l'orizzontalità del piano è stata individuata nell'interporre fra il traliccio e la base della trave, in corrispondenza di tutti gli appoggi, dei lamierini metallici di piccolo spessore (dimensioni 90 x 100 x 0,6 mm), appositamente forati. Per ogni appoggio è stato introdotto un numero specifico di piattine, in modo da raggiungere la stessa quota su tutti gli appoggi.



Figura 4.26 - Allineamento di una trave di alluminio mediante i lamierini metallici. Nella figura di destra si osserva la sistemazione di 4 piattine per annullare il dislivello di 2,4 mm tra le due estremità della trave

Una volta posizionate tutte le piattine, il dislivello tra le due travi più lontane è risultato essere dell'ordine del millimetro; anche le singole travi rimanevano affette da un errore di circa 1 mm tra le due estremità (direzione trasversale).

In conclusione, il metodo non è risultato sufficientemente efficace per imporre l'orizzontalità del piano, ed è stato scartato in favore di un'altra soluzione, capace di ridurre il dislivello in modo da mantenere un errore sub-millimetrico.

- **Secondo tentativo: registri**

Sebbene sia un metodo più lungo e laborioso, utilizzare dei registri per allineare le travi garantisce una precisione più elevata, perché l'attacco trave – traliccio non è diretto. In tale maniera si svincola l'errore di non orizzontalità della trave da quello del traliccio; quindi, una volta fissata la trave al registro tramite bullonatura, l'orizzontalità viene raggiunta effettuando le regolazioni esclusivamente sul registro.



Figura 4.27 - Fissaggio di una trave di alluminio al traliccio per mezzo di un terzo elemento (registro). Nell'immagine di destra si osservano i particolari della bullonatura tra il registro e il traliccio: l'orizzontalità è stabilita effettuando le regolazioni sui quattro dadi a contatto con il traliccio e fissando la posizione con altrettanti contro-dadi

Le piattine di metallo già presupponevano la realizzazione dei fori sul traliccio, per cui la difficoltà è stata riprodurre la posizione esatta dei quattro fori sul registro e saldare le barre filettate ai registri in modo da ottenere un elemento completo (*Figura 4.28*).

Una volta realizzati i dodici registri, questi sono stati fissati al traliccio di base in modo approssimativamente orizzontale; dopo di che sono state montate le travi al di sopra di questi elementi. In conclusione, è stata effettuata un'accurata regolazione della quota delle travi agendo sulla bullonatura registro – traliccio, fissando definitivamente la posizione per mezzo dei contro-dadi (*Figura 4.27*).

Procedendo in questa maniera, l'errore massimo in entrambe le direzioni è stato contenuto al di sotto di 1 mm (massimo scarto assoluto di 0,5 mm).

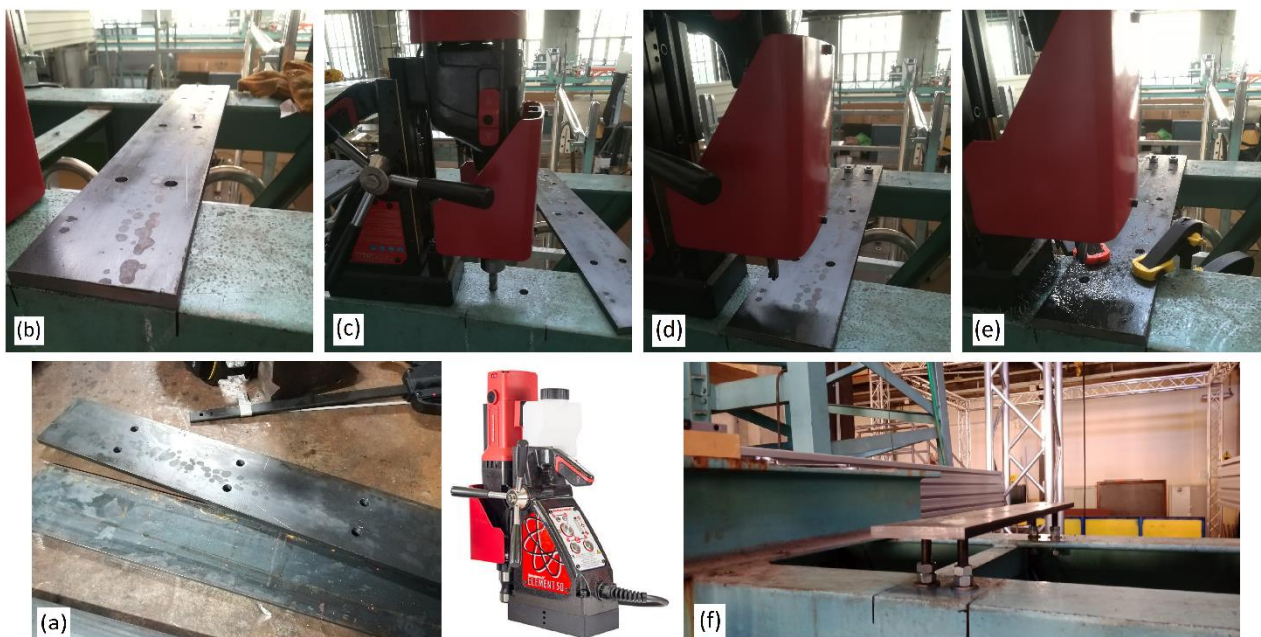


Figura 4.28 – Sequenza realizzativa di un registro: foratura per il collegamento trave-registro (a), registrazione della posizione del profilato (b), fissaggio del trapano magnetico nella posizione del foro (c), posizionamento del profilato per la foratura (d), foratura per il collegamento registro-traliccio (e), montaggio del registro dopo la saldatura delle barre filettate (e).
Le operazioni di foratura sono state realizzate mediante un trapano magnetico Rotabroach

A seguito dell'arresto forzato nel febbraio 2020, non è stato possibile proseguire con nessuna delle attività pratiche relative alla costruzione del modello, causa la chiusura del Laboratorio di Idraulica.

A sistemazione delle travi ultimata, le successive fasi sarebbero state:

- installazione e assemblaggio dei pannelli costituenti il piano orizzontale di valle;
- realizzazione del serbatoio di monte e del sistema di apertura della saracinesca;
- installazione e assemblaggio dei pannelli di tamponamento e di copertura sulle truss, in modo da costituire una camera chiusa e senza truss a vista;
- montaggio del sistema di illuminazione interno al light box;
- installazione della strumentazione e dei dispositivi di acquisizione sul soffitto del light box;
- preparazione di un sistema di raccolta delle acque a valle del set-up e reintroduzione delle stesse nel sistema di ricircolo.

5 Analisi di una vena effluente da breccia rettangolare

Una delle principali assunzioni nell'ambito di questo lavoro di tesi è stata la ricostruzione della breccia che si genera sul corpo diga con una geometria di tipo rettangolare, la quale realizza il fenomeno di dam-break³. Particolare interesse è stato espresso per lo studio delle caratteristiche della vena nel momento in cui il fenomeno di efflusso è completamente sviluppato. Quando ciò accade, la vena si stabilizza e assume una forma regolare, e le sue caratteristiche cinematiche derivano dal teorema di Torricelli:

“La velocità di un fluido in uscita da un foro posto lateralmente ad un serbatoio (a contatto con l'atmosfera) è la stessa di quella che avrebbe un corpo in caduta libera da un'altezza pari a quella misurata dalla superficie del serbatoio al centro del foro considerato”

$$v = \sqrt{2gh}$$

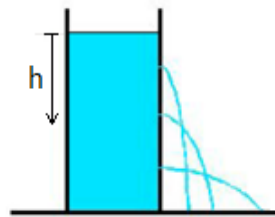


Figura 5.1 – Rappresentazione del teorema di Torricelli: per h crescenti aumenta la velocità della vena uscente, quindi la sua gittata

L'applicazione del teorema ad uno stramazzo è un problema già affrontato e parzialmente risolto in letteratura da R.E.Horton, (1907)²⁵. Tuttavia, realizzare la simulazione di un dam-break per dighe in terra, con breccia di forma rettangolare, induce ad affrontare la problematica sotto un nuovo aspetto: si vuole capire se la soluzione di Horton applicata al teorema di Toricelli, riguarante la pendenza del getto uscente, rimane valida anche nel caso di inviluppo delle traiettorie degli infiniti filetti fluidi sovrapposti che costituiscono la vena effluente.

A supporto di questa assunzione sono state condotte una serie di prove sperimentali su un set-up già utilizzato precedentemente in laboratorio^{12,13}; i test sono stati eseguiti per altezze d'acqua variabili e larghezze della breccia differenti, in modo da avere una maggiore disponibilità di dati per il confronto.

5.1 Concetti teorici

Per comprendere quanto afferma il teorema di Torricelli, si parta dallo schema riportato in *Figura 5.2*, che rappresenta un serbatoio colmo d'acqua e dotato di una piccola apertura laterale: se le dissipazioni di energia sono di entità limitata rispetto alle energie cinetiche messe in gioco, è lecito assumere che il liquido si comporti come un fluido ideale (nella realtà questo si realizza quando la vena effluente si stacca dalla parete sottile del recipiente in corrispondenza del bordo dell'apertura). Quando la vena raggiunge la sezione minima, che si dimostra essere ubicata ad una distanza dall'apertura pari a circa le sue dimensioni trasversali, essa è assimilabile ad una vena rettilinea. L'area in questione è detta sezione contratta e ogni punto che giace su di essa si trova alla pressione atmosferica.

Ora, si consideri una generica particella fluida posta sulla superficie libera del serbatoio. In condizioni di moto permanente e in presenza di sole forze di massa dirette verso il basso, avendo scelto un piano di riferimento arbitrario $y = 0$ in corrispondenza della base del serbatoio, si valutino le caratteristiche della particella. Essa si trova ad un'altezza h e a contatto con l'aria, per cui la sua pressione è pari a quella atmosferica; inoltre, dacché lo svuotamento del serbatoio avviene in tempi estremamente lunghi a causa delle piccole dimensioni del foro, la velocità della particella fluida è nulla se confrontata con la velocità del getto uscente.

In queste condizioni, il teorema di Bernoulli assume valore costante per ogni traiettoria, ad esempio quella tracciata dalla particella fluida suddetta che si sposta dalla superficie del serbatoio (1) alla sezione contratta (2). Allora, scrivendo il trinomio nei due punti, vige l'uguaglianza:

$$y + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{cost}$$

$$H + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$v_2 = \sqrt{2gh}$$

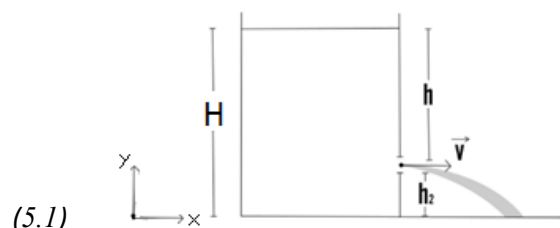


Figura 5.2 - Luce sotto battente posta sulla parete di un serbatoio

A questo valore, si attribuisce il nome di *velocità torricelliana*.

Appurato che il getto d'acqua in uscita dal foro si comporti come un grave e la sua traiettoria sia di tipo balistico, si può pensare di applicare il teorema di Torricelli ad uno stramazzo, che nel caso in esame si riconduce ad una fessura rettangolare sviluppata completamente in altezza. La trattazione di Horton giunge alla conclusione per cui si può assumere l'apertura costituita da una serie di fori allineati in verticale e tali per cui il getto uscente da ogni foro sia indipendente dagli altri.

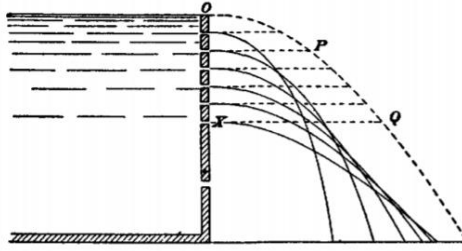


Figura 5.3 - Teorema di Torricelli applicato a un serbatoio dotato di fori allineati in verticale

In riferimento alla *Figura 5.3*, la generica traiettoria obbedisce alle leggi del moto parabolico:

$$\begin{cases} x = v_2 \cdot t \\ y = h_2 - \frac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (5.2)$$

Ricavato t dalla prima delle due espressioni, si ottiene l'equazione della traiettoria sostituendo in v_2 la velocità torricelliana:

$$y = h_2 - \frac{x^2}{4h} \quad (5.3)$$

ricordando che $h = H - h_2$.

Assumendo che i fori disposti verticalmente, di area piccola, possano essere considerati incrementi successivi dell'altezza h , è possibile trovare l'espressione analitica che definisce l'involuppo delle traiettorie dei singoli getti. Presa la funzione $F(x, y, h_2)$ che descrive la famiglia di curve nel piano (x, y) , l'involuppo si ottiene imponendo le due condizioni:

- $F(x, y, h_2) = 0$
- $\frac{\partial}{\partial h_2} F(x, y, h_2) = 0$

ovvero ricercando i punti dove la funzione è costante.

- Riscrivendo l'equazione (5.3) in forma implicita si può imporre la prima condizione:

$$\begin{aligned} F(x, y, h_2) &= y - h_2 + \frac{x^2}{4(H-h_2)} = 0 \\ 4yH - 4yh_2 - 4Hh_2 + 4h_2^2 + x^2 &= 0 \\ x^2 &= 4(H-h_2)(h_2-y) \end{aligned} \quad (5.4)$$

- Annullando la derivata si impone la seconda condizione:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial h_2} F(x, y, h_2) &= -4y - 4H + 8h_2 = 0 \\ h_2 &= \frac{y+H}{2} \end{aligned} \quad (5.5)$$

e sostituendo l'espressione appena trovata in (5.3) si può scrivere:

$$y = h_2 - \frac{x^2}{2H-h_2} \quad (5.6)$$

Dalle espressioni (5.4) e (5.6) si ottiene infine:

$$x = H - y \quad (5.7)$$

L'equazione (5.7) rappresenta la retta, di pendenza unitaria (45°), del profilo superiore dell'involuppo delle traiettorie. Essa ha origine nel punto corrispondente al pelo libero nel serbatoio (carico H). La *Figura 5.4* illustra quanto appena enunciato: si può oltremodo osservare l'involuppo delle traiettorie relative ad ogni altezza d'acqua, nell'ipotesi che queste si mantengano tra loro indipendenti.

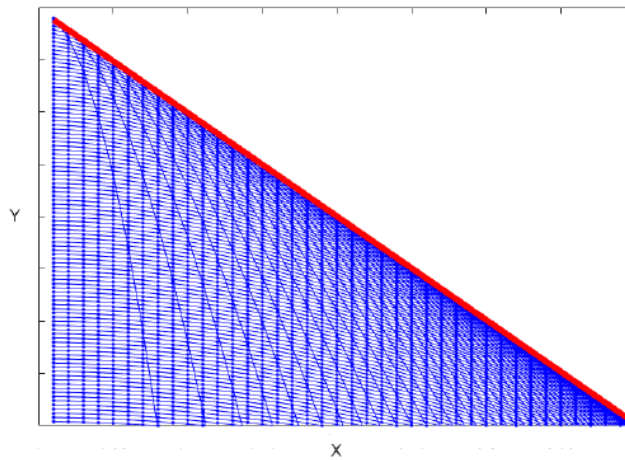


Figura 5.4 - Involuppo delle traiettorie uscenti dal serbatoio. Immagine reperita dallo studio di Briano, J. (2019)

Nota la geometria, è ora interessante ragionare sulla portata uscente da questo serbatoio. Sempre in riferimento alla *Figura 5.3* e all'ipotesi di traiettorie indipendenti, il flusso in uscita sarà costituito dalla somma dei singoli getti, aventi ognuno il proprio carico H_i e area A_i :

$$Q = \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[A_1 H_1^{\frac{1}{2}} + A_2 H_2^{\frac{1}{2}} + \dots + A_n H_n^{\frac{1}{2}} \right] \quad (5.8)$$

dove μ è il coefficiente di efflusso, da calcolarsi caso per caso. Considerando i singoli fori come incrementi successivi del carico totale H , esisteranno n strisce elementari (corrispondenti agli n fori) e a ciascuna di esse competerà l'altezza $\frac{H}{n}$. Allora i carichi sulle successive strisce sono $\frac{H}{n}, \frac{2H}{n}, \dots, \frac{nH}{n}$. Si può riscrivere l'espressione (5.8) come:

$$Q = \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot \frac{BH}{n} \cdot \left[\sqrt{\frac{H}{n}} + \sqrt{\frac{2H}{n}} + \dots + \sqrt{\frac{nH}{n}} \right] \quad (5.9)$$

poichè $A_1 + A_2 + \dots + A_n = \frac{BH}{n}$ in caso di stramazzo rettangolare.

Estraendo dalla parentesi il termine comune $\sqrt{\frac{H}{n}}$, si porta in evidenza la sommatoria $\sqrt{1} + \sqrt{2} + \dots + \sqrt{n}$ che sviluppata in serie conduce a $\sum_{i=1}^n \sqrt{i} = \frac{2}{3}n^{\frac{3}{2}}$. Da cui, infine:

$$Q = \frac{2}{3}\mu \cdot BH \cdot \sqrt{2gH} \quad (5.10)$$

$$Q = \frac{2}{3}\mu \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (5.11)$$

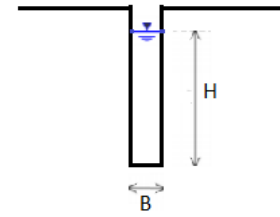


Figura 5.5 - Stramazzo rettangolare in parete sottile

Ci si riconduce quindi all'espressione dello *stramazzo Bazin* in parete sottile, certamente il più diffuso e ampiamente studiato, ma che in questo caso assume un'insolita forma rettangolare, sviluppata in altezza piuttosto che in larghezza.

Tuttavia, non è ancora stata specificata l'origine del termine μ , che rappresenta il coefficiente di efflusso. Esso è dato dal prodotto di altri due fattori, i quali riflettono l'influenza dei fenomeni dissipativi:²⁶ coefficiente di velocità C_v e coefficiente di contrazione C_c . Per luci a spigolo vivo, ponendo $C_v = 1$ l'errore che si commette è modesto; inoltre il valore teorico di C_c è stato determinato da Kirchhoff per il caso di moto piano attraverso una fessura rettangolare di lunghezza infinita ($C_c = \frac{\pi}{\pi+2} \approx 0,611$). Con questi valori si ha $\mu = 0,61$.

L'equazione (5.11) diventa quindi la seguente, con Q [l/s] e H [m]:

$$Q_{RETT} = 1804,26 \cdot B \cdot H^{\frac{3}{2}} \quad (5.12)$$

Vale la pena a questo punto introdurre anche la legge di deflusso per *stramazzo triangolare* in parete sottile, utilizzato negli esperimenti di laboratorio per misurazioni di portata.

$$Q = \frac{8}{15}\mu \cdot \tan \alpha \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (5.13)$$

Il vantaggio di questo stramazzo è la sua attitudine a prestarsi ad applicazioni di elevata precisione, dal momento che fa corrispondere carichi abbastanza elevati anche a piccole portate.

Inoltre, dall'equazione (5.12) è apprezzabile la relazione in forma di potenza $3/2$ della portata rispetto al carico, mentre qui la portata dipende dalla potenza $5/2$. Di conseguenza a piccole variazioni del carico corrispondono sensibili variazioni della portata.

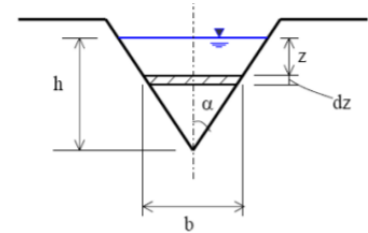


Figura 5.6 - Stramazzo triangolare in parete sottile

Nel nostro caso la relazione tra Q [l/s] e h [m] è nota, conoscendo l'angolo $\alpha = 20^\circ$. Non essendo fornite in letteratura indicazioni più precise, in merito al coefficiente di efflusso, rispetto a quelle di Marchi-Rubatta²⁷ si è deciso di assumere il valore proposto da Horton²⁵ pari a $\mu = 0,617$.

$$Q_{TR} = 530,52 \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (5.14)$$

5.2 Set up sperimentale e procedura

Lo studio condotto in questo lavoro di tesi ricalca una procedura sperimentale già adottata in una precedente esperienza di tesi¹³ relativa allo studio della vena effluente da una breccia.



Figura 5.7 – Rappresentazione del set-up sperimentale durante l'esecuzione di un esperimento. A destra si può osservare la vena fluida dal punto di vista della fotocamera

La procedura inizia con la preparazione di una struttura scatolare metallica con funzione di serbatoio, dotato di apertura rettangolare sulla parete frontale, dalla quale fuoriesce il getto d'acqua di interesse. Il serbatoio è prismatico, in acciaio inox, di dimensioni quadrate in pianta (1,50 m x 1,50 m) e 0,50 m in altezza. Esso è per ipotesi indeformabile. Il fondo, liscio e piano, è dotato di uno scarico regolato mediante valvola a sfera. La base del serbatoio è mantenuta ad un'altezza di circa 0,50 m da terra attraverso un supporto metallico che sostiene l'intera struttura.

Sulla sommità della struttura è stato allestito un telaio sul quale sono fissati dodici misuratori a ultrasuoni, che hanno il compito di registrare misure di superficie attraverso un circuito appositamente progettato. I dati puntuali forniti vengono visualizzati su PC attraverso il programma *Labview*²⁸, e permettono di valutare il raggiungimento delle condizioni di stabilità della vena in efflusso dalla breccia.

A valle della fessura rettangolare vi è un serbatoio aperto che ha il compito di raccogliere l'acqua in caduta dalla breccia e accumularla fino ad una prefissata altezza, superata la quale l'acqua è evacuata mediante uno stramazzo di tipo triangolare. La semplice relazione che lega l'altezza d'acqua alla portata per un flusso attraverso uno stramazzo triangolare permette di estrarre i dati di portata e ricondurli al carico nel serbatoio di monte.

Inizialmente vuoto, il serbatoio viene riempito per mezzo di pompe idrauliche di diversa potenza, in misura e numero che dipendono dal carico che si vuole ottenere a monte. L'acqua utilizzata è attinta da un canale artificiale posto al di sotto del piano di calpestio, che ha anche il compito di raccogliere l'acqua in uscita dallo stramazzo triangolare; in questo modo si crea un circuito idraulico chiuso e l'acqua viene riutilizzata. Nel serbatoio, l'acqua inizia a defluire dalla breccia assumendo un profilo triangolare e la superficie libera del serbatoio raggiunge l'altezza prestabilita. Sebbene a prima vista

possa sembrare che la lama d'acqua si sia stabilizzata pochi secondi dopo aver raggiunto il carico imposto, in realtà le condizioni di moto uniforme (immutabilità del flusso nel tempo e nello spazio) si stabiliscono solo dopo un transitorio che dura qualche minuto, e che viene giudicato concluso attraverso i dati forniti al contempo da *Labview*.

A questo punto si può procedere all'acquisizione delle immagini, per mezzo di una fotocamera digitale piazzata su un treppiede, il quale è posizionato ad una distanza (inferiore a 1 m) dalla breccia, tale da inquadrare la frazione di getto da analizzare. Le caratteristiche ottiche del fluido in questione (acqua trasparente, senza aggiunta di coloranti naturali) e la mutevole illuminazione ambientale circostante non consentono una distinzione nitida e regolare del profilo superiore della vena, perciò si è reso necessario imporre delle condizioni di illuminazione quanto più simili per tutte le prove. Sullo sfondo della zona inquadrata è stato dunque sistemata una lastra opaca in PVC, retroilluminata per mezzo di due pannelli a LED.

Previa calibrazione spaziale della strumentazione, le immagini vengono registrate esclusivamente quando la vena raggiunge la condizione di stabilità. Terminata questa fase di acquisizione digitale, l'alimentazione viene interrotta e il serbatoio lasciato svuotare completamente.

La procedura viene ripetuta per diversi livelli di carico del serbatoio e diverse larghezze della breccia. Quando l'acquisizione è completa, le immagini subiscono una fase di elaborazione per completare la calibrazione e per estrarre le informazioni ricercate, attraverso un software di calcolo.

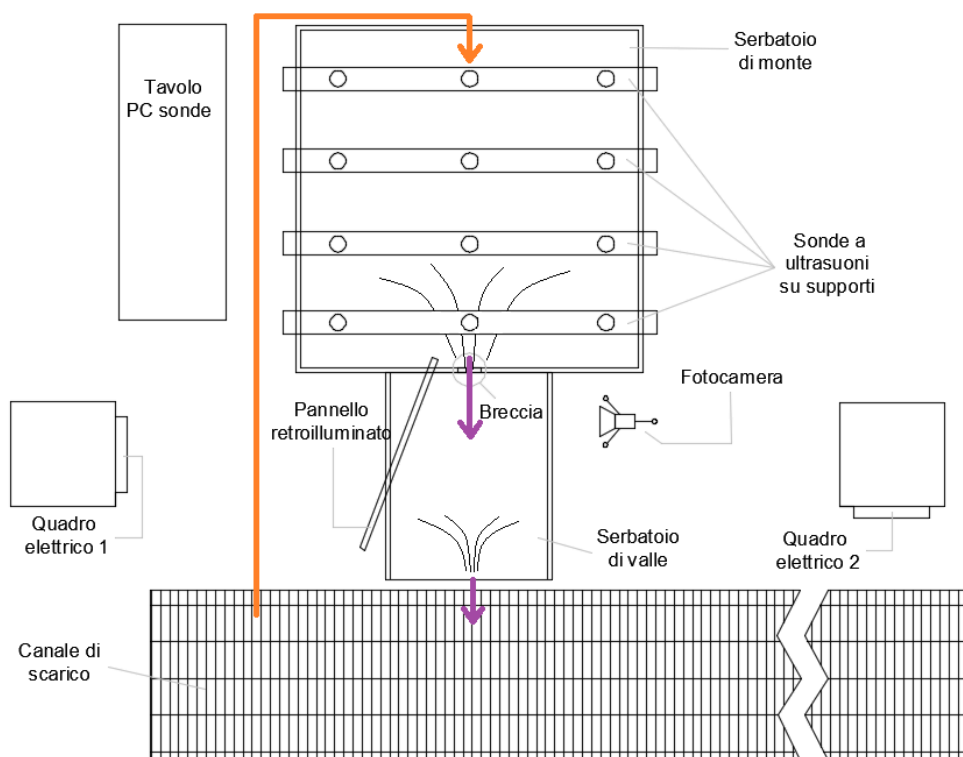


Figura 5.8 – Vista in pianta del set-up sperimentale utilizzato. Le frecce indicano il percorso seguito dall'acqua

Per le informazioni tecniche dei dispositivi e della strumentazione in generale, si rimanda al capitolo 5.7 di questa trattazione.

