



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi sperimentale dell'onda di dam break
su superfici lisce e vegetate**

Relatore

Prof. Ing. Davide Poggi

Correlatrice

Ing. Silvia Cordero

Candidato

Jacopo Briano

Anno Accademico 2018 – 2019

Alla mia famiglia

ABSTRACT

La determinazione del comportamento dell'onda dovuta al collasso improvviso del corpo diga (onda di dam break) è tutt'oggi un argomento di ancor non facile soluzione, in quanto il carattere tridimensionale e variabile nel tempo, unito a forti curvature del flusso nel tratto iniziale, comporta notevoli difficoltà nell'individuazione di soluzioni analitiche e numeriche adeguate. È tuttavia necessario ottenere una descrizione quantitativa diffusa e non puntuale del fenomeno, al fine di poter effettuare precise analisi del rischio idraulico concernente l'allagamento delle zone a valle. In questa direzione si orienta il progetto RISBA (metodi speditivi per la mappatura delle aree vulnerabili per onde dovute a rottura di sbarramenti, Poggi D., Cordero S., Dieudonné S., 2015), per la cui compilazione occorre conoscere i campi di altezze e velocità dell'onda, oltreché velocità e tempi di propagazione del suo fronte. La tesi qui descritta prende le mosse da queste premesse. L'obiettivo principale è investigare il fenomeno sul piano sperimentale, creando un modello idraulico e testando l'efficacia di una metodologia di acquisizione dati basata sullo studio di immagini. Allo stesso tempo, viene fornita la relativa descrizione quantitativa preliminare (avanzamento del fronte, ripetibilità dell'esperimento, campo di altezze). La tipologia di sbarramenti studiata comprende piccoli invasi artificiali (carico totale di circa 10 m) posizionati in zona pedemontana: l'onda che si va a creare ha dunque carattere tridimensionale e non solo bidimensionale, come usuale in valli incise. Tale condizione viene simulata nel modello con un serbatoio di monte largo 1.5 m, un piano di valle largo 3 m, ed una breccia di soli 0.03 m. Se la simulazione del collasso è ancora in uno stadio idealizzato (breccia rettangolare stretta, non variabile nel tempo, con apertura istantanea), la zona allagabile viene invece descritta secondo cinque differenti configurazioni di scabrezza: una con piano liscio, altre quattro con macroscabrezze distribuite uniformemente secondo differenti geometrie, al fine di simulare diverse densità di vegetazione. I dati sperimentali vengono acquisiti da una high-speed camera professionale, che permette di ottenere buone risoluzioni (circa 1 mm² /pixel) unitamente ad un alto frame rate (41 Hz). La sensibilità della camera è tale da poter ottenere immagini in scala di grigi a 16 bit. L'aggiunta del colorante E124 all'acqua permette non solo di individuare più chiaramente fronte e increspature dell'onda, ma anche di poter descrivere il campo di altezze facendo ricorso alle relazioni che intercorrono tra l'intensità luminosa e lo spessore dell'acqua nel generico punto in esame. A tale scopo si fa riferimento alla legge di Lambert Beer, la cui costante viene tarata basandosi anche su misure di spettrometria nel campo del visibile. Una volta ottenuto il campo di altezze, è possibile determinare il volume dell'onda istante per istante: esso viene confrontato con i dati acquisiti nel serbatoio di monte da sonde a ultrasuoni con elevata frequenza di acquisizione. La ripetibilità dell'esperimento viene investigata tramite lo studio dell'avanzamento del fronte tra le varie prove. Con riferimento alle macroscabrezze prima citate, viene valutato il loro effetto rispetto alla condizione di fondo liscio sia per quanto riguarda l'avanzamento del fronte, sia per il campo di altezze.

Indice

1	Introduzione.....	1
1.1	Valutazione del rischio.....	3
1.2	Il presente lavoro di tesi.....	6
2	Stato dell'arte.....	8
2.1	Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling (Aureli, Maranzoni, Mignosa, & Ziveri, 2008) [4].....	9
2.2	A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom (Aureli F., Dazzi S., Maranzoni A., Mignosa P., 2014) [5].....	11
2.3	Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows (LaRocque L. A., Imran J., Hanif Chaudry M.) [6].....	12
2.4	Experimental Investigations of Partial-Breach Dam-Break Flows (Elkholy, LaRocque, Chaudhry, & Imran, 2016) [7].....	13
2.5	Steve Cochard, Christophe Ancey (2008) [8].....	14
3	Modello sperimentale.....	16
3.1	Descrizione del modello.....	18
3.1.1	Modello e struttura.....	19
3.1.2	Acqua.....	19
3.1.3	Illuminazione a Led.....	20
3.1.4	Telecamera Andor Zyla 5.5 sCMOS.....	20
3.1.5	Telecamera Nikon DSLR D810.....	24
3.1.6	Spettrometro Spectromaster-C700 Sekonic.....	25
3.1.7	Sonde Balluff (BUS W18M1-XA-07/035-S92G).....	26
3.1.8	Piano di valle e macroscabrezze.....	27
3.2	Descrizione della procedura di esecuzione dell'esperimento.....	29
3.3	Similitudine dei modelli idraulici.....	32
3.3.1	Teorema Pi greco.....	32
3.3.2	Modelli a Froude costante e rapporti di scala.....	33
3.3.3	Rapporti di scala del modello realizzato.....	38
3.4	Campagna di esperimenti condotti.....	41
4	Calibrazione della strumentazione.....	43
4.1	Calibrazione telecamera Andor Zyla 5.5 sCMOS.....	44
4.1.1	Single camera calibration app.....	45
4.1.2	Verifica dell'efficacia della calibrazione.....	47
5	Analisi del fronte d'onda.....	49
5.1	Analisi del fronte per la categoria a fondo liscio.....	50
5.1.1	Analisi delle immagini per la categoria a fondo liscio.....	50
5.1.2	Metodologia di indagine e di confronto: fascio radiale di semirette.....	61

5.1.3	Analisi delle caratteristiche del fronte per singolo esperimento.....	67
5.1.4	Analisi di ripetibilità e confronto tra prove della stessa categoria	75
5.1.5	Confronto tra le categorie a fondo liscio	80
5.2	Analisi del fronte d'onda per la categoria a fondo scabro	90
5.2.1	Analisi delle immagini per la categoria a fondo scabro	91
5.2.2	Analisi delle caratteristiche del fronte per singolo esperimento.....	94
5.2.3	Confronto tra le categorie a fondo scabro	102
5.3	Confronto tra categorie a fondo scabro e liscio con battente 30 cm.....	111
5.3.1	Sovrapposizione grafica.....	111
5.3.2	Analisi quantitativa.....	112
6	Campo di altezze d'acqua.....	118
6.1	Legge di Lambert-Beer.....	119
6.2	Applicazione al modello sperimentale	122
6.2.1	Misure di spettrometria e individuazione della costante k.....	123
6.2.2	Determinazione della relazione intensità luminosa – altezza d'acqua.....	134
6.3	Calcolo campo di altezze.....	138
6.4	Validazione tramite bilancio di volumi.....	139
6.4.1	Volumi dalle sonde (monte).....	139
6.4.2	Volumi dal campo di altezze (valle)	139
6.4.3	Volumi da trattazione analitica.....	140
6.4.4	Confronto tra volumi.....	144
6.4.5	Sezioni del campo di altezze.....	145
7	Campo di velocità dall'equazione di continuità.....	149
7.1	Calcolo e risultati	151
8	Stima spaziale della vulnerabilità.....	156
8.1	Calcolo e risultati	157
9	Conclusioni e sviluppi futuri.....	160
10	Bibliografia.....	162
11	Riferimenti	164
11.1	Indice delle figure.....	165
11.2	Indice delle tabelle.....	170

1 Introduzione

La determinazione del comportamento dell'onda dovuta al collasso improvviso del corpo diga (onda di dam break) è tutt'oggi un argomento di ancor non facile soluzione, in quanto il carattere tridimensionale e variabile nel tempo, le forti curvature del flusso, l'avanzamento su terreno asciutto (battente iniziale delle zone invase nullo o ininfluyente) e la forma del territorio a valle comportano tutti notevoli difficoltà nell'individuazione di soluzioni analitiche e numeriche adeguate.

Ciò è tanto più vero quando l'invaso in esame non si trovi ubicato a monte di una valle incisa, come accade per le dighe più grandi: in questi casi, l'onda risulta più semplice da modellare, in quanto assume carattere monodimensionale, e la forma dell'invaso stesso è genericamente allungata nella direzione che avrà il flusso. Per queste condizioni sono già state sviluppate soluzioni analitiche soddisfacenti, come l'analisi di Ritter.

Qualora, invece, l'invaso si trovasse in zona pedemontana, o comunque posizionato su pendii o valli più aperte, l'analisi deve tenere in conto le differenti condizioni al contorno geometriche: l'onda, infatti, non disponendo di un alveo inciso, o comunque di forti confinamenti laterali, tende ad allargarsi anche nella direzione trasversale al flusso, in maniera tanto più marcata tanto più il territorio di valle è regolare e pianeggiante.

Molti invasi di dimensioni minori, utilizzati ad esempio come serbatoi a scopo irriguo, o per alimentare le necessità delle stazioni sciistiche, rispondono a questa categoria. Disponendo di volumi invasati e carichi totali decisamente minori, un loro eventuale collasso sarà sicuramente meno distruttivo di quello di una grande diga, in termini assoluti, ma non per questo può essere sottovalutato; sono infatti invasi molto più numerosi, talvolta posizionati in serie, e spesso costruiti in terra molti decenni fa con metodologie semi-empiriche, che non rispondono alle esigenze progettuali odierne. Trovandosi, inoltre, prospicienti pendii più aperti, l'onda che essi generano può coinvolgere porzioni di territorio che non si trovano direttamente sulla direzione longitudinale del suo percorso, diversificandosi in questo caso dai dam break più comunemente studiati.

Il danno specifico (relazionato alle loro dimensioni) che possono causare può risultare molto elevato.

Ciononostante, per questa tipologia di invasi non esiste ad oggi uno schema di valutazione del rischio dedicato, che tenga conto della loro specificità. Essendo tuttavia, come detto, molto numerosi (nella sola regione Piemonte, ad esempio, sono censite 800 dighe di queste dimensioni), il grado di rischio che essi comportano per il territorio è da intendersi elevato, ed è quindi emersa in tempi recenti l'esigenza di colmare questa lacuna, quantificando tale rischio e redigendo un piano di protezione civile che possa mitigarlo.

In questo contesto si inserisce il progetto ALCOTRA – RESBA, un programma transfrontaliero di cooperazione territoriale europea interregionale tra Italia e Francia, avviato nel 2014.

Internamente a questo, il progetto RESBA (Resilienza sugli SBarramenti, REsilience des Barrages), come si legge sul sito della Città Metropolitana di Torino:

"... ottenuto il sostegno finanziario dell'Unione europea, ha come obiettivo 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 cittadini sul tema della gestione dei rischi legati alle dighe e sulla loro prevenzione.”

L’arco alpino che divide i territori di Italia e Francia è ricco di sbarramenti artificiali, ubicati in zone di alta montagna tra 1500 e 3000 m di altitudine, ma anche in zone collinari, comprese tra 500 e 1550 m. Sono stati suddivisi in tre categorie principali, in base alla localizzazione e capacità di invaso:

- un gruppo di sbarramenti, da piccoli a medi, di altezza compresa tra 3 e 15 m e con modesta capacità di accumulo di volumi di acqua (alcune decine di migliaia di m³) situati in zona collinare di media quota, utilizzati soprattutto a fini agricoli. Questi sbarramenti sono gestiti da consorzi o piccole collettività, alle quali mancano i mezzi per migliorare il livello di sicurezza della struttura. In questa categoria ricadono alcune centinaia di opere, spesso posizionate in serie sullo stesso corso d’acqua.
- un gruppo di sbarramenti in quota di altezza compresa tra 10 e 20 m e con media capacità di accumulo di volumi di acqua (compresa tra 10⁴ e 10⁵ m³), situati in zone definite di alta montagna, all’interno di stazioni sciistiche, e utilizzati soprattutto per produrre neve artificiale. Si tratta di circa 200 sbarramenti, di recente costruzione (a partire dal 2000). Tali opere godono di una più efficace progettazione e gestione, ma hanno un elevato rischio in quanto situate in alta quota, e prospicienti zone con grande afflusso di persone, in inverno come in estate.
- Un gruppo di grandi sbarramenti in quota utilizzati per la produzione idroelettrica. Si tratta di alcune decine di sbarramenti con carica maggiore di 20 m e volumi invasati nell’ordine di 10⁶ m³. La categoria dei grandi sbarramenti non è oggetto di questa tesi.

Tra gli obiettivi di RESBA, quello più importante per il presente lavoro di tesi è costituito dalla necessità di “implementare azioni di conoscenza e gestione dei rischi per valutare la vulnerabilità degli sbarramenti in zona transfrontaliera e sviluppare innovativi sistemi di monitoraggio”.

Ciò si traduce nell’individuazione di “metodi speditivi per la mappatura delle aree vulnerabili per onde dovute a rottura di sbarramenti”, ossia l’oggetto di un documento, il RISBA (Rischio degli SBArramenti artificiali), prodotto nel 2015 a cura di Poggi D., Cordero S. e Dieudonné S., che è il contributo di uno dei partner del progetto ALCOTRA, il Politecnico di Torino. [1]

Nel presente capitolo si fa cenno alla metodologia di definizione e valutazione del rischio idraulico, ponendo l’attenzione sui parametri necessari alla sua compilazione. In ultimo, si fornisce una panoramica del presente lavoro di tesi.

1.1 Valutazione del rischio

Il rischio rappresenta la misura di un costo statisticamente atteso definito dal prodotto della probabilità di un evento sfavorevole (per noi, rischi naturali, rischi legati all'azione antropica ovvero rischi naturali ma indotti dall'uomo) per il valore monetario del danno causato dal verificarsi dell'evento stesso. L'introduzione del valore monetario del danno determina la dipendenza funzionale del rischio dal soggetto o dal territorio oggetto d'indagine.

Nel 1984 mediante un apposito rapporto UNESCO redatto da Varnes, il rischio viene definito numericamente dal prodotto di tre parametri: la pericolosità P , la vulnerabilità V e il danno potenziale D_p . In simboli:

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

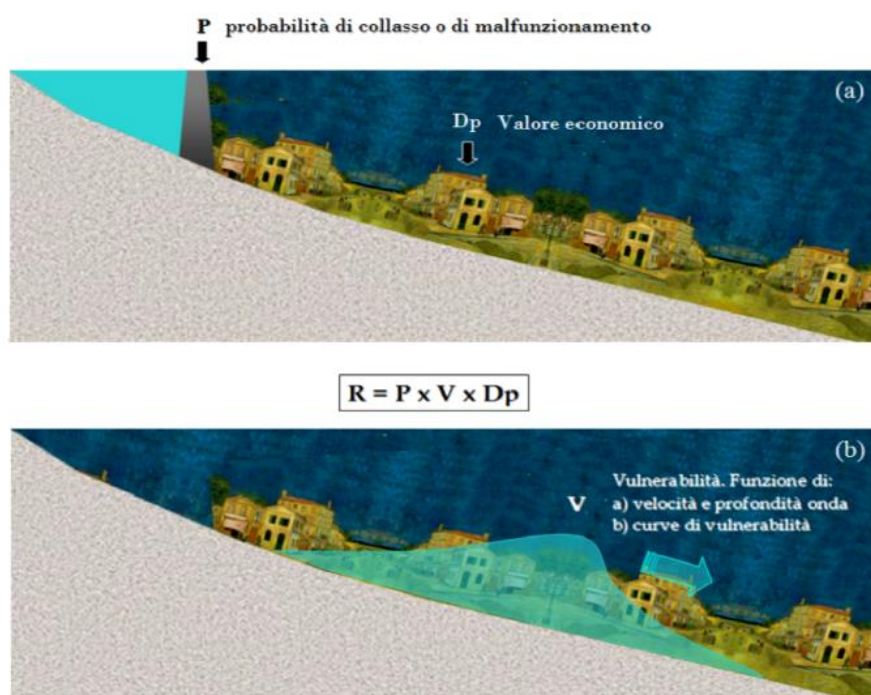


Figura 1 – Rappresentazione del significato dei vari termini che concorrono alla definizione del rischio. Immagine tratta dal lavoro di Cordero, S., "Modellazione numerica della propagazione di onde di dam-break, caso studio: gli sbarramenti in terra" (tesi di laurea magistrale, 2013) [2]

Nel seguito si riportano le definizioni dei parametri individuati con particolare riferimento al rischio idraulico:

- La pericolosità P rappresenta in generale la probabilità che un dato fenomeno di una certa intensità si verifichi in una data area in un dato periodo di tempo; nella pratica, si tratta di una valutazione statistica che fornisce una probabilità di accadimento su base tipicamente annuale.
- La vulnerabilità V rappresenta un coefficiente rappresentativo dell'effetto che il fenomeno distruttivo prima descritto ha sul generico oggetto in esame. La stima di questo parametro di norma è un processo complesso funzione di numerosi fattori tra cui la tipologia dell'evento, la relativa intensità, la connotazione fisica degli elementi oggetto di studio. Al fine di superare l'ostacolo di stima in campo tecnico si assume spesso un valore massimo imponendo tale parametro pari all'unità nell'ambito di una

scala da 0 a 1. Per quanto concerne l'intensità di un evento di piena, la letteratura scientifica asserisce di poter descrivere l'evento mediante due grandezze fisiche fondamentali reperibili dalle analisi idrauliche: la profondità e la velocità localmente raggiunte dall'acqua. Tali grandezze sono in grado di tenere in conto le forze che agiscono sugli oggetti investiti dalla corrente, ossia forza di galleggiamento e trascinamento, ma impongono di trascurare fenomeni come l'erosione, il trasporto e la deposizione di materiale solido, la presenza di corpi flottanti, i tempi del fenomeno (celerità e durata). Il computo della vulnerabilità risulta quindi dal semplice prodotto tra battente e velocità

$$V = u \cdot y \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Negli anni diversi studi e statistiche, quali 1975 Sangrey, 1975 Black, 1990 Clausen e Clark relativamente alle strutture murarie e 1979 Federal Emergency Management Office relativamente agli esseri umani dimostrarono i differenti effetti prodotti dallo stesso flusso su bersagli differenti, aprendo la strada per il concetto di rischio basato su fenomeno distruttivo e oggetto colpito.

Facendo riferimento alla valutazione del danneggiamento dei beni materiali, ci si riferisce alle analisi di Clausen e Clark [3], i quali ipotizzano i seguenti valori di soglia: semplice inondazione qualora il parametro v_y sia inferiore a $3 \text{ m}^2/\text{s}$, danni strutturali limitati qualora esso sia compreso tra 3 e $7 \text{ m}^2/\text{s}$. Gli stessi autori, tuttavia, sottolineano che per velocità del flusso inferiori a 2 m/s si debba parlare sempre di semplice inondazione.

- Il danno potenziale D_p rappresenta il valore degli elementi a rischio dato dal loro valore economico, e/o dal numero di unità presenti in una certa area. L'impossibilità etica di attribuire un valore monetario alla vita umana impone di separare il computo del rischio tra beni materiali e persone. Il valore dei beni materiali esposti al rischio è funzione del valore economico del singolo elemento, e della numerosità sul territorio di elementi che possono ricadere nella stessa tipologia. Al fine del calcolo del valore esistono differenti approcci quali il calcolo del valore discreto dei singoli elementi, l'utilizzo di funzioni di utilità, l'utilizzo di formule empiriche, la stima qualitativa del valore complessivo per una certa area, l'utilizzo della carta tematica dell'uso del suolo denominata CORINE.

Alla luce di quanto detto precedentemente, un'analisi completa del rischio dovrebbe passare attraverso lo studio congiunto di pericolosità, danno potenziale e vulnerabilità. In particolare: ad ogni diga andrebbe associata una probabilità di collasso; l'intensità dell'onda di dam-break che si sviluppa a seguito dell'eventuale collasso deve essere conosciuta in funzione della distanza dallo sbarramento; la suscettibilità degli elementi esposti deve essere studiata in funzione delle caratteristiche dell'onda; il valore economico dei beni a valle dello sbarramento deve poter essere facilmente desunto.

La difficoltà di poter disporre di una mole di dati così notevole, e la necessità parallela di poter disporre di analisi del rischio speditive e robuste, sebbene ovviamente meno precise, porta ad effettuare variazioni nella stima dei parametri.

In particolare, lo studio del danno potenziale D_p , che può risultare assai complesso, viene sostituito da una più veloce valutazione del grado di esposizione dell'area di interesse E .

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

Una semplice definizione del grado di fruizione dell'area, spesso ottenuto tramite foto aeree, o dalle cartografie tecniche, elaborati di pianificazione urbanistica e territoriale o da sopralluoghi permette di incasellare ogni estensione territoriale entro una classificazione che descriva l'entità dei danni procurabili in tale zona.

La suddivisione per una tipica analisi speditiva è la seguente:

- 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

L'analisi speditiva impatta anche sulla definizione del grado di vulnerabilità, fornendo una procedura sintetica per definire tre gradi di distruzione: totale, significativa, parziale.

A titolo di esempio, relativamente alle aree urbanizzate, si propone:

- V100, distruzione totale (ossia perdita del 100% del valore), con $v_y > 7 \text{ m}^2/\text{s}$
- V70, distruzione significativa (perdita del 70% del valore), con $v_y > 3 \text{ m}^2/\text{s}$
- V30, distruzione parziale (perdita del 30% del valore), con $v_y > 1 \text{ m}^2/\text{s}$

Trattazione estratta da

S. Cordero, D. Poggi, S. Grimaldi, (2013). "Modellazione numerica delle onde di dam-break, caso studio: gli sbarramenti in terra" [2].

D.Poggi, S.Grimaldi, E.Perucca, F.Miotto, M Pozzallo, A.Cagninei (2009). "Definizione di una metodologia speditiva per il calcolo del coefficiente di rischio globale per gli sbarramenti di competenza regionale". Contratto di ricerca, Regione Piemonte. [1].

1.2 Il presente lavoro di tesi

il presente lavoro di tesi risponde alla necessità di ottenere una descrizione dell'onda di dam break sul piano sperimentale.

Nel laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino è stato allestito un modello fisico idraulico che rappresenta, in scala circa 1:30, la categoria di invasi di piccole e medie dimensioni menzionati dal progetto RESBA.

L'obiettivo finale dell'intero allestimento consiste nel determinare, sul piano sperimentale, i campi di altezze e velocità secondo diverse condizioni al contorno, tra cui figurano:

- Altezze del pelo libero nell'invaso
- Scabrezza del piano di valle (forestato o libero)
- Pendenza del piano di valle, compresa tra 0° e basse pendenze
- Forma della breccia che dà origine al dam break

Ciò allo scopo di utilizzarli per validare i risultati delle modellazioni numeriche, e per meglio comprendere un fenomeno difficile da descrivere analiticamente.

Proprio perché lo studio è complicato, in questa fase il modello fisico si trova ancora ad uno stadio primitivo: delle condizioni al contorno elencate, solo le prime due vengono fatte variare, mentre la geometria dell'intero allestimento rimane invariata.