5.3 Campagna di esperimenti

La campagna di prove condotta è costituita da un totale di 3 esperimenti, di cui due relativi alla breccia di larghezza 3 cm e uno sulla breccia larga 5 cm, come riportato in tabella.

Data esperimento	Larghezza breccia	N° prove eseguite	Esito
01-10-2019	3 cm	8	scartato
09-10-2019	3 cm	8	conservato
16-12-2019	5 cm	5	conservato

Tabella 5.1 - Elenco delle prove condotte

Il motivo per cui le prove del 1° ottobre sono state scartate è che durante la fase di post-processamento dati, sono emerse difficoltà tali da impedire l'estrazione dei profili, principalmente a causa di un errato allestimento del background catturato dalla fotocamera, associato a parametri non corretti nel settaggio del dispositivo.

In particolare, i profili della vena presentavano zone di transizione proprio nella zona di interesse, per cui il profilo non era tracciabile con esattezza, nonostante alcune operazioni di editing delle immagini (regolazione della luminosità e del contrasto).

È stato quindi conservato un set di esperimenti per due diverse dimensioni di larghezza della breccia (3 e 5 cm).



Figura 5.9 - Immagine relativa all'esperimento del 1° ottobre: le zone rosse indicano i punti in cui il profilo non è chiaramente definito

L'esperimento si basa su comuni tecniche di *image processing* che permettono di rilevare l'elemento a partire da immagini digitali. Questa disciplina rappresenta una tecnologia pratica per effettuare operazioni sulle immagini (ad esempio *regressione*, riconoscimento dei pattern) ma qui l'obiettivo è principalmente ottenere immagini metriche a partire dai fotogrammi registrati nel sistema di riferimento proprio della fotocamera, che opera la composizione dell'immagine raster in forma di matrice di piccoli elementi, detti pixel. Lo scopo finale è quindi la determinazione di punti nello spazio fisico a partire dalla misura delle posizioni dei punti corrispondenti su un'immagine fotografica.

In sostanza però, il singolo esperimento non si limita alla sola acquisizione delle immagini da fotocamera, ma richiede tanto un'operazione preliminare di calibrazione del dispositivo quanto la successiva elaborazione delle stesse.

5.3.1 Calibrazione fotocamera Canon EOS 550D

La fase di calibrazione della strumentazione ricopre un ruolo fondamentale per completare in modo corretto le operazioni di misura, in quanto da essa si ricavano i parametri utili per rappresentare l'immagine nelle sue dimensioni reali. Detti parametri si dividono in estrinseci (o parametri di orientamento esterno) ed intrinseci (o parametri di orientamento interno).

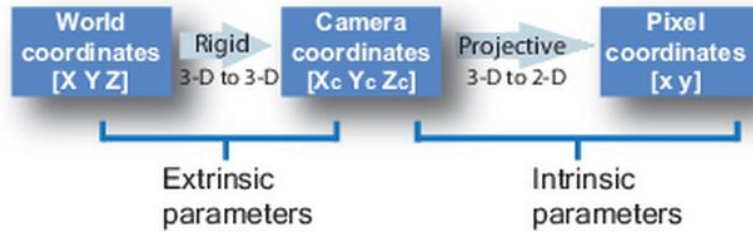


Figura 5.10 - Trasformazione tra coordinate attraverso i parametri di orientamento della fotocamera

- **Parametri estrinseci**

I parametri estrinseci definiscono l'assetto della presa, cioè consentono di ricollocare il generico punto registrato durante la presa rispetto ad un sistema di riferimento (S.R. globale) solidale con il terreno.

Dal momento che il S.R. della camera è solidale ad un corpo rigido nello spazio (la fotocamera stessa), un singolo punto possiede 6 gradi di libertà, di cui 3 relativi alla traslazione dell'origine del S.R. e 3 relativi alla rotazione di ciascuno degli assi dello stesso S.R.

Convenzionalmente i parametri sono descritti dal vettore $\bar{C}$ che definisce la traslazione e dalla matrice quadrata R che definisce le rotazioni:

$$R = R_{\omega} \cdot R_{\varphi} \cdot R_{\kappa} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{C} = \{X_0, Y_0, Z_0\}$$

Il punto espresso nel S.R. globale è quindi dato dalla relazione:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \bar{C} + [R] \cdot \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

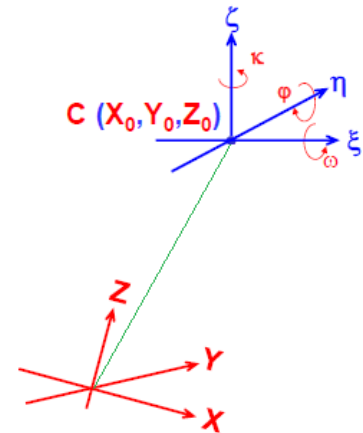


Figura 5.11 - Rappresentazione dei parametri di orientamento esterno: S.R. globale in rosso e S.R. camera in blu

È evidente che i soli parametri estrinseci non bastano per ricavare la relazione tra *spazio immagine* (punti appartenenti all'immagine acquisita) e *spazio oggetto* (punti corrispondenti rilevati nella realtà), perché l'assetto interno della fotocamera non è ancora determinato. Questo è definito una volta per tutte dai parametri di orientamento interno.

- **Parametri intrinseci**

L'insieme di grandezze utili a definire la geometria interna della camera da presa costituisce il set di parametri intrinseci: *distanza principale* della camera c e coordinate (ξ_0, η_0) del *punto principale* PP rispetto al sistema fiduciale definito sul piano del fotogramma.

La prima è la distanza del centro di presa O dal piano fotografico (lastra o pellicola), indicata con p (anziché con c) in *Figura 5.12*. Essa può essere considerata pari alla *distanza focale* f dello stesso obiettivo, prescindendo dalla distorsione. Il S.R. fiduciale invece giace sul piano del fotogramma ed ha l'origine posizionata in corrispondenza della marca fiduciale (nel caso di fotogrammi analogici) oppure in alto a sinistra (nelle immagini digitali, come in questo caso).

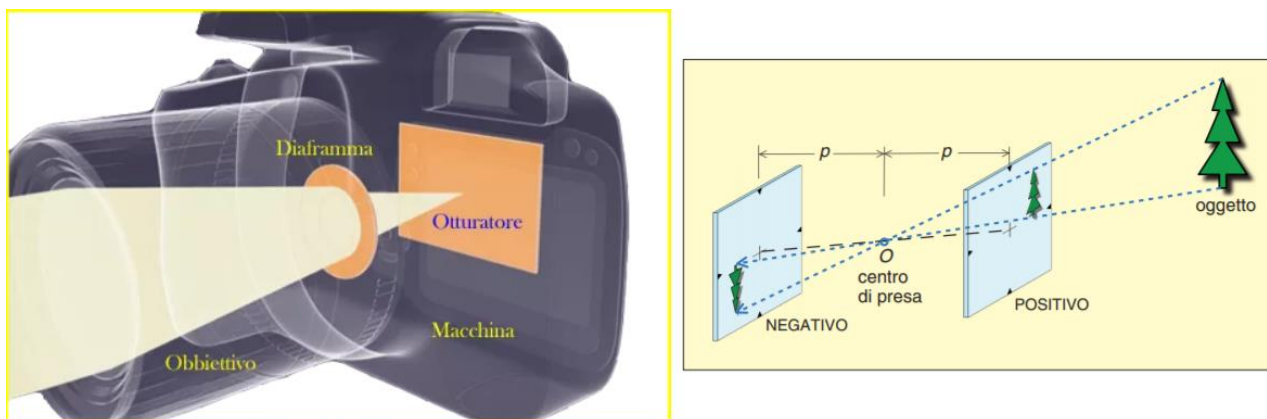


Figura 5.12 – Percorso della luce all'interno dell'obiettivo e della fotocamera. Sia il diaframma che l'otturatore determinano la quantità di luce che arriva al sensore. A destra, uno schema della geometria della presa fotografica

È possibile considerare una fotografia equivalente ad una prospettiva centrale di cui sono noti con precisione i relativi elementi geometrici²⁹. Si osserva che il centro di presa, dunque il centro della proiezione, si trova interposto tra la lastra e l'oggetto ripreso: ciò genera un'immagine capovolta rispetto alla disposizione dell'oggetto, detta *negativo*. Se, da un punto di vista teorico, si immaginasse la lastra collocata davanti all'obiettivo della camera occupando una posizione simmetrica e speculare rispetto alla sua reale collocazione, si otterrebbe un'immagine diritta, detta *positivo*.

Al fine di concepire il processo di formazione dell'immagine, si adotta un modello di sintesi chiamato *modello pin-hole*. Esso consiste in un'approssimazione della realtà, in quanto presuppone che tutti i raggi ottici che concorrono alla formazione dell'immagine siano transitati per un unico punto, il centro di presa (punto O). L'assunzione che tutti i raggi passino per questo punto è chiaramente solo un'approssimazione, questo perché nella realtà tale luogo, anziché essere un punto, è uno spazio di dimensioni finite. Questo produce una deformazione nell'immagine, che prende il nome di

distorsione. Sperimentalmente si è visto che tale deformazione è formata da una componente tangenziale ed una radiale, di cui solo quest'ultima è rilevante, dato che le moderne lenti componenti l'obiettivo sono a simmetria cilindrica molto raffinata³⁰.

La distorsione radiale è in genere definita da due coefficienti (k_1, k_2) e si osserva quando il fascio luminoso che colpisce l'obiettivo viene distorto maggiormente ai bordi rispetto al centro della lente. Minore è la dimensione della lente, maggiore sarà la distorsione.

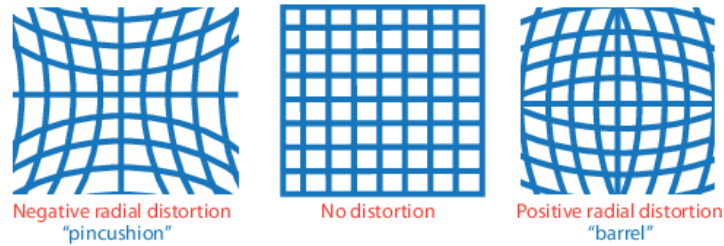


Figura 5.13 - Tipologie di curvatura del fascio luminoso generato dalla distorsione radiale della lente

La distorsione tangenziale si manifesta invece quando la lente e il piano del sensore della camera non sono perfettamente paralleli.

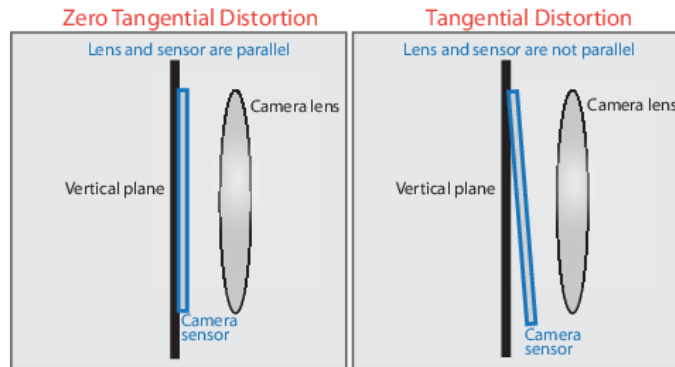


Figura 5.14 - Distorsione tangenziale nell'assetto interno della camera

Viste le sue caratteristiche, il modello pin-hole corrisponde ad un modello lineare della camera. All'interno di esso i parametri di orientamento interno sono spesso disposti in una matrice quadrata K che prende il nome di *matrice di calibrazione*:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_y & 0 \\ \xi_0 & \eta_0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sono noti la lunghezza focale f e i rapporti di scala m_x, m_y : essi descrivono appunto la scala di immagine in termini di rapporto tra la dimensione del pixel e le coordinate metriche dell'oggetto rappresentato sul piano di acquisizione. Da questi si ricavano i primi due termini sulla diagonale, rispettivamente $f_x = f \cdot m_x$ e $f_y = f \cdot m_y$

Infine, l'errore di non perpendicolarità tra gli assi del sensore è controllato da s , detto coefficiente di *skew*. È espresso da $s = f \cdot \cos(\alpha)$ ed è banalmente pari a zero se questo difetto non è presente, come nella maggior parte delle fotocamere moderne.

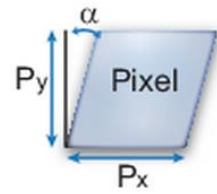


Figura 5.15 - Effetto di non perpendicolarità tra gli assi del sensore

Parametri intrinseci e di distorsione rappresentano le caratteristiche fisiche della macchina e ne condizionano quelle tecniche. Nei dispositivi questi parametri devono essere periodicamente verificati attraverso la procedura di calibrazione, ed i risultati sono contenuti nel relativo certificato allegato alla camera.

5.3.2 Procedura pratica di calibrazione

Dopo questa breve digressione sulle grandezze coinvolte nell'operazione di calibrazione, si riporta di seguito la procedura, che si riconduce ai passaggi indicati nel modello di camera pin-hole proposto da Zhang³¹.

L'autore suggerisce una tecnica per calibrare una fotocamera in modo semplice, applicabile anche in assenza di conoscenze specifiche riguardanti la *Computer Vision*. Il metodo richiede che la camera inquadrì lo stesso soggetto, uno schema planare o un pannello, disposto con diverse orientazioni: ciò è possibile mantenendo fisso il pannello e muovendo la camera o viceversa, senza bisogno di conoscere la posizione relativa dei piani. I risultati che si ottengono sono comparabili a tecniche più sofisticate e costose come l'uso di due o tre piani ortogonali, e la flessibilità della tecnica di Zhang ne privilegia l'impiego rispetto a queste.

La soluzione è in forma chiusa, ed è associata ad una correzione non lineare basata sul principio della massima verosimiglianza. Il limite che va a scapito della praticità della tecnica è rappresentato proprio dalla sua semplicità, infatti il metodo è lineare e si concentra a modellare la distorsione radiale dell'obiettivo.

La procedura raccomandata da Zhang consiste di cinque passaggi:

1. Stampare uno schema riconoscibile e incollarlo su un pannello rigido planare;
2. Scattare più fotografie del pannello con diverso orientamento (traslazioni, rotazioni rispetto al punto base) muovendo la camera o il pannello stesso;
3. Individuare i punti caratteristici nelle immagini;
4. Stimare i cinque parametri intrinseci e tutti i parametri estrinseci usando la soluzione in forma chiusa;
5. Correggere tutti i parametri con il principio di massima verosimiglianza, inclusi i parametri di distorsione radiale.

Per la valutazione dei parametri della camera sono state eseguite le operazioni corrispondenti alla procedura di Zhang, di cui i punti 3, 4, 5 in modo automatico, per mezzo del software di programmazione *Matlab*³², che dispone al suo interno di uno strumento dedicato in grado di implementare processi di Computer Vision, che ha il nome di *Camera Calibrator*³³.

- **Preparazione scacchiera**

La prima operazione della procedura di Zhang consiste nel preparare un pattern ben riconoscibile, in questo caso costituito da una scacchiera di riquadri bianco-neri incollata su una superficie indeformabile e piana.

Il pattern deve rispettare dei requisiti specifici per essere inserito in *Camera Calibrator*, tra cui il più importante è sicuramente lo schema a scacchiera, poiché è l'unica configurazione supportata dal tool. Inoltre è necessario che essa abbia dimensioni diverse nelle due direzioni (un numero pari di quadri su un lato e dispari sull'altro) e che i quadri siano regolari e tutti di ugual dimensione.

Nei vari esperimenti sono state utilizzate scacchiere con diverse dimensioni dei riquadri, ma

grandezze inferiori sono da preferire per un migliore processo di calibrazione, come si potrà apprezzare successivamente nel confronto in *Figura 5.18*.

- **Acquisizione immagini**

Dato che il metodo consente di scegliere quale degli strumenti fissare e quale muovere, è risultato più conveniente fissare la fotocamera (su un treppiede) piuttosto che il pannello. A maggior ragione, la natura “statica” dell’esperimento indirizza verso questa scelta.

Preparato il set-up, sono state scattate numerose fotografie della scacchiera (circa 20 fotografie, come consigliato dal solutore numerico) ritraenti diversi orientamenti e inclinazioni della stessa: mantenendo la scacchiera ad una distanza circa pari a quella dove si sviluppa la vena fluida, si sostiene manualmente il pannello facendogli compiere piccole rotazioni e traslazioni secondo i tre assi ortogonali, in modo da coprire, alla fine della serie di scatti, la maggior parte del campo visivo inquadrato. Si procede in questa maniera perché, essendo la lente dell’obiettivo ricurva, la distorsione è nulla al centro del sensore e aumenta radialmente verso l’esterno dell’immagine. Perciò avere delle fotografie che riproducono la scacchiera vicino ai bordi permette di modellare accuratamente la distorsione.

Per ogni fotografia, si deve operare in modo che tutta la scacchiera sia contenuta nell’immagine, e in modo da rilevare due angoli neri sul lato corto di sinistra e due angoli bianchi sul lato corto di destra. Quest’ultima è condizione necessaria affinché la procedura automatica riesca a riconoscere l’esatto orientamento delle immagini e fissare l’origine degli assi.

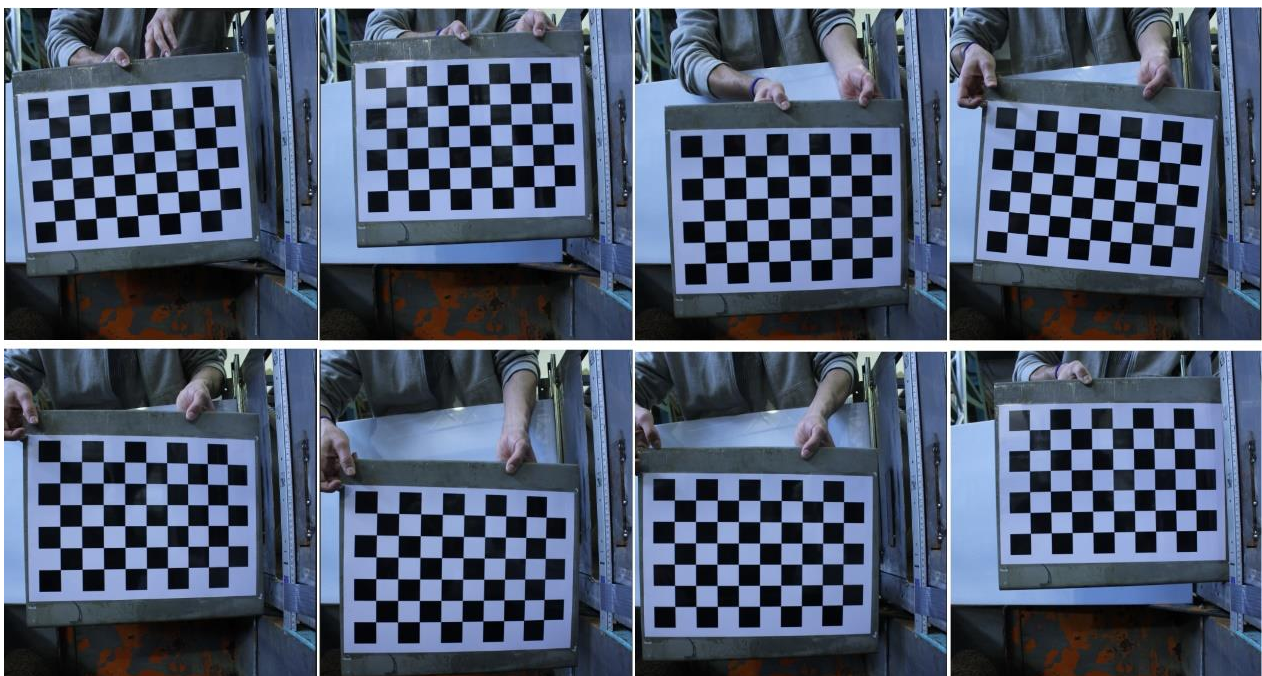


Figura 5.16 - Acquisizione di diversi orientamenti della scacchiera in fase di calibrazione: si fanno compiere alla scacchiera piccole traslazioni e rotazioni nel piano frontale (immagini in alto) e nel piano perpendicolare al sensore (immagini in basso)

- **Stima dei parametri con Matlab - *Camera Calibration***

Il rilevamento dei punti caratteristici delle immagini e il calcolo dei parametri intrinseci e di distorsione avviene in modo automatico attraverso l'applicazione disponibile sul software di programmazione.

Il processo di calibrazione è gestito da questa ma richiede all'utente alcuni semplici passaggi per essere avviata:

- Caricamento delle immagini nel formato originale;
- Definizione della dimensione del singolo quadretto della scacchiera: questa informazione permette al solutore di definire la correlazione fisica tra immagine e oggetto reale;
- Selezione della modalità di acquisizione (*standard* o *fish-eye*);
- Impostazione della stima dei parametri: distorsione radiale a 2 o 3 coefficienti (in genere 2 sono sufficienti, mentre per distorsioni più severe se ne utilizzano 3); coefficiente di skew (assente); coefficiente di distorsione tangenziale (assente);
- Avvio della calibrazione.

Al termine della calibrazione, viene fornita un'indicazione della sua qualità, espressa attraverso l'errore medio di riproiezione (in pixel).

L'app Camera Calibrator infatti riconosce i marker in corrispondenza degli incroci tra i quadri neri della scacchiera, e converte questi punti dal sistema di coordinate (S.C.) del terreno al sistema di coordinate dell'immagine. Dopo di che l'app stima i parametri e li usa per riproiettare i punti sull'immagine. L'errore di riproiezione è proprio la distanza tra punti individuati e punti riprodotti.

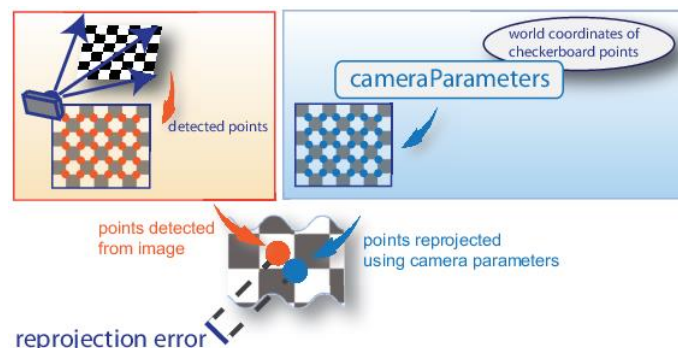


Figura 5.17 - Rappresentazione dell'errore di riproiezione

In genere gli errori inferiori ad un pixel sono considerati accettabili, ma la soglia che indica l'errore medio complessivo può essere modificata dall'utente per escludere le immagini più imprecise. La calibrazione va poi riavviata. Un esempio di risultato è riportato negli istogrammi di Figura 5.18. Nell'interfaccia grafica si possono anche apprezzare i parametri estrinseci, attraverso la ricostruzione tridimensionale dell'ambiente di presa, nelle due modalità *camera centric* o *pattern centric*. L'immediatezza di questa visualizzazione consente di rilevare errori grossolani e di verificare la distanza tra la camera e il pattern (circa 70 cm).

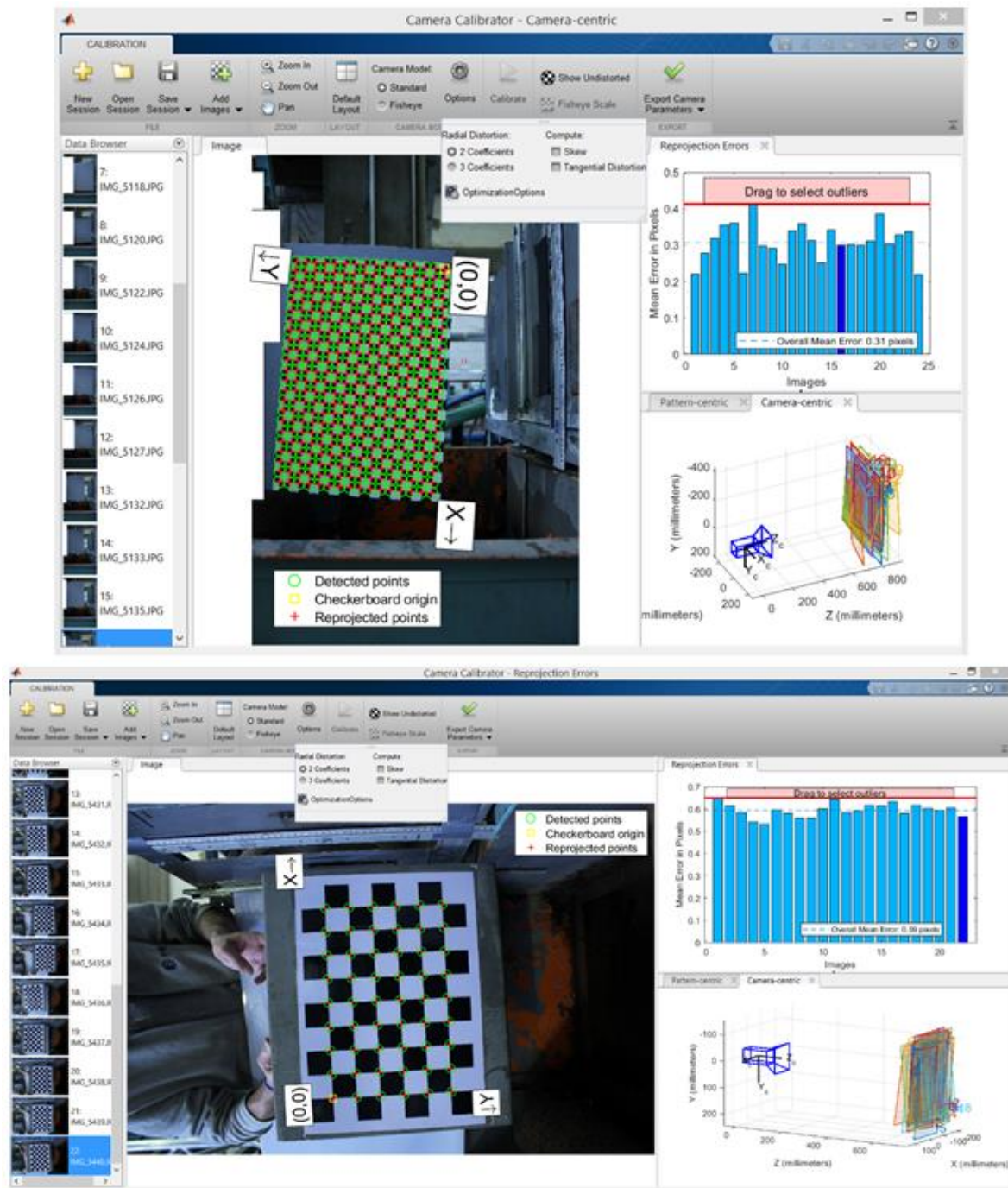


Figura 5.18 – Risultati dal tool Camera Calibrator: dimensioni inferiori dei quadri della scacchiera (20 mm nell'immagine in alto) comportano errori di riproiezione minori rispetto a quadri di dimensioni maggiori (38 mm nell'immagine in basso)

Si conclude la procedura con l'esportazione dei parametri stimati, che vengono immagazzinati all'interno di un file chiamato *cameraParameters*, il quale contiene i parametri di calibrazione interni ed esterni della camera e i coefficienti di distorsione. Oltre a questi, è possibile esportare anche gli errori associati ai parametri attraverso l'oggetto *cameraCalibrationErrors*.

A valle di tutta l'operazione, sarà necessario avere a disposizione un'ulteriore immagine per eseguire una seconda verifica della bontà del processo di calibrazione, ma questo argomento sarà discusso nel paragrafo riguardante l'elaborazione delle immagini.

5.3.3 Esecuzione degli esperimenti

Come anticipato all'inizio del capitolo, sono stati svolti in totale tre set di esperimenti, di cui uno scartato e due conservati. In questi ultimi due si è tentato di mantenere gli stessi livelli di carico nel serbatoio, per un confronto finale speditivo, modificando solo la larghezza della breccia (da 3 cm a 5 cm).

Per ogni esperimento sono stati indagati diversi livelli di carico nel serbatoio (8 livelli per il primo esperimento e 5 livelli per il secondo, a causa di limiti tecnici). Per ognuno di questi livelli sono state acquisite una dozzina di immagini, per un totale di circa 150 immagini elaborate.

All'inizio di ciascuno dei due esperimenti è stata effettuata la calibrazione della camera: una volta collocato un treppiede a poca distanza dal serbatoio di scarico si fissa su di esso il dispositivo, in modo tale da inquadrare la vena effluente secondo uno dei suoi due profili laterali, e si ricerca l'orizzontalità della fotocamera. Terminata la cattura di immagini necessarie ad effettuare la calibrazione (come indicato al *Capitolo 5.3.2*), la fotocamera non deve più essere spostata dalla posizione, avendo cura di mantenere anche lo stesso livello di zoom, in modo da non invalidare l'operazione di calibrazione (per evitare modifiche involontarie lo zoom è stato regolato al minimo e così mantenuto per tutto l'esperimento).

Da qui in poi il modo di procedere per l'acquisizione delle immagini è il medesimo per ciascun livello ma cambiano i dispositivi utilizzati (carichi maggiori necessitano di una capacità di pompaggio più elevata) e i tempi di prova (maggiore è il carico, maggiori saranno i tempi di riempimento e svuotamento del serbatoio di monte).

I passaggi dettagliati sono i seguenti:

1. Collegamento al quadro elettrico dei dispositivi elettronici necessari: pompe idrauliche, pannello di illuminazione LED, sonde a ultrasuoni, PC di controllo.
2. Accensione pannelli LED e fotocamera: si regolano i parametri di scatto della camera (ISO, diaframma e tempo di scatto) per ottenere una corretta esposizione.
3. Accensione sonde a ultrasuoni e avviamento di *Labview* su PC, sul quale monitorare l'altezza d'acqua rilevata dalle sonde in fase di riempimento e svuotamento del serbatoio.
4. Accensione pompa principale e pompe addizionali: la principale rimane in funzione sino allo spegnimento del quadro apposito, mentre le pompe addizionali possono essere attive (se la presa elettrica è mantenuta inserita) oppure solo innescate (presa elettrica inserita fino alla sommersione completa della pompa, e poi disinserita).

Mentre la principale lavora in continuo aspirando acqua dal canale al serbatoio, le addizionali possono lavorare in un senso o nell'altro a seconda della necessità: quando si vuole aumentare il carico nel serbatoio, le pompe alimentano il serbatoio e devono essere mantenute costantemente attive, cioè collegate al circuito elettrico; al contrario, quando si vuole svuotare velocemente il serbatoio, le pompe possono essere attive oppure innescate, e in quest'ultimo caso svolgono il loro compito in virtù del gradiente di quota geometrica tra serbatoio e canale, cioè senza bisogno di alimentazione elettrica.

Sul tubo collegato alla pompa principale è presente una valvola che ne regola la strozzatura e può essere governata manualmente per gestire la portata indirizzata al serbatoio.

5. Monitoraggio del livello nel serbatoio fino al raggiungimento di una condizione di moto uniforme, la quale richiede qualche minuto e viene valutata per mezzo di *Labview*, in quanto non percepibile a occhio nudo.
6. Ad altezza stabilizzata e vena effluente completamente sviluppata, si misura l'altezza del pelo libero nel serbatoio e l'altezza d'acqua (h in *Figura 5.6*) uscente dallo stramazzo triangolare, in modo da poter ricondurre il carico alla portata effluente, e ottenere in un secondo momento la curva di deflusso.
7. Acquisizione di circa 10 fotografie che ritraggono la vena fluida, regolando i parametri di scatto della camera nel caso in cui sia necessario.
8. Spegnimento delle pompe idrauliche che alimentano il serbatoio fino a svuotamento completo di questo. Per accelerare il processo si può aprire lo scarico di fondo del serbatoio mediante la valvola a sfera e si possono lasciare attive le pompe che scaricano l'acqua dal serbatoio al canale, se presenti.
9. Acquisizione di almeno 2 fotografie del background (stessa inquadratura ma assenza di acqua effluente), senza modificare i parametri della camera settati al punto 7.

Terminata l'acquisizione, si riparte dal punto 1 per analizzare un nuovo livello di carico.



Figura 5.19 - Fotografia rappresentativa di una delle 10 acquisizioni della vena fluida (punto 7)

Le misure effettuate nei due esperimenti sono riportate in tabella e discusse di seguito:

BRECCIA 3 cm				BRECCIA 5 cm		
n° prova	Carico H [cm]	Portata Q [l/s]		n° prova	Carico H [cm]	Portata Q [l/s]
1	37,20	12,63		1	37,20	20,47
2	35,95	12,04		2	35,95	19,45
3	33,40	10,67		3	33,40	17,41
4	25,40	7,06		4	25,40	11,99
5	24,15	6,54		5	24,15	11,13
6	23,45	6,27		6	23,45	10,61
7	20,60	5,20		7	20,60	8,82
8	18,00	4,25		8	18,00	7,19

Tabella 5.2 - Misure di portata effettuate per differenti larghezze della breccia

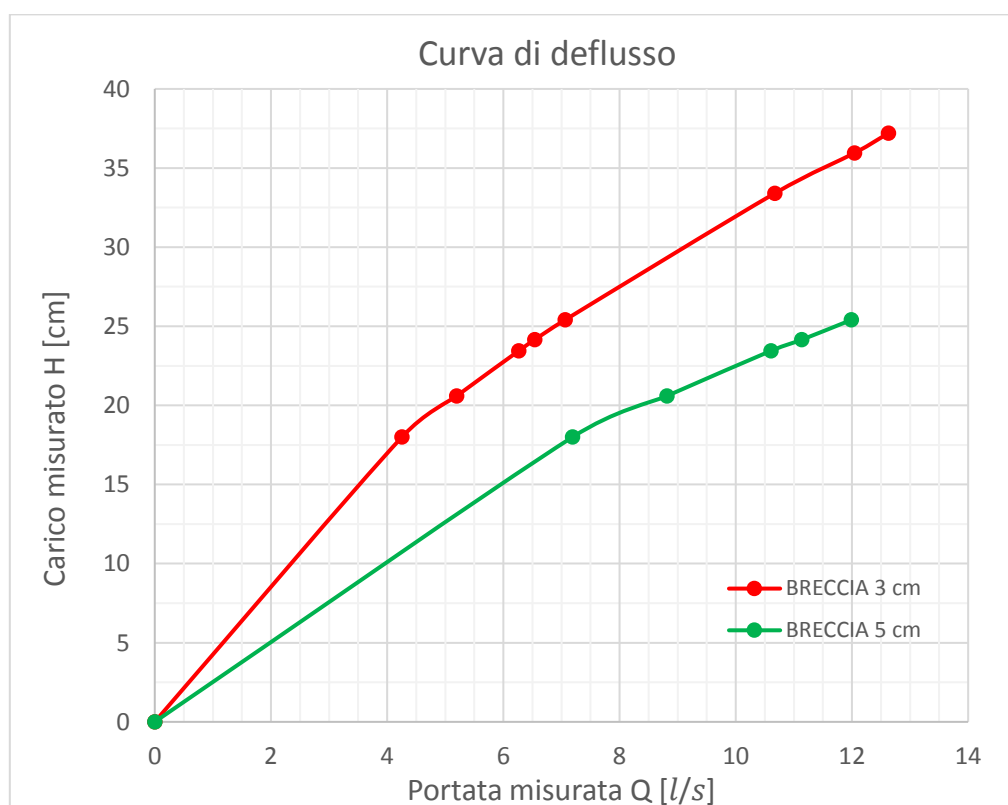


Figura 5.20 - Scala di deflusso stimata dalle misure effettuate

La procedura appena riportata è stata svolta inizialmente per breccia larga 3 cm (condizione in cui il serbatoio si presentava per il precedente impiego nei lavori di tesi di Briano¹² e D'Oria¹³). Con questa larghezza siamo stati in grado di indagare carichi compresi nel range $18 \div 38$ cm, corrispondenti a portate comprese tra $4 \div 13$ l/s. Dalla misura (indiretta) dell'altezza d'acqua h sullo stramazzo triangolare la portata è presto calcolata.

Per il secondo esperimento, la struttura metallica costituente il serbatoio è stata sottoposta a taglio mediante flessibile, in corrispondenza della breccia, per portare la larghezza della stessa a 5 cm.

Maggiorare la larghezza della breccia (2 cm in più) comporta altresì un incremento della portata effluente, a parità di carico. Durante questo esperimento non è stato possibile riprodurre l'intera serie di misure di quello precedente, a causa di un limite tecnico relativo all'attrezzatura di laboratorio: il serbatoio di scarico, dotato di stramazzo triangolare, è tarato per sostenere una portata massima di 16,5 l/s, a cui equivarrebbe un carico nel serbatoio di monte di 31,7 cm.

Con questo valore di portata il serbatoio di valle raggiungerebbe il colmo, e immediatamente dopo si avrebbe la tracimazione dell'acqua da ogni lato, e la conseguente perdita della funzione di "misuratore di portata" dello stramazzo triangolare.

Tutto ciò comporta la perdita dei primi tre profili (che superano il carico di 31,7 cm) per cui nel secondo esperimento non è possibile riprodurli (in *Tabella 5.2* sono stati barrati). Non sarà dunque possibile effettuare il confronto tra i due esperimenti per tutti i livelli di carico.

Nel seguito si riportano i dettagli di esecuzione delle prove, comprensivi dei tre parametri di scatto (ISO, apertura del diaframma e tempo di esposizione) e delle curve di deflusso ricavate. Si ricorda che, una volta instauratosi il moto uniforme, la portata uscente dalla breccia è uguale a quella che attraversa lo stramazzo triangolare:

$$Q_{TR} = 530,52 \cdot h_T^{\frac{5}{2}} [l/s] \quad Q_{RETT} = 1804,26 \cdot B \cdot H^{\frac{3}{2}} [l/s]$$

Per valutare la bontà dei risultati ottenuti si è ricorsi al RRMSE (radice dell'errore quadratico medio, relativo), usuale procedura per la validazione di dati sperimentali:

$$RRMSE [\%] = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i - H_{eff})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i} \cdot 100$$

dove il termine a numeratore è l'RMSE (radice dell'errore quadratico medio).

In base al valore assunto dall'RRMSE, l'accuratezza del modello è considerata eccellente (RRMSE < 10%), buona (10% < RRMSE < 20%), discreta (20% < RRMSE < 30%) o scarsa (RRMSE > 30%).

BRECCIA 3 cm						
n°	Parametri di scatto	Carico misurato H_i [cm]	Altezza h_T [cm]	$Q_{TR} = Q_{RETT}$ [l/s]	Carico effettivo H_{eff} [cm]	Scarto quadratico $ H_i - H_{eff} ^2$
1	ISO 200; f/8; 1/400	37,20	22,42	12,63	37,89	0,48
2	ISO 200; f/8; 1/400	35,95	22,00	12,04	36,72	0,59
3	ISO 200; f/9; 1/500	33,40	20,96	10,67	33,87	0,22
4	ISO 200; f/8; 1/400	25,40	17,77	7,06	25,72	0,10
5	ISO 200; f/9; 1/250	24,15	17,23	6,54	24,43	0,08
6	ISO 200; f/9; 1/400	23,45	16,94	6,27	23,75	0,09
7	ISO 200; f/9; 1/400	20,60	15,72	5,20	20,97	0,14
8	ISO 200; f/9; 1/400	18,00	14,51	4,25	18,35	0,12
						RRMSE = 21,9 %

Tabella 5.3 - Condizioni di prova per breccia larga 3 cm

BRECCIA 5 cm						
n°	Parametri di scatto	Carico misurato H_i [cm]	Altezza h_T [cm]	$Q_{TR} = Q_{RETT}$ [l/s]	Carico effettivo H_{eff} [cm]	Scarto quadratico $ H_i - H_{eff} ^2$
4	ISO 200; f/4,5; 1/250	25,40	21,96	11,99	26,04	0,41
5	ISO 200; f/4,5; 1/250	24,15	21,32	11,13	24,79	0,41
6	ISO 200; f/4,5; 1/250	23,45	20,91	10,61	24,00	0,30
7	ISO 200; f/4,5; 1/250	20,60	19,42	8,82	21,22	0,38
8	ISO 200; f/4,5; 1/250	18,00	17,90	7,19	18,52	0,27
						RRMSE = 21,6 %

Tabella 5.4 - Condizioni di prova per breccia larga 5 cm

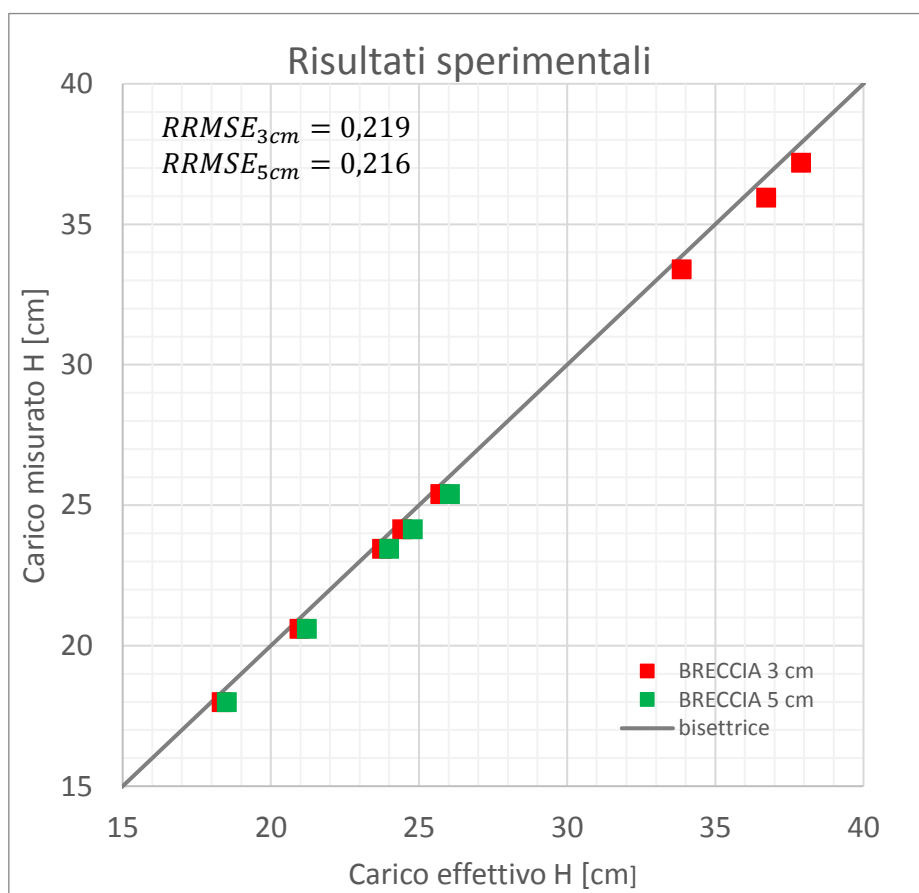


Figura 5.21 - Errore medio tra i carichi rilevati sul serbatoio (punti sperimentali) e i carichi effettivi desunti dalle misure di portata da stramazzo triangolare (bisettrice)

5.4 Post-elaborazione delle immagini

La ricostruzione dei profili d'acqua assunti dalla vena fluida durante i due esperimenti di laboratorio è stata realizzata mediante elaborazione delle immagini acquisite, utilizzando esclusivamente il software di programmazione *Matlab*.

Giunti a questo punto del lavoro abbiamo a disposizione le immagini della vena fluida, le immagini del background e i file derivanti dalla calibrazione e contenenti i parametri della camera. Il passo successivo è la scrittura di un codice che permetta di raddrizzare le immagini eliminando la distorsione e isolare, all'interno dell'immagine, la vena fluida dal contesto circostante, per estrarre infine la curva che descrive il profilo superiore del getto e verificarne la pendenza.

- **Raddrizzamento immagini**

Presa la singola fotografia ritraente la vena fluida, è essenziale dapprima sottoporre l'immagine a un processo di raddrizzamento che restituisca le sue reali dimensioni. Inizialmente si mantiene l'immagine nel sistema di coordinate della camera, cioè in pixel. A questo scopo si utilizza la funzione *undistortImage* presente nella libreria di comandi di Matlab, la cui sintassi è:

$$[J, newOrigin] = undistortImage(I, cameraParams, 'Outputview', Value)$$

Data in input un'immagine *I*, la funzione permette di correggere l'errore dovuto alla distorsione della lente utilizzando i parametri interni ed esterni calcolati in fase di calibrazione e contenuti in *cameraParams*, restituendo l'immagine *J* raddrizzata. La stessa funzione restituisce anche *newOrigin*, ovvero un vettore di componenti $[x,y]$ che rappresenta l'origine della nuova immagine *J*. Questo vettore ha componenti nulle nel caso la dimensione delle immagini in input e output sia la stessa, mentre in caso contrario *newOrigin* rappresenta la traslazione dalle coordinate intrinseche dell'immagine *J* alle coordinate intrinseche dell'immagine *I*.

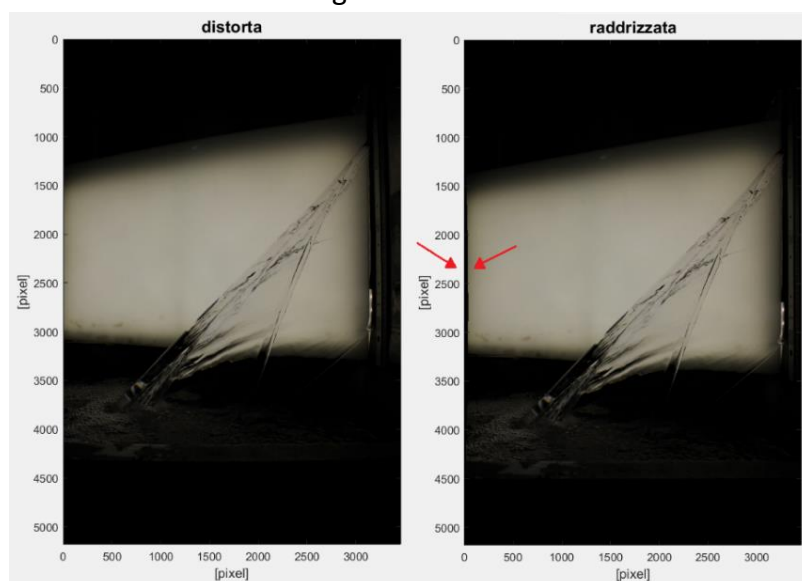


Figura 5.22 - Confronto tra immagine originale e immagine soggetta a raddrizzamento: i punti in cui la distorsione è massima sono quelli più distanti dal centro dell'immagine

La dimensione dell'immagine restituita rispetto all'immagine sorgente è stabilita in base alla modalità di output (*same*, *full*, *valid*) indicata in *Value*. Sebbene molto modesta, la distorsione dell'immagine originale *I* rispetto a quella ricostituita *J* è apprezzabile, utilizzando la modalità *full*, specialmente ai lati della fotografia.

- **Sottrazione immagini**

La procedura di raddrizzamento è da eseguirsi anche per la corrispettiva immagine di background: correggere la distorsione è indispensabile per eseguire la successiva “sottrazione”, dal momento che il calcolatore esegue l'operazione esclusivamente tra oggetti aventi le stesse dimensioni.

Con sottrazione si intende una vera e propria operazione matematica eseguita tra le due immagini, o meglio, tra i pixel che ne costituiscono la matrice. Chiameremo i due elementi in questione *vena* e *back* per distinguere rispettivamente un generico frame ritraente il getto e un frame in condizioni di serbatoio svuotato, in assenza d'acqua. Il risultato di questa sottrazione è un'immagine neutra contenente il solo profilo d'acqua, isolato dal contesto, che chiameremo *profilo*:

$$\text{profilo} = \text{vena} - \text{back}$$

Aver mantenuto la camera nella stessa posizione e con i medesimi parametri di scatto durante l'esecuzione dell'esperimento, garantisce la corrispondenza univoca tra i pixel che costituiscono le immagini *vena* e *back*, per quanto riguarda la posizione nello spazio immagine. Inoltre, il valore associato ai corrispondenti pixel, espresso dalla terna di valori che rappresenta le componenti di colore (R G B), dovrà coincidere per qualsiasi punto che non ritragga la vena, a meno di disturbi nell'intorno dovuti ad anomale riflessioni locali di luce o a schizzi d'acqua che si separano dal getto.

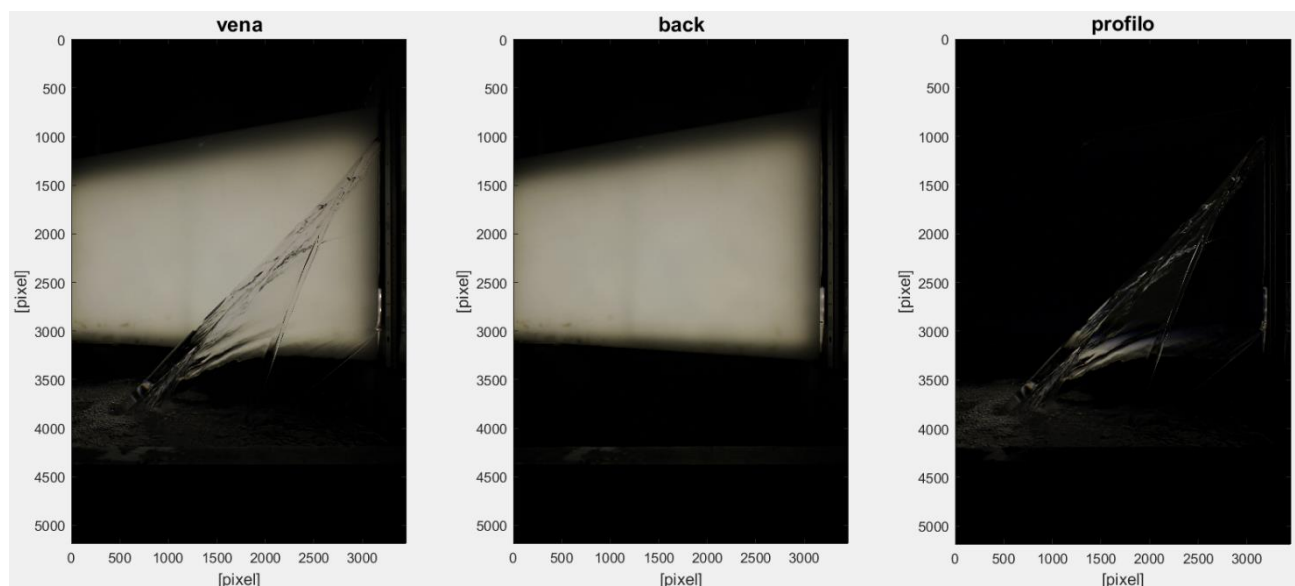


Figura 5.23 - Procedura di sottrazione tra un'immagine ritraente la vena (sinistra) e una ritraente il background (centro) per isolare la vena dal background (destra)

Prima di continuare ad esporre la procedura è bene comprendere come le immagini siano concepite dal calcolatore, allo scopo di essere in grado di manipolarle. Si introduce quindi un breve discorso sulle proprietà delle immagini.