In particolare, si sta parlando di:

- un serbatoio di monte prismatico con dimensioni in pianta 1.5 x 1.5 m, e alto 0.5m
- un piano di valle orizzontale, largo 3m e lungo 4 m, sul quale possono essere equipaggiate macroscabrezze (la vegetazione) secondo differenti geometrie uniformi
- una breccia che collega le due parti, di forma rettangolare, alta come l'intero invaso (0.5 m) ma larga solo 3 cm: in tal senso, essa descrive sì un collasso totale, ma solo di una porzione dell'intero corpo diga.

L'acquisizione dei dati avviene mediante due fonti principali:

- una high-speed camera professionale, che permette di ottenere buone risoluzioni (circa 1 mm²/pixel) unitamente ad un alto frame rate (41 Hz), con una sensibilità tale da poter ottenere immagini in scala di grigi a 16 bit. Essa si trova posizionata in alto, sopra al piano di valle, rivolta perpendicolarmente verso il basso in maniera tale da inquadrare il piano di valle e la breccia per un'area di circa 2 x 2.5 m. Il frame rate è tale da poter descrivere il fenomeno, che evolve per circa 1 secondo prima di incontrare le pareti della struttura, con un burst di almeno 100 fotogrammi (nelle configurazioni in cui l'onda si muove più velocemente). Essa viene utilizzata per descrivere il campo di altezze d'acqua
- 12 sonde a ultrasuoni, posizionate sopra il serbatoio di monte, che ne monitorano l'abbassamento, durante l'evento, con una frequenza di circa 80 Hz, permettendo di realizzare un bilancio di volumi tra monte e valle

Ulteriore strumentazione è composta da un'altra camera professionale, posizionata come la high-speed di cui sopra, ma utilizzata per il campo di velocità, da alcune action camera e da uno spettrometro, il cui utilizzo è stato previsto in un secondo momento, per il campo di altezze.

L'obiettivo della presente tesi è testare l'efficacia di una metodologia di descrizione del campo di altezze d'acqua (una descrizione diffusa e non puntuale) mediante l'acquisizione di

immagini, e allo stesso tempo fornire una descrizione quantitativa preliminare di alcuni degli aspetti del fenomeno: avanzamento del fronte, ripetibilità dell'esperimento, campo di altezze.

Con riferimento al campo di altezze, esso viene descritto grazie all'aggiunta del colorante rosso E124 all'acqua. Ciò permette infatti non solo di individuare più chiaramente fronte e increspature dell'onda, ma anche di poter descrivere il battente facendo ricorso alle relazioni che intercorrono tra l'intensità luminosa e lo spessore dell'acqua nel generico punto in esame.

A tale scopo si fa riferimento alla legge di Lambert Beer, la cui costante viene tarata basandosi anche su misure di spettrometria nel campo del visibile. Una volta ottenuto il campo di battenti, è possibile determinare il volume dell'onda istante per istante: esso viene confrontato con i dati acquisiti nel serbatoio di monte dalle sonde a ultrasuoni.

La ripetibilità dell'esperimento viene investigata tramite lo studio dell'avanzamento del fronte tra le varie prove.

Con riferimento alle macroscabrezze prima citate, viene valutato il loro effetto rispetto alla condizione di fondo liscio sia per quanto riguarda l'avanzamento del fronte, sia per il campo di altezze.

Obiettivo di altre tesi, contemporanee a questa, è descrivere invece gli aspetti di calibrazione della strumentazione, il campo di velocità, e modellare numericamente il fenomeno con il software BreZo.

2 Stato dell'arte

Il fenomeno del dam-break tridimensionale è già stato oggetto di indagini precedenti. Si raccolgono in questo capitolo alcuni tra gli studi più importanti condotti fino ad oggi, di seguito elencati:

- Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling (Aureli, Maranzoni, Mignosa, & Ziveri, 2008)
- A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom (Aureli F., Dazzi S., Maranzoni A., Mignosa P., 2014)
- Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows (LaRocque L. A., Imran J., Hanif Chaudry M.)
- Experimental Investigations of Partial-Breach Dam-Break Flows (Elkholy, LaRocque, Chaudhry, & Imran, 2016)
- Steve Cochard, Christophe Ancey (2008)

2.1 Dam-Break Flows: Acquisition of Experimental Data through an Imaging Technique and 2D Numerical Modeling (Aureli, Maranzoni, Mignosa, & Ziveri, 2008) [4]

In questo articolo si vanno a indagare i risultati di quattro esperimenti condotti per dam break tridimensionale. La notazione talvolta ambigua, bidimensionale o tridimensionale, si riferisce alla decisione o meno di comprendere o meno la direzione verticale nel conteggio.

Il dam break qui indagato è da intendersi come flusso rapidamente variabile indotto dalla subitanea rimozione di una saracinesca. Nei primi due esperimenti, il flusso si estende su un piano orizzontale per alcuni secondi prima di venire riflesso dalle pareti solide: sono stati eseguiti sia i casi inizialmente a letto umido che a letto asciutto.

Il terzo esperimento ha visto l'applicazione sul percorso dell'onda di un ostacolo di grandi dimensioni topologiche, ma sommergibile. Nel quarto ed ultimo esperimento, è stato aggiunto un ulteriore ostacolo, sovrapposto al primo, che fosse abbastanza elevato da rimanere emergente per tutta la durata del dam break.

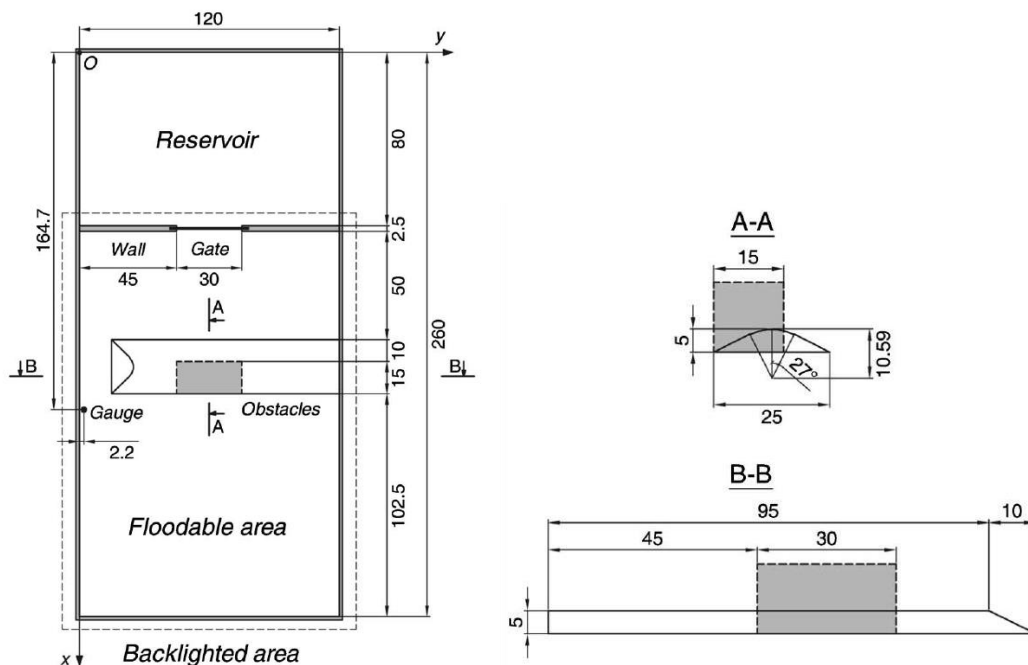


Figura 2 – Descrizione del set-up sperimentale per Aureli, Maranzoni, Mignosa, Ziveri.

Ciò che più interessa è la tecnica di acquisizione dei dati, antesignana di quella da noi adottata. Si tratta di una tecnica di imaging in grado di fornire informazioni spazialmente distribuite: utilizzando acqua colorata con metilene blu, retroilluminata attraverso il fondo della struttura, sono state scattate fotografie dell'area di interesse durante il dam break. I toni di grigio delle immagini acquisite sono stati convertiti in profondità d'acqua mediante funzioni di trasferimento derivate da una calibrazione statica precedente. Nell'articolo vengono poi discusse le potenziali fonti di errore della procedura proposta. Un confronto con le acquisizioni di un dispositivo ad ultrasuoni (che misura puntualmente) ha mostrato una deviazione massima del 20% nel 95% delle osservazioni.

I dati sperimentali così ottenuti sono stati poi confrontati con l'output di un modello numerico ai volumi finiti (MUSCL-Hancock 2D). Questo fa riferimento alle ipotesi shallow water, e valuta le profondità dell'acqua in base al metodo del gradiente di superficie.

Viene eseguita un'analisi globale delle distribuzioni di frequenza relative della deviazione tra risultati numerici e sperimentali. Nonostante alcune evidenti differenze a livello locale, il modello numerico 2D adottato è in grado di riprodurre le principali caratteristiche dei campi di flusso in esame.

2.2 A combined colour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom (Aureli F., Dazzi S., Maranzoni A., Mignosa P., 2014) [5]

Una seconda pubblicazione dello stesso autore principale, in cui si approfondiscono ulteriori aspetti riguardanti la fisica della tecnica di acquisizione dati di altezze d'acqua via imaging.

La tecnica utilizzata, combinata tra colori e infrarossi, è basata sulla rifrazione e assorbimento della luce in contesti in cui il pelo libero – fermo – dell'acqua non è parallelo al fondo. In altre parole, il contenitore è inclinato e l'acqua non ha ovunque lo stesso spessore.

La procedura di imaging richiede il processo simultaneo di immagini digitali ottenute nel campo del visibile e dell'infrarosso.

Da un alto, lo spostamento apparente denotabile tra l'immagine di riferimento e quella modulata permette di avere una stima dell'effetto di rifrazione indotto dalla superficie dell'acqua.

Dall'altro, le immagini nell'infrarosso vicino permettono di ottenere una stima accurata della profondità di penetrazione, dovuta all'elevata assorbanza dell'acqua nello spettro dell'infrarosso vicino.

La tecnica di imaging nel suo insieme è applicata ad una serie di test di laboratorio allo scopo di testare l'accuratezza globale della misura. I risultati provano che il metodo proposto è robusto e accurato, e può essere considerato un efficace strumento non intrusivo per ottenere dati sperimentali spazialmente distribuiti.

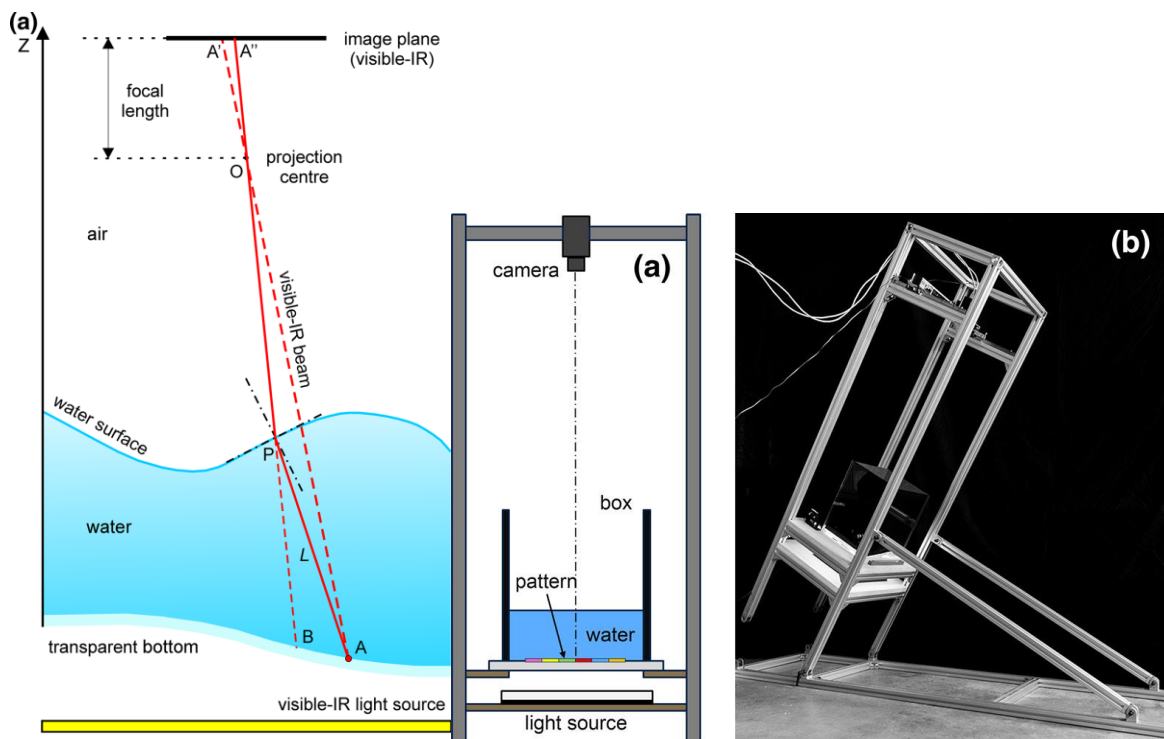


Figura 3 – Geometria dei raggi nei principi della misurazione e set-up sperimentale utilizzato da Aureli e al.

2.3 Experimental and Numerical Investigations of Two-Dimensional Dam-Break Flows (LaRocque L. A., Imran J., Hanif Chaudry M.) [6]

In questo articolo sono presentate misure di profili di velocità ottenuti da esperimenti di dam-breaks ideali. Inoltre, si presentano i risultati di simulazioni numeriche di questi esperimenti.

Le onde di dam-break sono state generate in laboratorio sollevando improvvisamente una saracinesca all'interno di un canale per tre diverse altezze del pelo libero a monte con una condizione del letto a valle asciutta.

Dei misuratori Ultrasonici Doppler sono stati utilizzati per avere una misura, in 8 punti differenti, distribuiti tra monte e valle, dei profili di velocità transitanti. Questi esperimenti hanno fornito una serie di dati sull'evoluzione spazio temporale del campo di moto, in una condizione, questa, di moto rapidamente variabile e di breve durata.

Gli esperimenti (bidimensionali – o tridimensionali, a seconda di come li si intenda) sono stati performati attraverso un solutore di fluido dinamica.

Sono state effettuate le seguenti considerazioni:

1. La modellazione della turbolenza non modifica la velocità calcolata nel serbatoio di monte, ma ha invece un peso importante nel determinare la velocità a valle
2. Il modulo della velocità in locazioni note cambia nel tempo, ma la forma del profilo di velocità rimane simile
3. Una soluzione analitica per flussi di dam-break senza attrito su un piano inclinato e una simulazione tramite LES (Large Eddy Simulation) hanno prodotto risultati soddisfacenti secondo il confronto con le misure sperimentali
4. L'adimensionalizzazione dei profili di velocità all'interfaccia del serbatoio di monte calcolati secondo diversi carichi totali iniziali e posizioni iniziali rivela che lo spessore dello strato di taglio di questi profili è circa il 5% del carico del serbatoio iniziale
5. Le misurazioni e simulazioni con il modello LES mostra buoni risultati per la turbolenza, suggerendo che la modellazione con LES è un approccio utilizzabile per un'accurata predizione dei flussi di dam-break

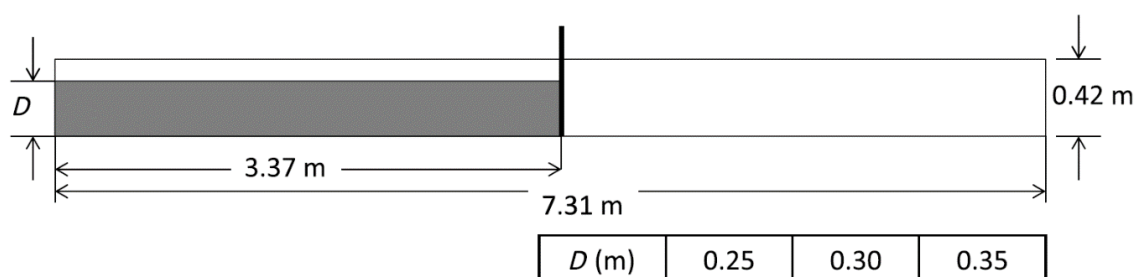


Figura 4 – Descrizione schematica del set-up utilizzato alla University of South Carolina

2.4 Experimental Investigations of Partial-Breach Dam-Break Flows (Elkholy, LaRocque, Chaudhry, & Imran, 2016) [7]

In questo documento si presentano risultati sperimentali sulle onde di dam-break parziale. L'onda viene ottenuta sollevando rapidamente una saracinesca che separa un serbatoio e un bacino asciutto a valle. Sono considerate tre differenti profondità d'acqua iniziali a monte.

Le onde tridimensionali (3D) derivanti dal collasso vengono investigate sperimentalmente combinando diverse tecniche di misurazione.

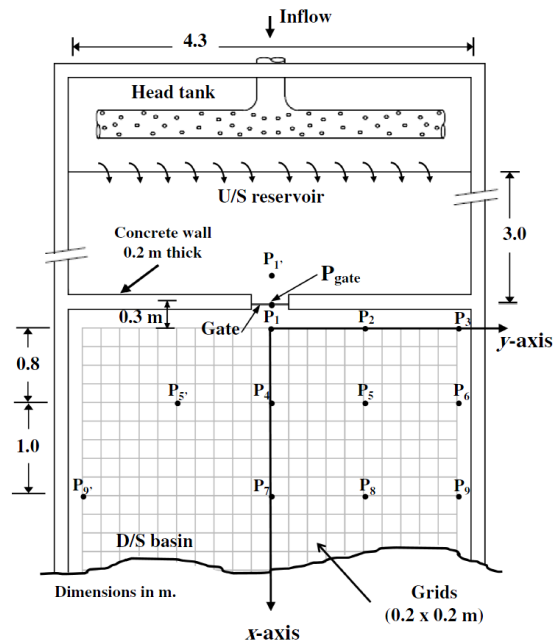


Figura 5 – Rappresentazione schematica del set up utilizzato da Elkholy e al.

Lo studio utilizza la tecnica della velocimetria digitale delle particelle (DPTV) per misurare la velocità della superficie libera e la profondità dell'acqua. La configurazione stereoscopica di due videocamere ad alta definizione che registrano il movimento di sfere di plastica cave consente la misurazione del campo di velocità 3D e l'elevazione della superficie dell'acqua.

L'altezza di pressione viene misurata dai trasduttori di pressione allocati in varie posizioni. Profiloni di velocità ultrasonici (UVP) vengono utilizzati per ottenere profili di velocità nel serbatoio di svuotamento. Viene presentata una semplice relazione non dimensionale per la variazione dell'elevazione della superficie dell'acqua nel serbatoio a monte.

Sono state fatte inoltre le seguenti osservazioni: (1) il valore massimo per la velocità non dimensionale dell'onda frontale è vicino a 1.0; (2) il rapporto tra velocità di propagazione laterale del fronte d'onda rispetto a quella nella direzione di valle è quasi 1:3; (3) la profondità dell'acqua è maggiore dell'altezza di pressione vicino alla breccia e inferiore a valle della saracinesca a causa dell'effetto di curvatura della superficie dell'acqua; e (4) i profili di velocità normalizzati nel serbatoio di monte mostrano, sotto diverse altezze iniziali, un collasso soddisfacente.

2.5 Steve Cochard, Christophe Ancey (2008) [8]

In questo studio si presenta lo studio di una nuova tecnica di elaborazione di immagini, basata sull'utilizzo di una camera digitale accoppiata con un proiettore a micro-specchio sincronizzato per ricostruire profilo tempo dipendenti della profondità del flusso.

Per l'obiettivo principale, studiare la validità delle leggi shallow water, si utilizzano fluidi Newtoniani e non Newtoniani per le diverse fasi: accelerazione (bilancio tra inerzia e gradiente di pressione), a regime e deposito (predominanza del processo di dissipazione).

Il set up utilizzato consiste di un piano inclinato, in cima al quale si trova uno sbarramento che trattiene una massa d'acqua. A valle si trova un piano orizzontale di deflusso. La struttura misura 6 metri in lunghezza, 1.8 in larghezza e 4 in altezza, mentre il serbatoio può accogliere 120 litri. La strumentazione di misura è apposta su un telaio vicino.

Il fluido utilizzato, viscoplastico, è un gel polimerico stabile immesso in soluzione acquosa. Il dam-break risulta in questo caso piuttosto lento.

La determinazione della forma dell'onda avviene tramite tecniche di imaging che coinvolgono la proiezione di un'immagine nota sull'onda (ovviamente, dotata di propria forma ed elevazione), e l'ottenimento dei valori di altezza dalla ricostruzione della stessa entro un piano.

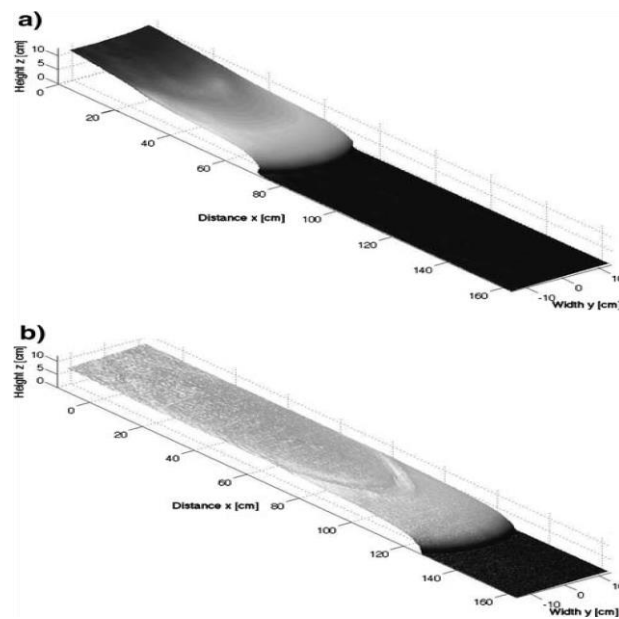


Figura 6 - Superficie libera a 1 s e 52 s

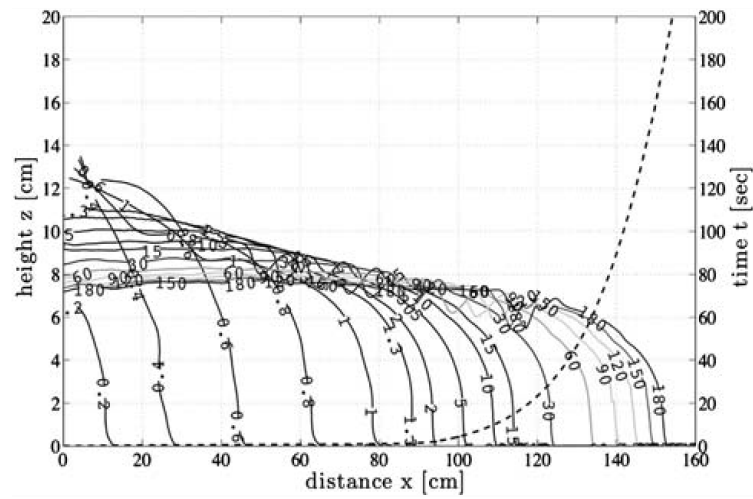


Figura 7 – Profilo della profondità del flusso di un'onda (linea continua) e posizione del fronte in funzione del tempo per un fluido viscoelastico

3 Modello sperimentale

Lo stato dell'arte presente si rifà a tecnologie oggi superate. Nel caso di Aureli [4], ad esempio, la fotocamera permetteva di acquisire sì immagini ad alta risoluzione, ma con un frame rate pari a soli 3 Hz.

La maggior parte delle misure di carattere quantitativo sono state quindi ottenute da misuratori ad ultrasuoni, che sono sì precisi, affidabili e non disturbano il flusso, ma hanno il difetto di offrire risultati puntuali e mediati sull'area di indagine, perdendo completamente l'informazione relativa all'onda.

La novità apportata dall'indagine descritta in questa tesi sta proprio nell'effettuare non più misurazioni puntuali, ma continue nello spazio.

Per ottenere ciò, come già anticipato, non si fa ricorso alla strumentazione sopra indicata ma si interpretano direttamente le immagini fornite dalla fotocamera. In tal modo, la frequenza spaziale di dati disponibili risulta enormemente elevata, poiché il valore registrato nella cella di ogni pixel che compone l'immagine costituisce una fonte di dati.

I dati non risultano solo abbondanti spazialmente, ma anche nel tempo: il frame-rate adottato, infatti, supera di un fattore 10 quello delle precedenti esperienze di laboratorio, permettendo di studiare con la cura necessaria l'evolversi del fenomeno.

Nelle nostre intenzioni, lo studio di queste immagini deve portare ad uno studio preciso ed esaustivo delle caratteristiche del fronte d'onda (posizione, velocità), e dei campi di altezze e velocità (quest'ultimo aspetto viene indagato in un'altra tesi magistrale).

La fotocamera adottata – ossia il nostro strumento principale, sebbene non l'unico - è una high-speed camera professionale, le cui caratteristiche saranno esaurientemente descritte nei paragrafi 3.1.4 e 4.1.

Si anticipa qui che, in seguito al settaggio delle impostazioni di carattere fotografico (ISO, tempo dell'otturatore, apertura del diaframma) e di quelle di carattere informatico (velocità di trasferimento dati, dimensioni del disco temporaneo di archiviazione e sua velocità di scrittura e trasmissione), la fotocamera adottata per le misure (una Zyla 5.5 della casa produttrice Andor) produce immagini con le seguenti caratteristiche:

- immagini ad alta risoluzione (2160 x 2560 pixel)
- valori registrati in scala di grigi a 18 bit (65.535 livelli di intensità)
- frame rate di 41.388 Hz, ossia un periodo di esposizione di appena 2.4 centesimi di secondo
- rapporto pixel/mm pari a circa 0.995
- le immagini, acquisite nel formato .sif proprio del software della casa, vengono salvate nel formato .tif senza compressioni di sorta

La fotocamera si trova posizionata a circa 3 metri di altezza sopra un piano orizzontale, che va a costituire la zona di valle – allagabile – del modello fisico che è stato allestito nel laboratorio di idraulica del Politecnico di Torino.

Il modello, i cui requisiti di progetto sono discussi nel paragrafo successivo, il 3.1 (Similitudine del modello idraulico), mentre nella sua completezza (struttura e strumentazione) è descritto nel paragrafo 3.2 (il set-up), si compone di:

- un serbatoio di monte prismatico di dimensioni 1.5 x 1.5 x 0.5 m

- un piano orizzontale di valle impermeabile ricoperto in pvc bianco di dimensioni 3 x 4 m
- una breccia di 3 cm che collega serbatoio e piano orizzontale, occlusa da una paratia che può essere rimossa in maniera sostanzialmente istantanea
- impianto di illuminazione a led orientato non direttamente verso il piano, per evitare riflessi sull'acqua, ma puntato su un sistema di teli bianchi in pvc che ricoprono per intero l'interno dell'intero set-up, allo scopo di favorire una diffusione luminosa uniforme
- strumentazione di controllo e acquisizione dati: fotocamera Zyla (e Nikon, usata per il campo di velocità), sonde a ultrasuoni Balluff

L'acqua utilizzata per gli esperimenti è stata pigmentata con il colorante rosso E124. Questo per favorire sia un migliore individuazione del fronte d'onda e delle increspature (acqua rossa su fondo orizzontale in pvc bianco, illuminato da impianto a led con luce bianca), sia per permettere la stima del campo di altezze d'acqua. Come verrà ampiamente discusso nel capitolo 6 (campo di altezze d'acqua e legge di Lambert Beer), l'altezza d'acqua pixel per pixel viene indagata correlando ad essa l'intensità luminosa registrata nel pixel i-esimo.

La struttura semplice del modello è da ricondursi alla natura di questo set di sperimentazioni: ancor prima che quantitativa, l'analisi qui presentata è metodologica, con l'obiettivo di offrire dati preliminari che possano consentire di valutare se proseguire o meno con questo approccio.

Con tale spirito, si è scelto di realizzare un modello fisico sì in scala, ma dai caratteri fortemente idealizzati (in primis la forma della breccia), che non trovano riscontro nei sistemi reali; il collasso dell'argine di un vaso in terra, ad esempio, come lo sono diversi tra gli invasi indagati dal progetto RESBA, assume una forma trapezoidale evolvente verso quella triangolare (così come descritto da Froelich), ben diversa da quella da noi adottata.

D'altro canto, l'utilizzo di una forma rettangolare stretta, abbinata ad un piano di valle senza alcuna costrizione laterale, permette di testare la metodologia nella situazione più svantaggiosa, ossia di acque molto basse. La portata effluente è infatti molto limitata rispetto a quella di un normale dam break, eppure dotata di una notevole energia dovuta al carico del serbatoio, che rimane elevato per tutta la durata dell'esperimento.

Il risultato di queste condizioni al contorno è un'onda con battenti molto limitati, compresi tra 2 e 7 mm. Altezze così contenute rappresentano la condizione peggiore per poter effettuare la valutazione del campo di altezze tramite fotocamere. Tuttavia, se la metodologia risulta efficace in questa situazione limite, di certo lo sarà per battenti più elevati.

Infine, la forma rettangolare della breccia permette di evitare, in questa fase di studi preliminari, di sovrapporre ulteriori effetti all'onda, come quelli dovuti ad una sezione di deflusso variabile in larghezza.

3.1 Descrizione del modello

Il modello fisico è un prototipo presente nel Laboratorio Didattico di Idraulica Giorgio Bidone nel Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) nella Sede Centrale del Politecnico di Torino.

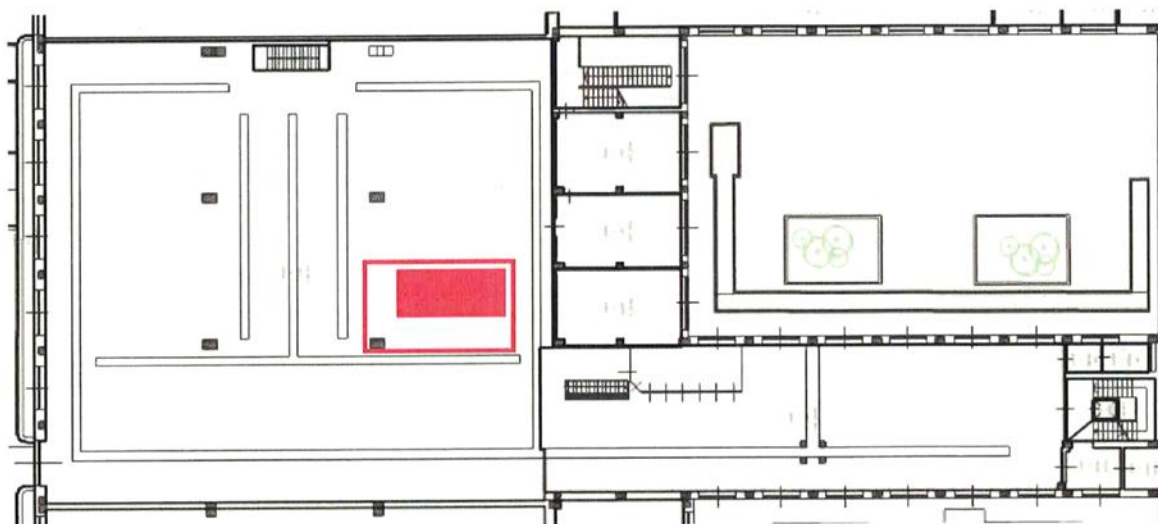


Figura 8 - Ubicazione del prototipo all'interno del laboratorio idraulica e modelli idraulici. L'area occupata dal prototipo è campita in rosso, il perimetro evidenziato in rosso comprende l'ingombro delle strumentazioni afferenti.

È composto da un serbatoio di monte e una vasca di valle messi in comunicazione da una breccia dotata di una saracinesca.

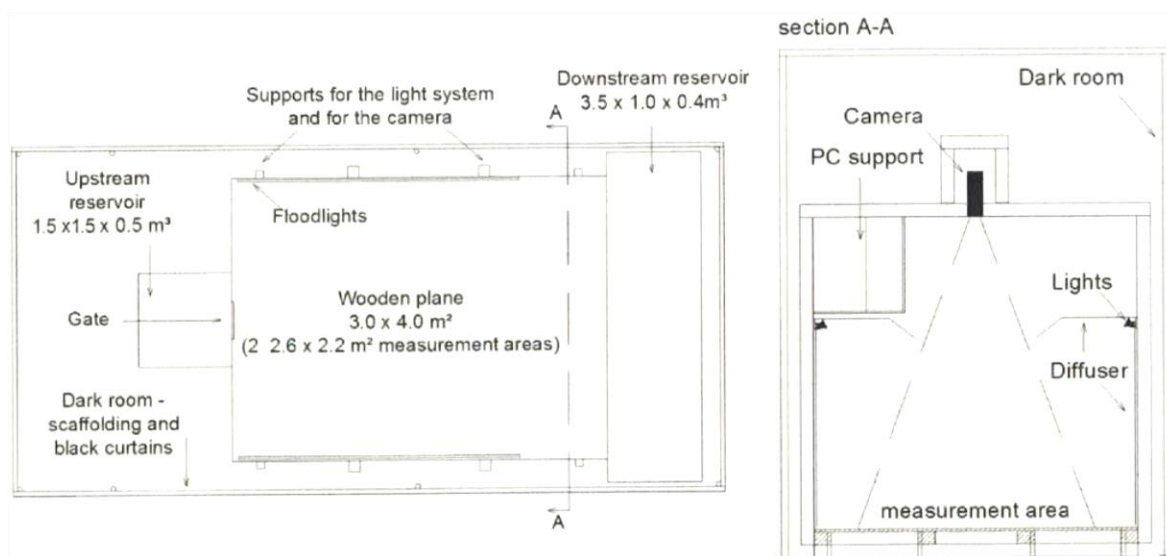


Figura 9 - Uno schema del modello fisico: a sinistra una vista dall'alto e a destra la sezione AA indicata in pianta.

3.1.1 Modello e struttura

Il serbatoio di monte è prismatico, in acciaio inossidabile di 1.50 m di lunghezza, 1.50 m di larghezza e 0.50 m di altezza. È posto ad un'altezza di circa 0.40 m da terra. Il fondo è piano ed è dotato di uno scarico regolato mediante valvola a sfera.

La vasca di valle è un piano in legno lungo 4.00 m e largo 3.00 m. La continuità della superficie e la tenuta idraulica sono garantite da un rivestimento in pvc di spessore 3 mm, oltre che dalla sigillatura con stucco al livello delle giunzioni e dalla verniciatura superficiale bianca. Inoltre, il tappeto è mantenuto teso e senza pieghe grazie alla presenza, sui due lati lunghi della vasca, di profilati metallici angolari a lati uguali e spigoli tondi.

Sulla parete in comune tra il serbatoio e la vasca è presente la breccia. Essa è di forma rettangolare e ha una larghezza di 0.03 m ed un'altezza pari a quella del serbatoio (0.50 m).

La saracinesca che la occlude è un pannello in acciaio inossidabile che può muoversi verticalmente grazie a guide lineari a sfera poste lato vasca. Per rendere stagna la saracinesca sono state adottate due soluzioni: l'incollaggio di due strisce di guarnizione in gomma e l'installazione di due elettrocalamite, controllate a distanza, in modo che in esercizio venga mantenuta adesa al pannello del serbatoio di monte. Superiormente la saracinesca presenta un robusto anello d'acciaio che consente di collegarla al sistema meccanico di apertura.

Il sistema di apertura è costituito da un peso di 10 kg legato ad un cavo di acciaio intrecciato che passa per due carrucole fissate ad uno dei portali in legno che sovrastano la struttura. Il portale in questione è isolato dalla struttura del modello al fine di non trasmettere le vibrazioni conseguenti la caduta del grave. Il peso può essere mantenuto sospeso ad un'altezza di circa 2.80 m da terra grazie alla presenza di un'elettrocalamita controllata a distanza. La caduta del peso avviene all'interno di una colonna chiusa di caduta, dotata di attenuatore in sabbia sul fondo. Il sistema di apertura è stato progettato in modo tale da poter assumere la fase di movimentazione della saracinesca come istantanea¹.

3.1.2 Acqua

In prossimità del prototipo è presente una cisterna in polietilene lineare, che ha lo scopo di raccogliere per poi riutilizzare l'acqua impiegata nell'esperimento. Con una capienza di 1500 l, contiene circa 1350 l di acqua colorata rossa.

La colorazione, frutto di studio precedente alla campagna di esperimenti, è stata ottenuta mediante aggiunta del colorante cocciniglia con una concentrazione pari a 0.0167 g/l, e successivamente del colorante E124 con una concentrazione pari a 0.185 g/l (250 g sui 1350 l originali). All'interno della cisterna è presente una pompa sommersa che permette di riempire il serbatoio di monte.

L'iniziale scelta del colorante cocciniglia si è rivelato problematico, in quanto tale pigmento tende a precipitare nel tempo, anche se con tempi molto lunghi. Il suo elevato costo ha inoltre portato a considerare l'utilizzo dell'E124, che ha inoltre il vantaggio di essere più fisso e meno soggetto ad alterazioni nel tempo.

¹ Il tempo di apertura della paratia è stato calcolato essere di circa 0.08 s.

3.1.3 Illuminazione a Led

Due portali di altezza 3 m sono fissati ai lati lunghi e sovrastano il piano permettendo di posizionare una telecamera. Piano, sottostruttura e portali sono solidali, pertanto l'asse della telecamera è ortogonale al piano

L'illuminazione dell'area di misura è garantita da due file di faretti disposti sui 2 lati lunghi del piano ad un'altezza di 1.80 m dallo stesso, con un'inclinazione di 5° rispetto all'orizzontale verso l'alto. Questo per ottenere una diffusione uniforme della luce e minimizzarne la dispersione, infatti il piano è circondato da 4 pareti verticali realizzate in tessuto oscurante bianco opaco. Sono state lasciate libere solo l'area della breccia e uno spazio a valle per permettere l'uscita dell'acqua dal modello. Con lo stesso materiale sono stati realizzati anche i 2 diffusori orizzontali posti immediatamente sopra ai faretti. Le loro dimensioni sono vincolate all'esigenza di non occludere l'angolo di visuale della telecamera. L'intera struttura è circondata da una camera oscura, realizzata con pesanti teli neri sorretti da una gabbia metallica. Tale camera oscura mantiene inalterate le condizioni ambientali escludendo contributi luminosi esterni.

3.1.4 Telecamera Andor Zyla 5.5 sCMOS

La prima fotocamera installata è una Andor Zyla 5.5 sCMOS. Registra raffiche di fotografie con una frequenza di 41.3888 Hz, di risoluzione 2560x2160 con un intervallo dinamico di 16 bit (0 – 65536) monocromatico.



Figura 10 - Andor Zyla 5.5 sCMOS e obiettivo Sigma utilizzati per lo studio di dam-break 3D

La scelta della telecamera e il suo settaggio sono naturalmente di fondamentale importanza per la buona riuscita degli esperimenti. Studi precedenti a questa tesi, come la “Progettazione e verifica di un light-box per lo studio sperimentale di onde di dam-break” di Guerra, P. [9], e la “Metodi per la valutazione del rischio a valle delle dighe regionali: confronto tra i metodi in uso e semplificati” di Costa P. [10] hanno consentito di individuare le migliori condizioni per l'esercizio della camera.

In questa sede ci si limita quindi a descrivere le caratteristiche ed i settaggi, senza entrare nel merito di come tali configurazioni siano state raggiunte.

La fotocamera, prodotta dalla Andor, è il modello Zyla 5.5. Offre combinazioni di basso rumore e alta frequenza di acquisizione di altissimo livello.

Il sensore utilizzato è di tipo sCMOS, con una griglia di 2560 x 2160 pixel (circa 5.5 megapixel), in formato APS-C da 16.6 x 14.0 mm.

L'utilizzo della tipologia sCMOS consente di lavorare con frequenze di acquisizione e registrazione dati sensibilmente più elevate rispetto alla tipologia CCD, la quale, solo se portata ai massimi livelli, riesce a reggere il passo in termini di qualità (rumore nell'immagine). Viste tuttavia le necessità di ottenere, prima di tutto, immagini con un alto frame-rate, il sensore sCMOS risulta più confacente alle nostre necessità.

A livello tecnico, la differenza principale tra i due risiede nella sede in cui viene convertito lo stimolo luminoso in potenziale elettrico. Nella tipologia CCD, la conversione del livello di luce in dato digitale avviene necessariamente all'esterno del sensore ad opera di un chip dedicato, nel sCMOS la conversione avviene direttamente all'interno del chip/sensore, in cui ogni fotodiodo ha il proprio amplificatore e convertitore A/D.

Le differenze esistenti tra i parametri dei convertitori e amplificatori presenti per ogni singolo fotodiodo nel sCMOS, anche se minimali, sono responsabili della minor qualità eventualmente riscontrabile rispetto al singolo chip dedicato (esterno) per i CCD.

Al netto di tutto ciò, gli svantaggi del CCD rispetto al sCMOS sono i maggiori costi di produzione, una maggiore lentezza di lavoro, il maggiore ingombro e un maggior consumo di energia.

Inoltre, come evidenziato nella scheda tecnica della camera, il suo sensore sCMOS offre prestazioni elevatissime in termini di rumore minimo registrato, "superiori a qualsiasi CCD". [11].

Per quanto riguarda i tempi di esposizione, la Zyla 5.5 offre la possibilità di eseguire gli scatti secondo la consueta modalità Rolling Shutter, in cui le righe di pixel vengono esposte allo stimolo luminoso in maniera sequenziale lungo una finestra temporale (ristrettissima, certo, ma esistente e misurabile), e secondo la modalità Global Shutter, in cui invece l'intero sensore viene esposto alla luce nel medesimo istante.

Indagando in maniera più approfondita, la modalità di Rolling Shutter essenzialmente significa che le righe adiacenti del sensore sono esposte in tempi assoluti leggermente differenti, via via che l'onda di esposizione e poi quella di readout spaziano ogni metà del sensore.

Alla massima frequenza di readout (560 MHz), questo slittamento temporale ammonta, riga per riga, a 10 μ s. Il meccanismo è descritto in Figura 11. Il funzionamento prevede che, all'inizio di un'esposizione, l'onda di apertura parte dal centro e percorre le due metà del sensore, facendo passare ogni riga da un 'keep clean state', in cui tutta la carica elettrica è tenuta lontana dai pixel in una struttura dedicata interna al sensore, ad un 'exposing state' in cui la luce induce una carica registrata in ogni pixel secondo le consuete modalità della fotografia digitale.

Al termine dell'esposizione, l'onda di readout attraversa nuovamente il sensore, trasferendo, riga per riga, la carica elettrica dal pixel al suo nodo dedicato. Il tempo di esposizione di ogni riga è lo stesso, ma come si intuisce, ciascuna riga registra un istante leggermente differente. Il ritardo totale, pari a metà sensore, vale 10 ms.

Per le nostre applicazioni, l'effetto più importante di questo ritardo è la distorsione spaziale che ne può conseguire. La distorsione sarà maggiore nei casi in cui oggetti di grandi dimensioni si muovono con una frequenza differente da quella di acquisizione.

Un ulteriore importante effetto è dovuto al ritardo stesso: le differenti regioni dell'immagine non sono correlate nel tempo tra di loro, ma la foto, di fatto, descrive entro il suo spazio un'evoluzione spaziale. Nel nostro caso, in cui si va a indagare un'onda in movimento senza punti di riferimento cui ancorarsi, è una condizione da evitare, se possibile.

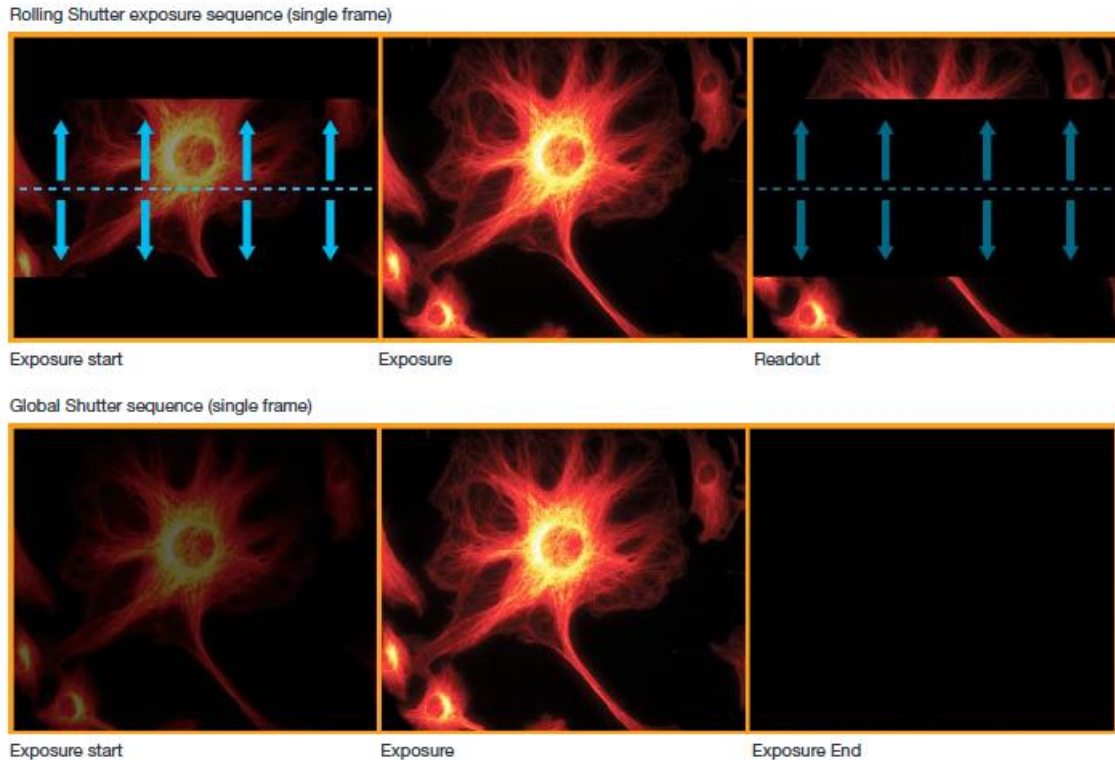


Figura 11 – Dimostrazione semplificate delle modalità Rolling e Shutter. Immagine di cortesia dal sito della Oxford Instruments, sezione dedicata a Rolling e Global shutter, Learning Center. Autore Andor.

La modalità di Global Shutter, invece, rende possibili acquisizioni del tipo “freeze frame”. Tutti i pixel, infatti, sono esposti simultaneamente, permettendo di catturare oggetti e fenomeni in rapido movimento o rapido cambiamento, senza le deformazioni spaziali e gli offset temporali descritti nel rolling shutter (attenzione: la deformazione radiale e tangenziale continua ad esistere, e non è funzione di queste modalità di acquisizione).