Le immagini digitali acquisite sono costituite da matrici di dimensioni $M \times N$, le cui unità, dette pixel, sono identificate da una terna di canali di colore (Red, Green, Blue) rappresentativa delle intensità di rosso, verde e blu. La combinazione dei valori che assumono i tre canali della terna permette di visualizzare i diversi colori. Questo tipo di immagini sono conosciute più comunemente come immagini *Truecolor* (oppure *RGB*) e sono sempre descritte da un oggetto geometrico $M \times N \times 3$.

Quindi, al singolo pixel compete l'informazione riguardante la posizione nel grigliato di punti (X,Y) e i 3 valori di intensità di colore contenuti nella tripletta (R,G,B).

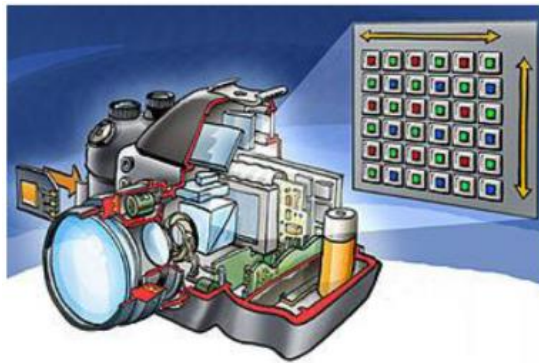


Figura 5.24 - Rappresentazione di un'immagine digitale RGB

Ora, esistono diversi formati in cui le immagini possono essere espresse, a seconda dei valori assunti dalla terna di colori:

- matrici *single* o *double*: valori RGB compresi nell'intervallo continuo $[0, 1]$;
- matrici *uint8*: valori RGB compresi nell'intervallo discreto $[0, 255]$;
sono possibili $2^8 = 256$ sfumature per ciascun canale;
- matrici *uint16*: valori RGB compresi nell'intervallo discreto $[0, 65535]$;
sono possibili $2^{16} = 65536$ sfumature per ciascun canale;

Le immagini acquisite durante gli esperimenti sono state inserite nel calcolatore in formato *double* e successivamente convertite in *uint8* per due semplici motivi: la praticità di manipolare valori interi piuttosto che decimali, e il fatto che alcune delle funzioni presenti in Matlab non supportano il formato *double*.

Infine, si ricorda che il numero di bit usati per rappresentare ogni pixel nello spazio è detta *profondità*: se, come nel formato *uint8*, ognuna delle tre componenti è a 8 bit, ogni pixel a colori ha una profondità di 24 bit e l'immagine è detta *full color*. In tal caso i possibili colori che si possono visualizzare sono $(2^8)^3 = 16777216$, vale a dire una gamma di oltre 16 milioni di colori possibili.

- **Estrazione profili**

La fase più importante e complessa dell'elaborazione riguarda la scrittura di un codice per rilevare, in ogni immagine, il profilo superiore del getto, e rappresentarlo attraverso una funzione di punti. Questo profilo è generato dalla sovrapposizione degli infiniti filetti fluidi uscenti ad altezze differenti dalla breccia. È evidente come le traiettorie non si compenetrano fra loro, limitandosi ad appoggiarsi una al di sopra dell'altra, in virtù del principio del minor dispendio energetico: ai punti posizionati più in basso compete una velocità torricelliana maggiore in modulo, in opposizione ai filetti più in alto, i quali possiedono una minore energia cinetica.

Si evidenzia così una frontiera di punti che costituisce il profilo limite superiore della vena, distinguibile a occhio nudo, a meno di zone di transizione localizzate, in cui il getto si confonde con il pannello retrostante.

L'approccio seguito per distinguere il luogo dei punti sfrutta la capacità tecnica del dispositivo fotografico di rilevare una gamma di colori piuttosto ampia: il criterio impiegato per l'individuazione del profilo ammette che il punto sia posizionato sulla frontiera in questione quando la somma aritmetica dei valori della terna che lo rappresenta supera una soglia predefinita. Per comprendere meglio quanto appena detto, si osservi la figura sottostante, in particolare l'ingrandimento del riquadro, che riporta una frazione del profilo da rilevare.

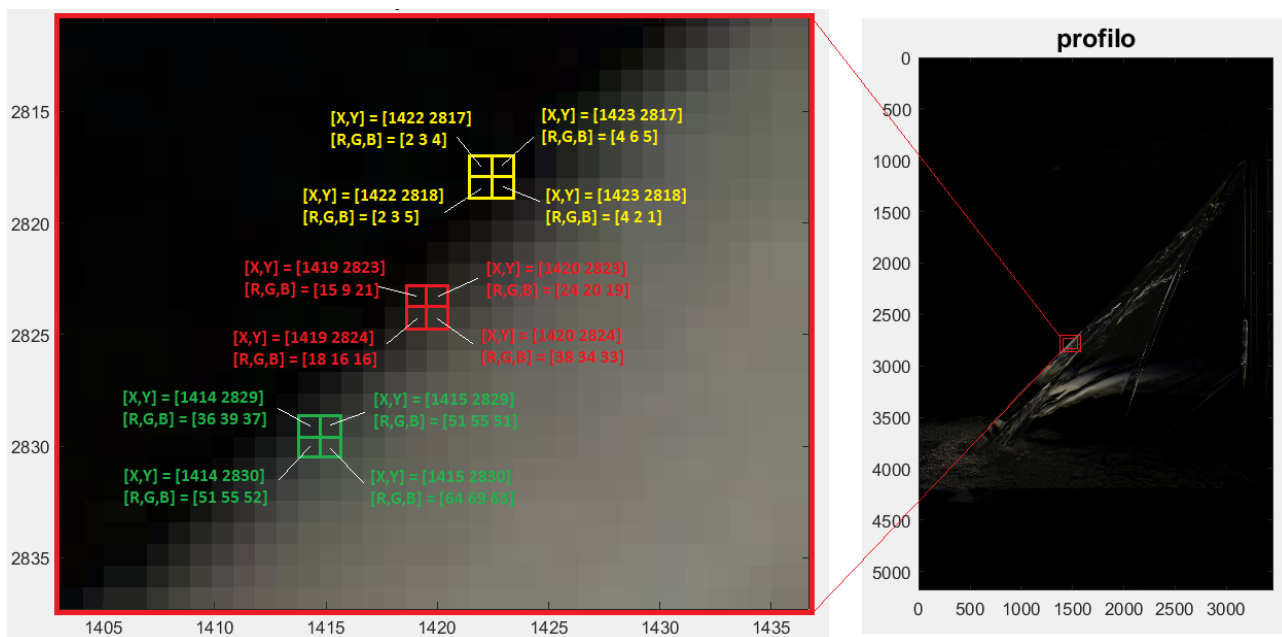


Figura 5.25 - Ingrandimento di una parte dell'immagine che ritrae alcuni punti posizionati sul profilo superiore della vena liquida: a questo livello sono riconoscibili i pixel, identificati dalle coordinate X,Y e dai valori R,G,B

Ciò che non si percepisce nell'immagine completa e che viene invece esaltato nel riquadro di ingrandimento è il fatto che la linea di demarcazione che separa il getto liquido dallo sfondo non sia tracciabile con precisione, anzi è non meglio definibile come una fascia di spessore compreso tra i 3 e i 5 pixel. Ciò significa che il passaggio tra le due regioni non è netto ma piuttosto graduale.

Il criterio scelto per stabilire se un punto si trovi o meno sullo strato d'acqua superiore è matematico, e riguarda l'informazione di colore associata ad ogni pixel. Per comprenderlo, si osservi ancora

il riquadro di sinistra. Come già accennato, un generico pixel è identificato nell'immagine per mezzo delle coordinate [X,Y]: in questo modo la sua posizione è definita. Il pixel però possiede anche l'informazione riguardante il colore. Nelle immagini *full color* questa informazione è contenuta nella terna [R,G,B] e, come detto, i valori possibili per il singolo canale di colore sono compresi nell'intervallo 0-255.

Ad esempio, si abbia un pixel con terna [0 0 255]. Si ha quindi un pixel di colore blu. Ora, l'espressione *profilo(3456, 5184, 3)* inserita nel calcolatore corrisponde a interrogare il pixel posizionato in X=3456 e Y=5185 per conoscere il valore in posizione 3 della tripletta [R,G,B], quindi il blu. L'espressione dovrà dunque restituire il valore corrispondente all'intensità di blu di quel pixel, cioè 255.

– Primo tentativo

Per rilevare il profilo si è stabilita una soglia sui valori [R,G,B] del singolo punto, superata la quale si assume che quel punto giaccia sul profilo. Il codice eseguito implica che il solutore interroghi l'immagine procedendo per strisce verticali, dall'alto verso il basso, sul grigliato di pixel, avanzando alla ricerca di un punto che soddisfi una condizione prestabilita, ad esempio:

$$\text{if } (\text{profilo}(x,y,1) + \text{profilo}(x,y,2) + \text{profilo}(x,y,3) > 12)$$

Quando la condizione è verificata il punto viene copiato all'interno di un vettore che ne registra le coordinate; dopo di che ci si sposta a destra sulla successiva striscia verticale, e si ripete la ricerca di un nuovo punto. Il processo continua per tutta la lunghezza dell'asse orizzontale, definendo una funzione di punti che rappresenta il profilo.

Il primo tentativo si è però rivelato poco efficace, causa la presenza non rara di falsi positivi.

Condizioni puntuali non perfettamente uniformi di illuminazione, eventuali gocce d'acqua separate dalla traiettoria o più semplicemente il disturbo elettronico tra i pixel fa sì che alcuni punti estranei alla vena liquida vengano riconosciuti come appartenenti al profilo (ad esempio si noti che la condizione >12 si è verificata anche per punti lontani dalla frontiera, come il pixel giallo in alto a destra, anche se è evidente che il punto appartenga allo sfondo).

Si è adoperata quindi una nuova strategia per far fronte al problema.

– Secondo tentativo

Dal momento che il primo metodo non può fornire una soluzione adeguata, è stata elaborata una strategia più efficace, sempre sul filone del primo metodo: anziché applicare la condizione al singolo pixel, si analizza un cluster di pixel di ridotte dimensioni, il che permette di prescindere dall'errore dovuto alle disomogeneità puntuali. Una condizione, applicata a insiemi di pixel di dimensioni 2x2, è ad esempio:

$$\text{if } (\text{mean}(\text{profilo}(x,y,1)) + \text{mean}(\text{profilo}(x,y,2)) + \text{mean}(\text{profilo}(x,y,3)) > 12))$$

dove *mean* indica che è stata effettuata la media dei valori dei 4 pixel costituenti il cluster.

Questo metodo restituisce un profilo più regolare e corrispondente alla realtà. Tuttavia, non è stato possibile eliminare del tutto l'errore dovuto alle diverse sorgenti di disturbo.

Per agevolare l'analisi della matrice da parte del calcolatore ed evitare inutili appesantimenti all'elaborazione, il ciclo è stato compiuto all'interno di una regione delimitata da due rette inserite manualmente, dopo aver individuato il più probabile tracciato del profilo (analizzare l'immagine completa non sarebbe affatto stato un problema, tuttavia richiede tempi e capacità di elaborazione che dipendono dal dispositivo sul quale è installato il software).

È necessario precisare che la condizione da verificare è stata stabilita di volta in volta a seconda dell'immagine sottoposta ad analisi, a causa di valori dissimili e persino molto diversi di intensità di colore dei punti appartenenti al profilo. Ciò è da imputare alle diverse condizioni di scatto con cui sono state acquisite le immagini (*Tabella 5.3* e *Tabella 5.4*).

A maggior ragione, il tracciamento delle rette limite entro cui svolgere il ciclo non può essere fissato per tutte le immagini indistintamente, dacché si sono indagate diverse altezze d'acqua nel serbatoio.

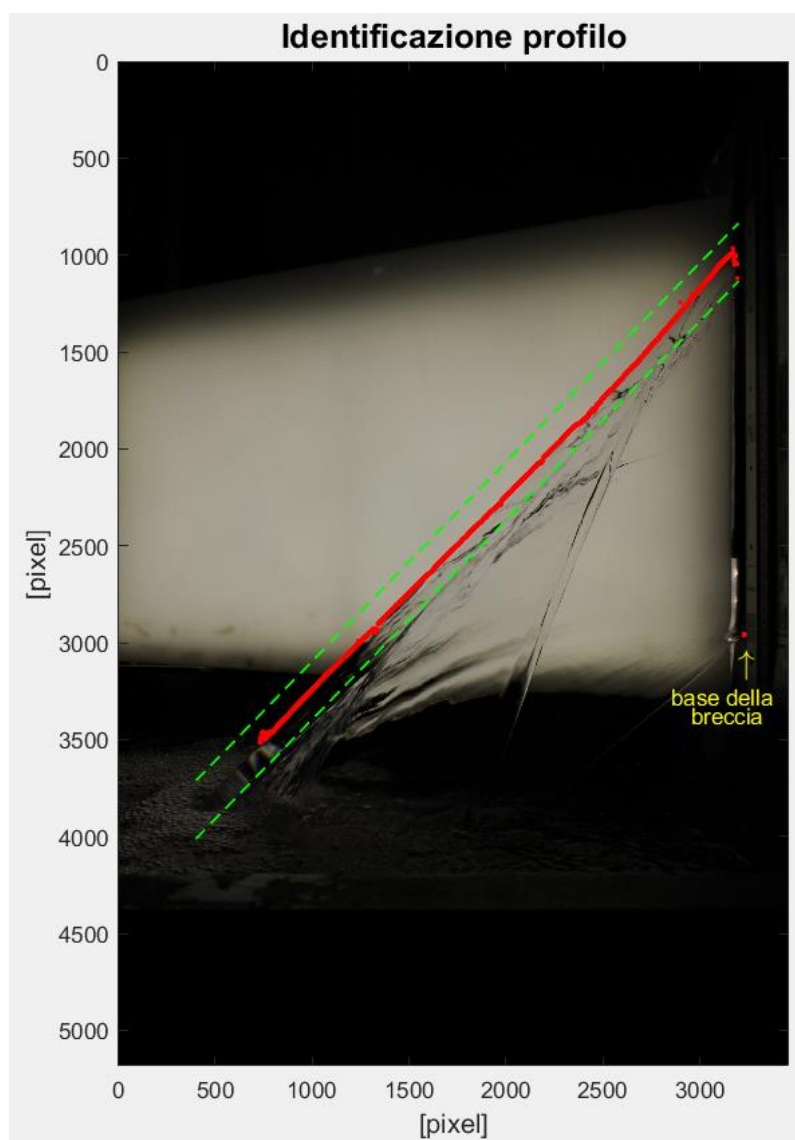


Figura 5.26 - Esempio grafico della fase di rilevamento del profilo: breccia 3 cm, $H=37,2$ cm. Il codice esegue il ciclo solo nella regione compresa tra le rette verdi, per strisce verticali, avanzando da sinistra verso destra.

- **Trasposizione in mm**

L'ultimo step della procedura permette finalmente di trasporre i punti rilevati dal S.R. della camera al S.R. globale, applicando la trasformazione da pixel a mm. Anche qui accorrono in aiuto alcune funzioni disponibili nella libreria di Matlab, di cui alcune già note.

Nella precedente fase di calibrazione era stata scattata un'ulteriore immagine, oltre quelle acquisite per estrarre i parametri della fotocamera, allo scopo di verificare l'efficacia della calibrazione. Questa ulteriore immagine è stata ottenuta disponendo la scacchiera quanto più possibile in asse con la breccia, servendosi di strumenti di precisione per valutarne l'allineamento. La necessità di avere un'immagine aggiuntiva nasce dal bisogno di estrarre i parametri di orientamento esterno (R, C) per convertire le immagini da pixel a mm: sebbene l'oggetto *cameraParams* contenga già i suddetti fattori, questi non possono essere impiegati perché dipendono dall'orientamento che ha assunto ciascuna immagine nella fase di calibrazione precedente.

Per operare la trasformazione da pixel a mm ci si serve dunque di questa immagine addizionale, che innanzitutto viene corretta attraverso la funzione *undistortImage* per modellarne la distorsione, ottenendo l'immagine raddrizzata, chiamata *check*:

[check, newOrigin] = undistortImage (I, cameraParams, 'Outputview', Value)

Successivamente, il comando *detectCheckerboardPoints* individua i marker situati sugli incroci tra i quadri neri e riconosce le dimensioni della scacchiera:

[imagePoints, boardSize] = detectCheckerboardPoints (check)

Data in input l'immagine raddrizzata, la funzione restituisce le coordinate dei marker individuati registrandole nell'elemento *imagePoints*, e calcola le dimensioni della scacchiera in termini di numero di quadri costituenti i lati della scacchiera, inserendoli in *boardSize*.

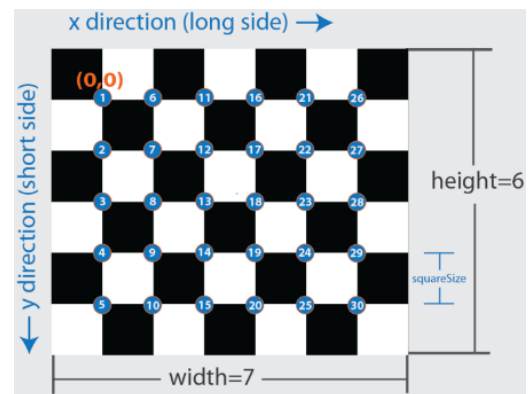


Figura 5.27 - Rappresentazione dell'output fornito dalla funzione *detectCheckerboardPoints*

Le dimensioni della scacchiera (*boardSize*), unite all'informazione della dimensione reale dei quadri interni (*squareSize*), permettono di generare una scacchiera virtuale di punti, per mezzo della funzione *generateCheckerboardPoints*:

[worldPoints] = generateCheckerboardPoints (boardSize, squareSize)

L'elemento di output *worldPoints* contiene le coordinate dei marker sulla scacchiera, in riferimento all'origine collocata sul primo incrocio tra quadri neri individuato in alto a sinistra della scacchiera.

Confrontando i punti individuati sull'immagine (*imagePoints*) con i punti costituenti la scacchiera virtuale (*worldPoints*) si può valutare l'efficacia della calibrazione: essa sarà tanto migliore quanto più essi saranno sovrapposti.

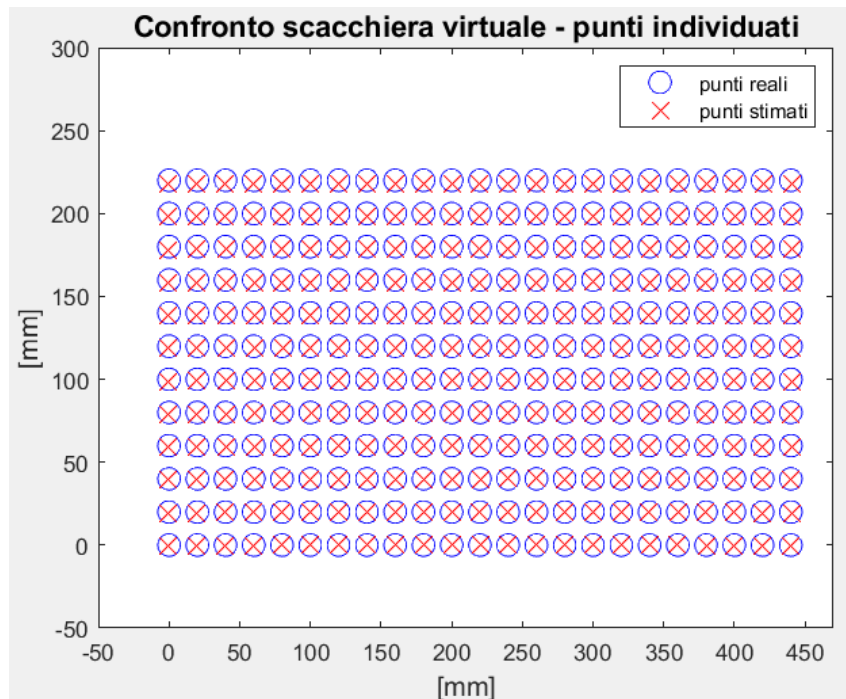


Figura 5.28 - Confronto tra i punti appartenenti alla scacchiera virtuale (reali) e i punti individuati (stimati)

A questo punto non resta che correlare i punti tra il sistema di coordinate reali e quello della camera, utilizzando il comando *extrinsics*, che estrae la matrice di rotazione *R* e il vettore di traslazione *C* dall'immagine:

$[rotationMatrix, translationVector] = extrinsics(imagePoints, worldPoints, cameraParams)$

In conclusione, si applicano i parametri appena trovati alle immagini dei profili d'acqua (le quali sono ancora espresse in pixel) attraverso il comando *pointsToWorld*:

$worldPoints = pointsToWorld(cameraParams, rotationMatrix, translationVector, imagePoints)$

Inserendo in input i parametri interni della camera (*cameraParams*), i parametri esterni (*R*, *C*) e l'immagine del profilo di cui effettuare la trasformazione di coordinate (*imagePoints*) si ottiene infine il profilo d'acqua in mm.

Il codice Matlab è riportato in allegato nella sezione A. *Codici MATLAB* di questo documento.

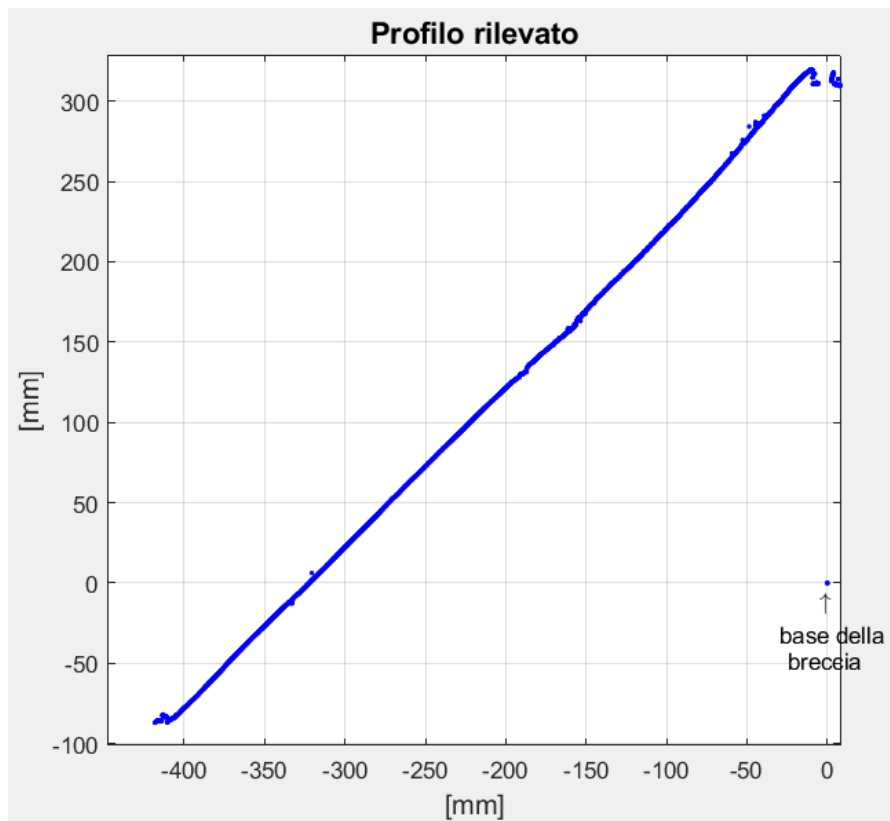


Figura 5.29 - Esempio di profilo ottenuto dall'elaborazione delle immagini: breccia 3 cm, $H=33,4$ cm.
 Il profilo si presenta regolare nella zona centrale e più disturbato alle estremità

5.5 Risultati

Il capitolo qui presente riporta i risultati delle prove, raccogliendo tutti i profili appartenenti ai singoli esperimenti e operando un confronto grafico e analitico tra i due, per giungere infine all'obiettivo dell'intero studio, che si ricorda essere la verifica del teorema di Torricelli nel caso di breccia rettangolare sviluppata interamente in altezza.

I profili originali sono stati rilevati nell'intera lunghezza, infatti si estendono dal punto di sbocco in corrispondenza della breccia fino alla superficie d'acqua accumulata nel serbatoio di valle (*Figura 5.29*). Dall'immagine sono subito evidenti delle irregolarità nel profilo, che si concentrano alle estremità della traccia: i punti geometricamente più in basso infatti si presentano ammassati in modo caotico, a causa della turbolenza generata dalle particelle in caduta, e ciò comporta che il profilo non possa essere chiaramente definito; nella zona di efflusso dalla breccia invece esso è raccordato alla superficie orizzontale definita dall'acqua in condizioni quasi-statiche nel serbatoio di monte. Infine, il profilo presenta punti isolati, cuspidi o vuoti nella sua continuità e ciò è da attribuire principalmente alla casualità con cui i filetti fluidi si compenetrano e riflettono la luce in un preciso istante.