Il comportamento del global shutter del sensore sCMOS della Zyla 5.5 è di fatto simile a quello di un interline CCD: prima dell'esposizione, tutti i pixel sono mantenuti nel 'keep clean state', per poi venire esposti simultaneamente. Durante l'esposizione, ogni pixel raccoglie fotoni e accumula carica, per poi trasferire, contemporaneamente a tutti gli altri, il potenziale elettrico nel nodo di readout.

A causa del maggior rumore subito da ogni pixel, vengono eseguite delle operazioni aggiuntive di readout, che permettono tuttavia di abbattere il problema. Il rumore di lettura nel caso del global shutter varia, in base alla scheda della camera, tra 2.3 e^- e 2.6 e^- , mentre nel rolling si raggiunge il minimo, compreso tra 1 e 1.3 e^- .

Entrambe le modalità, rolling e global, sono congeniate in maniera da performare una modalità di continua sovrapposizione tra onde di esposizione di readout. Ciò si traduce in perfetta efficienza riguardo le risoluzioni temporali e l'efficienza di raccolta dei fotoni. La modalità global, tuttavia, sfrutta meglio l'informazione in quanto non ha il tempo morto dovuto al passaggio dell'onda di readout.

Ultima nota, il massimo frame-rate possibile nel global risulta dimezzato rispetto al rolling.

Descrizione ed immagine tratte dal sito della Oxford Instruments, sezione Learning Center/Asset/Rolling and Global Shutter, autore Andor [12].

Al netto delle differenze, il global shutter risulta essere più congeniale ai nostri scopi, e viene perciò adottato. Dalle valutazioni effettuate, infatti, il frame-rate massimo disponibile in modalità global è comunque più che sufficiente, e i vantaggi offerti dalla minor distorsione e

dalla perfetta acquisizione di oggetti in movimento vengono preferiti ad una velocità di acquisizione superiore, ma meno corretta.

L'obiettivo applicato alla camera è stato scelto in base a due fattori, come spiegato nel lavoro di Costa, P. [10].

“Su di essa è stato montato, attraverso un adattatore, un obiettivo, questo è stato scelto in base a due fattori: l'apertura del diaframma deve poter essere comandata meccanicamente dall'obiettivo, e questo non succede nei modelli più nuovi in cui l'apertura del diaframma è comandata dal corpo macchina. Il secondo requisito cercato è stata una lunghezza focale tale per cui si abbia un buon compromesso tra area inquadrata e distorsione dell'immagine, si definisce lunghezza focale infatti la distanza tra il sensore e il centro ottico della lente; all'aumentare di questa, diminuisce l'angolo di inquadratura ma anche le deformazioni. Si è scelto, in definitiva un obiettivo Sigma 18-35, in cui i due numeri indicano proprio il range di variazione della lunghezza focale; durante gli esperimenti la distanza focale sarà sempre mantenuta al minimo cioè 18 mm. Con questo tipo di obiettivo è possibile inquadrare solo una parte del piano in particolare un rettangolo di dimensioni 2.6 x 2.2 metri circa.”

Il posizionamento della camera, sempre facendo riferimento a Costa, P, [10] è così architettato:

“Al fine di posizionare la telecamera sul portale, è stato realizzato un supporto orientabile; la macchina, lateralmente ha 4 fori in cui si inseriscono delle viti fotografiche con la filettatura da un quarto di pollice; con dei distanziatori di legno costruiti su misura, è stata collegata la camera a due profili a L d'alluminio, i profilati sono stati forati e fissati a loro volta a una tavoletta. Infine la tavoletta è stata collegata al portale attraverso un apposito snodo che permette un certo range di rotazioni”.

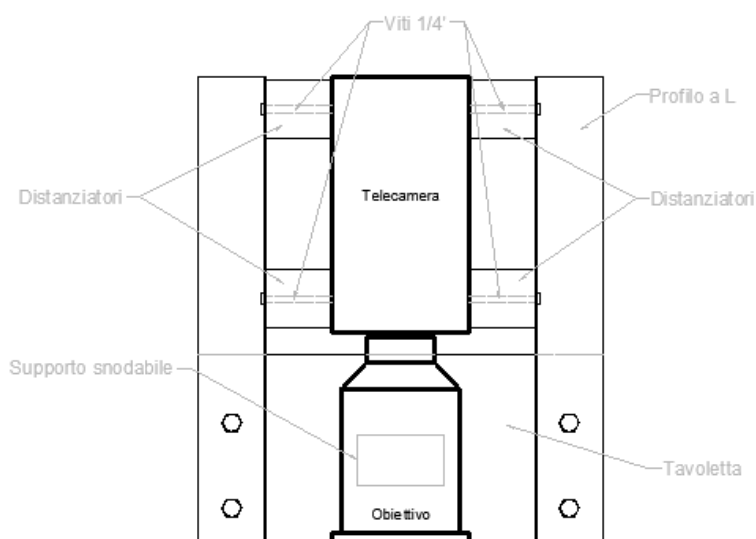


Figura 12 – Immagine di cortesia dalla tesi di Costa, P. Set up della camera Zyla 5.5

Ricapitolando, la camera Zyla 5.5 viene utilizzata con la massima frequenza di readout (560 MHz), in modalità Global Shutter.

Il tempo di esposizione vale 0.004038 s, mentre il frame-rate totale vale 41.3888 Hz (0.024 s tra un'immagine e l'altra).

I fotogrammi sono registrati con valori di rumore elettronico negligibili, producendo immagini a 2560x2160 pixel in scala di grigi a 16 bit (65.536 valori).

Ultimo, ma non per importanza, il sistema di allocazione e registrazione dati, che è stato progettato in modo da sostenere la produzione di informazione elevatissima (ogni immagine pesa, al termine dell'elaborazione, quasi 11 Mb), tramite allocazione in uno spazio dedicato dei file intermedi in formato .sif.

Questi, utilizzando lo stesso software di controllo adottato per controllare la macchina durante gli scatti, (Andor Solis for Imaging: VSC-00271), vengono successivamente convertiti in file .tif senza perdita di informazione.

3.1.5 Telecamera Nikon DSLR D810

La seconda fotocamera installata è una Nikon DSLR D810 che monta un obiettivo AF-S Nikkor 24-120 mm f/4G ED. Registra video a 60 fps a 1080p (1920x1080) con un intervallo dinamico di 8 bit (0 – 256) per ognuno dei tre canali cromatici (RGB). Per tutte le acquisizioni è stato utilizzato un rapporto focale f/4, ISO 200 e temperatura 3000 K.

La telecamera Nikon non verrà trattata ulteriormente in questa sede, in quanto non utilizzata per il campo di altezze. Il campo di velocità, invece, indagato nello stesso periodo di elaborazione di questa tesi da Buzzerio A., viene tracciato con la Nikon DSLR.



Figura 13 - Nikon DSLR D810 e obiettivo Nikkor utilizzata per lo studio di dam-break 3D

3.1.6 Spettrometro Spectromaster-C700 Sekonic

Lo spettrometro è risultato essere un elemento indispensabile per risolvere le criticità legate alla determinazione del campo di altezze. Sono state infatti necessarie misure dello spettro elettromagnetico, in quanto la legge che governa il fenomeno indagato (6.1) va considerata per ogni singola lunghezza d'onda in maniera separata.

Lo spettrometro Sekonic SpectroMaster C-700 è in grado di acquisire informazione da scenari in movimento e fermi, da multipli tipi di sorgenti luminose. Equipaggia un sensore CMOS, che è in grado di individuare le proprietà dello spettro con la precisione del nanometro.

Esso fornisce in output immagini .jpeg recanti l'informazione grafica della forma dello spettro, oltre che un file .xlsx contenente tutte le informazioni relative all'illuminotecnica, tra cui temperatura di colore e luminanza.

Purtroppo, trattandosi di uno strumento dedicato al mondo della fotografia professionale, non è concepito per effettuare rapidi burst di misurazioni, come sarebbe servito ai nostri scopi. Cionondimeno, è stato utilizzato per effettuare misure di acqua ferma a diversi battenti, allo scopo di determinare le variazioni di forma e di valore dello spettro elettromagnetico visibile.

La taratura dello strumento è automatica: ad ogni nuova accensione, è richiesta una dark calibration, performata in autonomia dallo strumento, dopo che l'operatore abbia girato una ghiera che oscura il sensore agli stimoli luminosi esterni.



Figura 14 – Lo spettrometro Spectromaster-C700 utilizzato nelle misurazioni. Immagine di cortesia dal sito Sekonic

3.1.7 Sonde Balluff (BUS W18M1-XA-07/035-S92G)

Le sonde utilizzate sono misuratori ad ultrasuoni che non richiedono contatto con l'oggetto da misurare. Esse misurano la distanza tramite variazione del potenziale elettrico registrato, offrendo in output un segnale analogico proporzionale alla distanza metrica rilevata.

Applicando un programma di scrittura codici e gestione di strumentazione elettronica (LabView nel nostro caso), è possibile effettuare la conversione dal dato elettrico a quello metrico.

La prima installazione e taratura delle sonde è stata effettuata in una fase precedente a questa tesi. Le sonde in utilizzo sono 12, installate secondo uno schema 3 x 4 entro un telaio in alluminio, che permette di sospenderle al di sopra del serbatoio di monte, affinché misurino, durante l'esperimento, l'abbassamento della superficie libera dell'acqua che man mano effluisce sul piano.

In Figura 15 è presentato l'estratto della scheda tecnica per il modello di sonde da noi impiegato.

Dalla stessa, si estraggono le specifiche salienti:

- Range di misurazione compreso tra 120 e 1300 mm: la sonda ha un angolo cieco entro i primi cm
- Precisione di ripetibilità ± 0.15 % FS
- Risoluzione < 0.069 mm

Inoltre, l'apertura dell'angolo di misura delle sonde, sempre indicato in Figura 15, implica che il dato che esse riprendono è sì puntuale, ma implicitamente basato su tutti i valori di altezza che rientrano entro il cono. Per i nostri scopi, la superficie acquisita dalla sonda, ovviamente variabile con l'altezza, tende ad essere un cerchio di diametro con valori compresi tra 10 e 20 cm per distanze dai 15 ai 30 cm.

Ciò rende le sonde adatte a misurare l'abbassamento entro il serbatoio, dato che la superficie libera, al netto delle onde riflesse che si generano, tende ad essere uniforme, ma non sul piano di valle, in quanto l'onda, oltre ad essere molto bassa, presenta una variabilità spaziale notevole, che varia molto repentinamente.

Si era pensato infatti, a valle dei calcoli per il campo di altezze (capitolo 6), di applicare le sonde anche a valle per avere una misura puntuale dell'evento, da confrontare con la modellazione pixel per pixel.

Purtroppo, l'evidenza sperimentale ha portato ad abbandonare questa strada.

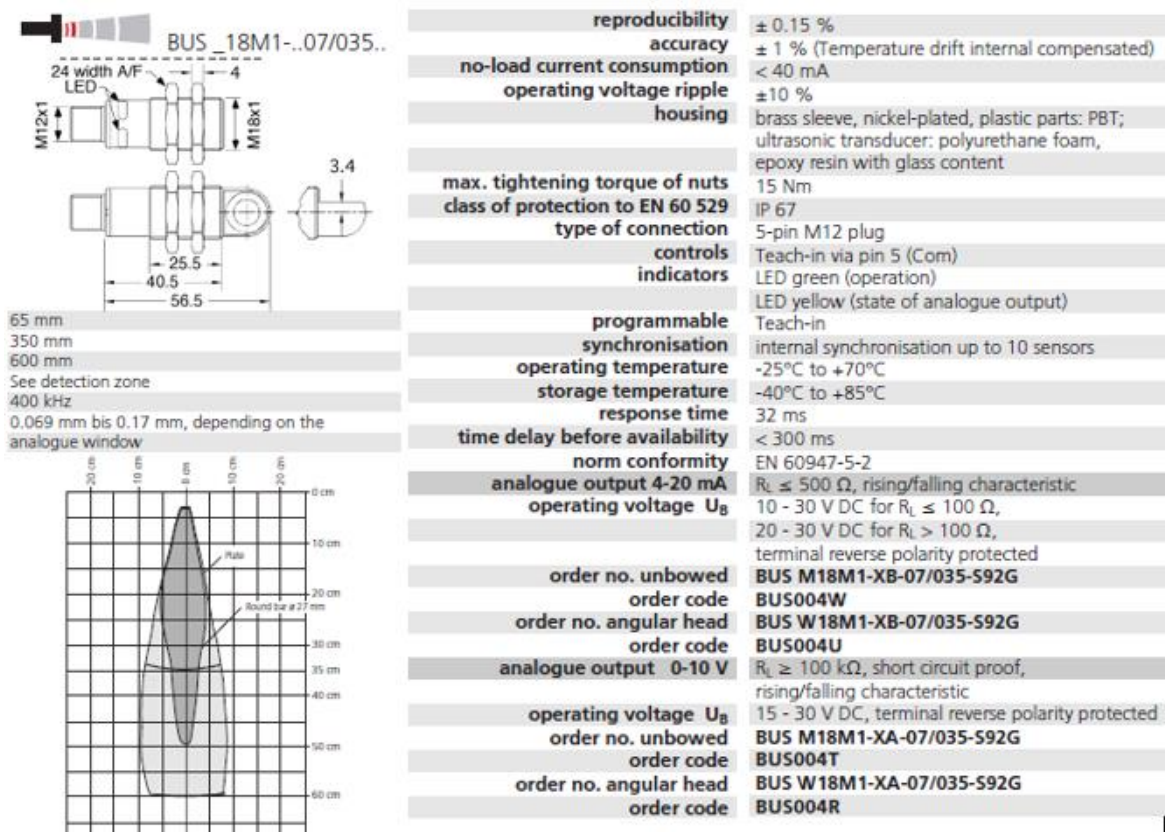


Figura 15 – Scheda tecnica delle sonde Balluff mod 07/035 utilizzate per le misure. Immagine di cortesia dal manuale Balluff – Ultrasonic Sensors

3.1.8 Piano di valle e macroscabrezze

Il piano di valle è supportato da un telaio in legno. La superficie è rivestita con uno strato di pvc bianco, con spessore 3 mm: esso garantisce impermeabilità alla struttura, oltre che il colore bianco necessario a diffondere la luce dei fari, ed a creare contrasto con l'acqua rossa che vi si espande durante gli esperimenti.

La rugosità di questa superficie è stata oggetto di indagine di tesi precedenti a questa qui presentata, mediante accurata analisi spaziale. Alla vista, si presenta come un rivestimento uniforme, solcato da minime rugosità puntuali.

Il coefficiente di scabrezza di Manning è stato stimato essere pari a 0.016.

Per effettuare le prove con macroscabrezze, il piano viene equipaggiato con numerosi pannelli di vetro sintetico bianco, debolmente lucido, di dimensioni 1 x 0.5 m, fino a ricoprirne l'intera superficie.

Si presta attenzione all'installazione nei pressi della breccia: i pannelli sono infatti spessi circa 5 mm, lo scalino che determinano rispetto alla quota del serbatoio di monte viene colmato e addolcito con applicazione di mastice.

Su ogni pannello sono stati installati dei piccoli cilindri metallici (alluminio), di diametro esterno 6 mm e altezza 50 mm. La loro superficie è grigia chiara, opaca.

Distribuiti secondo una geometria uniforme, in maglie quadrate da 50x50 mm e 100x100 mm per due differenti batterie di pannelli, vanno a costituire le macroscabrezze equivalenti alla vegetazione, più o meno densa, che può ricoprire i versanti interessati dall'onda di dam break.

Si noti che non sono intesi essere macroscabrezze nel senso tecnico del termine: per esse non viene individuata una scabrezza equivalente in sabbia funzione della loro forma e disposizione, ma intendono invece rappresentare la vegetazione più o meno presente. In tal senso, con riguardo ai rapporti di scala del modello, essi vengono semplicemente gestiti secondo la scala geometrica (scala delle lunghezze).

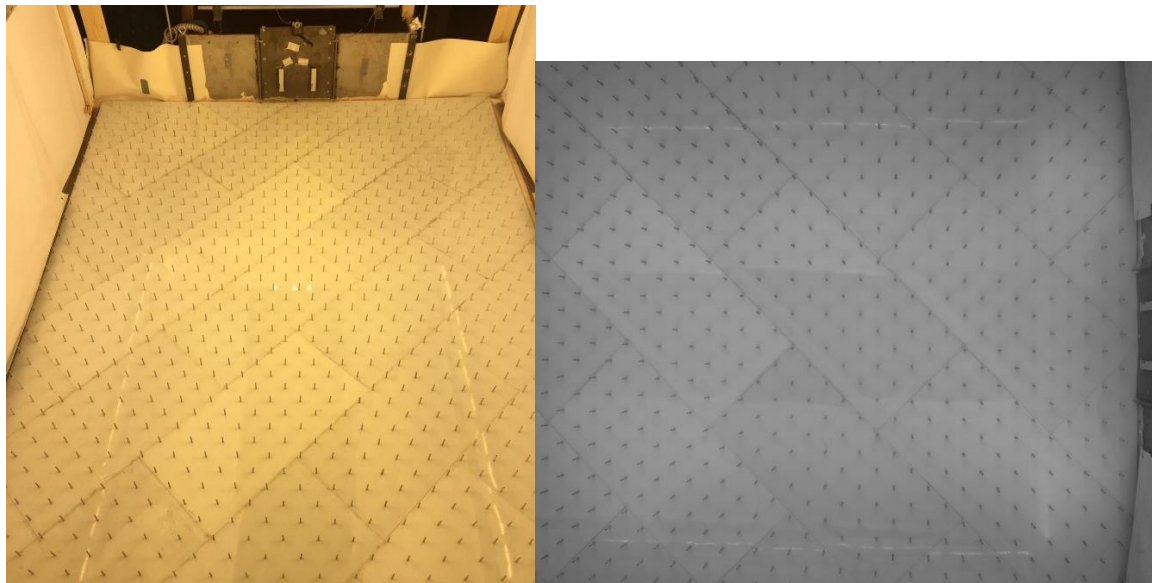


Figura 16 – Esempio di macroscabrezze applicate sui pannelli in vetro sintetico, poste in loco prima dell'esperimento. In particolare, si tratta della configurazione 10x10 cm con angolo di 45° rispetto all'asse della breccia

3.2 Descrizione della procedura di esecuzione dell'esperimento

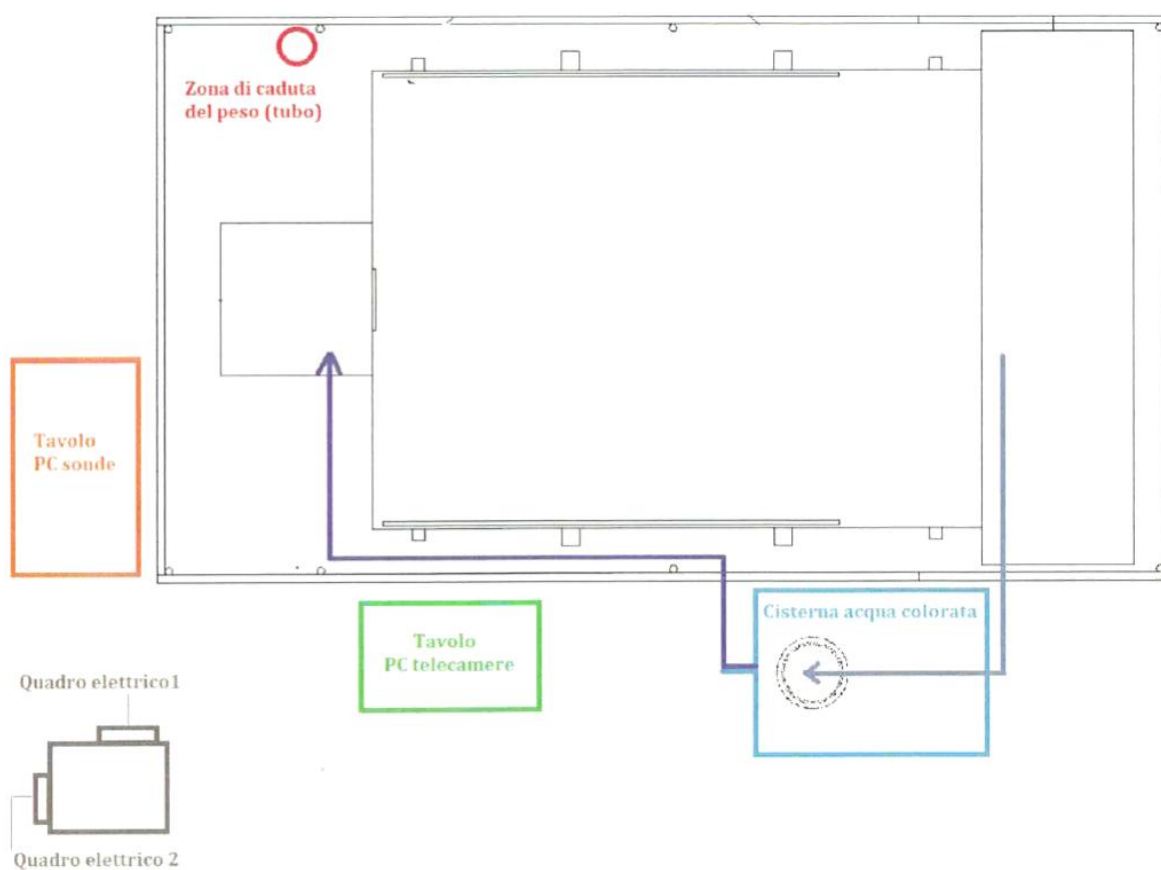


Figura 17 - Descrizione in pianta dell'installazione

1. Verifica della corretta connessione tra il serbatoio di monte e il piano di valle.

Si accerta che permanga la continuità idraulica tra le due parti (sigillare eventuali discontinuità con mastice per botti).

2. Posizionamento dello scarico e verifica della taratura degli ancoraggi

Si controlla che, nella parte di valle, il pvc di rivestimento del piano sia fissato alla barra trasversale con almeno sei morsetti in modo da formare una piccola conca al disotto del livello del piano. Si rimuove la pompa da utilizzare per lo svuotamento della conca e la si riposiziona solo a termine dell'esperimento.

3. Verifica del corretto collegamento di tutte le parti elettroniche ai rispettivi quadri

Si accerta che il "quadro elettrico 1" sia libero: ad esso si collega esclusivamente i cavi di alimentazione delle 3 elettrocalamite (2 per la tenuta idraulica della paratoia e 1 per l'ancoraggio del peso per l'apertura istantanea della paratoia) ed eventualmente il cavo del faretto di servizio per l'illuminazione della zona del serbatoio. Tutte le altre strumentazioni si collegano al "quadro elettrico 2".

4. Accensione delle luci

Si collegano i faretti di illuminazione dell'area di misura alla presa industriale 220V (blu) presente sul "quadro elettrico 2" e si aziona l'interruttore corrispondente alla suddetta presa.

5. Accensione e verifica degli strumenti di misura

a. Sonde

Ci si accerta del corretto funzionamento delle sonde p.es. monitorando anche la fase di riempimento del serbatoio. Il PC di controllo delle sonde si trova nella zona retrostante il serbatoio al di fuori della zona oscurata.

b. Telecamera Zyla

Ci si accerta del corretto funzionamento della telecamera eseguendo una live view. Il pc è posizionato sullo stesso portale su cui è fissata la telecamera. Il resto dell'hardware è sul "tavolo PC telecamere". L'alimentazione della telecamera avviene mediante la ciabatta fissata al medesimo portale: ci si accerta che sia collegata.

c. Fotocamera Nikon

Ci si accerta del corretto funzionamento della fotocamera eseguendo una live view. Il pc è posizionato sul "tavolo PC telecamere". L'alimentazione della fotocamera avviene mediante la ciabatta fissata al medesimo portale: ci si accerta che sia collegata.

6. Preparazione della paratoia e del serbatoio

Dopo l'esecuzione di un esperimento, la paratoia si trova nella configurazione illustrata in Figura 1.8.a: tutte le elettrocalamite scollegate, paratoia alzata fino al blocco di fine corsa e peso abbassato nell'apposita colonna di caduta. Per eseguire qualsiasi attività inerente alla paratoia, occorre scollegare la paratoia dal trefolo che la vincola al peso (Figura 1.8.b) eliminando il golfare dalla piattina di ancoraggio. Per preparare un nuovo esperimento si collegano le 2 elettrocalamite poste sulla paratoia. Ci si assicura che le calamite siano ben fissate alla parete del serbatoio in modo da rendere la guarnizione quanto più possibile aderente alla zona della breccia. Impermeabilizzare i bordi della breccia con mastice da botte (Figura 1.8.b). Si solleva il peso fino a riportarlo in prossimità dell'elettrocalamita posta alla sommità della colonna di caduta avvalendosi dell'apposita cima di recupero. Salendo sulla scala di servizio posta sulla sinistra idraulica del piano, si fissa il peso facendo passare la barra di ancoraggio di sicurezza (Figura 1.7) nell'anello saldato alla sommità del peso stesso e la si appoggia al bordo della colonna in modo da impedire la caduta del peso all'interno della stessa. Si ricollega la paratoia al trefolo fissando il golfare all'apposita piattina (Figura 1.8.c).

7. Riempimento del serbatoio e verifica della tenuta idraulica

Si verifica che il rubinetto di scarico del serbatoio (posto al di sotto dello stesso) sia chiuso. Si verifica che le sonde siano posizionate alla distanza opportuna dal fondo del serbatoio in funzione dell'altezza d'acqua con cui si vuole eseguire l'esperimento e tenendo presente che le sonde Balluff devono trovarsi sempre ad almeno 6.5 cm dalla superficie libera. Si riempie il serbatoio utilizzando l'acqua contenuta nella cisterna azionando l'apposita pompa. Si monitorano le fasi di riempimento assicurandosi che non vi siano perdite. Si collega al "quadro elettrico 1" la calamita di supporto al peso per l'apertura istantanea della paratoia. Salendo sulla scala di servizio posta sulla sinistra idraulica del piano, si fa aderire il peso alla calamita assicurandosi che venga sorretto dalla stessa. Si elimina la barra di sicurezza (Figura 1.8.d).

8. Esecuzione della prova

Per eseguire la prova si svolgono in rapida successione le seguenti azioni:

- a. si avvia l'acquisizione delle immagini dalla telecamera Andor Zyla (tenendo presente che c'è un ritardo di alcuni secondi prima che l'acquisizione inizi realmente);
- b. si avvia l'acquisizione della raffica di fotogrammi (o video) sulla fotocamera Nikon circa 3 s dopo l'avvio di Zyla;
- c. simultaneamente al punto "b" si apre la paratoia scollegando l'interruttore del "quadro elettrico 1".

9. Ripristino delle condizioni iniziali

Utilizzando l'apposita pompa da 12V, si pompa l'acqua utilizzata direttamente dal piano (utilizzando l'apposita conca creata a valle) nella cisterna di stoccaggio. Si asciuga il piano e il serbatoio con l'apposita spatola tira acqua per evitare depositi di colorante. Per salire sul piano

o nel serbatoio durante questa fase, si utilizza appositi stivali assicurandosi che le suole siano lavate e prive di corpi estranei.

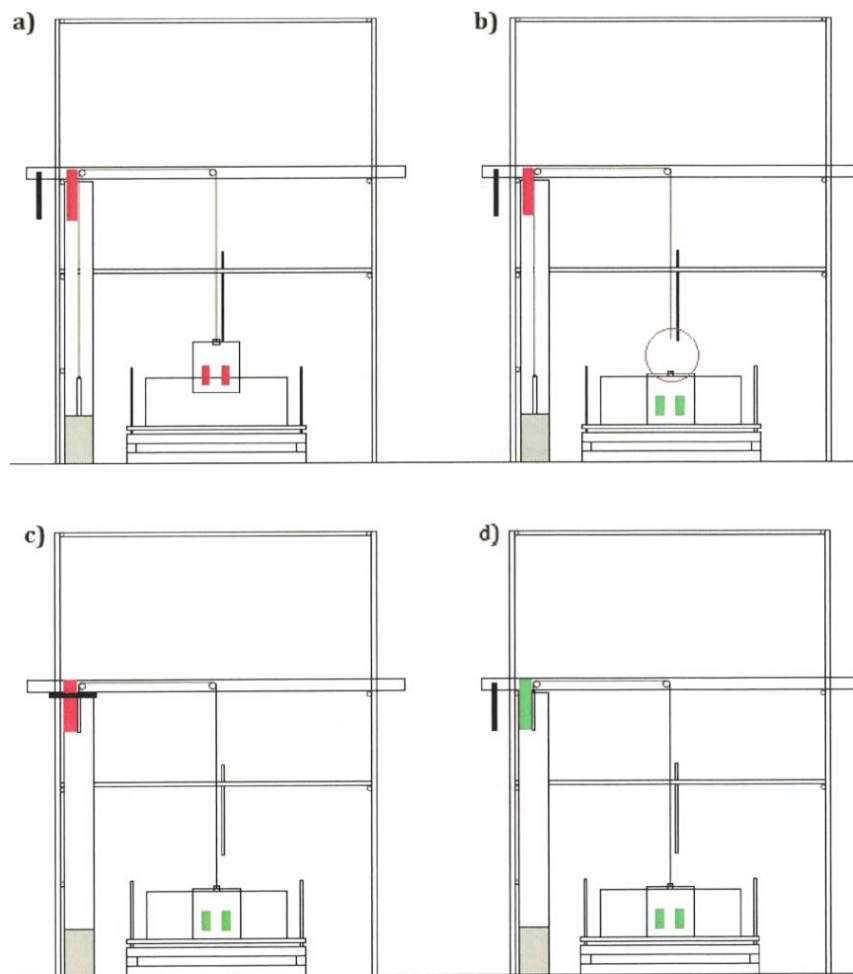
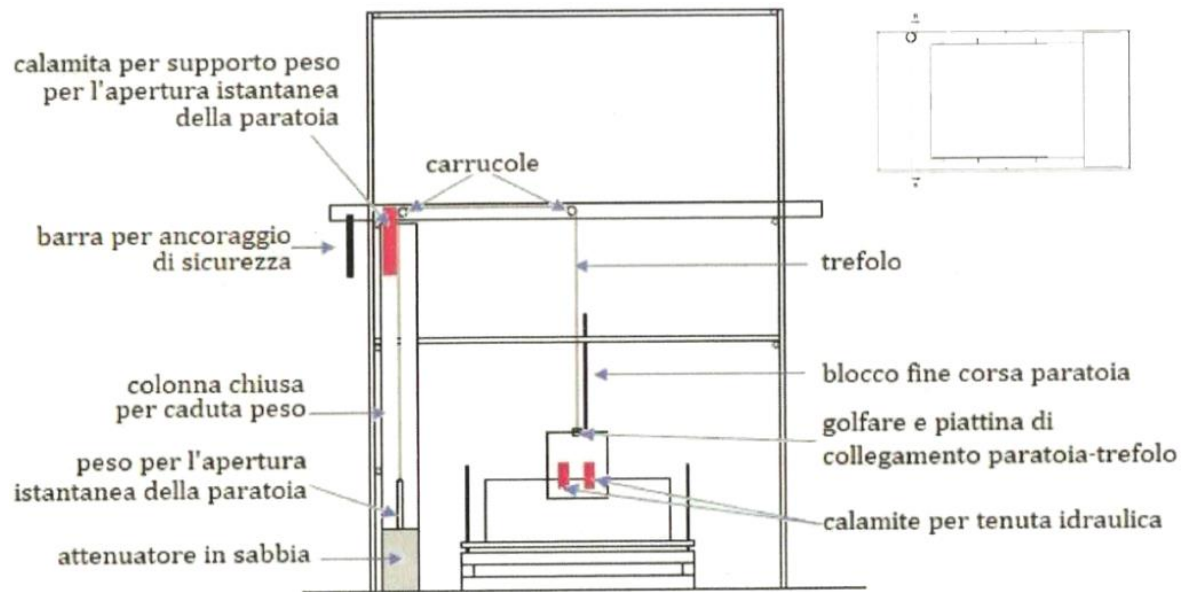


Figura 18 – Descrizione delle 4 fasi di messa in sicurezza

3.3 Similitudine dei modelli idraulici

La similitudine è un concetto utilizzato in ambito ingegneristico, grazie al quale si descrive un sistema reale tramite un modello fisico in scala rispetto al primo. Affinché modello e sistema siano considerati simili, e quindi i risultati possano essere trasposti dall'uno all'altro, occorre che vi sia similitudine geometrica e meccanica.

Mentre la geometria del modello può essere facilmente scalata, altre quantità, come la pressione, la velocità, e la natura del fluido, non sono immediatamente scalabili. La similitudine meccanica viene raggiunta solo se viene rispettata l'invariabilità del valore di alcuni raggruppamenti di grandezze che descrivono il fenomeno in esame.

Tali raggruppamenti di grandezze, adimensionali, vengono individuati tramite un preciso teorema, detto di Buckingham o del Pi Greco, che viene di seguito enunciato.

3.3.1 Teorema Pi greco

Si consideri la relazione

$$y_0 = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3-1)$$

fra le grandezze $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ che caratterizzano un dato fenomeno (indicate come variabili indipendenti) e una grandezza y che interessa individuare (variabile dipendente). Si noti innanzitutto che la relazione tra le grandezze considerate non è funzione, nella sostanza, del sistema di riferimento e/o misura adottata.

Tra le variabili indipendenti, per sistemi definiti da sole grandezze meccaniche (come quelli dell'idraulica), possono essere sempre individuate tre grandezze linearmente indipendenti, ossia atte a rappresentare una terna di grandezze base (siano x_1, x_2, x_3) in cui far confluire tutte le altre.

Si può, secondo il teorema, sempre scrivere la seguente:

$$x_i = [x_1]^\alpha [x_2]^\beta [x_3]^\gamma \text{ con } i = 1, \dots, n \quad (3-2)$$

Ossia esprimere le dimensioni di ogni grandezza indipendente come prodotto delle tre di base. Da qui, possono essere quindi nuovamente definite tutte le grandezze di interesse

$$\Pi_i = \frac{x_i}{x_1^\alpha x_2^\beta x_3^\gamma} \text{ con } i = 1, \dots, n \quad (3-3)$$

Che risultano essere adimensionali. Va da sé che l'adimensionalizzazione delle tre grandezze adottate come terna di base porta come risultato il valore 1, per cui si scrive

$$\Pi_0 = f(1, 1, 1, \Pi_4, \Pi_5, \dots, \Pi_n) \quad (3-4)$$

Si osserva che la dipendenza della grandezza di interesse è stata ridotta in numero di 3 variabili indipendenti, essendo 3 il numero di grandezze fondamentali individuate.

Il Teorema Π permette quindi di ridurre il numero di variabili da controllare, indipendentemente dalla forma matematica assunta dalle funzioni y_0 e Π_0 , e di individuare quei raggruppamenti linearmente indipendenti tra loro che vengono utilizzati nella scienza dei modelli.

In questo modo è possibile studiare un fenomeno, come per esempio la sedimentazione del trasporto solido in un canale monodimensionale, con un solo grafico dipendente da due grandezze identificate nel numero di Reynolds e nel coefficiente di drag). Senza questa accortezza si sarebbero dovuti realizzare praticamente infiniti grafici uno per ogni diametro delle particelle, per il peso delle stesse, per ogni viscosità del fluido ecc.

3.3.2 Modelli a Froude costante e rapporti di scala

I raggruppamenti linearmente indipendenti più noti nelle applicazioni idrauliche risultano essere il numero di Reynolds e il numero di Froude, entrambi, ovviamente, adimensionali.

Il numero di Reynolds nasce come rapporto tra le forze inerziali e quelle viscosi che intervengono nel caso studio.

$$Re = \frac{\rho \cdot u_m \cdot d}{\mu} \quad [-] \quad (3-5)$$

Con

- ρ densità dell'acqua (0.998 g/cm^3 a 20° Celsius) [kg/m^3]
- u_m velocità media del fluido [m/s]
- d dimensione caratteristica [m]
- μ viscosità dinamica dell'acqua ($8.94 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ a 20° Celsius) [$\text{N} \cdot \text{s/m}^2$]

Esso, come noto, descrive la tipologia di moto in cui si trova il fluido: laminare, di transizione, turbolento, turbolento completamente sviluppato. Condizione imprescindibile per soddisfare le condizioni di similitudine è che il fluido si trovi nella stessa tipologia di moto sia nel modello, sia nel sistema reale.

Per moti in pressione, il valore soglia del moto laminare è 2000. Dalla letteratura scientifica (Open-Channel Hydraulics, Chow V. T., University of Illinois, 1988 [13]) per il pelo libero tale soglia scende a 500, come si evince dalla seguente:

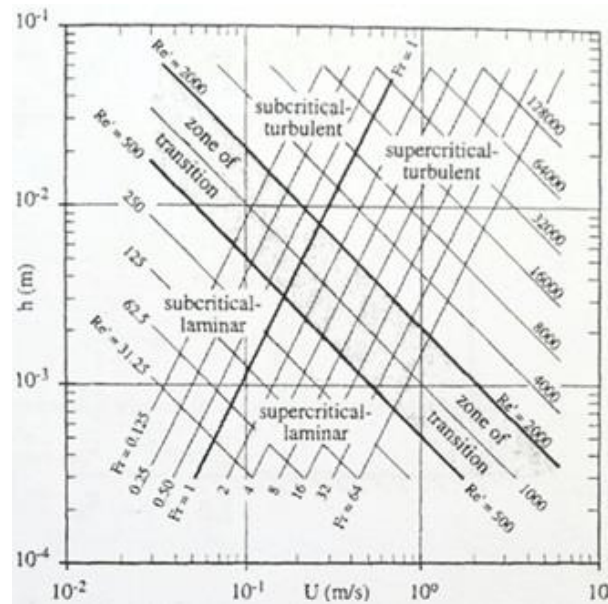


Figura 19 – I quattro regimi del flusso per canali a pelo libero

Il numero di Froude nasce invece come rapporto tra le forze inerziali e quelle gravitazionali che intervengono nel caso studio.

$$Fr = \frac{u_m}{\sqrt{g \cdot d}} \quad [-]$$

(3-6)

Con

u_m velocità media del fluido	[m/s]
g costante di gravità (9.81 m/s ²)	[m/s ²]
d dimensione caratteristica	[m]

È il parametro cui far riferimento in tutti quei fenomeni in cui predominano le trasformazioni da energia potenziale in cinetica, e assume un ruolo tanto più importante tanto più Reynolds diventa elevato (e perde di significato).

In entrambi i casi, occorre individuare una lunghezza caratteristica, particolare del caso in esame. Nel nostro caso si parla dello studio della propagazione dell'onda di dam break su un versante aperto, per il quale valgono le equazioni shallow water dell'idrodinamica. Queste equazioni sono ottenute dalle generali di Navier Stokes, con l'aggiunta dell'ipotesi che il battente d'acqua sia di un ordine inferiore rispetto alle dimensioni del corpo idrico in direzione longitudinale e trasversale.

Questo è vero tanto per i fiumi (in particolar modo quelli con un alveo molto largo, in cui i fenomeni di correnti e ricircolo trasversali non possono essere ignorati) quanto per il nostro specifico caso studio. L'onda infatti, pur risultando notevolmente diversa da un fiume (dimensioni e velocità nel piano xy del tutto paragonabili, avanzamento su fondo asciutto), risponde all'ipotesi principale di acque basse.

In tal senso, allora, la dimensione caratteristica da applicare nei numeri sopra descritti è il battente idrico, o altezza d'acqua.

La similitudine dei modelli fisici con il sistema reale viene garantita tramite la conservazione di almeno uno dei due numeri.

La creazione di un modello a Froude costante, nel nostro caso, risulta essere più vantaggiosa rispetto ad uno con Reynolds costante, questo in base a:

- la natura del fenomeno studiato: l'onda di dam break appartiene, per quanto sia particolare, alla categoria degli open channel flow, nei quali lo studio del numero di Froude è cruciale. Un modello a controllo di Reynolds infatti obbligherebbe a calcolare il numero di Froude ovunque nel flusso, allo scopo di assicurarsi che esso mantenga le stesse condizioni di criticità (sub o super) del sistema reale. Sempre correlato al tipo di fenomeno, occorre ricordare che il dam break ha sicuramente valori di Reynolds estremamente elevati, per cui l'effetto della viscosità è naturalmente molto basso
- i rapporti di scala che vengono individuati imponendo la conservazione del numero in questione

Con un modello a Froude costante, quindi, si ovvia soprattutto al primo problema, ossia a quello di assicurarsi che la corrente sia veloce o lenta nel modello così come nel sistema reale.

Riguardo la determinazione dei fattori di scala, per Froude costante si procede come di seguito.

Si pone l'uguaglianza del numero tra sistema reale (indicato con pedice "o", originale) e modello (indicato con pedice "m"), assumendo inoltre di utilizzare l'acqua e non un altro liquido; motivo per cui densità e viscosità avranno valore costante nelle trasformazioni qui descritte.

$$\left(\frac{\bar{u}_m}{\sqrt{g \cdot y}} \right)_{originale} = \left(\frac{\bar{u}_m}{\sqrt{g \cdot y}} \right)_{modello} \rightarrow \left(\frac{\bar{u}_m^2}{g \cdot y} \right)_o = \left(\frac{\bar{u}_m^2}{g \cdot y} \right)_m \quad (3-7)$$

Con la lettera λ si indica la scala geometrica adottata. Scale λ con il pedice (ad esempio λ_u) indicano il rapporto di scala per una specifica grandezza (la velocità u in questo caso); esso viene individuato a partire dal rapporto di scala geometrico.

$$\lambda_u^2 = \frac{(\bar{u}_m^2)_m}{(\bar{u}_m^2)_o} = \frac{y_m \cdot g}{y_o \cdot g} = \lambda \rightarrow \lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (3-8)$$

Con la stessa filosofia vengono individuati gli altri rapporti di scala principali:

$$\text{scala dei tempi} \quad \lambda_u = \frac{\lambda}{\lambda_t} \rightarrow \lambda_t = \lambda \cdot \lambda_u^{-1} = \lambda \cdot \lambda^{-\frac{1}{2}} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (3-9)$$

$$\text{scala delle forze} \quad \lambda_F = \frac{F_m}{F_o} = \frac{(\rho \cdot \Omega \cdot \bar{u}_m^2)_m}{(\rho \cdot \Omega \cdot \bar{u}_m^2)_o} = \lambda^2 \cdot \lambda_u^2 = \lambda^2 \cdot \lambda^1 = \lambda^3 \quad (3-10)$$

avendo ottenuto la definizione di forza a partire dal teorema dell'impulso.

In sintesi, per un modello a Froude costante si hanno i seguenti rapporti principali

$$\text{Modello a Froude costante: } \begin{cases} \lambda \\ \lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}} \\ \lambda_t = \lambda^{\frac{1}{2}} \\ \lambda_F = \lambda^3 \end{cases} \quad (3-11)$$

Il che comporta che, per un'ipotetica scala geometrica $\lambda = 1:10$, si avrebbe $\lambda_u = 0.31$ e $\lambda_F = 0.001$. Ciò risulta essere un notevole vantaggio, perché fenomeni che in scala reale risulterebbero distruttivi, alla scala del laboratorio risultano molto più gestibili.

Per contro, un modello a Reynolds costante offre rapporti di scala meno vantaggiosi, come si evince dalla seguente

$$\text{Modello a Reynolds costante: } \begin{cases} \lambda \\ \lambda_u = \lambda^{-1} \\ \lambda_t = \lambda^2 \\ \lambda_F = 1 \end{cases} \quad (3-12)$$

Si ricorda ancora una volta il principale vantaggio di mantenere Froude costante: non occorre assicurarsi in quale regime (se subcritico o supercritico) si trovi la generica sezione dell'onda, in quanto si è già implicitamente sicuri che il Froude corrisponda tra modello e sistema reale.

Un modello che rispetti sia Reynolds sia Froude, sebbene sarebbe ottimo dal punto di vista della similitudine, risulta essere di difficile attuazione in quanto il rapporto di viscosità del materiale da utilizzarsi cambia. Nel modello, andrebbe usato un fluido con viscosità pari a 31.62 volte quella dell'acqua.

Il modello realizzato nel laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino è un modello a Froude costante. Gli ulteriori rapporti di scala, per scabrezze, portate e lo stesso numero di Reynolds, sono estratti dalle loro stesse definizioni o dall'imporre la conservazione delle leggi idrodinamiche adottate tra modello e sistema reale.

Le equazioni adottate sono quelle basate sull'ipotesi shallow water applicata alle equazioni di Navier Stokes.

In questa tesi viene infatti studiata l'onda di dam break laddove essa si spande sul territorio, venendo quindi a contatto con la scabrezza equivalente che questo esibisce; qui, essa ha la scala del tirante fortemente inferiore rispetto alle dimensioni longitudinale e trasversale, il che permette l'ipotesi shallow water. Più a monte, nella zona immediatamente prospiciente la breccia, l'onda ha invece carattere fortemente tridimensionale, e per essa non può valere questa approssimazione delle leggi di N.S.

Tale frazione dell'onda, che indichiamo come vena effluente, non è oggetto di indagine di questa tesi.

Le ipotesi shallow water sono semplificazioni per cui il tirante Y (dimensione verticale) è di un ordine inferiore rispetto alle dimensioni dominanti dell'onda (longitudinale e trasversale, indicate con L) e dei valori di velocità mediati sulla verticale stessa (tra la quota del fondo η e il pelo libero h).

$$\frac{Y}{L} = \delta \ll 1 \quad \bar{U} = \frac{1}{Y} \int_{\eta}^h U(x, y, z, t) dz \quad \bar{V} = \frac{1}{Y} \int_{\eta}^h V(x, y, z, t) dz$$

(3-13)

Queste ipotesi di partenza, applicate alle equazioni di Navier Stokes, unitamente alle condizioni al contorno cinematiche sul pelo libero e al fondo, comportano l'ottenimento, per successive trasformazioni, delle equazioni shallow water 2D:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \nabla V &= -g \nabla Y - \frac{r}{Y} \vec{V} |\vec{V}| \\ \frac{\partial Y}{\partial t} + \nabla(\vec{V} Y) &= 0 \end{aligned}$$

(3-14)

Rispettivamente equazioni vettoriali della conservazione della quantità di moto e equazione di continuità.