Per correggere la non-linearità dei profili, questi sono stati accorciati, letteralmente, al fine di rendere la singola traccia più "pulita" per una successiva analisi: nonostante si perda parte dell'informazione troncando il profilo alle due estremità, la pendenza media potrà comunque essere calcolata sulla parte centrale della lama d'acqua, che rappresenta la sezione più rappresentativa.

Dunque, se le prime due cause di disturbo localizzato possono essere, per così dire, eliminate, non è così semplice invece regolarizzare il corpo centrale del profilo.

Successivamente all'estrazione dei profili, nella fase di elaborazione delle immagini, gli stessi sono stati riportati all'interno di un unico grafico allo scopo di cogliere l'aspetto di ripetibilità delle prove. Si ricordi che per la singola prova (associata ad uno specifico carico nel serbatoio) sono state acquisite 10 immagini del profilo: un primo dato interessante può essere operare un confronto grafico tra questi profili in forma grezza. Nelle immagini successive sono raggruppati tutti i test effettuati, separatamente per breccia larga 3 cm e 5 cm, e distinti secondo l'energia posseduta dal fluido, espressa sotto forma di carico H .

Si noti quanto la forma del corpo centrale del profilo sia variabile in alcune prove rispetto ad altre.

– Breccia larga 3 cm

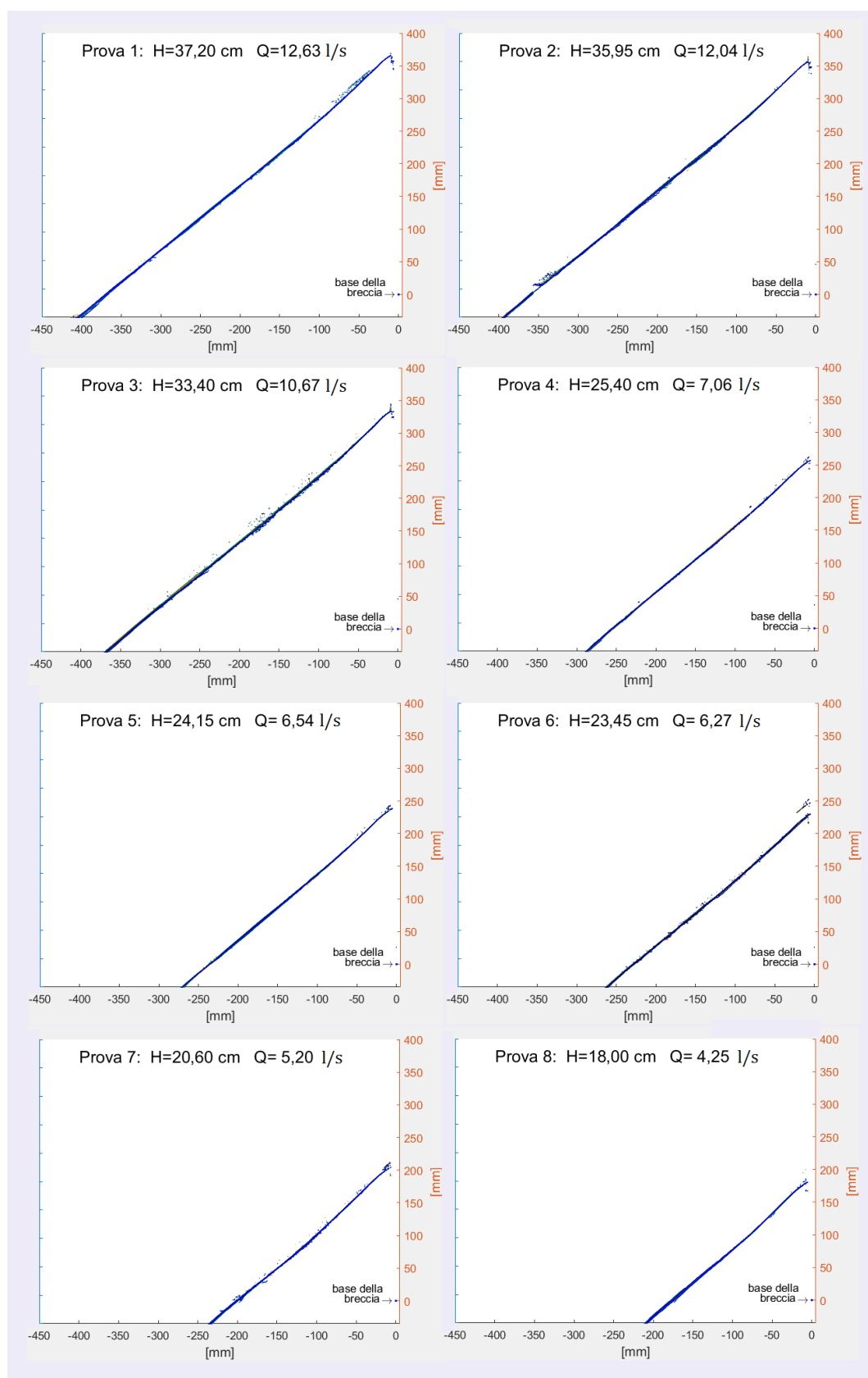


Figura 5.30 - Profili rilevati per le 8 prove in condizioni di breccia larga 3 cm. Per ogni prova sono stati elaborati 10 profili

– Breccia larga 5 cm

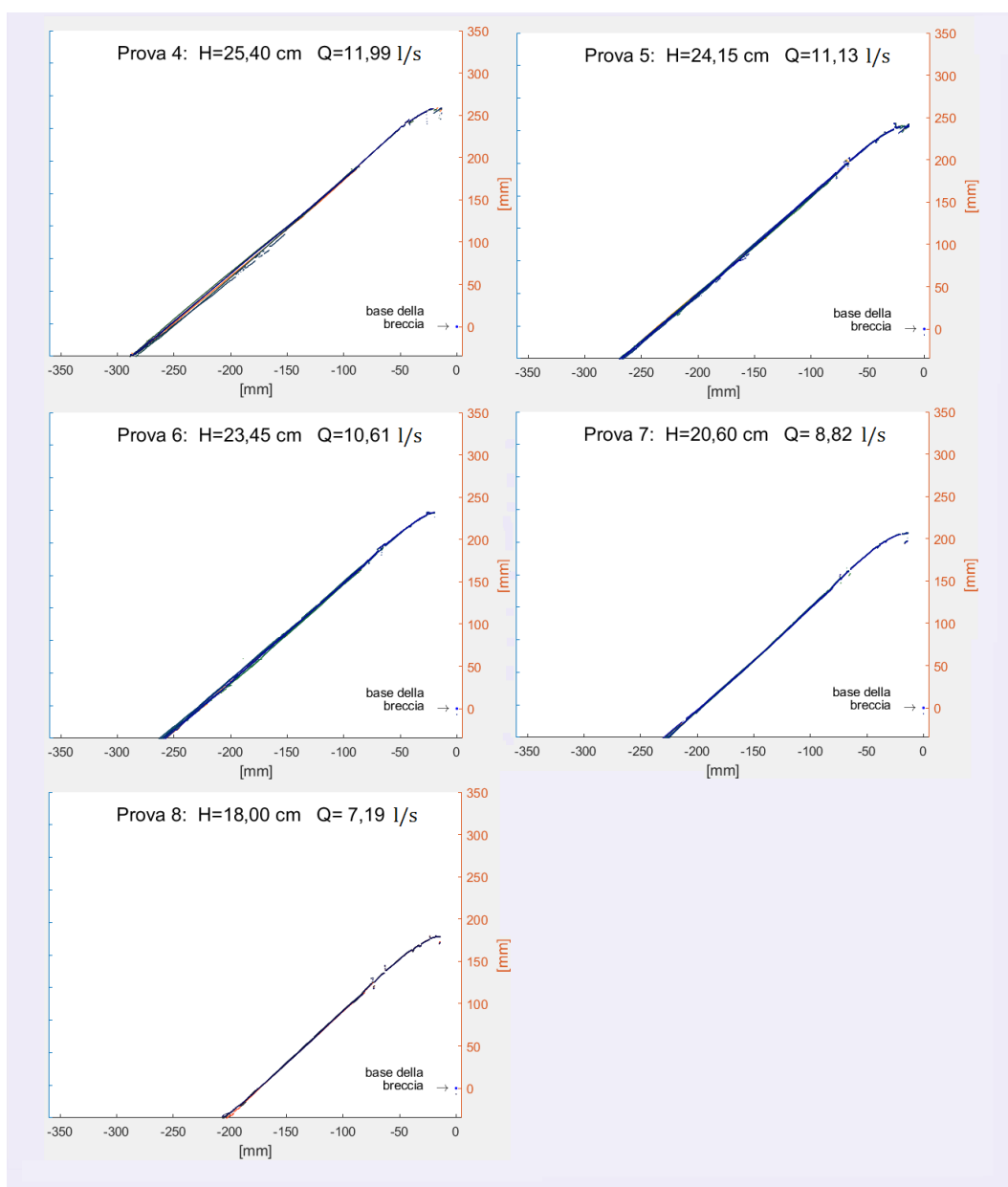


Figura 5.31 - Profili rilevati per le 5 prove in condizioni di breccia larga 5 cm. Per ogni prova sono stati elaborati 10 profili

- **Confronto tra gli esperimenti**

Per ogni condizione di carico è stato estratto un profilo caratteristico, ottenendo un totale di 13 profili rappresentativi dell'intero studio, divisi per esperimento. Avere questi grafici a disposizione consente di confrontare i risultati in modo qualitativo, iniziando a trarre qualche conclusione riguardo la pendenza e la morfologia, anticipando delle conclusioni confermate successivamente da un'analisi più approfondita.

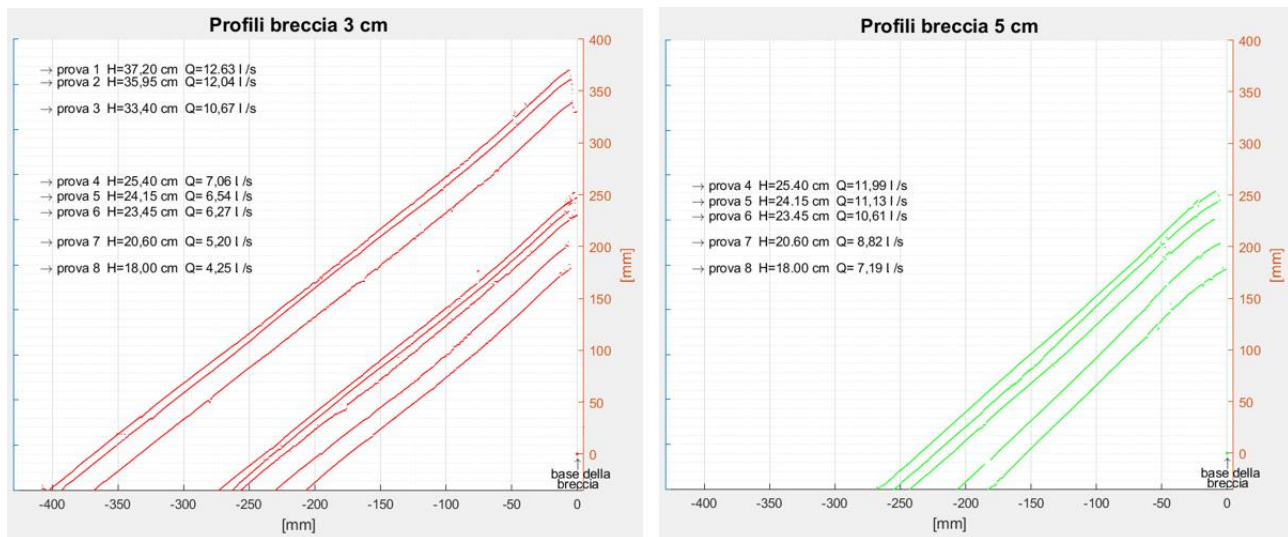


Figura 5.32 - Risultati degli esperimenti eseguiti per breccia larga 3 cm e 5 cm, con un profilo rappresentativo per ogni prova

In primo luogo, dai grafici in *Figura 5.32* si osserva la conservazione del parallelismo tra i profili appartenenti ad uno stesso esperimento, a indicare che il carico influisce solo sulla dimensione del profilo, espressa come altezza del triangolo rettangolo i cui lati sono il profilo e i due assi cartesiani; invece non ne condiziona la pendenza, che si mantiene a prima vista a 45°.

Questa osservazione fornirebbe una prima conferma del risultato analitico raggiunto da Horton riguardo la pendenza del getto, descritto dalla funzione $x = H - y$. (*Capitolo 5.1*)

Per avere un dato grafico più attendibile si possono sovrapporre i profili laddove i carichi coincidono, e osservare l'andamento delle tracce.

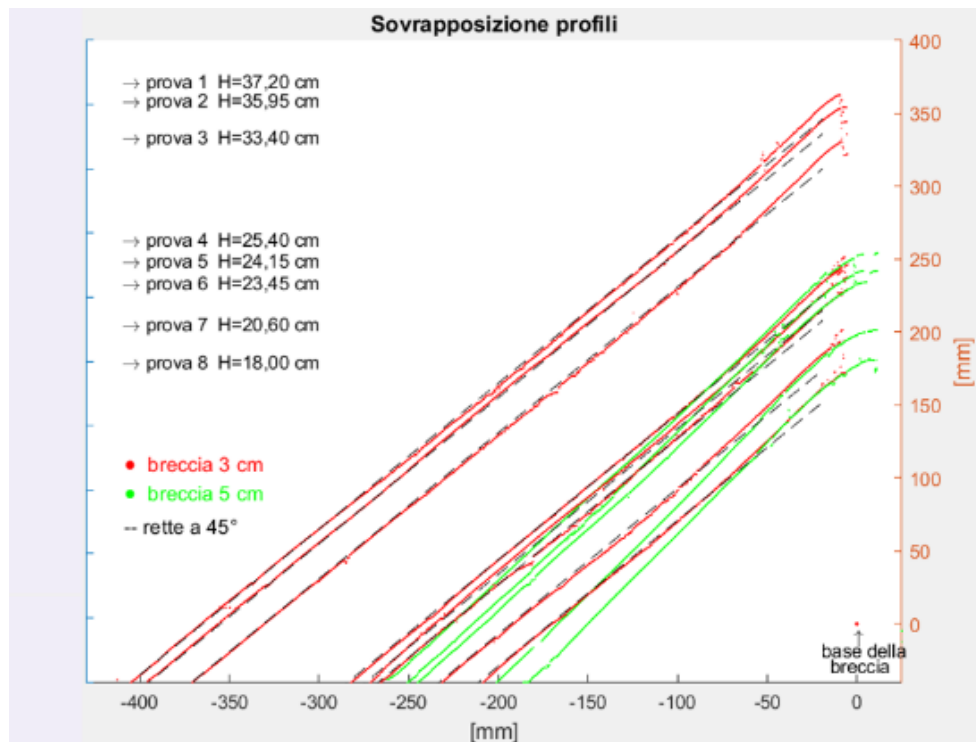


Figura 5.33 - Sovrapposizione tra i profili per breccia 3 cm, breccia 5 cm e le rette di pendenza unitaria

Nella figura sopra, oltre ai profili rappresentativi, sono state riportate anche le rette aventi pendenza unitaria, la cui traccia corrisponde al dato di verità discendente dalla trattazione di Horton.

Si riscontra immediatamente la corrispondenza tra le rette nere e i profili rossi, corrispondenti all'esperimento con breccia larga 3 cm: le due tracce si sovrappongono in tutta la loro estensione, eccezion fatta per la parte superiore, in cui i profili sono richiamati dal livello stabilitosi nel serbatoio, manifestando una leggera inflessione prima del raccordo.

Lo stesso discorso non può essere sostenuto per i profili verdi (breccia larga 5 cm), per i quali la pendenza appare maggiore di qualche grado. Conviene a questo punto calcolare gli scarti rispetto alle rette di pendenza unitaria, per trarre delle conclusioni certe.

Di seguito si riportano i valori di scarto di ciascuna prova, attraverso delle grandezze statistiche:

$$RMSE [\%] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{45^\circ})^2}$$

$$RRMSE [\%] = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{45^\circ})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i} \cdot 100$$

Nel calcolo non è stata analizzata la parte di profilo superiore che presenta una marcata inflessione, per le ragioni già precisate.

– Breccia larga 3 cm

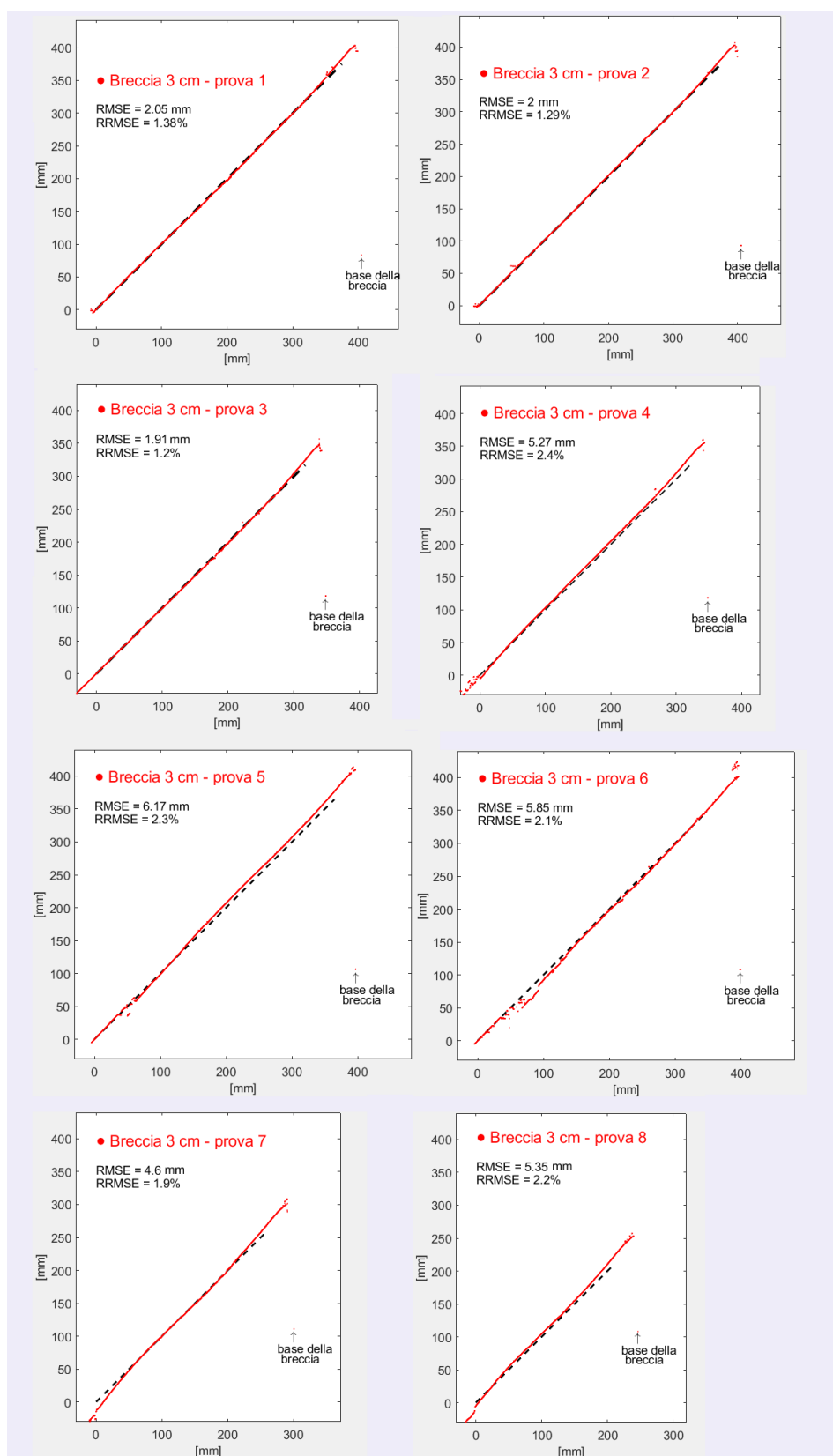


Figura 5.34 - Sovrapposizione tra i profili per breccia larga 3 cm e le rette a pendenza unitaria: l'errore relativo è contenuto e le tracce corrispondono

– Breccia larga 5 cm

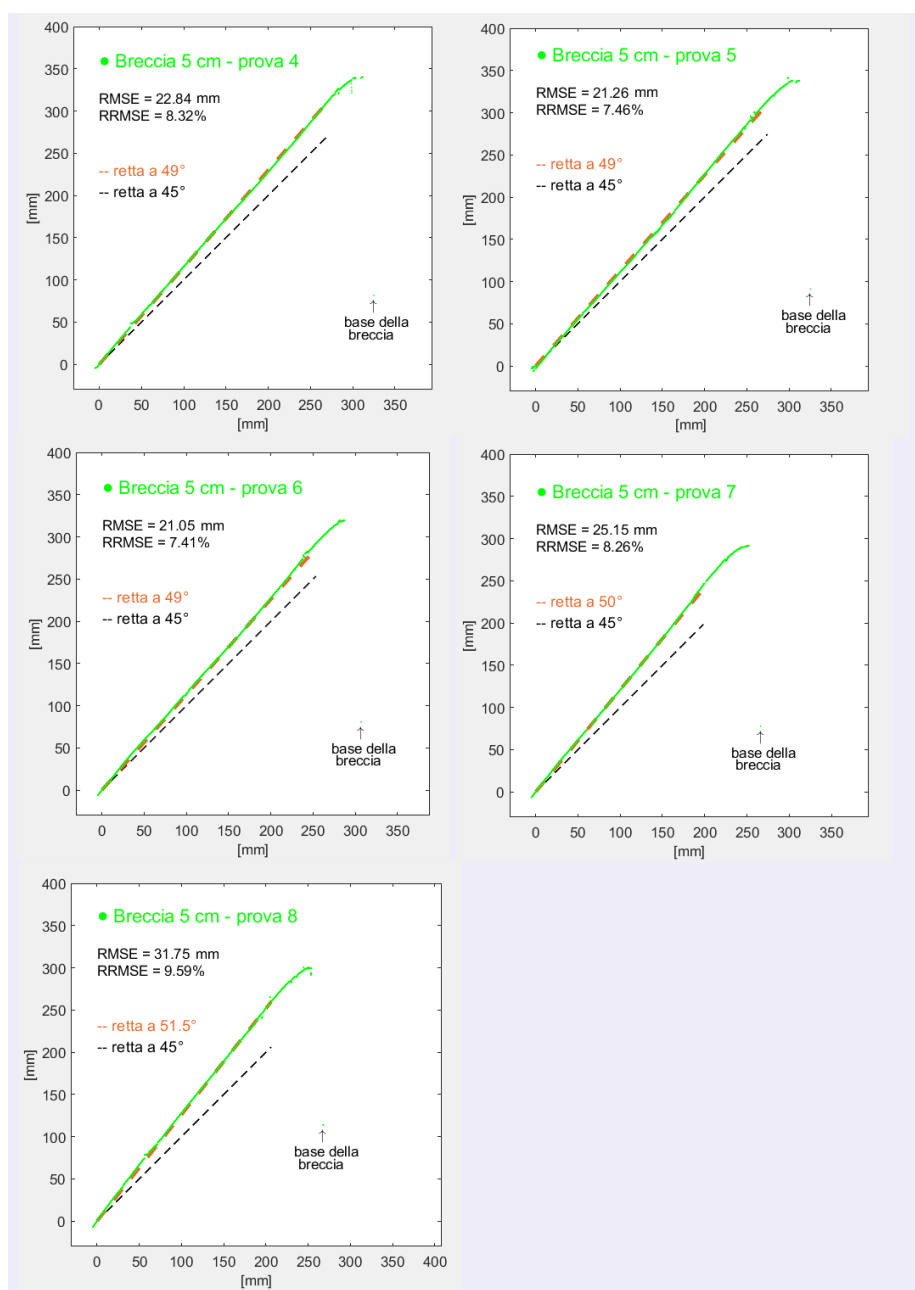


Figura 5.35 – Sovrapposizione tra i profili per breccia larga 5 cm e le rette a pendenza unitaria: l'errore relativo aumenta perché i profili tendono a seguire una pendenza maggiore

I dati ottenuti suggeriscono un errore contenuto per tutti i profili del primo esperimento (breccia 3 cm), che mantiene scarti relativi inferiori al 3%.

In particolare, l'RMSE, che consente di apprezzare il valore medio di scarto verticale tra la retta nera (dato di verità) e la traccia rossa (profilo rilevato empiricamente), si aggira intorno ai 5 mm.

Di conseguenza si può affermare che l'ipotesi di Horton è verificata per vena effluente da una breccia rettangolare stretta in parete sottile.

Tuttavia, il secondo esperimento conduce a conclusioni diverse, infatti gli scarti tra i profili verdi e

le rette nere risultano molto più elevati (tra 20 e 30 mm), a indicare che il profilo si discosta sicuramente da un andamento a 45° per adattarsi a pendenze maggiori (tra 49° e 52°), come indicato dalle linee arancioni.

Allora si conclude che, per larghezze della breccia crescenti, descrivere il fenomeno 2D attraverso il punto di vista di Horton comporta delle difficoltà e risulta necessario un approccio completo tridimensionale.

5.6 Analisi della traiettoria di un singolo getto

Parallelamente allo studio della pendenza della vena effluente, è stata condotta un'ulteriore analisi sullo stesso elemento fluido, al fine di dimostrare la validità del teorema di Torricelli applicato allo stramazzo: se i filetti fluidi si mantengono tra loro indipendenti, in virtù del principio di minimo dispendio di energia, ne deriva che altrettanto facciano le corrispondenti traiettorie.