Il coefficiente r è un parametro di scabrezza strettamente legato a quello utilizzato nel caso monodimensionale. Imponendo la conservazione dell'equazione monodimensionale di S. Venant, si vuole soddisfare l'analisi dimensionale del coefficiente che comprende il parametro di scabrezza X (coefficiente di Chezy).

$$\frac{u_o^2}{\chi^2 \cdot R_o} = \frac{\lambda_u^2}{\lambda_X^2 \cdot \lambda} = 1$$

$$\text{essendo, per } Fr \text{ costante,} \quad \lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}}, \text{ si ha } \frac{\lambda_u^2}{\lambda_X^2 \cdot \lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_X^2 \cdot \lambda} = 1 \rightarrow \lambda_X = 1$$

(3-15)

Valendo poi la nota relazione tra il coefficiente di Chezy X e il coefficiente di Gauckler-Strickler c di seguito indicata, si ottiene, per il reciproco di quest'ultimo, ossia il numero di Manning n :

$$X = c \cdot R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{1}{6}}$$

$$1 = \lambda_X = \frac{X_m}{X_o} = \frac{c_m \cdot R_m^{\frac{1}{6}}}{c_o \cdot R_o^{\frac{1}{6}}} = \lambda_c \cdot \lambda^{\frac{1}{6}} \rightarrow \lambda_c = \lambda^{-\frac{1}{6}} \rightarrow \lambda_n = \lambda^{\frac{1}{6}}$$

(3-16)

Imponendo il semplice rapporto di scala per il numero di Reynolds invece, e sfruttando il rapporto di scala per le velocità definito dalla conservazione del numero di Froude, si ottiene:

$$\lambda_{Re} = \frac{u_m \cdot v \cdot d_m}{u_o \cdot v \cdot d_o} = \lambda^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda = \lambda^{\frac{3}{2}}$$

(3-17)

Per le portate si ottiene infine

$$\lambda_Q = \lambda_u \cdot \lambda_{\Omega} = \lambda^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda^2 = \lambda^{\frac{5}{2}}$$

(3-18)

3.3.3 Rapporti di scala del modello realizzato

Come indicato nell'introduzione, il modello ha lo scopo di simulare la rottura improvvisa degli invasi di piccola e media dimensione presenti sul territorio.

Le dimensioni geometriche salienti cui ci si deve riferire rientrano nei seguenti range, ottenuti da applicazioni del progetto RESBA, su un totale di 101 invasi:

- Carico totale: da un minimo di 0.95 metri ad un massimo di 10 metri, valore esibito da 3 invasi. Il 73% degli invasi, in ogni caso, presenta altezze dello sbarramento superiori ai 6 m.
- Volumi: da un minimo di 44 m³ ad un massimo di 92000 m³. Il volume medio vale 5887 m³.

Per quanto riguarda il territorio a valle, il carattere primitivo di questo modello ha portato a definirlo come un piano orizzontale in entrambe le direzioni. La pendenza verrà infatti aggiunta in periodi successivi, così come qualsivoglia vincolo laterale. L'onda è quindi libera di espandersi su un piano perfettamente uguale e orizzontale in tutte le direzioni.

Date queste condizioni al contorno, in fase progettuale (precedente all'inizio di questo lavoro di tesi) è stato deciso di adottare una scala geometrica di riferimento pari a 1:20.

Non essendovi infatti sbarramenti specifici cui riferirsi, ma solo una categoria piuttosto vasta, la scelta della scala è stata subordinata soprattutto alle disponibilità del laboratorio di idraulica.

Si è così scelto di costruire un serbatoio di monte di dimensioni 1.5 x 1.5 m in pianta e con una capacità di carico di 0.45 m, prismatico.

Il piano di valle misura 3 x 4 m, con la dimensione minore all'interfaccia con il serbatoio prismatico. Esso è costituito da una membrana impermeabile in pvc, che da misurazioni offre un coefficiente di Manning pari a $n = 0.016$.

La breccia è simulata da un'apertura fissa a tutta altezza, ma larga solo 3 cm.

Le macrocabrezze sono costituite da cilindri in alluminio di diametro 6 mm e altezza 5 cm.

Confrontando tali valori di riferimento con il range dei sistemi reali, si ottengono i seguenti rapporti di scala geometrica.

Carico totale [m]			Volume invasato [m ³]		
sistema reale	modello	scala	sistema reale	modello	scala
3	0.2	1:15	500	0.45	1:10
10	0.4	1:25	92.000	0.9	1:47

Tabella 1 – Rapporti di scala per le categorie di invasi studiate

Laddove 0.2 e 0.4 m di carico rappresentano gli estremi del range entro cui viene fatto variare il battente negli esperimenti. Si noti che, per ottenere la scala dei volumi, occorre ovviamente estrarre la radice cubica dal risultato del rapporto tra sistema reale e modello.

Va tenuto in conto che il confronto di volumi ha un valore inferiore rispetto a quello tra carichi, visto che lo studio del dam-break interesserà i primissimi istanti di tempo, entro i quali il

volume varia in maniera non elevata. Ricordiamo, infatti, che si parla di portate effluenti pari a circa 10 l/s nel caso con maggior battente, contro un volume invasato di 900 litri.

Si osserva come il rapporto di scala scelto, 1:20, rientri entro il range calcolato in Tabella 1 – Rapporti di scala per le categorie di invasi studiate.

3.3.3.1 Parametri per l'attendibilità del modello

Trattandosi di un modello a Froude costante, occorre indagare il valore del numero di Reynolds, allo scopo di verificare che il regime di moto nel modello sia lo stesso del sistema reale.

Prendendo a prestito i risultati ottenuti durante la trattazione, si può calcolare un numero di Reynolds rappresentativo dell'onda. Non si indaga infatti la vena effluente, in quanto la forma della breccia, così costituita per le ragioni indicate in apertura del capitolo 3, non è rappresentativa di una tipica rottura del corpo diga.

In particolare, assumendo un valor medio di velocità di propagazione del fronte (circa 1.3 m/s) e un valor medio di altezza d'acqua sul piano (circa 0.003 m), si ottiene

$$Re_{modello} = \frac{\rho \cdot u_m \cdot d}{\mu} = 4362 \quad Fr_{modello} = \frac{u}{\sqrt{g \cdot y}} = 7.6 \quad (3-19)$$

Le cui trasposizioni nel sistema reale valgono

$$Re_{originale} = \frac{4362}{\frac{1}{20}^{\frac{3}{2}}} = 390150 \quad Fr_{originale} = 7.6 \quad (3-20)$$

Trattandosi, per il dam break, di un fenomeno a regime turbolento, il valore di Reynolds ottenuto nel modello $Re_{modello} = 4362 > 500$ risulta adeguatamente elevato per garantire la trasferibilità dei risultati tra modello e sistema reale.

Un altro numero cui far riferimento è il numero di Weber, che descrive il rapporto tra le forze d'inerzia e la tensione superficiale in un liquido.

Ricordando che la tensione superficiale dell'acqua è espressa come $\gamma = 0.073 \frac{N}{m}$, il numero di Weber può essere ottenuto come il rapporto dimensionale tra la forza d'inerzia e la forza di tensione superficiale dell'acqua:

$$We = \frac{F_{inerziale}}{F_{tensione\ sup}} = \frac{\rho \cdot l^3 \cdot \frac{l}{t^2}}{\gamma \cdot l} = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot l}{\gamma} \quad (3-21)$$

O alternativamente come prodotto tra il numero di Reynolds e il numero di capillarità, che rappresenta il rapporto tra le forze viscosi e la tensione superficiale in due fluidi non miscibili (o tra fasi liquide e gassose)

$$We = Ca \cdot Re = \frac{\mu \cdot u}{\gamma} \cdot \frac{\rho \cdot u_m \cdot d}{\mu} = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot l}{\gamma} \quad (3-22)$$

Quale che sia la sua formulazione, per le nostre applicazioni il numero di Weber indica quanto le forze di tensione superficiale influenzino il moto globale. Da osservazioni dirette dei video, infatti, si vede un fronte relativamente arrotondato.

Se il numero di Weber del modello risulta essere almeno pari a 10, ciò significa che le forze di tensione superficiale sono di almeno un ordine inferiore rispetto a quelle inerziali, e perciò trascurabili. Utilizzando gli stessi valori adottati per il numero di Reynolds si ottiene

$$We = \frac{1000 \cdot 1.3^2 \cdot 0.003}{0.073} = 69.5 \quad (3-23)$$

Si può quindi escludere un ruolo rilevante della tensione superficiale sulla forma del fronte d'onda (a meno dell'instabilità prodotta dai cosiddetti "fingers", protrusioni del fronte che si osservano durante l'evoluzione del fenomeno, trattati in 5.1.1.3).

3.4 Campagna di esperimenti condotti

Sono state condotte numerose sperimentazioni, in un periodo di tempo che copre 9 mesi circa. Di queste, alcune si sono rivelate inutilizzabili, per motivi riconducibili per lo più alla categoria degli errori umani (nella preparazione o durante l'esecuzione) e talvolta per eventi imprevisti. Tra questi ultimi, figurano ad esempio malfunzionamenti del meccanismo di sollevamento della paratia, o ostruzioni lungo il percorso della vena che hanno irrimediabilmente rovinato l'esito della prova.

Al netto di tutte le prove condotte, ne vengono presentate in questa tesi 24, condotte con tre differenti battenti d'acqua nel serbatoio di monte, e con un totale di cinque diverse configurazioni di scabrezze del piano a valle. Sono di seguito indicate insieme alla data di esecuzione dell'esperimento.

PROVE CONDOTTE			
<i>battente</i>	<i>scabrezza</i>	<i>quantità</i>	<i>periodo di esecuzione</i>
30 cm	liscio	6	tra maggio 2018 e febbraio 2019
30 cm	5x5 45°	2	settembre 2018
30 cm	5x5 0°	2	settembre 2018
30 cm	10x10 45°	2	ottobre 2018
30 cm	10x10 0°	2	ottobre 2018
20 cm	liscio	5	novembre 2018
40 cm	liscio	5	gennaio 2018

Tabella 2 – Elenco delle prove condotte. In totale, si dispone di 24 esperienze.

Laddove si intende:

- Per fondo liscio, il piano orizzontale in pvc bianco descritto in 3.1.8.
- Per 5x5 o 10x10, le dimensioni delle maglie quadrate descritte dalla distribuzione uniforme di macroscabrezze. Tali ostacoli, si ricorda, sono sottili cilindri in alluminio, con diametro 6 mm e altezza 5 cm, installati su pannelli bianchi di dimensioni 50x100 cm. E' sempre presente una fila di macroscabrezze poste frontalmente alla breccia, quindi esattamente davanti all'onda che si viene a creare.
- Per 45° o 0° l'angolazione del lato lungo dei pannelli rispetto alla direzione principale di deflusso dell'onda (longitudinale all'asse della breccia). Una differente angolazione indica una diversa larghezza degli spazi liberi offerti frontalmente al flusso.

Nota: viene indicato il periodo di esecuzione per porre l'attenzione sulla variabilità che esso può avere avuto sugli esperimenti. Un fattore esterno come la variabilità annuale della temperatura ambiente, che si riflette su un diverso comportamento dell'acqua, non è ad esempio stato preso in considerazione. Ciò può aver avuto un ruolo nel determinare le differenze che vengono individuate tra esperimenti condotti in periodi notevolmente diversi, come è accaduto ad esempio per la categoria dei dam breaks lisci a 30 cm.

Le esperienze con macroscabrezze, pur essendo otto in totale, sono presenti solamente in numero di due per ogni categoria; ciò dipende dalla laboriosità della realizzazione del piano equipaggiato con macroscabrezze. La garanzia di ripetibilità degli esperimenti verrà effettuata quindi sulle esperienze a fondo liscio, che dispongono di una casistica più nutrita. Conservandosi tutte le variabili in gioco tra esperienze a fondo liscio e scabro (a parte ovviamente il fondo), è lecito trasferire i risultati di ripetibilità tra queste categorie.

Insieme alle 24 prove su citate, che rappresentano il dato su cui lavorare, sono state condotte numerose altre esperienze relative alla taratura della strumentazione o utili a misure di spettrometria (vedi capitolo 6).

4 Calibrazione della strumentazione

La calibrazione della strumentazione rappresenta naturalmente un passo importante in qualsiasi attività di misura, tanto più in questa, che ha carattere sperimentale.

Conoscere le possibilità degli strumenti utilizzati, e gli errori che essi commettono è cruciale.

Verrà indagata in particolare l'attività di calibrazione della fotocamera Andor Zyla 5.5 (3.1.4), che ha richiesto l'adozione, tramite il tool Computer Vision di Matlab, di una tipologia di calibrazione con camera singola.

Spesso, infatti, vengono utilizzate tecniche di stereometria, in cui almeno due camere, possibilmente di posizioni assolute e relative note, concorrono alla formazione di un'immagine tridimensionale del soggetto.

L'approccio stereometrico è stato giudicato inadatto a descrivere l'evoluzione di un oggetto in rapido movimento come l'onda di dam break, per cui si è optato per una singola, potente, camera.

4.1 Calibrazione telecamera Andor Zyla 5.5 sCMOS

La calibrazione di una camera è un processo complesso, appartenente all'ambito della Computer Vision, che permette di determinare, per una data fotocamera, i parametri estrinseci, intrinseci e di distorsione.

I parametri estrinseci sono quelli che permettono di trasferire un generico punto, individuato sul fotogramma acquisito, dal sistema di riferimento proprio della camera al sistema di riferimento in cui la camera, come oggetto materiale, si trova. Permettono cioè di passare dalle coordinate con cui l'oggetto è espresso nell'immagine (i pixel) alle coordinate più consone appartenenti al sistema metrico (metri, centimetri o millimetri che siano) con cui tale oggetto è posizionato nel mondo materiale. Si faccia attenzione che per ottenere il rapporto pixel / millimetri occorrono anche i parametri intrinseci: i soli estrinseci regolano la sola rototraslazione nello spazio.

In sostanza cioè, i parametri estrinseci definiscono la posizione della camera nello spazio; ad esempio, a che distanza si trova dalla scena inquadrata.

Nella pratica, i parametri estrinseci sono espressi da un vettore di traslazione e da una matrice di rotazione, di dimensioni rispettivamente 3×1 e 3×3 . La trasformazione per passare dalle coordinate globali a quelle della camera è la seguente:

$$[x_c \ y_c \ z_c] = R \cdot ([x_w \ y_w \ z_w] - T) \quad (4-1)$$

I parametri intrinseci invece descrivono parametri interni alla camera:

- la lunghezza focale utilizzata (espressione dello zoom, e della messa a fuoco)
- le coordinate del punto principale $[c_x \ c_y]$ del fotogramma, ossia l'origine del sistema di riferimento interno alla camera stessa. Tali coordinate rappresentano l'offset dell'origine di questo sistema rispetto all'angolo in alto a sinistra del fotogramma/matrice di punti (pixel)
- la scala dell'immagine, ossia il rapporto che intercorre tra la dimensione del pixel e le dimensioni in coordinate metriche dell'oggetto rappresentato sul piano di messa a fuoco

Si noti che lunghezza focale F e i rapporti di scala s_x e s_y (uno per ogni asse) sono spesso espressi insieme in un unico prodotto, indicato con $f_x = F \cdot s_x$ e $f_y = F \cdot s_y$

I parametri intrinseci sono organizzati in una matrice 3×3 , come segue:

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & 0 \\ s & f_y & 0 \\ c_x & c_y & 1 \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

In cui il parametro s , detto di "skew", vale 0 nell'ipotesi in cui gli assi del sensore siano perfettamente perpendicolari (condizione garantita con la camera Zyla).

Infine, ci sono i parametri k_1 e k_2 di distorsione radiale della camera, che di fatto appartengono alla categoria degli intrinseci. Tali parametri, esprimibili, entro le equazioni appartenenti al modello radiale, come semplici numeri puri, regolano gli aspetti legati alla deformazione dell'immagine acquisita. Tale deformazione è propria, con livelli differenti, di ogni camera.

Parametri intrinseci e di distorsione sono tutti parametri funzione di caratteristiche fisiche della macchina.

4.1.1 Single camera calibration app

La calibrazione è stata effettuata ricorrendo al tool di Computer Vision del software Matlab.

In particolare, si è utilizzata l'applicazione di calibrazione in camera singola (Single Camera Calibrator App [14]).

Le formulazioni ed i processi applicati si basano sul modello proposto da Zhang Z. nel suo articolo "A flexible new technique for Camera Calibration", 2000 [15].

Il modello si basa sull'utilizzo di multiple fotografie (in numero compreso tra 10 e 20) dello stesso soggetto ottenute muovendo la camera nello spazio. In maniera equivalente, le immagini possono essere acquisite spostando il soggetto e lasciando ferma la camera: nel nostro caso, essendo la camera fissata ad un supporto a 3 metri da terra, è stato seguito questo secondo approccio.

Il soggetto ritratto deve essere una scacchiera, i cui quadri, oltre a dover essere perfettamente regolari, devono essere di dimensioni note. Il tool infatti basa la calibrazione sul riconoscimento di alcuni punti (detti in gergo "marker") univocamente ricollegabili in ogni immagine che gli viene sottoposta. In questo caso, gli incroci tra i quadri della scacchiera. Al fine di poter collegare ogni punto con sé stesso in ogni fotogramma (visto che la scacchiera deve essere spostata, ruotata entro e fuori dal piano), occorre che la stessa abbia dimensioni differenti, con un numero dispari di quadri su un lato e pari sull'altro.

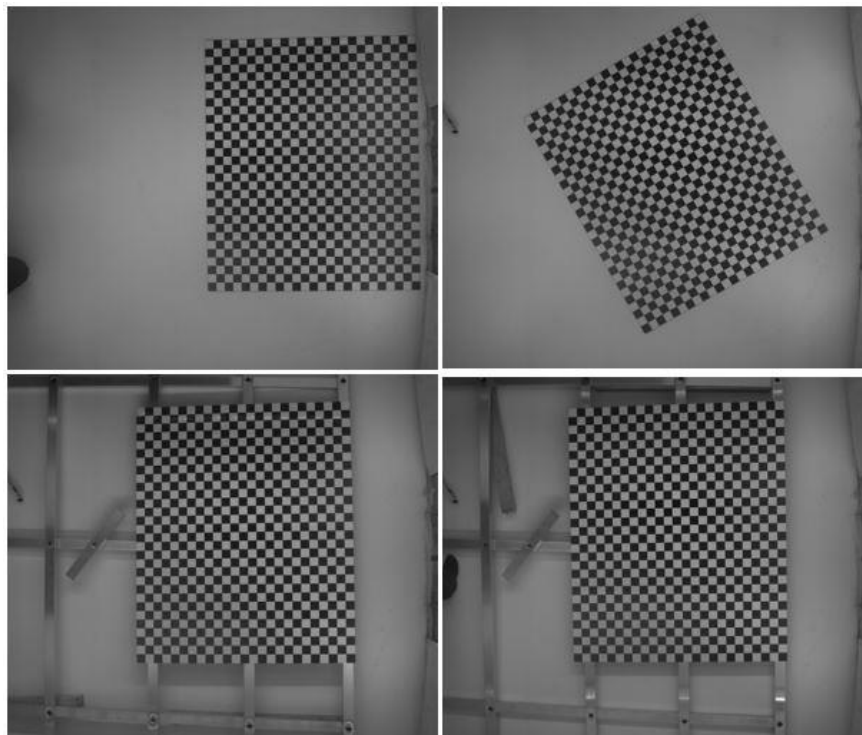


Figura 20 – Alcune delle acquisizioni della camera per effettuare la calibrazione. Si osservi come alcune (circa il 20% del totale) siano state effettuate ponendo la scacchiera fuori dal piano focale, incidente ad esso

Passando al tool l'informazione della reale dimensione dei quadri, esso è in grado di elaborare i parametri intrinseci che regolano il rapporto tra pixel e millimetri, oltre che allocare la camera alla corretta distanza rispetto al piano focale inquadrato.

L'attività di calibrazione è guidata dal tool. L'intervento umano si limita a fornire, appunto, le immagini scattate in maniera corretta, e a scegliere se includere alcuni parametri nei calcoli, in base alle caratteristiche della camera e della scena ripresa. Questi sono:

- il parametro di distorsione radiale, se a 2 o 3 coefficienti (a 3 solo se vengono ripresi campi molto ampi)
- il parametro "skew", legato alla possibilità che gli assi del sensore non siano perpendicolari. Nel nostro caso viene assunto pari a 0 (assi perpendicolari)
- il parametro di distorsione tangenziale, qualora lente e sensore non fossero paralleli (anche qui si sceglie di non computarlo)

Per ogni immagine "i" viene elaborato un indice di affidabilità, basato sugli errori di riproiezione (Reprojection Errors, in alto a destra in Figura 21) basato sulla i-esima matrice di rototraslazione calcolata: le immagini che presentano fattori troppo discordanti possono essere escluse dall'operatore, per poi eseguire nuovamente la calibrazione.

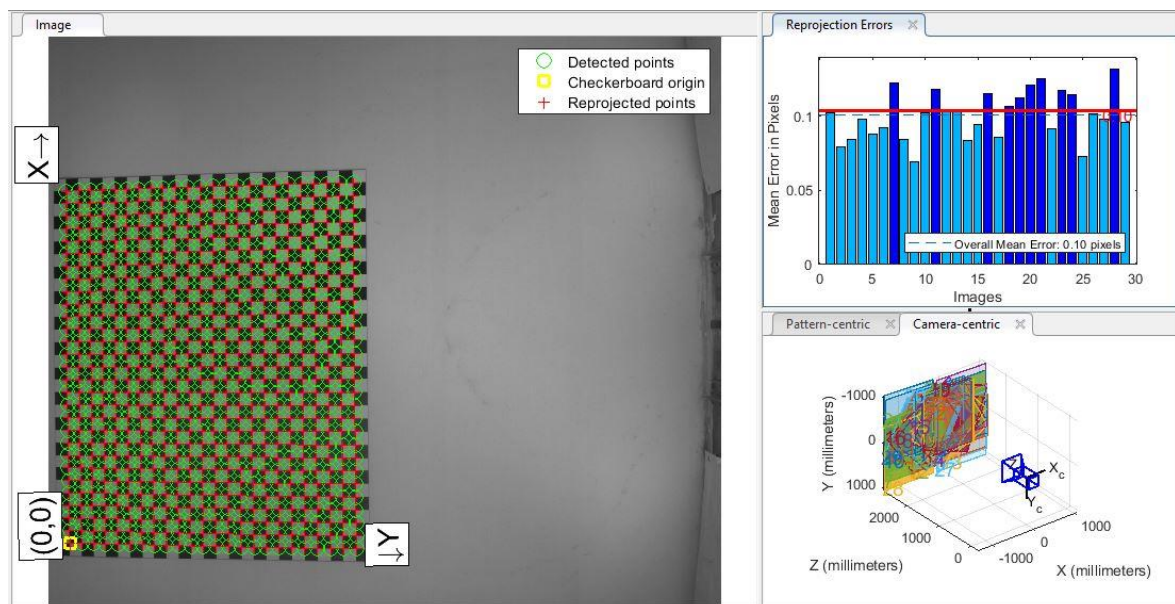


Figura 21 – Schermata del tool Camera Calibrator: in evidenza gli errori di riproiezione, in alto a destra

I parametri di calibrazione possono essere esportati in un oggetto matlab, definito come Camera Parameters. Esso rientra come file di input in molti dei codici appartenenti all'ambito della computer vision, e contiene i parametri intrinseci, estrinseci e distorsione della camera.

4.1.2 Verifica dell'efficacia della calibrazione

La verifica della bontà della calibrazione avviene in due step. In fase di calibrazione stessa, facendo riferimento ai valori stimati di errore forniti dal tool, e a valle dell'operazione, al fine di ottenerne una stima più precisa.

Questo secondo step si basa sul compiere una verifica su un'ulteriore immagine acquisita, non utilizzata in fase di calibrazione, che inquadri una scacchiera il più ampio possibile. Nel nostro caso, 4 scacchiere sono state affiancate per coprire l'intera scena.

L'approccio si basa sul confrontare una scacchiera virtuale di punti, delle stesse dimensioni di quella presente in foto, con i punti individuati sull'immagine, de-distorti e poi rototraslati, ossia trasposti dal sistema di riferimento della camera a quello globale, applicando inoltre la trasformazione px – mm.

A tal fine si utilizza la stringa di comandi di seguito descritta.

Caricata l'immagine, occorre prima di tutto correggere l'errore di distorsione della lente, utilizzando l'apposito "undistortImage":

[J, newOrigin] = undistortImage(I, cameraParams) returns an image, J, containing the input image, I, with lens distortion removed. The function also returns the [x,y] location of the output image origin. The location is set in terms of the input intrinsic coordinates specified in cameraParams.

Utilizzando i parametri di distorsione radiale (corredati di distorsione tangenziale e skew, se presenti) vengono ristabilite le corrette proporzioni in ogni punto della camera. A seconda dell'output scelto ('full', 'same', 'valid') la funzione restituisce anche il vettore rappresentante l'origine dell'immagine de-distorta rispetto a quella sorgente.

Nel nostro caso, si è deciso di utilizzare l'output 'full', portando le immagini dalle dimensioni iniziali 2160x2560 [pixel] a 2217x2625 [pixel], con un offset del sistema di riferimento pari a [34 28].

Ora che l'immagine è stata corretta, si possono individuare i punti appartenenti alla scacchiera, tramite il seguente "detectcheckerboardPoints":

[imagePoints, boardSize] = detectCheckerboardPoints(I) detects a black and white checkerboard of size greater than 4-by-4 squares in a 2-D truecolor or grayscale image. The function returns the detected points and dimensions of the checkerboard.

Il comando è basato sul lavoro di Geiger, A., F. Moosmann, O. Car, and B. Schuster, così come delineato in "Automatic Camera and Range Sensor Calibration using a Single Shot," *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, St. Paul, USA, May 2012. [16].

Le dimensioni della scacchiera così individuata sono utilizzate, insieme all'informazione di dimensione dei quadri, per noi 50 mm, per generare le coordinate dei punti di una scacchiera virtuale, che rappresenta il dato di verità cui fare riferimento. Si utilizza il semplice "generateChekerboardPoints".

I punti individuati (ImagePoints) devono essere confrontati con questo dato di verità. Sono già stati corretti per la distorsione, occorre ora estrarre le informazioni per la rototraslazione.

A tal proposito si utilizza “PointsToWorld”:

worldPoints =pointsToWorld(cameraParams,rotationMatrix,translationVector,imagePoints) returns world points on the X-Y plane, which correspond to the input image points. Points are converted using the input rotation matrix, translation vector, and camera parameters.

La matrice di rotazione ed il vettore di traslazione vanno estratti dall’immagine stessa. Ciò viene eseguito tramite “extrinsics”:

[rotationMatrix,translationVector] = extrinsics(imagePoints,worldPoints,cameraParams) returns the 3-D rotation matrix and the 3-D translation vector to allow you to transform points from the world coordinate to the camera coordinate system.

Infatti l’oggetto cameraParameters contiene in sé le matrici R e T specifiche per ogni immagine di calibrazione. In fase di computazione, ne opera una composizione, ma il dato non può essere estratto: inoltre, utilizzare una di queste matrici comporterebbe un errore ricorsivo, in quanto si utilizzerebbe un dato compreso tra quelli di calibrazione.

Questo è il motivo per cui viene utilizzata un’immagine ulteriore. La matrice di rototraslazione che viene da essa estratta potrà poi essere utilizzata per ogni altra immagine acquisita dalla camera, fermo restando che non varino i parametri di orientamento.

Ciò significa che potranno essere utilizzati questi dati anche per le acquisizioni degli esperimenti, anche se in essi non compare nessuna scacchiera con cui poter computare la rototraslazione.

L’applicazione, al termine, di PointsToWorld permette di ottenere una sovrapposizione della scacchiera virtuale, dato di verità, e dei punti immagine riproiettati nel sistema di riferimento globale (lo stesso della scacchiera virtuale).

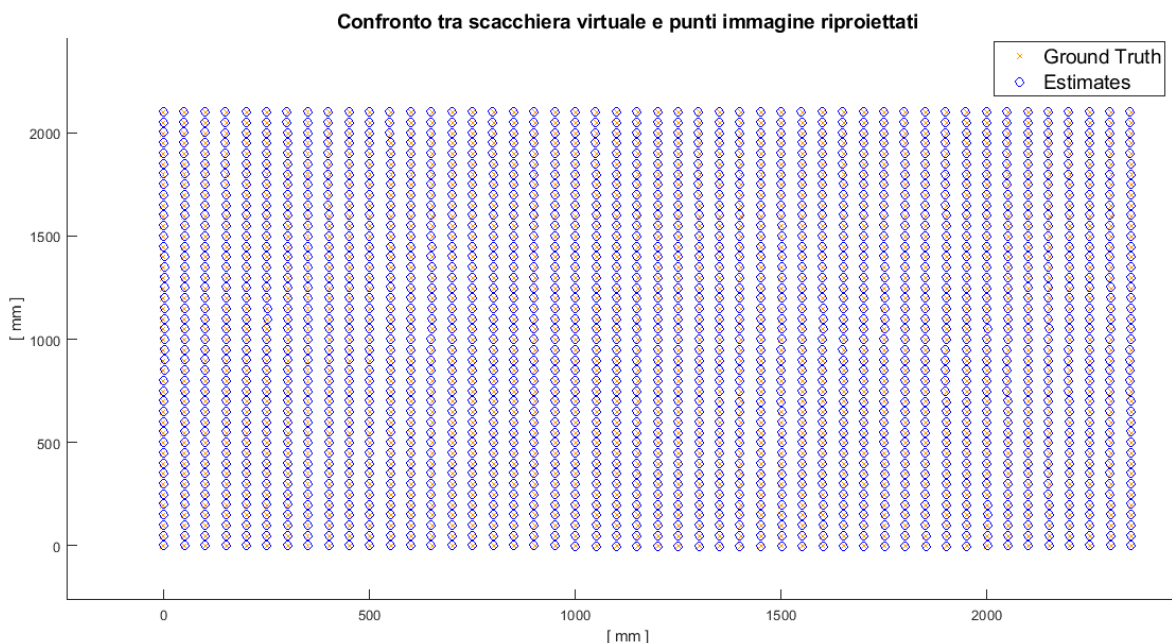


Figura 22 – Verifica della calibrazione tramite proiezione della scacchiera virtuale (dato di verità) e i punti individuati dalla camera e trattati con i parametri di calibrazione

Lo studio dell’errore di calibrazione così condotto ha permesso di individuare la miglior combinazione di immagini di calibrazione in input, così da minimizzare l’errore stesso.

5 Analisi del fronte d'onda

Lo studio delle caratteristiche del fronte d'onda costituisce parte fondante di questa tesi.

Si intende offrire una descrizione del suo profilo in pianta, andando a determinarne tempi di arrivo rispetto alla posizione della breccia e velocità istantanee.

Il tutto con due scopi principali: confrontare i risultati estratti da prove appartenenti a categorie differenti di dam breaks (per battente iniziale, o per condizione di scabrezza a valle), e offrire i numeri per poter effettuare una analisi di ripetibilità degli esperimenti.

L'analisi di ripetibilità, in esperienze di carattere sperimentale, è infatti un passo imprescindibile.

Analisi e confronti verranno effettuati sia in via grafica, sia in via quantitativa; per quest'ultima, si è deciso di utilizzare una metodologia di confronto, descritta nel prossimo sotto capitolo 5.1.2, basata sull'applicazione di un fascio radiale di rette che vanno a suddividere l'onda di dam break in settori circolari, confrontabili tra le varie categorie.

Si riporta per comodità la Tabella 2, che contiene l'elenco delle prove effettuate.

PROVE CONDOTTE			
<i>battente</i>	<i>scabrezza</i>	<i>quantità</i>	<i>periodo di esecuzione</i>
<i>30 cm</i>	<i>liscio</i>	<i>6</i>	<i>tra maggio 2018 e febbraio 2019</i>
<i>30 cm</i>	<i>5x5 45°</i>	<i>2</i>	<i>settembre 2018</i>
<i>30 cm</i>	<i>5x5 0°</i>	<i>2</i>	<i>settembre 2018</i>
<i>30 cm</i>	<i>10x10 45°</i>	<i>2</i>	<i>ottobre 2018</i>
<i>30 cm</i>	<i>10x10 0°</i>	<i>2</i>	<i>ottobre 2018</i>
<i>20 cm</i>	<i>liscio</i>	<i>5</i>	<i>novembre 2018</i>
<i>40 cm</i>	<i>liscio</i>	<i>5</i>	<i>gennaio 2018</i>

Tabella 1 – Elenco delle prove condotte. In totale, si dispone di 24 esperienze.

Nella trattazione che segue, per i sotto capitoli 5.1.3 (Analisi delle caratteristiche del fronte per singolo esperimento) e 5.1.4 (Analisi di ripetibilità e confronto tra prove della stessa categoria), verranno indagati principalmente i dam breaks lisci con 40 cm di battente. Sebbene non siano i più numerosi, essi sono tuttavia stati eseguiti in un ristretto periodo di tempo, e presentano caratteristiche di uniformità che quelli lisci a 30 cm possiedono in misura minore (seppur pienamente soddisfacenti, come verrà dimostrato).

Vengono analizzate, tramite software MATLAB (release R2018b), le immagini ottenute dalla sola telecamera Zyla.

Si ricorda che si tratta di immagini con dimensioni 2160 x 2560 pixel, con un intervallo dinamico di 16 bit (0 – 65536) monocromatico. Per un singolo esperimento sono disponibili centinaia di fotografie (sono stati eseguiti burst da un minimo di 500 shots ad un massimo di 2460, ossia il valore massimo raggiungibile dall'apparato software che accompagna la telecamera).

Il formato digitale di output è stato scelto come TIFF non compresso.

5.1 Analisi del fronte per la categoria a fondo liscio

Si espone di seguito l'analisi per categorie separate, per maggior chiarezza. Soprattutto lo studio delle immagini, infatti, richiede un approccio leggermente differente tra le categorie a fondo liscio e quelle scabre. Nel secondo caso, è stato necessario implementare un passo in più per assicurarsi una corretta identificazione delle caratteristiche importanti delle immagini.

Lo studio è articolato in più paragrafi:

- “Analisi delle immagini”, in cui si affronta la metodologia di estrazione delle informazioni dalle immagini .tiff fornite dalla camera
- “Metodologia di indagine e di confronto: fascio radiale di semirette”, in cui ci si pone il quesito su come confrontare onde dalla forma così variabile e che evolvono in maniera non prevedibile nel tempo
- “Analisi delle caratteristiche del fronte per singolo esperimento”, in cui viene innanzitutto presentata la tipologia di risultati estratti
- “Analisi di ripetibilità e confronto tra prove della stessa categoria”, in cui viene indagato il grado di confidenza di questi esperimenti
- “Confronto tra le categorie”, in cui vengono infine rapportati i valori medi di ogni categoria

Lo stesso iter si ripeterà per le quattro categorie appartenenti alla classe “fondo scabro”.

5.1.1 Analisi delle immagini per la categoria a fondo liscio

L'obiettivo è individuare il fronte d'onda per ciascuna delle centinaia di immagini che costituiscono una singola prova. Il numero preciso di fotografie indagate è funzione della tipologia di dam break, in quanto l'area inquadrata dalla fotocamera rappresenta solo una porzione (maggioritaria, si intende) del piano; in conseguenza di ciò, nel momento in cui il fronte sfugge dall'area di presa della fotocamera, esso non può più, ovviamente, essere tracciato o descritto, e si rende quindi inutile analizzare i frame successivi a questo evento.

È ovvio notare che i dam breaks con basso battente o con piano equipaggiato con le macroscabrezze produrranno fronti più lenti rispetto a quelli lisci con alti battenti, il che determina una forte disparità nel numero di frames indagati per categoria: si va dal massimo dei 350 per la categoria “lisci a 20 cm” ai soli 120 della “lisci a 40 cm”.

Essendo così numerosi i frame da individuare, è imperativo creare una routine che permetta di individuarli in automatico via macchina.

5.1.1.1 Normalizzazione dell'immagine

Il primo passo consiste nell'uniformare il più possibile i dati dei pixel, sia spazialmente nella singola immagine, sia nel tempo tra i vari frame.

Le condizioni di luminosità sul piano infatti, sebbene siano state oggetto di studi precedenti (P. Guerra, D. Poggi e S. Cordero, «Progettazione e verifica di un light box per lo studio sperimentale di onde di dam-break,» 2018) [9], non sono perfettamente uniformi nello spazio (in termini del

valore di illuminamento su una superficie [lux]), complice sicuramente il fatto che la disposizione attuale dei fari non corrisponde a quelle indagate nella tesi citata.

Inoltre, la luminosità varia nel tempo, tra un frame e l'altro, in virtù di un fenomeno non evitabile: il progressivo allagamento dell'ambiente del piano, che ricordiamo essere ricoperto su quasi ogni superficie con teli bianchi opachi (assimilabili peraltro a superfici perfettamente diffondenti). La graduale sostituzione di parte del piano, bianco, con acqua dalle forti tonalità rosse comporta infatti una diminuzione della luminosità totale, fattore che tra l'altro, se in quest'ambito dello studio del fronte rappresenta poco più che un inconveniente, risulta invece meritevole di attenzione (e di taratura di un coefficiente dedicato) in sede di calcolo delle altezze d'acqua.

La soluzione a ciò è stata individuata nell'applicare una normalizzazione alle matrici che costituiscono le immagini, sottraendo pixel per pixel un'immagine detta di "background", e dividendo il risultato nuovamente per la matrice background (pixel per pixel), secondo la seguente:

$$im_{norm} = \frac{back - im_{originale}}{back} \quad (eseguita \text{ pixel per pixel}) \quad (5-1)$$

Con immagine di background si intende una fotografia acquisita negli istanti precedenti il generico esperimento, che ritrae quindi il piano non ancora invaso dall'acqua. Ad ogni esperimento è associata la sua immagine di background, che per convenzione viene scelta, tra le decine di fotogrammi presenti, come la quinta precedente al primo istante in cui la paratia inizia ad alzarsi, segnando l'inizio del dam break. Rimanendo la telecamera immobile durante la ripresa, l'operazione di sottrazione viene applicata a pixel che godono di una corrispondenza biunivoca: lo specifico punto del piano che viene descritto da uno specifico nell'immagine in esame, infatti, viene anche descritto dal corrispondente pixel nell'immagine di background.

In tal modo l'immagine risultante im_{norm} presenta valori compresi tra 0 e 1, con il vantaggio di aver eliminato la variazione spaziale di luminosità.

Sottrarre i valori registrati in questi pixel corrispondenti ha allora due effetti:

- Il già citato annullare l'informazione di variabilità di luminosità nello spazio, in quanto è un contributo presente in entrambi i pixel
- Eliminare il contributo di forme di rumore statico dovute a imperfezioni del piano o sporco su di esso. Più in generale, la sottrazione ha l'effetto di rimuovere completamente l'informazione, qualunque essa sia, nel generico pixel in cui l'acqua ancora non è arrivata, poiché è corretto assumere che il valore ivi registrato sia uguale tra le due foto.

Ciò, in realtà, è sempre meno vero man mano che l'onda si espande, in virtù del fenomeno di diminuzione dell'intensità luminosa prima citato. L'effetto risulta tuttavia trascurabile e verrà rimosso completamente con successive operazioni.

5.1.1.2 Correzione della distorsione

Occorre ora correggere l'immagine dagli effetti di distorsione che avvengono in fase di acquisizione, come illustrato nel sotto capitolo 4.1.

A livello operativo, ciò si traduce nell'utilizzo del comando Matlab "undistortImage", la cui sintassi è di seguito indicata, insieme ad una breve descrizione offerta dal supporto Matlab:

"[J,newOrigin] = undistortImage(I,cameraParams) returns an image, J, containing the input image, I, with lens distortion removed. The function also returns the [x,y] location of the output

image origin. The location is set in terms of the input intrinsic coordinates specified in cameraParams.” [14]

Il comando estrae dunque i parametri intrinseci della camera utilizzata in fase di presa e li utilizza per restituire ad ogni punto del fotogramma in esame le giuste proporzioni, eliminando le aberrazioni che si presentano in forma di distorsione radiale e tangenziale specialmente agli angoli del fotogramma. Dopo questo passaggio, l'immagine presenta le stesse proporzioni in ogni suo punto, costituendo quindi una fedele documentazione dell'oggetto ripreso.

Questa correzione comporta una deformazione dell'immagine output, che da rettangolare assume una forma irregolare, proprio per permettere di “stirare” i punti e garantire le proporzioni.

A questo punto l'immagine è proporzionata ma ancora descritta in pixel. In un momento successivo sarà applicato ai vettori di coordinate da essa estratti il già descritto comando *PointsToWorld* per ottenere una descrizione in coordinate metriche (millimetri), in particolare verrà applicato al vettore *xy* che descriverà i punti appartenenti al fronte.

5.1.1.3 Instabilità del fronte: i “fingers”

Prima di proseguire con la descrizione del metodo di analisi, occorre spendere due parole su un fenomeno di instabilità del fronte che non ci si attendeva. Come esemplificato, ad esempio in Figura 23, si nota subito una nutrita serie di protrusioni che erompono dal fronte d'onda, rendendolo molto irregolare. Esse sembrano essere espressione dell'instabilità del fronte stesso, potenzialmente non direttamente imputabili a variazioni di scabrezza del piano in pvc, né tantomeno alle sue variazioni spaziali – indesiderate, sia chiaro, ma presenti – di quota.

Essi infatti si originano in maniera consistente lungo la direzione principale del flusso e lungo direzioni di 45° o più rispetto alla principale, con aspetti di simmetria che non fanno pensare alle cause sopra indicate.

Invece, essi sono più presenti nelle esperienze a fondo liscio con battente di 30 cm, mentre scompaiono in quelli meno energetici a 20 cm, e risultano molto ridotti in estensione e numero in quelli a 40 cm. Nelle configurazioni scabre, invece, non si presentano.

Come si può notare osservando un video ottenuto dai fotogrammi (grazie al frame-rate di 41.3888 Hz), queste protrusioni (definite col nome evocativo di “fingers”) non seguono l'andamento del resto dell'onda.

Originate tipicamente da un impulso (si osservano più impulsi durante l'esperimento), si allungano fuori dal resto dell'onda per poi esaurire in brevissimo tempo (4 – 5 fotogrammi, ossia circa 0.1 s) la loro energia, finendo per essere completamente o quasi riassorbite.

In un primo momento si è pensato di eliminare questi fingers in fase di elaborazione digitale, ritenendoli espressione di un effetto di scala indesiderato (tensione superficiale, probabilmente). Considerazioni successive, come quelle sopra riportate, hanno fatto propendere per mantenerli come parte integrante dell'onda e dello studio, assegnando loro un ruolo di espressione dell'instabilità del fronte da un punto di vista anche statistico.

A supporto di questa decisione, sta anche il problema di come eliminare tali fingers, nel senso di quanta parte di essi, dei loro basamenti tagliare rispetto alle curvature che identificano un certo fronte minimo dell'onda.

Verrà quindi tenuto conto di essi nella trattazione, ma senza andare ad approfondire le cause che determinano la loro presenza in questo modello, né tantomeno indagare le correlazioni che possono avere con instabilità – del tutto plausibili – dell'onda nel sistema a grandezza reale.

5.1.1.4 Primo approccio: funzione edge

In un primo momento si è pensato di applicare la funzione Matlab “edge”:

“BW = edge(I) returns a binary image BW containing 1s where the function finds edges in the input image I and 0s elsewhere. By default, edge uses the Sobel edge detection method.” [14]

Tale funzione permette di utilizzare diversi algoritmi di computazione per individuare i bordi in un’immagine input; il codice si basa su lavori inerenti la computer vision: Lim, Jae S., *Two-Dimensional Signal and Image Processing*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1990, pp. 478-488. [17], e Parker, James R., *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 23-29. [18]

Tra gli algoritmi proposti, è stato scelto di utilizzare quello basato sul metodo “Canny”, che individua i bordi indagando per massimi locali del gradiente dei valori registrati nell’immagine. Ciò rappresenta una buona scelta per il nostro caso, in quanto il fronte è descritto, nell’immagine, da un gradiente molto forte, visto che si tratta di acqua rossa su fondo bianco.

In particolare, secondo la documentazione Matlab:

“[the Canny method] ... Finds edges by looking for local maxima of the gradient of I. The edge function calculates the gradient using the derivative of a Gaussian filter. This method uses two thresholds to detect strong and weak edges, including weak edges in the output if they are connected to strong edges. By using two thresholds, the Canny method is less likely than the other methods to be fooled by noise, and more likely to detect true weak edges.” [14]

Una volta ottenuta l’immagine binaria BW, da essa possono essere estratti i soli pixel con valore logico “1”, che descrivono il fronte. Ciò si attua con i comandi “find” e “ind2sub” per ottenere, infine, un vettore di coordinate xy (purtroppo disordinato) nel sistema di riferimento della matrice.

Sebbene promettente sulla carta, il metodo edge si è rivelato di difficile implementazione per il nostro specifico caso. Il rumore eccessivo, forse imputabile in parte al valore degli ISO della camera (necessario a causa dell’elevato frame-rate), nonché il fatto che il metodo opera pixel per pixel, ed esige quindi forti differenze entro piccole regioni, rendeva imprecisa l’individuazione del fronte, oltre ad offrire come fronti anche – raramente – parti del piano bianco o – più spesso – creste interne all’onda. Inoltre, come ci si aspettava, anche la paratia veniva individuata come un forte edge.

Il problema della paratia (e dei teli) è stato superato applicando maschere fisse all’immagine.

Il rumore è stato attenuato applicando dei valori di soglia all’intera immagine normalizzata. Trovandosi tutti i valori compresi nel range 0-1 (uno dei vantaggi della normalizzazione), ed essendo che quelli relativi al piano devono esibire valori prossimi allo 0 (frutto della sottrazione del background), è sufficiente applicare una condizione di soglia minima ad ogni pixel, che se non soddisfatta, impone di portare a 0 il valore del pixel in questione.

$$im(im < 0.10) = 0$$

(5-2)

Laddove il valore 0.1 costituisce solo un esempio del valor medio adottato.

Purtroppo, anche con questi accorgimenti, un’individuazione del fronte tramite la funzione edge si è rivelato troppo instabile per poter stabilire in maniera semplice una routine applicabile a tutti i 24 esperimenti, per le centinaia di fotogrammi che ciascuno possiede.