Si tratta allora di isolare la traiettoria di una singola particella fluida, per quanto possibile, e di verificarne la corrispondenza con la traiettoria che la stessa particella percorrerebbe in un moto di tipo parabolico, secondo l'applicazione di Horton.

Osservando la vena fluida frontalmente o dall'alto, inoltre, si può osservare un cambio di traiettoria dei punti più esterni: le particelle tendono a generare un ventaglio di curve che sfuggono verso l'esterno quando la vena è più lontana dalla breccia, perché questa è la configurazione che permette al fluido di spendere la minima quantità di energia. La vena capillare quindi può dare informazioni sulla reale traiettoria seguita, a seconda che essa si trovi esattamente sull'asse della breccia o in posizione più defilata.

Il set-up sperimentale coincide con quello utilizzato nella fase precedente, a meno dell'aggiunta di un tubo capillare immerso nel serbatoio in corrispondenza dell'asse della breccia, piazzato a pochi centimetri a monte rispetto ad essa e direzionato verso valle.



Figura 5.36 – A sinistra, set-up del tubo capillare; a destra, vista della breccia e del tubo capillare dall'interno del serbatoio

Il tubo capillare quindi ha un'estremità che si affaccia sulla breccia, mentre all'altro capo attinge del liquido da una tanica che permette di comandarne il flusso. Questo sistema permette di riprodurre il moto di un filetto fluido uscente dalla breccia in maniera indipendente dalla massa d'acqua in caduta dal serbatoio, per capire come la sua traiettoria interagisce con le altre.

Per il liquido in questione, all'inizio si è deciso di utilizzare un colorante alimentare disciolto in acqua, per aumentare il contrasto visivo tra il getto singolo e l'intera vena effluente e rendere più visibile

la traiettoria in esame, mantenendo la retroilluminazione con il pannello a LED. Il solo colorante non permette di essere rilevato con precisione dal dispositivo di acquisizione, complice il fatto che il getto assume la forma a ventaglio e quando la vena capillare si disperde nel ventaglio diventa difficile da distinguere.

Dunque, si è ricercato un metodo in grado di accrescere la visibilità della traiettoria lungo l'intero percorso, sfruttando la fluorescenza di alcune sostanze nello spettro di luce che interessa gli UV.

Per valutare il comportamento della vena capillare sono state posizionate due *action cam* lateralmente a pochi centimetri dal getto, in modo da inquadrare il profilo della vena capillare nelle zone in cui si manifesta il ventaglio d'acqua; in aggiunta a queste è stata piazzata una fotocamera professionale in posizione frontale, ad un livello più elevato rispetto alla sommità della breccia, in modo che fornisse un inquadramento completo della breccia e dell'intera vena effluente.

5.6.1 Sostanze fluorescenti

Allo scopo di rendere la vena capillare più visibile durante il flusso dalla breccia, sono stati effettuati diversi tentativi per individuare le migliori condizioni di prova, impiegando diverse sostanze.

Il primo tentativo è stato realizzato disciogliendo in acqua del colorante alimentare E124. Si tratta di un colorante artificiale noto anche come *Ponceau 4R* o *Cocciniglia A* (dove A indica “artificiale” per distinguerlo dalla *Cocciniglia*, cioè il colorante di provenienza animale, ottenuto dalla macinazione degli omonimi insetti); si presenta con una tonalità rossa intensa e attribuisce una forte colorazione all’acqua anche in piccole quantità. Inoltre, è un composto relativamente economico, non tossico e innocuo al tatto.



Figura 5.37 - Colorante E124 in polvere

Nonostante i vantaggi che comporta il suo impiego, la vena capillare è difficilmente individuabile nella sua interezza, in particolare in quei punti dove il ventaglio che si forma, ripiegandosi verso l’esterno, crea effetti di rifrazione o rompe la vena capillare.

Si è così deciso di abbandonare l’utilizzo di coloranti in favore di sostanze in grado di emettere luce quando stimulate da una sorgente esterna, cioè sostanze dalle proprietà luminescenti.

Esistono sorgenti esterne di diversa natura, pertanto esisteranno differenti tipi di luminescenza: si può infatti parlare di elettroluminescenza, radioluminescenza, chemiluminescenza e fotoluminescenza. Per lo studio qui presente è di interesse solo quest’ultima forma, in cui l’energia è fornita dall’assorbimento di radiazione elettromagnetica nello spettro compreso tra l’ultravioletto e l’infrarosso, la cosiddetta regione del visibile.

Quando la radiazione incidente colpisce gli atomi di una sostanza luminescente, trasferisce ad essa dell’energia: questa viene assorbita dagli atomi e si genera uno stato elettronico eccitato in cui un elettrone è promosso a un livello energetico più esterno, e quindi più energetico.

Dopo un tempo molto breve (inferiore a 10^{-3} secondi) l’elettrone eccitato torna al livello di partenza attraversando uno o più stati a energia intermedia. In questa fase di rilassamento dello stato elettronico (quenching) l’atomo dissipa energia senza emissione di luce (conversione interna) e in genere solo uno dei decadimenti si manifesta in modo radiativo, cioè emettendo luce. Nella maggior parte dei casi l’emissione avviene a lunghezza d’onda maggiori rispetto alla radiazione incidente (quindi a energia minore) e non necessariamente la lunghezza d’onda emessa ricade nello spettro del visibile³⁴.

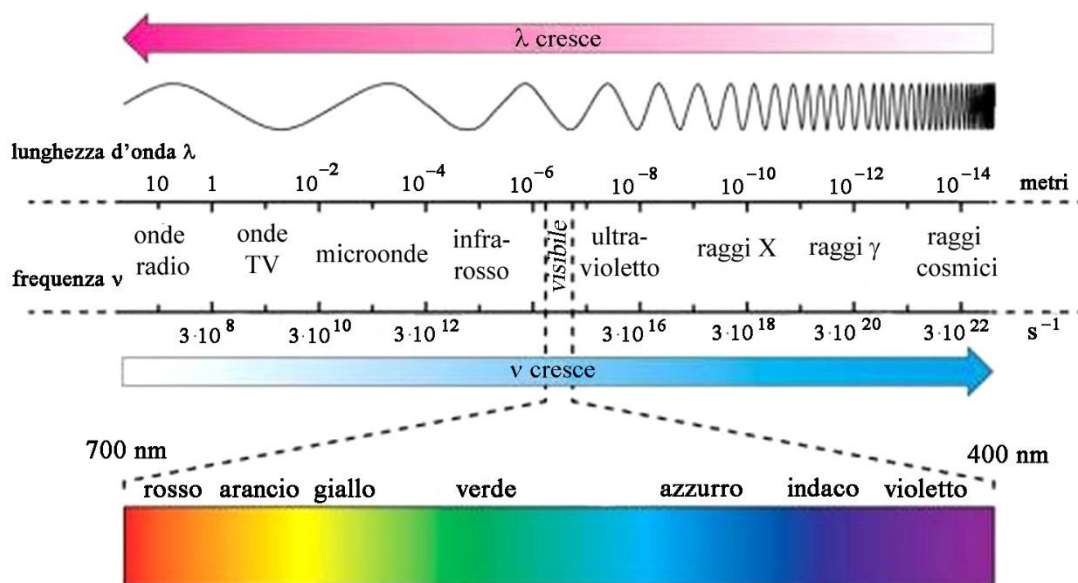


Figura 5.38 - Rappresentazione dello spettro elettromagnetico

Nel fenomeno della luminescenza rientrano due processi fisici noti in mineralogia e in diverse applicazioni biomediche: fluorescenza e fosforescenza.

La distinzione più semplice tra i due si basa sul tempo di vita della radiazione: nella fluorescenza accade che la luminescenza cessa quasi subito dopo aver eliminato la radiazione eccitante (decadimento dell'ordine di $10^{-9} \div 10^{-8}$ secondi), mentre nella fosforescenza la radiazione continua ad essere emessa anche dopo aver eliminato la sorgente eccitante (decadimento di 10^{-3} secondi).

Nel caso in esame si ha a che fare con sostanze fluorescenti, quindi l'emissione perdura fintanto che esiste la radiazione incidente.

Le sostanze fluorescenti sono costituite generalmente da molecole poliatomiche dette *fluorofori*, i cui atomi subiscono le transizioni elettroniche quando colpiti dal fascio radiante. Per queste molecole si possono individuare uno *spettro di eccitazione* e uno *spettro di emissione* della fluorescenza, secondo lo schema definito dal Diagramma di Jablonski.

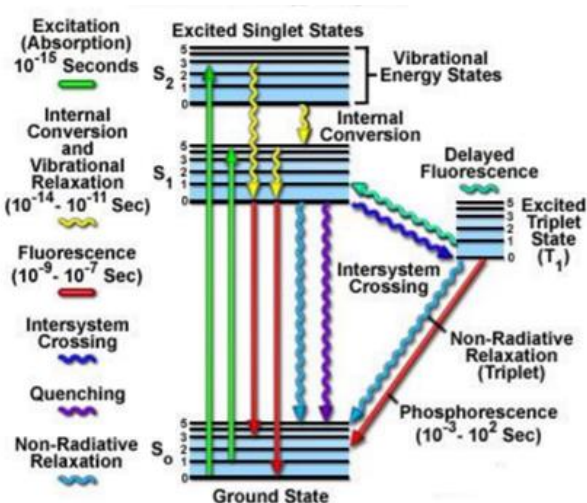


Figura 5.39 - Rappresentazione delle transizioni elettroniche nel Diagramma di Jablonski

Questo schema rappresenta il passaggio da uno stato fondamentale (S_0) ad uno eccitato (S_2), da qui a un nuovo stato eccitato (S_1) e quindi di nuovo allo stato fondamentale. Ogni stato è rappresentato da un gruppo di linee orizzontali che identificano i livelli vibrazionali. La distanza tra le linee orizzontali è proporzionale alla differenza di energia tra i livelli. I segmenti che terminano con una freccia rappresentano le transizioni (in verde l'assorbimento, in rosso la fluorescenza e la fosforescenza), quelli ondulati rappresentano le transizioni che non producono emissione di luce.

- **Rodamina**

La *rodamina B* è un colorante dalle proprietà fluorescenti utilizzato comunemente in istologia e in altre applicazioni biologiche. A temperatura ambiente si presenta come un solido di colore rosso quasi inodore. È un composto irritante e, se disperso, pericoloso per l'ambiente.

Se viene disciolta in acqua a concentrazioni non troppo elevate, la rodamina ha un picco di assorbimento in corrispondenza di lunghezze d'onda pari a 540 nm ed un picco di fluorescenza nel range 550÷585 nm.

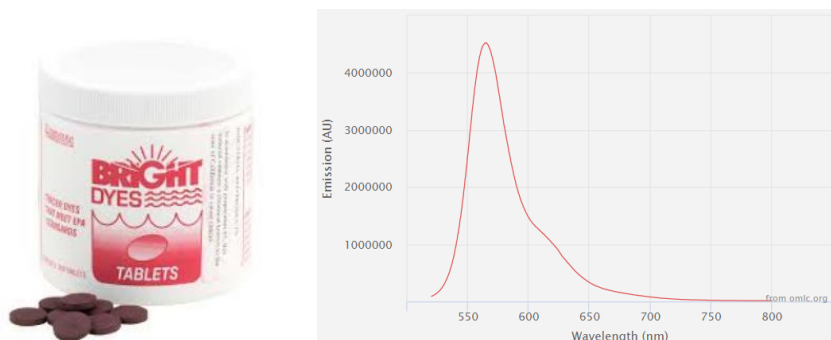


Figura 5.40 - Rodamina B in pastiglie di colore rosso-bruno e relativo spettro di emissione

- **Fluoresceina**

La *fluoresceina sodica* (o *uranina*) è un composto organico molto fluorescente, utilizzato come tracciante in diverse applicazioni. Particolarmente indicato per la ricerca di acque sotterranee, per la verifica di perdite di cisterne e invasi e per la verifica di tenuta di impermeabilizzazioni in generale, trova impiego anche in medicina, negli esami diagnostici oculistici, dal momento che si tratta di un composto non irritante per gli occhi né per la pelle. Esistono anche numerose altre applicazioni di questo colorante, in biochimica, in cosmetica, ma anche usi più singolari, come la rilevazione di macchie di sangue latenti o come repellente per gli squali.

La fluoresceina conferisce una forte colorazione giallo-verde quando disciolta in acqua (520-530 nm), ma le migliori proprietà fluorescenti sono esibite quando viene eccitata da raggi UV a 254 nm, in cui il composto assume le sfumature nella gamma del blu (465-490 nm).

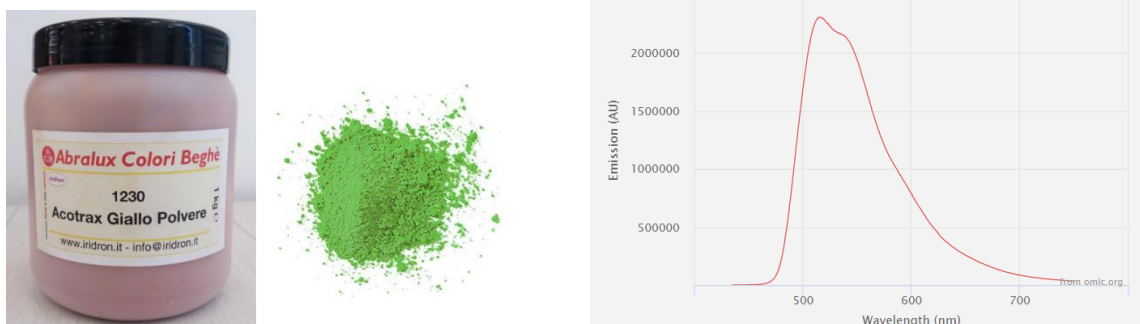


Figura 5.41 - Fluoresceina sodica in polvere e relativo spettro di emissione

Vista l'inefficacia del colorante E124 nel fornire informazioni chiare su come la vena capillare interagisce con il ventaglio d'acqua (specialmente quando ripresa dall'alto), sono state sfruttate le proprietà luminescenti di queste due sostanze. Al di fuori del serbatoio e in particolare al di sopra della breccia, è stato allestito un ambiente buio in modo che l'unica sorgente luminosa fosse quella fornita da lampade UV (*black light*), vista la capacità delle radiazioni ultraviolette di eccitare le molecole di queste sostanze e indurre un rilascio di radiazioni nello spettro della luce visibile.

La fluorescenza visibile indotta da radiazione ultravioletta, detta *Fluorescenza Ultravioletta* (UVF) è una tecnica di analisi per immagini non invasiva, in quanto è sufficiente registrare fotograficamente la componente visibile emessa dalle sostanze.

Rispetto alla rodamina, l'utilizzo della fluoresceina si è mostrata soluzione più efficace per rendere visibile la vena capillare, come si vede nella figura seguente. La rodamina dà luogo ad un filetto fluido di colore arancio-rosso poco visibile tanto all'occhio umano quanto al dispositivo fotografico, parzialmente imputabile al posizionamento laterale, anziché sovrastante, delle lampade UV rispetto alla vena effluente; il motivo principale comunque è da individuare nello spettro di assorbimento della rodamina, che mostra un picco di assorbimento per radiazione verde ($\lambda = 540$ nm) mentre quando è eccitata da radiazione UV ($\lambda = 254$ nm) la curva di emissione rimane vicina allo zero.

In virtù del suddetto accorgimento (posizionamento delle *black light*), il successivo tentativo con la fluoresceina ha permesso un'acquisizione più nitida della vena capillare.



Figura 5.42 - Visibilità della vena capillare relativa all'utilizzo di diverse sostanze

- **Black light**

Impiegare la tecnica UVF presuppone l'utilizzo di una sorgente di radiazione elettromagnetica ultravioletta, che sia in grado di emettere luce nel campo dell'UV e stimolare il rilascio di radiazione nel campo della luce visibile. Questo dispositivo è detto *Lampada di Wood* o *luce nera* (*black light*).

Esistono diversi tipi di black light (a fluorescenza, a incandescenza, a LED) ma in tutte quante la luce è emessa nel campo degli UV-A (la banda di onde lunghe UV prossima alla luce visibile) e in misura trascurabile nel campo del visibile. Le lampade utilizzate per l'esperimento sono due black light a fluorescenza, che quindi funzionano secondo lo stesso principio di una lampada a fluorescenza, a meno di un rivestimento al fosforo interno alla lampada che filtra la luce ultravioletta anziché la luce visibile. In questo modo la luce nel campo UV-A emessa dalla lampada interessa le lunghezze d'onda nell'intorno dei 370 nm.

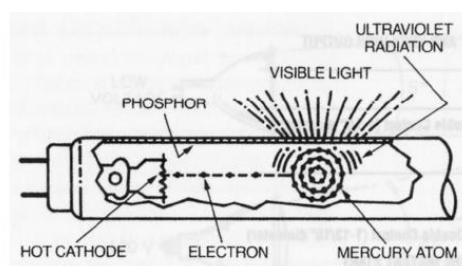


Figura 5.43 - Lampada fluorescente a UV

5.6.2 Risultati dell'esperimento

Si è deciso di condurre le prove esclusivamente per breccia larga 3 cm, dato che per questa condizione i risultati riguardanti la pendenza della vena effluente si presentano in accordo con l'applicazione di Horton.

La volontà di indagare il comportamento della vena capillare secondo differenti carichi nel serbatoio ha portato ad allestire un set-up nel quale la regolazione del livello fosse di semplice e rapida attuazione. Inoltre, sono state analizzate diverse posizioni del tubo capillare rispetto alla breccia per avere più informazioni sulla traiettoria seguita: in asse con la breccia (1), a filo parete (3) e in posizione intermedia tra le due (2).



Figura 5.44 - Rappresentazione delle diverse posizioni assunte dall'iniettore nella direzione perpendicolare al flusso

La posizione 1 vede l'iniettore situato in asse con la breccia, per cui la vena capillare traccia una traiettoria che appare verticale quando osservata frontalmente. In queste condizioni quindi la vena capillare si mantiene centrale rispetto al getto, sebbene il getto stesso si allarghi in direzione trasversale per diminuire il dispendio di energia durante la caduta, come già osservato in precedenti studi¹³. La forma si mantiene sostanzialmente la stessa per differenti carichi nel serbatoio.

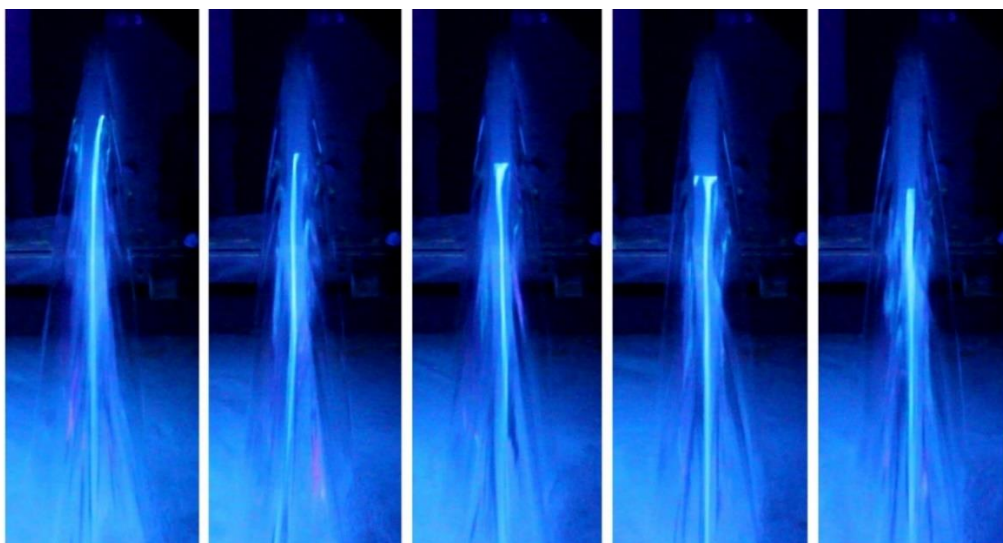


Figura 5.45 - Vena capillare in condizioni di carico decrescente (posizione 1)

Spostando l'iniettore sull'asse z , in posizione 2, si osserva un diverso comportamento del liquido fluorescente. Quando la vena è vicina al fondo del serbatoio, la traiettoria si mantiene coerente con la teoria di Horton, conservando il moto parabolico nel piano (x,y) e limitando la curvatura nel piano frontale (y,z) .

Ora, se aumentare il carico significa aumentare l'energia del fluido, la vena capillare tenderà a tracciare il percorso a minor energia, portandosi verso l'esterno del getto e seguendo questo percorso laterale sul ventaglio d'acqua. Questo fenomeno è evidente nelle prime immagini in *Figura 5.46*.

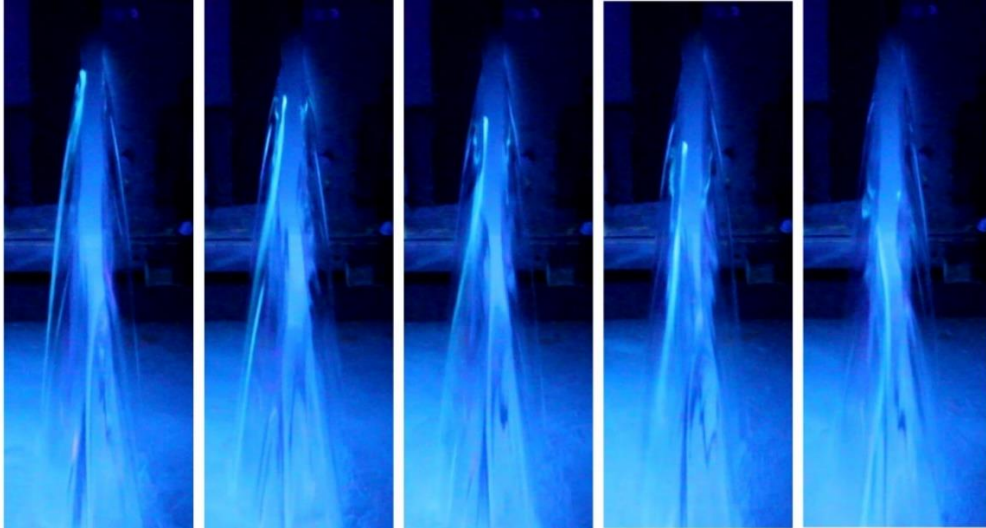


Figura 5.46 - Vena capillare in condizioni di carico decrescente (posizione 2)

Spostandosi nel punto 3, a filo parete, il fenomeno appare ancora più marcato, perché il tubo capillare inietta il fluido già sull'estremità del getto e la traiettoria seguita è quella più esterna; talvolta la vena capillare si disperde sul ventaglio fluido ma comunque mostra una forte curvatura nel piano (y,z) , confermando un'espansione laterale del getto.

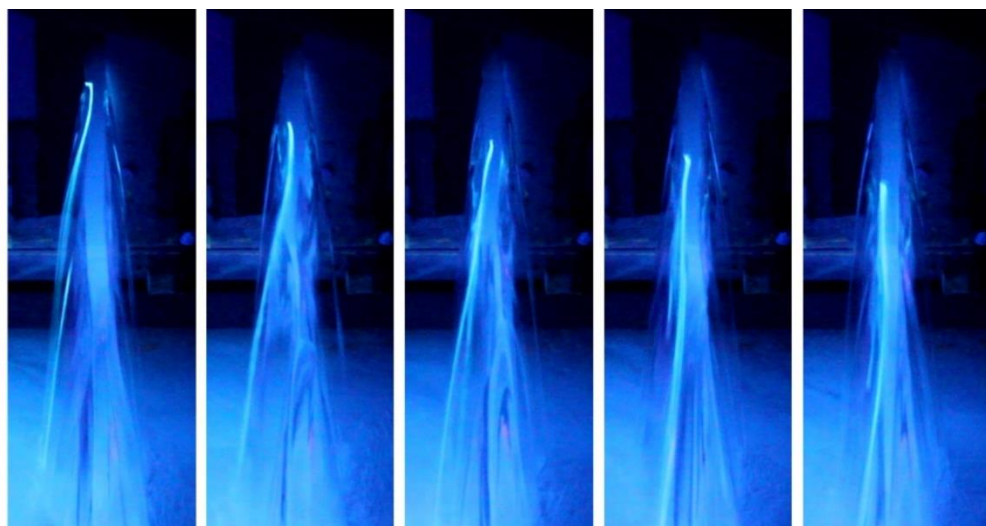


Figura 5.47 - Vena capillare in condizioni di carico decrescente (posizione 3)

In parallelo alle riprese frontali sono state effettuate le riprese laterali del getto, per mezzo delle *action cam* posizionate a pochi centimetri dalla breccia. Le due *GoPro* sono state piazzate in modo da rilevare la vena capillare all'interno del getto, anche nei punti che risulterebbero nascosti dal ventaglio d'acqua qualora si osservasse la breccia frontalmente.

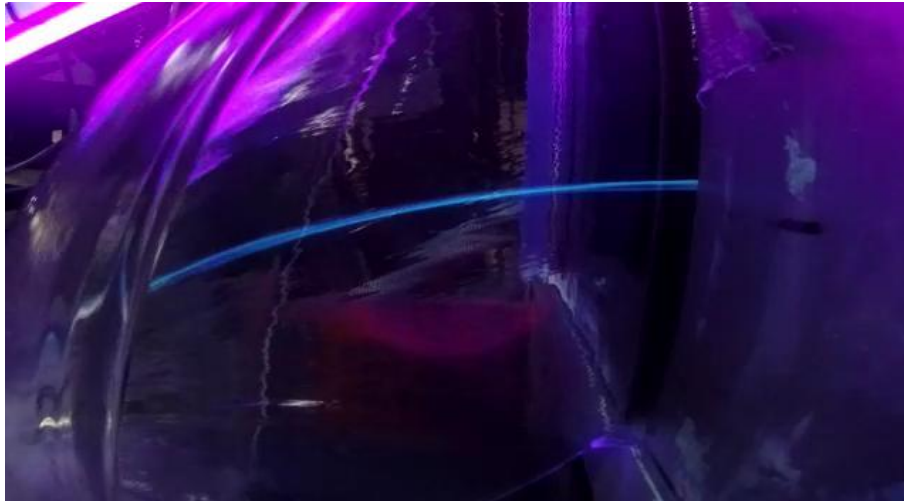


Figura 5.48 - Frame estratto dal video di una delle *GoPro*, che riprende la vena capillare costituita da fluoresceina all'interno del getto d'acqua

Le *GoPro*, alimentate in continuo e comandate da remoto attraverso l'apposita App, hanno registrato l'esperimento, nel quale un operatore sosteneva il piano d'illuminazione e un altro comandava il flusso di fluoresceina e regolava il livello del tubo capillare all'interno del serbatoio. In questo modo è stato possibile variare il carico con il quale la vena capillare fuoriusciva dalla breccia e ottenere diverse traiettorie della stessa.

Il passaggio successivo, necessario per rilevare i profili alle varie altezze, è simile a quello adottato nel capitolo 5.4. L'elaborazione dei dati è avvenuta in *Matlab*.

In questo caso è stato necessario estrarre i frame dal video a intervalli regolari per ottenere diverse traiettorie della vena capillare, corrispondenti a diversi carichi. A questo proposito esiste uno specifico comando in Matlab per leggere file contenenti video, che è la funzione *VideoReader*. Creando l'elemento omonimo alla funzione, si possono estrarre ed utilizzare le proprietà del video di cui si ha bisogno, come durata, numero di frame complessivi, frame rate, dimensioni dei frame e formato del video.

Una volta isolati i frame, si può lavorare sulla singola immagine per rilevare il profilo della vena capillare. Preso un frame in cui non compare la vena capillare (quindi solo il getto d'acqua) chiamato *back*, questo viene sottratto al frame con la vena capillare in evidenza, chiamato *vena*, per ottenere un'immagine quasi completamente nera in cui il profilo sia più semplice da rilevare. Il risultato è l'oggetto *profilo*:

$$\text{profilo} = \text{vena} - \text{back}$$

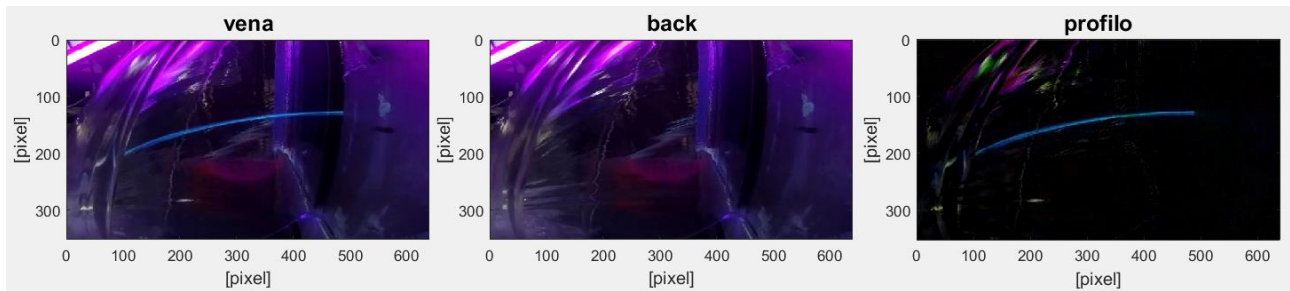


Figura 5.49 - Procedura di sottrazione tra un'immagine ritraente la vena capillare (sinistra) e una in assenza di vena capillare (centro) per isolare la vena (destra)

Successivamente, sulla linea del modello precedente, si individuano i punti della matrice di pixel che soddisfano una condizione prestabilita. Essi costituiranno la traiettoria rilevata. La funzione utilizzata è la seguente, applicata a cluster di pixel di dimensioni 2x2:

$$\text{if } (\text{mean}(\text{prof}(j-2:j+2, i-2:i+2, 1)) + \text{mean}(\text{prof}(j-2:j+2, i-2:i+2, 2)) + \text{mean}(\text{prof}(j-2:j+2, i-2:i+2, 3))) > 85$$

Procedendo in questo modo per tutti i frame è stato possibile riprodurre le traiettorie a differenti livelli nel serbatoio. Dalla figura successiva si osserva che le traiettorie non si compenetrano tra loro, a conferma dell'ipotesi di Horton per la quale si può assumere la breccia costituita da infiniti fori allineati in verticale che generano filetti fluidi non incrociati tra loro, ma semplicemente sovrapposti.

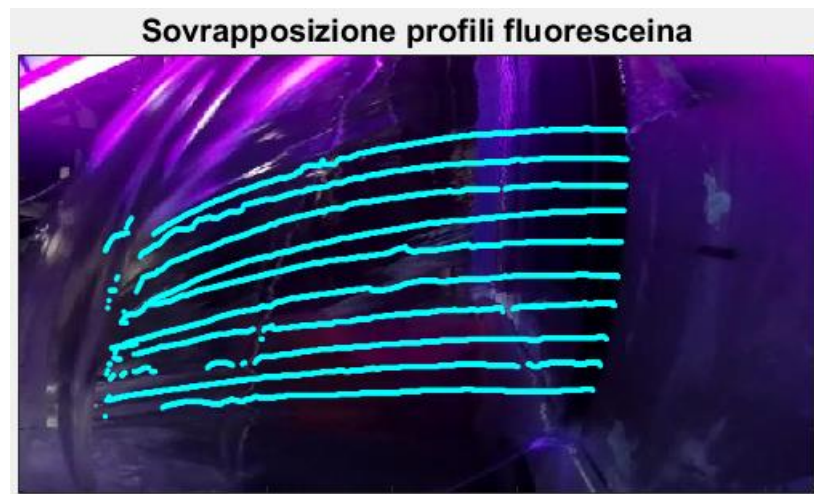


Figura 5.50 - Traiettorie della vena capillare rilevate per diversi livelli di carico nel serbatoio

Il codice Matlab è riportato in allegato nella sezione A. *Codici MATLAB* di questo documento.

5.7 Dispositivi di acquisizione

Molte volte in questa trattazione è stata data importanza al fatto di aver utilizzato dispositivi professionali in fase di ripresa o per l'acquisizione di immagini da elaborare. Tali strumenti comportano senza alcun dubbio maggiori vantaggi sul lato dei risultati, in quanto la geometria interna è molto più sofisticata rispetto ad apparecchiature non professionali (in questi dispositivi ad esempio si può prescindere dalla distorsione tangenziale in fase di calibrazione, poiché essa è trascurabile, e anche la distorsione radiale risulta contenuta). Con questi strumenti la precisione è più elevata e il margine di errore ridotto.

- **Fotocamera Canon EOS 550D**

La fotocamera utilizzata per lo studio della vena effluente è una Canon EOS 550D.

Si tratta di una fotocamera reflex digitale monobiettivo a elevate prestazioni, dotata di un sensore CMOS APS-C da 22,3 x 14,9 mm, 18,0 megapixel effettivi, processore DIGIC 4, area di messa a fuoco automatica con 9 punti AF ad alta precisione e velocità; scatto continuo a circa 3,7 fps, scatto *Live View* e ripresa di filmati in Full HD. Le immagini sono registrate nello spazio colore RGB e sono acquisite in formato RAW 5184 x 3456 oppure JPEG 5184 x 3456 (o minori). Questa fotocamera è stata utilizzata per registrare le immagini dei profili da cui sono state calcolate le pendenze, e successivamente per l'acquisizione frontale della vena capillare.



Figura 5.51 - Canon EOS 550D

- **GoPro Hero 5 Session**

Per rilevare la vena capillare sono state utilizzate due GoPro Hero 5 Session. Le dimensioni e il peso ridotto hanno permesso un'installazione semplice a pochi centimetri dal getto liquido, in modo da analizzare la dinamica interna del fluido. La singola *action cam* dispone di un sensore CMOS da 10 megapixel. I video sono stati acquisiti alla risoluzione di 1080p a 30 fps, con campo visivo largo (FOV lungo), risoluzione 1920 x 1080 e rapporto 16:9.



Figura 5.52 - GoPro Hero 5 Session

6 Conclusioni

Il bisogno di ottenere una valutazione speditiva del rischio per gli invasi di competenza regionale, per i quali non esiste un atto normativo dedicato che garantisca implicitamente la sicurezza, ha reso necessaria la costruzione di un modello fisico in scala ridotta, al fine di indagare sperimentalmente le caratteristiche dell'onda di dam break.

L'obiettivo principale di questa tesi risultava essere la realizzazione di un set-up, finalizzato allo studio dei fenomeni di dam-break, le cui caratteristiche sono state dettagliatamente studiate per superare i limiti del vecchio assetto. Tra questi, la problematica di un piano di valle poco esteso in direzione trasversale (rispetto all'asse della breccia) e la presenza di deformazioni del piano confrontabili con le altezze d'acqua misurate, frutto dell'impiego del legno come materiale costituente il piano di valle.

È stato dimostrato che la configurazione adottata per il nuovo set-up è esente da questi limiti (Capitolo 4.2). In primo luogo, è stata definita una larghezza maggiore del piano allagabile di valle, nei limiti dello spazio disponibile in laboratorio. Tale accorgimento consentirà di descrivere con maggiore completezza le caratteristiche del fronte d'onda, dal momento che una maggiore larghezza trasversale ritarda il fenomeno di riflessione dell'onda sulle pareti laterali. In secondo luogo, adottare una configurazione in cui il pannello costituente la superficie di scorrimento dell'acqua collabora con le travi di alluminio sottostanti si è dimostrato un'efficace soluzione. Ciò si realizza in due fasi: l'analisi elastica della trave che ha restituito una deformazione sub-millimetrica, confermata anche dalla soluzione numerica; la fase di regolazione della quota delle travi tramite registri che ha attestato un massimo scarto assoluto di 0,5 mm.

Oltre al piano di valle, è stato condotto il progetto del serbatoio di monte, sulla base del vecchio modello (Capitolo 4.1). Adeguando le dimensioni dello scatolare alla nuova struttura e mantenendo la dinamica del meccanismo di apertura, il nuovo serbatoio si distingue per la capacità di adattare al modello forme della breccia differenti, più rappresentative rispetto ad una semplice e poco realistica fessura rettangolare stretta.

L'improvvisa chiusura dei laboratori, avvenuta a febbraio 2020 e protrattasi fino al periodo di conclusione di questa tesi (luglio 2020), a causa dell'emergenza sanitaria globale, non ha permesso di soddisfare tutti gli obiettivi prestabiliti per questa tesi. La costruzione del modello si è arrestata con il posizionamento e fissaggio delle travi di alluminio, dopo che l'allestimento dello scheletro del light box era già stato completato (Capitolo 4.4). Il modello in scala che ne emerge, realizzato in similitudine di Froude con un rapporto di scala 1:20, non si può dire completo in fase progettuale. Rimane infatti da definire la modalità di fissaggio dei pannelli alle truss e di installazione dei dispositivi di acquisizione sul soffitto del light box.

A fine di validarne l'efficacia, è stata testata una metodologia di acquisizione dati basata sul procesamiento di immagini digitali, strumento con il quale saranno successivamente dedotti il campo di altezze d'acqua e la posizione del fronte d'onda, una volta completata la costruzione del modello fisico. La tecnica, applicata al rilevamento statico dei profili della vena effluente, è stata sviluppata al punto da assumere una solida padronanza delle tecniche di calibrazione dei dispositivi (per mezzo

del tool Camera Calibrator di Matlab) e di post-processamento delle immagini acquisite (Capitoli 5.3 e 5.4).

Per ciò che riguarda l'analisi della vena effluente da breccia rettangolare, l'approccio euleriano si è dimostrato efficace per condurre lo studio delle traiettorie e verificare la pendenza dei profili secondo quanto espresso dal teorema di Torricelli. I risultati mostrano che per larghezze della breccia crescenti, descrivere il fenomeno 2D attraverso il punto di vista di Horton comporta delle difficoltà e risulta necessario un approccio completo tridimensionale (Capitolo 5.5).

Infine, nell'analisi della traiettoria di una vena capillare, l'impiego di sostanze fluorescenti, unitamente all'installazione di una telecamera frontale, ha permesso di riconoscere un comportamento della traiettoria che può essere definito "energia dipendente": il getto uscente dalla breccia non mantiene costante la sua dimensione trasversale, ma si espande lateralmente assumendo una forma a ventaglio, in virtù del principio di minima energia (Capitolo 5.6).

Parlando di sviluppi futuri di questo studio, si potrà procedere alle prime prove già a installazione del serbatoio di monte avvenuta. La comprovata tecnica di misura basata sull'assorbimento della luce potrà essere impiegata a seguito della calibrazione statica, la quale ha il compito di correlare le unità immagine alle unità reali e di definire la relazione tra intensità di colore delle immagini e profondità d'acqua.

Successivamente a questa fase, con l'allestimento del light box e della sua illuminazione interna secondo la configurazione prescelta, sarà possibile condurre le prime simulazioni di dam break sul nuovo set-up sperimentale.

Bibliografia

1. Piemonte, R. Sbarramenti idrici regionali.
<https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/difesa-suolo/dighe/sbarramenti-idrici-regionali> (2015).
2. Città metropolitana di Torino. Progetto ALCOTRA.
<http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/protezione-civile/speciale-progetto-alcotra> (2015).
3. Poggi, D., Cordero, S. & Dieudonné, S. Metodi speditivi per la mappatura delle aree vulnerabili per onde dovute a rottura di sbarramenti / Evaluation de l'onde de rupture en aval de l'ouvrage. REPORT FINALE Azione3.1/ RAPPORT FINAL Action3.1. *RISBA Rischio degli Sbarramenti artificiali* (2015).
4. Cordero, S., Poggi, D. & Grimaldi, S. Modellazione numerica della propagazione di onde di dam-break, caso studio: gli sbarramenti in terra. (Politecnico di Torino, 2013).
5. Clausen, L. & Clark, P. B. The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modelling of historical dam failures. *International conference on river flood hydraulics* 369–380 (1990).
6. Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P. & Ziveri, C. Dam-break flows: Acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling. *Journal of Hydraulic Engineering* vol. 134 (University of Parma, 2008).
7. Aureli, F., Maranzoni, A., Mignosa, P. & Ziveri, C. An image processing technique for measuring free surface of dam-break flows. *Experiments in Fluids* vol. 50 (University of Parma, 2011).
8. LaRocque, L. A., Imran, J. M. A. & Chaudry, M. H. F. A. Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows. (2013).
9. Aureli, F., Dazzi, S., Maranzoni, A. & Mignosa, P. A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom. *Experiments in Fluids* vol. 55 (University of Parma, 2014).
10. Cordero, S., Cagninei, A. & Poggi, D. Three-dimensional evolution of a dam-break flow: construction and calibration of a physical model. in *Proc. of the 5th IAHR Europe Congress — New Challenges in Hydraulic Research and Engineering* Editor(s) Aronne 599–600 (2018). doi:10.3850/978-981-11-2731-1_314-cd.
11. Chanson, H. Analytical solutions of laminar and turbulent dam break wave. in *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics - River Flow 2006* vol. 1 465–474 (2006).
12. Briano, J., Poggi, D. & Cordero, S. Analisi sperimentale dell'onda di dam break su superfici lisce e vegetate. (Politecnico di Torino, 2019).
13. D'Oria, A. D., Poggi, D. & Cordero, S. Studio sperimentale di onde di collasso su superfici non

confinare. (Politecnico di Torino, 2019).

14. Guerra, P., Poggi, D. & Cordero, S. Progettazione e verifica di un light box per lo studio sperimentale di onde di dam-break. (Politecnico di Torino, 2018).
15. Costa, P., Poggi, D. & Cagninei, A. Metodi per la valutazione del rischio a valle delle dighe regionali: confronto tra i metodi in uso e metodi semplificati. (Politecnico di Torino, 2018).
16. Napoli, R., Poggi, D., Cagninei, A. & Bosio, R. Nuovo set-up sperimentale per lo studio della propagazione di onda dovute al collasso di dighe. (2020).
17. Carpinteri, A. *Scienza delle Costruzioni 1*. (1992).
18. Alusic. Catalogo online: Profili in alluminio e accessori, line BH. <https://online.flippingbook.com/view/667286/> (2019).
19. Ionni, M. Caratterizzazione meccanica di un pannello sandwich per l'interno di un aeromobile. (Università di Bologna, 2013).
20. S.R.L., C. C. Pannello Sandwich COMPOCEL AL e COMPOCEL AL FR. <https://www.cel.eu/it/prodotti/pannelli-sandwich/compocel/compocel-al-fr> (2019).
21. Audio-Luci_Store. Americana in traliccio quadrata Heavy lato 40. <https://www.audio-luci-store.it/1073-quadrata-heavy-lato-40> (2019).
22. Lattonedil. Pannelli sandwich in poliuretano. <https://www.lattonedil.it/prodotti/pannelli-sandwich-in-poliuretano> (2020).
23. Marcegaglia, B. Pannelli coibentati e sezionali. <https://www.marcegagliabuildtech.it/pannelli-coibentati/> (2019).
24. Italpannelli s.r.l. Pannelli per l'edilizia. Copertura-Parete. <https://italpannelli.it/pannelli-edilizia/> (2019).
25. Horton, R. E. Weir experiments, Coefficient and Formulas. *Department of the Interior, U.S. Geological Survey* pp 10-14, 20-46 (1907).
26. Citrini, D. & Nosedà, G. *Idraulica*. (1987).
27. Marchi, E. & Rubatta, A. *Meccanica dei fluidi : principi e applicazioni idrauliche*. (1981).
28. National Instruments. LabVIEW. (2019).
29. Cannarozzo, Cucchiaroni & Meschieri. Principi e strumenti della fotogrammetria. in *Fotogrammetria* (ed. Zanichelli) 1–33 (2012).
30. The Mathworks, I. MATLAB Computer Vision Toolbox Documentation. https://it.mathworks.com/help/vision/index.html?s_tid=CRUX_lftnav (2020).
31. Zhang, Z. *A flexible new technique for camera calibration*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* vol. 22 (2000).
32. The MathWorks, I. {MATLAB}, Release 18. (2018).
33. The MathWorks, I. MATLAB Camera Calibrator App. (2018).

34. Kellogg, R. E. & Bennett, R. G. *Radiationless intermolecular energy transfer. III. Determination of phosphorescence efficiencies. The Journal of Chemical Physics* vol. 41 (1964).

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 - Soglie di vulnerabilità in funzione della velocità e della profondità di corrente	7
Tabella 3.1 - Grandezze fisiche nei fenomeni idrodinamici. Scelte tre grandezze fondamentali (evidenziate), le rimanenti sono esprimibili in funzione di queste tre	33
Tabella 3.2 - I due principali numeri puri indipendenti utilizzati nei modelli idraulici	34
Tabella 3.3 - Rapporti di scala per i diversi modelli, in funzione della scala geometrica. Il fattore n indica il rapporto di distorsione	36
Tabella 3.4 - Rapporti di scala per la riproduzione in laboratorio. In evidenza il rapporto scelto per questo studio	38
Tabella 4.1 - Abbassamento agli estremi della trave adottando lo schema a mensola	50
Tabella 5.1 - Elenco delle prove condotte	77
Tabella 5.2 - Misure di portata effettuate per differenti larghezze della breccia	88
Tabella 5.3 - Condizioni di prova per breccia larga 3 cm	89
Tabella 5.4 - Condizioni di prova per breccia larga 5 cm	90

Indice delle figure

Figura 1.1 – Province partecipanti al programma trans-frontaliero.....	2
Figura 1.2 - Rappresentazione grafica dei parametri che concorrono alla definizione di rischio	4
Figura 1.3 - Esempio di distribuzione dei dati sperimentali rispetto alle curve elaborate da Clausen & Clark.....	8
Figura 2.1 - Set-up sperimentale utilizzato da Aureli et al.....	11
Figura 2.2 - Dimensioni (cm) dell'attrezzatura sperimentale impiegata	13
Figura 2.3 - Dimensioni (cm) dell'attrezzatura sperimentale. PC indica la proiezione ortogonale del centro della camera	15
Figura 2.4 - Funzioni di trasferimento per i canali R, G, B e per la Luminanza Y nei formati RAW (a) e JPEG (b)	16
Figura 2.5 - Schema rappresentativo della relazione che intercorre tra coordinate del punto oggetto (P), coordinate del punto immagine (P') e centro di presa (PC)	17
Figura 2.6 - Effetto della pendenza superficiale sulla stima della profondità d'acqua	18
Figura 2.7 - Set-up sperimentale utilizzato da LaRocque et al.	20
Figura 2.8 - Valori ottenuti dall'analisi numerica delle velocità u (figura a) e v (figura b)	22
Figura 2.9 - Schema del set-up sperimentale (a) e vista dello stesso in configurazione inclinata (b)	24
Figura 2.10 - Rappresentazione geometrica del principio di misura	25
Figura 2.11 - Rappresentazione dei parametri della legge di Snell	25
Figura 2.12 - Profondità d'acqua lungo le diverse sezioni parallele alla saracinesca, un secondo dopo l'apertura	28
Figura 3.1 – Rappresentazione dell'ipotesi shallow water in un alveo inciso	30
Figura 3.2 - Campione di invasi analizzati nello studio di Poggi e Cordero (2015)	37
Figura 4.1 - Vista assonometrica del serbatoio di monte e del sistema di apertura	41
Figura 4.2 - Particolare 1: collegamento tra il serbatoio e il supporto	42
Figura 4.3 - Esploso assonometrico del serbatoio di monte.....	42
Figura 4.4 - Rappresentazione del modello empirico di formazione della breccia secondo Froehlich. Il parametro “beta” crescente dà un'idea dell'evoluzione nel tempo della forma.....	43
Figura 4.5 - Particolare 2: collegamento tra il pannello con la breccia e il serbatoio	44
Figura 4.6 - Esploso assonometrico del serbatoio e del pannello con la breccia	44
Figura 4.7 - Particolare 3: sistema di sollevamento della paratoia	45
Figura 4.8 - Fasi di apertura della saracinesca: nella fase 1 le calamite sono attive, quindi la paratia aderisce al serbatoio e il grave è mantenuto sospeso; nella fase 2 le calamite sono disattivate, perciò il grave precipita in fondo alla colonna ed innesca l'apertura della paratia	46
Figura 4.9 - Configurazione del piano di valle prima del posizionamento dei pannelli: la trave può essere considerata come doppiamente appoggiata sul traliccio	48
Figura 4.10 - Schema statico della generica trave di alluminio che sorregge il piano d'appoggio. Il contatto trave-terreno è schematizzabile tramite incastri, in virtù della bullonatura che collega la trave in alluminio al traliccio d'appoggio.....	48
Figura 4.11 - Schema strutturale di mensola lunga l, con carico distribuito uniforme	48

Figura 4.12 - Caratteristiche geometriche della sezione impiegata. Immagine estratta dal catalogo online Alusic	50
Figura 4.13 - Fasi della modellazione in SAP2000, dall'alto: definizione dei vincoli esterni, della lunghezza delle aste e dei carichi.....	51
Figura 4.14 - Deformata elastica della trave sottoposta a peso proprio, peso dei pannelli e 10 cm di acqua a riposo	52
Figura 4.15 - Schema dei materiali componenti un Pannello Sandwich COMPOCEL AL.....	53
Figura 4.16 - Pannello sandwich comparato a trave a doppia T, e relativo comportamento meccanico a flessione	54
Figura 4.17 - Scheda tecnica di un Pannello Sandwich COMPOCEL AL standard	55
Figura 4.18 - Scheda tecnica dei tralicci serie TRQ40-S2 costituenti lo scheletro del light box	57
Figura 4.19 - Scheda tecnica dei tralicci serie TRP40-S2 costituenti lo scheletro del light box.....	58
Figura 4.20 - Scheletro del light box prima dell'installazione dei pannelli e relativo schema geometrico (misure in metri).....	59
Figura 4.21 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano ISOPAR ELITE. In rosso le caratteristiche .	61
Figura 4.22 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano a fissaggio nascosto di Marcegaglia Buildtech. In rosso le caratteristiche	62
Figura 4.23 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano EUROCPRE e EURO CINQUE di Lattonedil. In rosso le caratteristiche.....	64
Figura 4.24 - Scheda tecnica dei prodotti TD5 e EGB 1200 di Marcegaglia Buildtech. In rosso le caratteristiche	65
Figura 4.25 - Scheda tecnica dei pannelli in poliuretano MONO MEGA106 DECK di Italpannelli. In rosso le caratteristiche.....	66
Figura 4.26 - Allineamento di una trave di alluminio mediante i lamierini metallici. Nella figura di destra si osserva la sistemazione di 4 piattine per annullare il dislivello di 2,4 mm tra le due estremità della trave.....	67
Figura 4.27 - Fissaggio di una trave di alluminio al traliccio per mezzo di un terzo elemento (registro). Nell'immagine di destra si osservano i particolari della bullonatura tra il registro e il traliccio: l'orizzontalità è stabilita effettuando le regolazioni sui quattro dadi a contatto con il traliccio e fissando la posizione con altrettanti contro-dadi	68
Figura 4.28 – Sequenza realizzativa di un registro: foratura per il collegamento trave-registro (a), registrazione della posizione del profilato (b), fissaggio del trapano magnetico nella posizione del foro (c), posizionamento del profilato per la foratura (d), foratura per il collegamento registro-traliccio (e), montaggio del registro dopo la saldatura delle barre filettate (e). Le operazioni di foratura sono state realizzate mediante un trapano magnetico Rotabroach.....	69
Figura 5.1 – Rappresentazione del teorema di Torricelli: per h crescenti aumenta la velocità della vena uscente, quindi la sua gittata	70
Figura 5.2 - Luce sotto battente posta sulla parete di un serbatoio	71
Figura 5.3 - Teorema di Torricelli applicato a un serbatoio dotato di fori allineati in verticale	72
Figura 5.4 - Involuppo delle traiettorie uscenti dal serbatoio. Immagine reperita dallo studio di Briano, J. (2019)	73
Figura 5.5 - Stramazzone rettangolare in parete sottile	74
Figura 5.6 - Stramazzone triangolare in parete sottile	74

Figura 5.7 – Rappresentazione del set-up sperimentale durante l'esecuzione di un esperimento. A destra si può osservare la vena fluida dal punto di vista della fotocamera	75
Figura 5.8 – Vista in pianta del set-up sperimentale utilizzato. Le frecce indicano il percorso seguito dall'acqua	76
Figura 5.9 - Immagine relativa all'esperimento del 1° ottobre: le zone rosse indicano i punti in cui il profilo non è chiaramente definito.....	77
Figura 5.10 - Trasformazione tra coordinate attraverso i parametri di orientamento della fotocamera.....	78
Figura 5.11 - Rappresentazione dei parametri di orientamento esterno: S.R. globale in rosso e S.R. camera in blu.....	78
Figura 5.12 – Percorso della luce all'interno dell'obiettivo e della fotocamera. Sia il diaframma che l'otturatore determinano la quantità di luce che arriva al sensore. A destra, uno schema della geometria della presa fotografica.....	79
Figura 5.13 - Tipologie di curvatura del fascio luminoso generato dalla distorsione radiale della lente	80
Figura 5.14 - Distorsione tangenziale nell'assetto interno della camera	80
Figura 5.15 - Effetto di non perpendicolarità tra gli assi del sensore.....	81
Figura 5.16 - Acquisizione di diversi orientamenti della scacchiera in fase di calibrazione: si fanno compiere alla scacchiera piccole traslazioni e rotazioni nel piano frontale (immagini in alto) e nel piano perpendicolare al sensore (immagini in basso)	83
Figura 5.17 - Rappresentazione dell'errore di riproiezione	84
Figura 5.18 – Risultati dal tool Camera Calibrator: dimensioni inferiori dei quadri della scacchiera (20 mm nell'immagine in alto) comportano errori di riproiezione minori rispetto a quadri di dimensioni maggiori (38 mm nell'immagine in basso).....	85
Figura 5.19 - Fotografia rappresentativa di una delle 10 acquisizioni della vena fluida (punto 7) ...	87
Figura 5.20 - Scala di deflusso stimata dalle misure effettuate.....	88
Figura 5.21 - Errore medio tra i carichi rilevati sul serbatoio (punti sperimentali) e i carichi effettivi desunti dalle misure di portata da stramazzone triangolare (bisettrice)	90
Figura 5.22 - Confronto tra immagine originale e immagine soggetta a raddrizzamento: i punti in cui la distorsione è massima sono quelli più distanti dal centro dell'immagine	91
Figura 5.23 - Procedura di sottrazione tra un'immagine ritraente la vena (sinistra) e una ritraente il background (centro) per isolare la vena dal background (destra)	92
Figura 5.24 - Rappresentazione di un'immagine digitale RGB.....	93
Figura 5.25 - Ingrandimento di una parte dell'immagine che ritrae alcuni punti posizionati sul profilo superiore della vena liquida: a questo livello sono riconoscibili i pixel, identificati dalle coordinate X,Y e dai valori R,G,B.....	94
Figura 5.26 - Esempio grafico della fase di rilevamento del profilo: breccia 3 cm, H=37,2 cm. Il codice esegue il ciclo solo nella regione compresa tra le rette verdi, per strisce verticali, avanzando da sinistra verso destra.	96
Figura 5.27 - Rappresentazione dell'output fornito dalla funzione detectCheckerboardPoints	97
Figura 5.28 - Confronto tra i punti appartenenti alla scacchiera virtuale (reali) e i punti individuati (stimati)	98

Figura 5.29 - Esempio di profilo ottenuto dall'elaborazione delle immagini: breccia 3 cm, H=33,4 cm. Il profilo si presenta regolare nella zona centrale e più disturbato alle estremità.....	99
Figura 5.30 - Profili rilevati per le 8 prove in condizioni di breccia larga 3 cm. Per ogni prova sono stati elaborati 10 profili.....	101
Figura 5.31 - Profili rilevati per le 5 prove in condizioni di breccia larga 5 cm. Per ogni prova sono stati elaborati 10 profili.....	102
Figura 5.32 - Risultati degli esperimenti eseguiti per breccia larga 3 cm e 5 cm, con un profilo rappresentativo per ogni prova	103
Figura 5.33 - Sovrapposizione tra i profili per breccia 3 cm, breccia 5 cm e le rette di pendenza unitaria	104
Figura 5.34 - Sovrapposizione tra i profili per breccia larga 3 cm e le rette a pendenza unitaria: l'errore relativo è contenuto e le tracce corrispondono	105
Figura 5.35 – Sovrapposizione tra i profili per breccia larga 5 cm e le rette a pendenza unitaria: l'errore relativo aumenta perché i profili tendono a seguire una pendenza maggiore	106
Figura 5.36 – A sinistra, set-up del tubo capillare; a destra, vista della breccia e del tubo capillare dall'interno del serbatoio.....	108
Figura 5.37 - Colorante E124 in polvere	110
Figura 5.38 - Rappresentazione dello spettro elettromagnetico	111
Figura 5.39 - Rappresentazione delle transizioni elettroniche nel Diagramma di Jablonski.....	111
Figura 5.40 - Rodamina B in pastiglie di colore rosso-bruno e relativo spettro di emissione.....	112
Figura 5.41 - Fluoresceina sodica in polvere e relativo spettro di emissione.....	113
Figura 5.42 - Visibilità della vena capillare relativa all'utilizzo di diverse sostanze.....	113
Figura 5.43 - Lampada fluorescente a UV	114
Figura 5.44 - Rappresentazione delle diverse posizioni assunte dall'iniettore nella direzione perpendicolare al flusso.....	115
Figura 5.45 - Vena capillare in condizioni di carico decrescente (posizione 1)	115
Figura 5.46 - Vena capillare in condizioni di carico decrescente (posizione 2)	116
Figura 5.47 - Vena capillare in condizioni di carico decrescente (posizione 3)	116
Figura 5.48 - Frame estratto dal video di una delle GoPro, che riprende la vena capillare costituita da fluoresceina all'interno del getto d'acqua	117
Figura 5.49 - Procedura di sottrazione tra un'immagine ritraente la vena capillare (sinistra) e una in assenza di vena capillare (centro) per isolare la vena (destra).....	118
Figura 5.50 - Traiettorie della vena capillare rilevate per diversi livelli di carico nel serbatoio	118
Figura 5.51 - Canon EOS 550D	119
Figura 5.52 - GoPro Hero 5 Session.....	119

A. Codici MATLAB

A.1 Script per rilevare il profilo della vena effluente (Breccia 3 cm – Carico H=37,2 cm)

```
clear all
close all
clc

%% Step 1: caricamento parametri di calibrazione

load('CanonCameraParameters0910');
load('EstimatedErrors0910');

%% Step 2: raddrizzamento immagini

cd 1_Valvola chiusa
% cd indirizza nella cartella con nome '1_Valvola chiusa'
a=double(imread('IMG_5492.jpg')); % converte immagine in formato double
[aa, orig] = undistortImage(a, cameraParams, 'OutputView','same');
or=aa; % raddrizzamento immagine a e assegnazione alla variabile or
ba=double(imread('IMG_5501.jpg')); % caricamento immagine di background
[bac, orig] = undistortImage(ba, cameraParams, 'OutputView','same');
back=bac;
ora="raddrizzamento terminato"

%% Step 3: isolamento del profilo dal background

c =abs(or-back); % sottrazione immagini
c=uint8(c); aaaa=uint8(aaaa); backk=uint8(backk); or=uint8(or);
% conversione immagini nel formato uint8 (double ha dato problemi)
figure(1)
% confronto immagine originale (distorta) con immagine raddrizzata
subplot(1,2,1) % visualizzazione delle immagini nella stessa finestra
image(a); axis equal; title('distorta','FontSize',15);
ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
xlim([0 3456]); ylim([0 5184]);
subplot(1,2,2)
image(or); axis equal; title('raddrizzata','FontSize',15);
ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
xlim([0 3456]); ylim([0 5184]);
text(3200,3093,'\uparrow','Color','yellow','FontSize',15);
figure(2)
% visualizzazione sottrazione immagini
subplot(1,3,1)
image(or); axis equal; title({'vena'},'FontSize',15);
ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
xlim([0 3456]); ylim([0 5184]);
subplot(1,3,2)
image(backk); axis equal; title({'back'},'FontSize',15);
ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
xlim([0 3456]); ylim([0 5184]);
subplot(1,3,3)
image(c); axis equal; title({'profilo'},'FontSize',15);
ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
xlim([0 3456]); ylim([0 5184]);
```

```

%% Step 4: analisi della matrice di pixel per rilevare il profilo

bw=zeros(5184,3456); k=0;
x1=3393; y1=-737; x2=1054; y2=-3141; % punti della retta superiore
x3=3393; y3=y1-200; x4=1054; y4=y2-200; % punti della retta inferiore
in=730;
for i=in:3150 % analisi dei punti sulle x da 730 a 3200
    index(i-in+1)= round(-(y2-y1)/(x2-x1)*(i-x1)+y1));
    % troviamo il corrispondente y di x sulla retta superiore
    for j=index(i-in+1):round(-(y4-y3)/(x4-x3)*(i-x3)+y3)
        % analizza riga per riga fino a intercettare la retta inferiore
        if mean(c(j-2:j+2,i-2:i+2,1))+mean(c(j-2:j+2,i-2:i+2,2))+
            mean(c(j-2:j+2,i-2:i+2,3))>12
            % analisi dei cluster di pixel 2x2: la condizione per
            cui ci si trova sul profilo è che la somma della media
            dei valori di rosso, verde e blu sia > di 12
            k=k+1;
            profil(k,:)= [i,j]; % registra il punto nella variabile
                                solo se la condizione è rispettata
            break
        end
    end
    qui=i % stampa a video il numero corrente del ciclo
end

%% Step 5: stampa del profilo ottenuto

figure(3) % visualizzazione delle rette limite
image(c); axis equal
hold on
x=[in:3150]; plot(x,round(-(y2-y1)/(x2-x1)*(x-x1)+y1),'.g');
% retta superiore
x=[in:3150]; plot(x,round(-(y4-y3)/(x4-x3)*(x-x3)+y3),'.b');
% retta inferiore
figure(4) % sovrapposizione profile rilevato-profilo reale
image(or); axis equal
hold on
x=[400:3200]; plot(x,round(-(y2-y1)/(x2-x1)*(x-x1)+y1+100),'--b',
'LineWidth',1); % retta superiore
x=[400:3200]; plot(x,round(-(y4-y3)/(x4-x3)*(x-x3)+y3),'--b',
'LineWidth',1); % retta inferiore
xlim([0 3456]); ylim([0 5184]);
title({'Identificazione profilo'},'FontSize',15);
ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
text(3200,3093,'\uparrow','Color','yellow','FontSize',15);
text(2852,3273,'base della','Color','yellow','FontSize',10);
text(2952,3373,'breccia','Color','yellow','FontSize',10);
% ora si aggiunge manualmente il punto di coordinate (3229,2960)
% cioè il punto alla base della breccia, per vedere in seguito
% se la trasposizione è andata a buon fine.
profil(end+1,1)=3229;
profil(end,2)=2960; % qui non è end+1 perchè con il comando
                    precedente è già stata aggiunta la nuova riga
plot(profil(:,1),profil(:,2),'.r'); % visualizzazione profilo finale

%% Step 6: trasposizione da pixel a mm

ora="inizio_trasposizione_in_millimetri"
check =double(imread('InkedIMG_5157_LI.jpg'));
% dato di verità per avere le reali dimensioni della scacchiera

```

```

[check, origine] = undistortImage(check, cameraParams,
'OutputView','same'); % raddrizzamento immagine di controllo
check=uint8(check);
figure(5)
image(check); axis equal
[imagePoints, boardSize]=detectCheckerboardPoints(check);
% riconosce le intersezione tra i quadri neri della scacchiera
hold on
plot(imagePoints(:,1),imagePoints(:,2),'ro');
[worldPoints] = generateCheckerboardPoints(boardSize,20);
% crea scacchiera virtuale con i nuovi punti
[R,T] = extrinsics(imagePoints,worldPoints,cameraParams);
% matrici di rototraslazione
newWorldPoints = pointsToWorld(cameraParams,R,T,imagePoints);
% traspone l'immagine di controllo da pixel a mm
profilo_mm = pointsToWorld(cameraParams,R,T,profil);
% traspone il profilo rilevato in precedenza da pixel in mm
figure(6) % confronto punti stimati - punti certi
hold off
plot(worldPoints(:,1),worldPoints(:,2),'bo','MarkerSize',10);
hold on
plot(newWorldPoints(:,1),newWorldPoints(:,2),'rx','MarkerSize',10);
legend('punti reali','punti stimati');
legend show; % legend boxoff; legend ('Location','northeast');
ylabel ('[mm]','FontSize',12); xlabel ('[mm]','FontSize',12);
title('Confronto scacchiera virtuale - punti individuati',
'FontSize',13); xlim([-50 470]); ylim([-50 300]);
hold off
figure(7) % stampa profilo in mm
plot(profilo_mm(:,1)-466.8,-profilo_mm(:,2)+253.6,'.b','Linewidth',10);
axis equal; grid on;
ylabel ('[mm]','FontSize',12); xlabel ('[mm]','FontSize',12);
title('Profilo rilevato','FontSize',13);
xlim([-430 25]); ylim([-80 350]);
text(-5,-10,'\uparrow'); text(-30,-32,'base della');
text(-25,-48,'breccia');
ora="fine_trasposizione"
save('1-profilo_img_5268','profilo_mm') % salvataggio in file .mat

```

A.2 Script per il confronto dei risultati delle prove (Breccia 5 cm)

```

clear all
close all
clc

%% Caricamento dei profili in una struttura

d=dir('*profilo_img*');
% crea una struttura formata da tanti elementi quanti sono i profili
h=[33.00 31.75 31.05 28.20 25.60] -7.6; % carichi
q=528*(([58.06 57.42 57.01 55.52 53.90]-35.6)/100).^2.5; % portate
for i=1:length(d) % analizza uno alla volta tutti i profili
    load(fullfile(d(i).name)); % identifica gli elementi per nome
    numb=d(i).name(1);
    numb=str2num(numb);
    figure(1)
    hold on
    yyaxis right % pone l'asse y sulla destra del grafico

```

```

if numb>=6
    plot(profilo_mm(1:(end-60),1)-profilo_mm(end,1)+20,
        -profilo_mm(1:(end-60),2)+profilo_mm(end,2)-7,
        'b','Color',[0 1 0],'DisplayName',['prova ',
        num2str(i),': h='],num2str(round(h(i),2)),');
        q=',num2str(round(q(i),2)),'], 'MarkerSize',1);
else
    plot(profilo_mm(1:(end-50),1)-profilo_mm(end,1)+20,
        -profilo_mm(1:(end-50),2)+profilo_mm(end,2),
        'b','Color',[0 1 0],'DisplayName',['prova ',
        num2str(i),': h='],num2str(round(h(i),2)),');
        q=',num2str(round(q(i),2)),'], 'MarkerSize',1);
end
axis equal
end
hold on;
plot(0,0,'g','Linewidth',15)
ylabel ('[mm]','FontSize',12); xlabel ('[mm]','FontSize',12);
title('Profili breccia 5 cm','FontSize',15); grid on;
xlim([-430 5]); ylim([-35 400]);
text(-2,-8,'\uparrow','FontSize',10);
text(-20,-18,'base della'); text(-15,-28,'breccia');
text(-410,260.0,'\rightarrow prova 4 H=25.40 cm Q=11,99 L/s');
text(-410,245.5,'\rightarrow prova 5 H=24.15 cm Q=11,13 L/s');
text(-410,230.5,'\rightarrow prova 6 H=23.45 cm Q=10,61 L/s');
text(-410,206.0,'\rightarrow prova 7 H=20.60 cm Q= 8,82 L/s');
text(-410,180.0,'\rightarrow prova 8 H=18.00 cm Q= 7,19 L/s');
savefig('Figura-rappresentativi_1612.fig');

```

A.3 Script per il calcolo dell'errore rispetto alla soluzione di Horton (Breccia 5 cm – Prova 7)

```

clear all
close all
clc

%% Confronto tra singolo profilo rilevato e soluzione di Horton

d=dir('*-profilo_img*');
% crea una struttura formata da tanti elementi quanti sono i profili
j=1; % indice utile per riconoscere le figure
precedente=7; % numero di riconoscimento del profilo
for i=1:length(d) % analizza gli elementi della struttura
    load(fullfile(d(i).name));
    numb=d(i).name(1);
    numb=str2num(numb);
    in=30; fine=300;
    l=size(profilo_mm);
    lung=1(1)-in-fine;
    % le zone del profilo più disturbate (estremi) sono scartate,
    % analizzando solo il corpo centrale
    x=double(profilo_mm(in:(end-1-fine),1));
    % x deve avere la stessa dimensione del tratto analizzato
    y=(-1*(x-profilo_mm(in,1))+profilo_mm(in,2));
    % sovrappone la retta a 45° al tratto di profilo da analizzare
    y_49=(-1.21*(x-profilo_mm(in,1))+profilo_mm(in,2));
    % retta per pendenza 49°
    real=[x,y]; % è la matrice che rappresenta la retta a 45°

```

```

y_prof=double(profilo_mm(in:(end-1-fine),2)); % profilo rilevato
mis=[x y_prof]; % è la matrice che rappresenta i punti rilevati
E=abs(y_prof - y); % Errors
SE=E.^2; % Squared Error
MSE=mean(SE); % Mean Squared Error
RMSE = sqrt(MSE); % Root Mean Squared Error
RMSE = round(RMSE,2,'decimal');
RRMSE = (RMSE/mean(y_prof))*100; % Relative Root Mean Squared Error
RRMSE = round(RRMSE,2,'decimal');
figure(j)
plot(x-x(1),-y+y(1),'--k','Linewidth',1); % retta a 45° (Horton)
axis equal;
hold on
plot(x-x(1),-y_49+y(1),'--','Color',[0.91 0.41 0.17],
'Linewidth',2.5); % retta a 49°
plot(profilo_mm(:,1),-profilo_mm(:,2),'.g','DisplayName',
['prova ',num2str(i)],'MarkerSize',2); % profilo rilevato
if numb==precedente
    txt = ['• Breccia 5 cm - prova ',num2str(numb)];
    text(0,y(1)-70,txt,'fontsize',13,'color','green');
else
    txt = ['• Breccia 3 cm - prova ',num2str(numb)];
    text(0,y(1)-70,txt,'fontsize',13,'color','red');
end
txt = ['RMSE = ',num2str(RMSE),' mm'];
text(0,y(1)-115,txt,'fontsize',10,'color','black');
txt = ['RRMSE = ',num2str(RRMSE),'%'];
text(0,y(1)-135,txt,'fontsize',10,'color','black');
text(profilo_mm(end,1)-x(1)-5,-profilo_mm(end,2)-10+y(1),
'\uparrow','FontSize',10);
text(profilo_mm(end,1)-x(1)-35,-profilo_mm(end,2)-30+y(1),
'base della breccia');
text(0,y(1)-200,'-- retta a 50°','fontsize',11,'color',
[0.91 0.41 0.17]);
text(0,y(1)-225,'-- retta a 45°','fontsize',11,'color','black');
ylabel('[mm]','FontSize',10); xlabel('[mm]','FontSize',10);
xlim([-30 profilo_mm(end-1,1)+30]); ylim([-30 400]);
j=j+1;
precedente=numb;
hold off
end
end

```

A.4 Script per rilevare i profili della vena capillare (Fluoresceina)

```

clear all
close all
clc

%% Step 1: estrazione dei frame dai video GoPro

v=VideoReader('GPdown-1-20191031.mp4');
n = v.NumberOfFrames;
Folder = 'C:\Users\Utente\Dropbox\TESI\Esperimento con black
lights\'; % percorso nel quale salvare i frame
for iFrame = 1:80:1041 % seleziona la parte di video di interesse
    frames = read(v,iFrame); % individuo i frame di interesse
    imwrite(frames, fullfile(Folder, sprintf('GP-frame%04d.jpg',iFrame)));
    % imwrite crea le immagini a partire dai frame e le salva

```

```

        % con nomi a 4 cifre per mantenere l'ordine dei frame;
        % fullfile tiene conto dei separatori
end
last = read (v,n-1);          % legge ultimo frame del video
imwrite (last, fullfile(Folder, sprintf('GP-frame%04d.jpg', n-1)));
% registra questa immagine per usarla come sfondo da sottrarre
FileList = dir(fullfile(Folder, '*.jpg'));
for iFile = 1:length(FileList) % ciclo per visualizzare le immagini
    aFile = fullfile(Folder, FileList(iFile).name);
    img = imread(aFile);
end

%% Step 2: isolamento del profilo dal background

clc;
clear all;
close all;
d=dir('GP-frame*');
xsize = 640; ysize = 352; % dimensioni del frame
allprof = struct('frame',{},'ascisse',{},'ordinate',{});
% struttura in cui sono salvati i profili
for f=1:(length(d)) % caricamento immagini da elaborare
    a = uint8(imread(fullfile(d(f).name))); % vena
    bac = uint8(imread('GP-back1715.jpg')); % background
    prof = abs (a - bac); % profilo
    ora="raddrizzamento terminato"
    figure(1)
    subplot(1,3,1)
    image(a); axis equal; title({'vena'},'FontSize',15);
    xlim([0 xsize]); ylim([0 ysize]);
    ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
    subplot(1,3,2)
    image(bac); axis equal; title({'back'},'FontSize',15);
    xlim([0 xsize]); ylim([0 ysize]);
    ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);
    subplot(1,3,3)
    image(prof); axis equal; title({'profilo'},'FontSize',15);
    xlim([0 xsize]); ylim([0 ysize]);
    ylabel ('[pixel]','FontSize',12); xlabel ('[pixel]','FontSize',12);

%% Step 3: analisi della matrice di pixel per rilevare il profilo

bw = zeros(ysize,xsize);
k=0;
if f<6 % definizione rette limite in base alla forma del profilo
    x1=75; y1=-126; x2=458; y2=-34; % punti della retta superiore
    x3=x1; y3=y1-60; x4=x2; y4=y2-60; % punti della retta inferiore
else
    if f<10
        x1=75; y1=-115; x2=458; y2=-63; % retta superiore
        x3=x1; y3=y1-60; x4=x2; y4=y2-60; % retta inferiore
    else
        x1=75; y1=-91; x2=458; y2=-79; % retta superiore
        x3=x1; y3=y1-40; x4=x2; y4=y2-40; % retta inferiore
    end
end
end
if f~=1 % spostamento automatico delle rette verso il basso
    y1=y1-20*(f-1); y2=y2-20*(f-1);
    y3=y3-20*(f-1); y4=y4-20*(f-1);
end
end

```

```

in=70; fin=500; % limiti di analisi del ciclo sull'asse x
figure(2)
image(prof); axis equal
hold on
x = [in:fin]; plot(x,round(-(y2-y1)/(x2-x1)*(x-x1)+y1)),
    '.g'); % retta superiore
x = [in:fin]; plot(x,round(-(y4-y3)/(x4-x3)*(x-x3)+y3)),
    '.r'); % retta inferiore
for i=in:fin % ciclo per individuare il profilo
    index(i-in+1)= round(-(y2-y1)/(x2-x1)*(i-x1)+y1);
    % troviamo il corrispondente y di x sulla retta sup.
    for j=index(i-in+1):round(-(y4-y3)/(x4-x3)*(i-x3)+y3)
        % analizza riga per riga fino alla retta inferiore
        if mean(prof(j-2:j+2,i-2:i+2,1))+mean(prof(j-2:j+2,
            i-2:i+2,2))+mean(prof(j-2:j+2,i-2:i+2,3))>85
            % condizione per cui siamo sul profilo:
            % (media)R+G+B >soglia
            k=k+1;
            profil(k,:)= [i,j]; % salva il punto nella variabile
            break
        end
    end
    end
    qui=i
end

% Step 4: stampa profilo tra le rette

figure(3)
image(a); axis equal
hold on
x=[in:fin]; plot(x,round(-(y2-y1)/(x2-x1)*(x-x1)+y1)),
    '--g','LineWidth',1); % retta superiore
x=[in:fin]; plot(x,round(-(y4-y3)/(x4-x3)*(x-x3)+y3)),
    '--r','LineWidth',1); % retta inferiore
xlim([0 xsize]); ylim([0 ysize]);
plot(profil(:,1),profil(:,2),'.c');
figure(4)
image(a); axis equal
hold on
xlim([0 xsize]); ylim([0 ysize]);
plot(profil(:,1),profil(:,2),'.c');
allprof(f).frame = f; % salva il profilo in una struttura
allprof(f).ascisse = profil(:,1);
allprof(f).ordinate = profil(:,2);
end

%% Step5: stampa tutti i profili

close all
clc
figure(5)
image(bac); axis equal % stampa i profili sul background
hold on
xlim([0 xsize]); ylim([0 ysize]);
for f=1:length(allprof)
    plot(allprof(f).ascisse,allprof(f).ordinate,'.c');
end
title('Sovrapposizione profili fluoresceina','FontSize',12);
savefig('Figura - soglia85.fig');

```