I problemi riscontrati sono i seguenti:

- Variabilità temporale dei valori, anche se normalizzati
- Difficoltà nell'individuare il fronte con precisione entro pochi pixel
- Individuazione da parte della funzione edge di altri bordi oltre al fronte, quali creste interne all'onda, veli sottilissimi di acqua che vengono portati a 0 dalle soglie (accade soprattutto accanto alla vena effluente dalla breccia), bordi dei pannelli con le macroscabrezze, oltre alle scabrezze stesse ed altri cluster imputabili a generico rumore

L'applicazione di filtri di pulizia delle immagini, come "bwareaopen"

"BW2 = bwareaopen(BW,P) removes all connected components (objects) that have fewer than P pixels from the binary image BW, producing another binary image, BW2. This operation is known as an area opening." [14]

consente solo in parte di isolare ed eliminare i bordi indesiderati.

Tutti questi passaggi, tuttavia, hanno compromesso l'utilizzazione del codice su tutti gli esperimenti, in quanto ci si è ritrovati a dover settare, in maniera incrociata e dipendente dal tempo, dalla categoria di esperimento e dalla variabilità intrinseca tra una prova e l'altra, i valori delle soglie, del metodo Canny (funzione edge) e dei filtri di pulizia.

La presenza di così tante variabili da settare ha comportato l'abbandono di questo primo approccio per un secondo.

5.1.1.5 Secondo approccio: binarizzazione delle immagini

Preso atto delle difficoltà con la funzione edge, si è deciso di adottare un approccio diverso, che con il precedente condivide solo le fasi preparatorie.

Queste, in particolare, sono la normalizzazione tra 0 e 1 e l'applicazione di maschere per nascondere paratia e tendaggi.

Si crea una matrice parallela all'immagine in esame: questa sarà una matrice logica, inizializzata con soli zeri, e ci si riferirà ad essa d'ora in avanti come "immagine binaria".

Si applica poi un valore di soglia minimo sotto il quale tutti i valori dell'immagine in esame vengono posti uguale a 0, come nel primo approccio, ma questa volta usando un valore molto basso, pari a 0.05. L'immagine risultante (Figura 23) mostra ancora molto sporco, e molto rumore nei pressi del fronte, il che renderebbe complicato il riconoscimento dello stesso, ma essa verrà invece usata come benchmark per stimare l'efficacia del metodo.

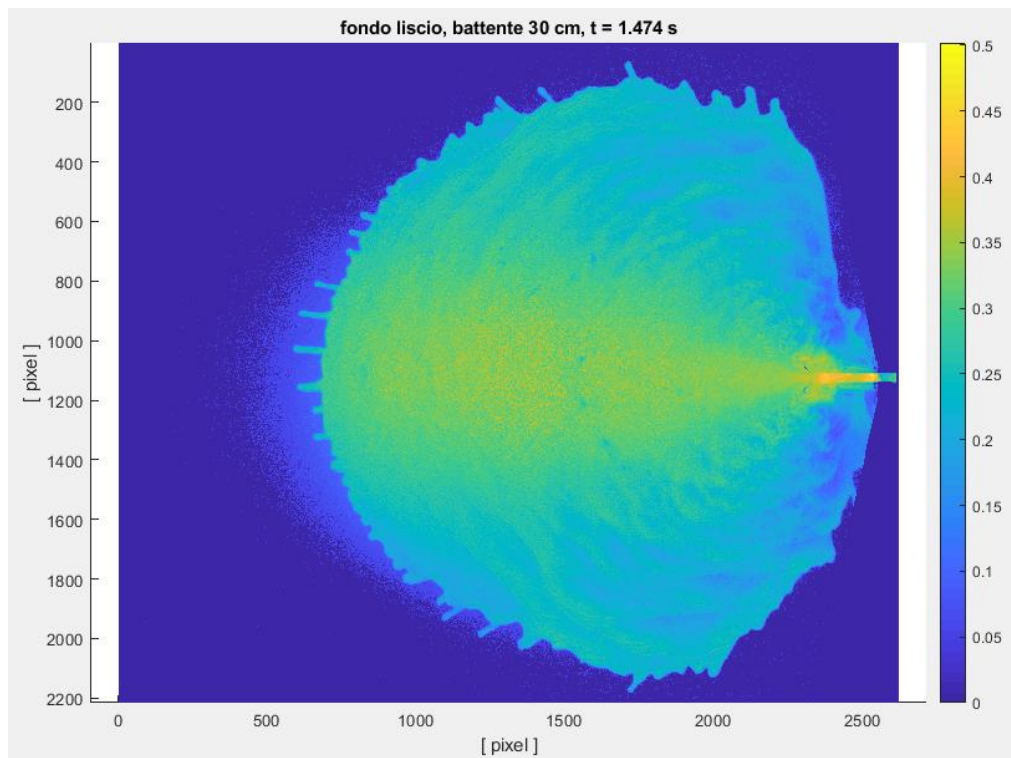


Figura 23 - Frame esemplificativo di come si presenta l'immagine, dopo l'applicazione di maschere (in zona destra, nei pressi della breccia), normalizzazione e della soglia a 0.05. Con una soglia così bassa, non tutti i punti esterni al piano collassano al valore 0, ma è invece presente molto rumore (valori compresi tra 0.05 e 0.2).

Si applicano ora queste stesse soglie, ma con valori più elevati (operativamente, essi oscillano tra 0.08 e 0.11): tutti i punti maggiori di queste soglie andranno ad apporre il valore logico 1 nell'immagine binaria parallela. In tal modo, l'onda viene "disegnata" nella matrice binaria, prima costituita da soli zeri.

I valori di soglia risultano dipendenti dal tempo, crescendo in valore, ma offrono risultati robusti con soli 2 o 3 valori per un intero dam break. Inoltre, per esperimenti appartenenti alla stessa categoria (avanzamento simile nel tempo), rimangono sostanzialmente costanti.

Naturalmente, l'immagine binaria risulta sporca, come indicato in Figura 24, e sono presenti:

- "buchi" nell'onda, in special modo ai lati della vena, laddove per molti istanti la copertura d'acqua è costituita da un velo sottilissimo e spesso frammentato
- cluster esterni all'onda, espressione del rumore, della variazione di luminosità nel tempo e di eventuali imperfezioni del piano, che emergono comunque a causa di leggere vibrazioni della camera che comportano un non perfetto allineamento dei pixel che descrivono l'imperfezione in questione.

Questo disallineamento non risulta essere importante per la categoria a fondo liscio. Per quelli a fondo scabro, invece, il disallineamento provocherà sottrazioni tra pixel non perfettamente coerenti, generando molto disturbo.

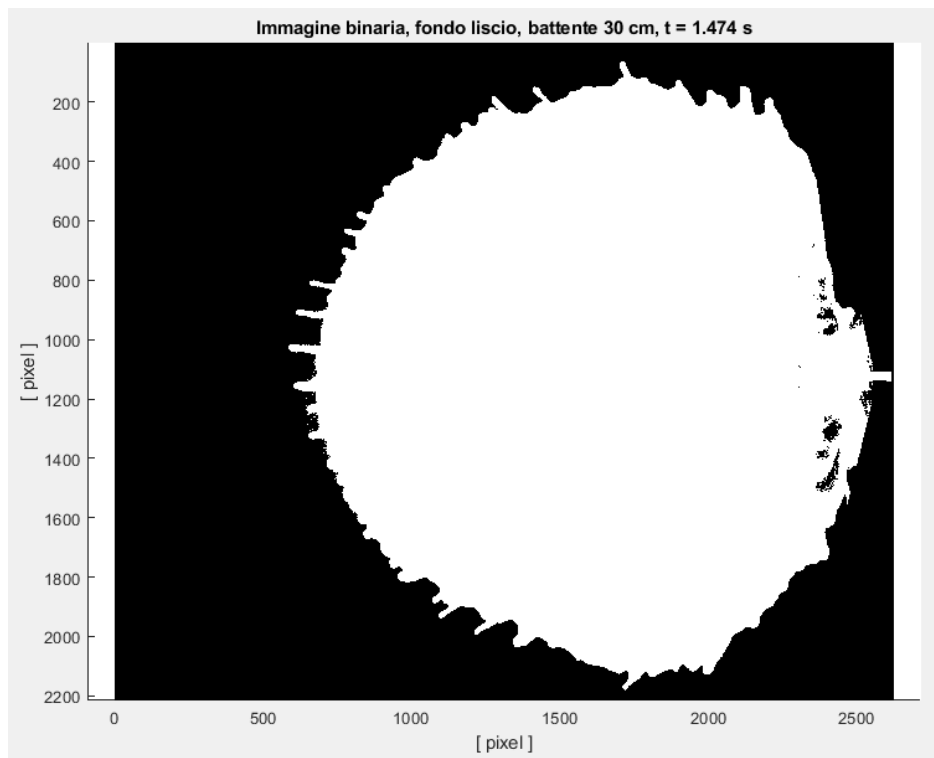


Figura 24 – Immagine binaria non ancora trattata con filtri, prova con fondo liscio a battente 30 cm

Questo inconveniente viene risolto applicando alcuni codici correttivi.

Per i buchi viene applicato il comando matlab “imfill”, nella versione con specifica “holes”:

BW2 = imfill(BW, Locations) performs a flood-fill operation on background pixels of the input binary image *BW*, starting from the points specified in *Locations*. [14]

Esso opera esclusivamente su immagine binaria, e riempie effettivamente i vuoti completamente circondati dal valore logico alternativo. Con questa sintassi, in particolare, è definito “hole” un gruppo di pixel di background che non possono essere raggiunti iniziando a riempire il background stesso a partire dal bordo dell’immagine.

L’algoritmo si basa sul concetto di ricostruzione morfologica, così come delineata da Soille P. (Soille, P., Morphological Image Analysis: Principles and Applications, Springer-Verlag, 1999, pp. 173–174.) [19]

Per i cluster viene applicato il già citato “bwareaopen”, con dimensioni dei gruppi bersaglio variabili tra 50 e 250 pixel.



Figura 25 – La stessa immagine binaria trattata con i filtri descritti. L'uniformità delle regioni è pressoché totale

Le immagini binarie così trattate risultano molto pulite (Figura 25), e ben si prestano all'applicazione del codice cardine di questo approccio, ossia il semplice “bwboundaries”.

$B = \text{bwboundaries}(BW)$ traces the exterior boundaries of objects, as well as boundaries of holes inside these objects, in the binary image BW . bwboundaries also descends into the outermost objects (parents) and traces their children (objects completely enclosed by the parents). Returns B , a cell array of boundary pixel locations. [14]

Esso, banalmente, indaga l'immagine binaria e restituisce un vettore di coordinate ordinate laddove riscontra un confine tra i valori 0 e 1, ossia nelle regioni che i vari pixel definiscono, qualunque esse siano, comunque siano costituite, ad esempio in caso di regioni annidate.

Nel nostro caso, avendo preventivamente mascherato, riempito e corretto le immagini binarie, viene tracciato solo il fronte, come esemplificato in Figura 26.

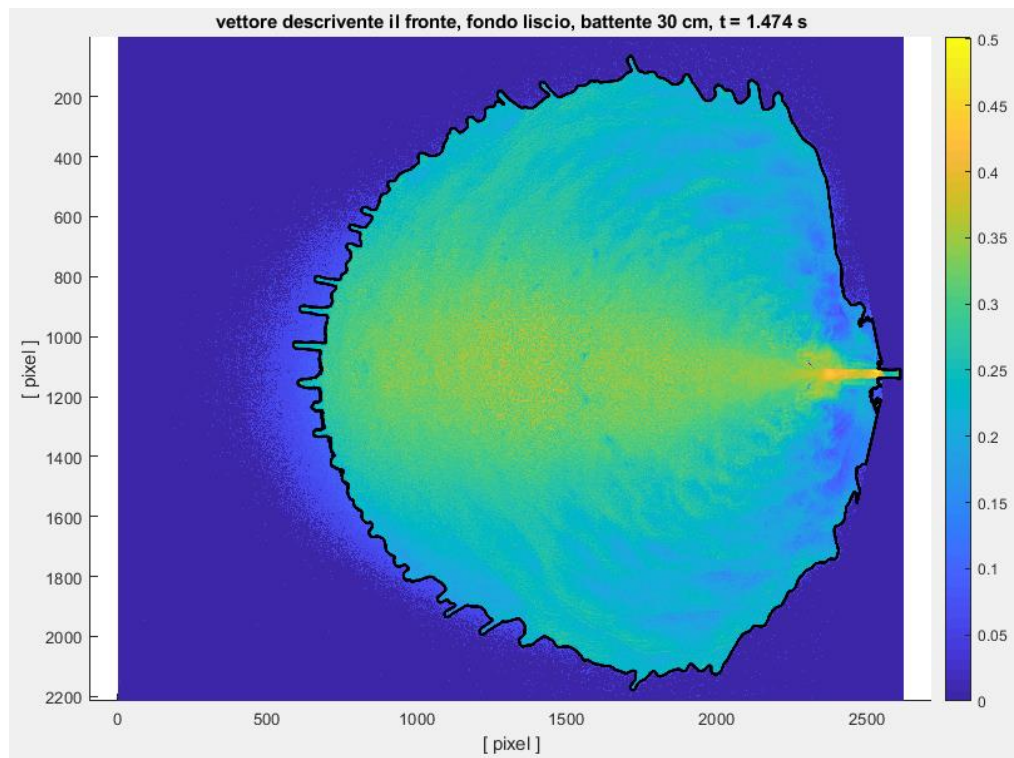


Figura 26 – Fronte d'onda descritto come vettore di coordinate xy, qui in nero

L'ottenimento di un fronte corretto, che ricalchi in maniera fedele il fronte, richiede tuttavia alcune iterazioni sullo stesso esperimento per trovare la miglior soglia possibile.

Tale taratura, che viene risolta in maniera soddisfacente in pochi tentativi, viene effettuata tramite un'indagine visiva, sovrapponendo in un'unica figura:

- l'immagine sorgente de-distorta, alla quale è stata solamente applicata una debole soglia minima (<0.05), per la quale si hanno esempi in Figura 23
- il vettore coordinate del fronte d'onda, così come ottenuto dall'immagine binaria parallela, realizzata applicando la variabile indipendente principale, ossia il valore di soglia minimo.

La sovrapposizione dei due, che globalmente si presenta come in Figura 26.

Per considerazioni circa l'effettivo grado di precisione ottenibile si rimanda al prossimo paragrafo 5.1.1.7. La taratura avviene tenendo conto dei seguenti aspetti:

- applicare una soglia debole costruirà un'immagine binaria parallela con un'onda più ampia, in quanto verranno portati al valore logico 1 complessivamente molti punti, anche quelli che esibiscono valori normalizzati bassi (circa 0.07), e che pertanto potrebbero non fare parte dell'onda ma essere dovuti a rumore.
- applicare una soglia debole ha l'effetto di nascondere le protrusioni del fronte d'onda (denominate "fingers"), inglobandole parzialmente: tra di esse, infatti, il rumore è maggiore
- applicare una soglia elevata ha l'effetto di limare molto l'immagine binaria, portando al valore logico 1 complessivamente meno punti, rischiando di indentificare il fronte in maniera troppo arretrata

- applicare una soglia elevata ha spesso l'effetto di ignorare i fingers, descritti, probabilmente a causa della forma tondeggiante che essi assumono (causati dalla tensione superficiale) da valori complessivamente più bassi del resto dell'onda

La commistione di questi effetti impone di individuare la corretta via di mezzo nel valore di soglia, che varia nel tempo, aumentando all'aumentare del numero di frame. Ciò ha obbligato ad individuare 2 o 3 valori di soglia tempo-dipendenti per ogni prova.

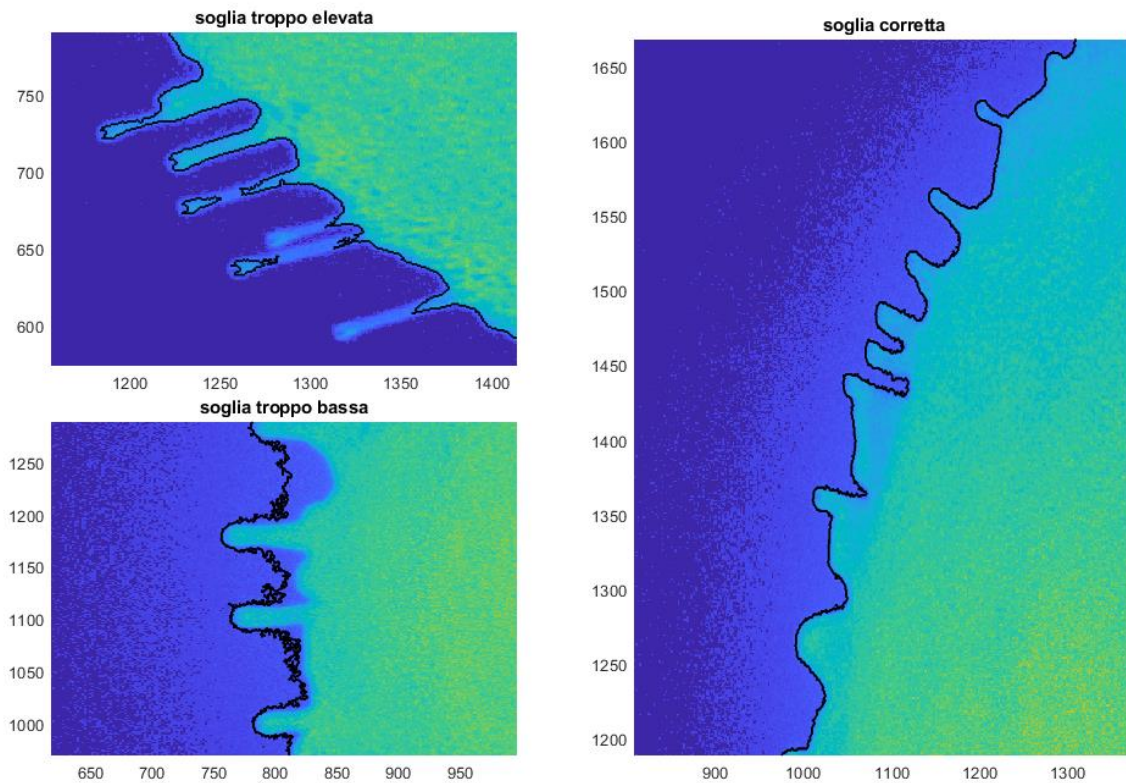


Figura 27 – Effetti dei diversi valori delle soglie per la determinazione del fronte d'onda

L'ultimo passo nell'analisi delle immagini consiste infine nel trasformare il vettore di coordinate del fronte dal sistema pixel a quello metrico. A tale scopo viene utilizzata la funzione `PointsToWorld`, che fa parte, come gli altri comandi di calibrazione, del toolbox di Computer Vision di Matlab.

`worldPoints = pointsToWorld(cameraParams,rotationMatrix,translationVector,imagePoints)`
returns world points on the X-Y plane, which correspond to the input image points. Points are converted using the input rotation matrix, translation vector, and camera parameters. [14]

Come più ampiamente descritto in 4.1, la funzione assolve a due compiti:

- estrarre i parametri intrinseci della fotocamera (lunghezza focale, punto principale) per operare il passaggio da pixel a coordinate metriche (nel nostro caso, millimetri)
- operare una rototraslazione, funzione della posizione nell'immagine sorgente, delle coordinate del vettore affinché possano essere riferite ad un sistema di riferimento indipendente da quello dell'immagine. Quest'ultimo passaggio, per noi non strettamente necessario, consente tuttavia di operare i confronti relativi alla bontà della calibrazione (4.1).

5.1.1.6 Applicazione agli esperimenti con taratura dei parametri

L'intera routine finora descritta viene applicata a tutti i 16 esperimenti disponibili per la categoria a fondo liscio. Per ciascuno di essi andranno tarati i valori di soglia, unitamente alle dimensioni dei cluster da eliminare tramite `bwareaopen`. Tuttavia, diversamente dal primo approccio, la taratura richiede pochi tentativi per ogni esperienza, come indicato nel paragrafo precedente.

Si riportano in Figura 28 le sovrapposizioni a passo temporale costante dei soli fronti d'onda espressi in coordinate metriche (mm).

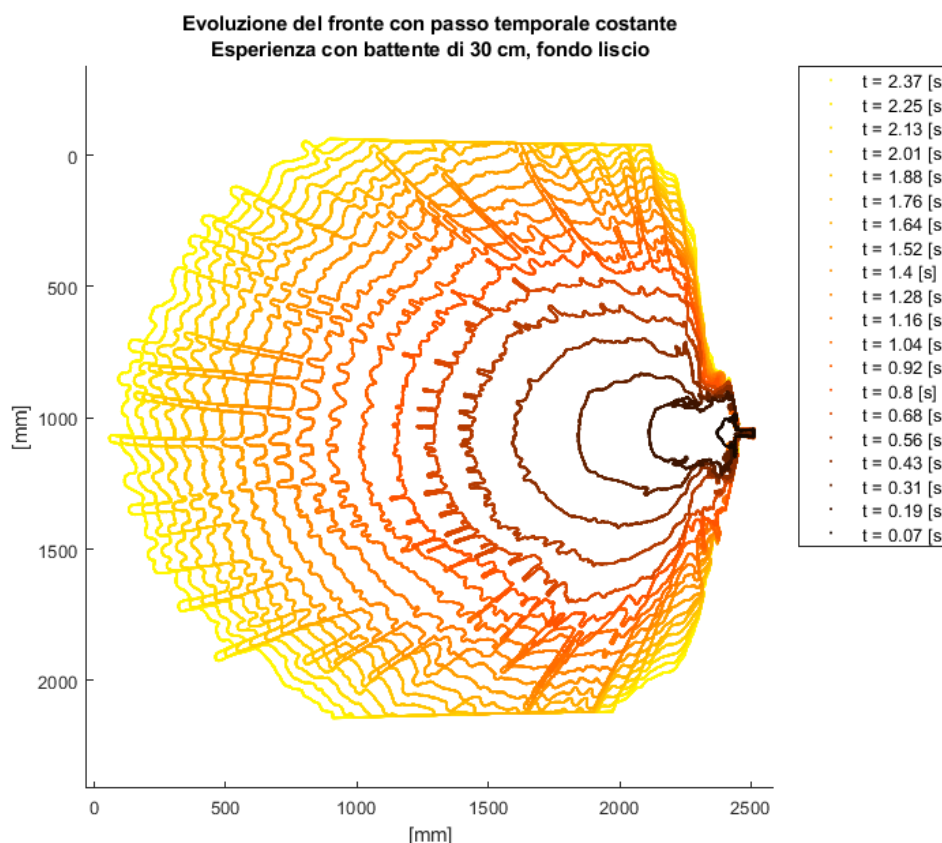


Figura 28 -Evoluzione temporale del fronte d'onda con passo costante (5) su 20 istanti, in coordinate metriche

5.1.1.7 Grado di precisione dell'analisi

Per quanto riguarda la precisione nell'identificazione dell'esatta posizione del fronte, non può essere fornita una precisa informazione quantitativa, mancando un dato di verità cui riferirsi. Possono essere tuttavia formulate alcune considerazioni.

In primis, si osservi il dato di partenza, ossia l'immagine grezza in scala di grigi offerta dalla telecamera Andor Zyla. Come esemplificato in Figura 29 la risoluzione alla scala del fronte, o dei fingers, non è abbastanza elevata da permettere un'individuazione sicura dello stesso.

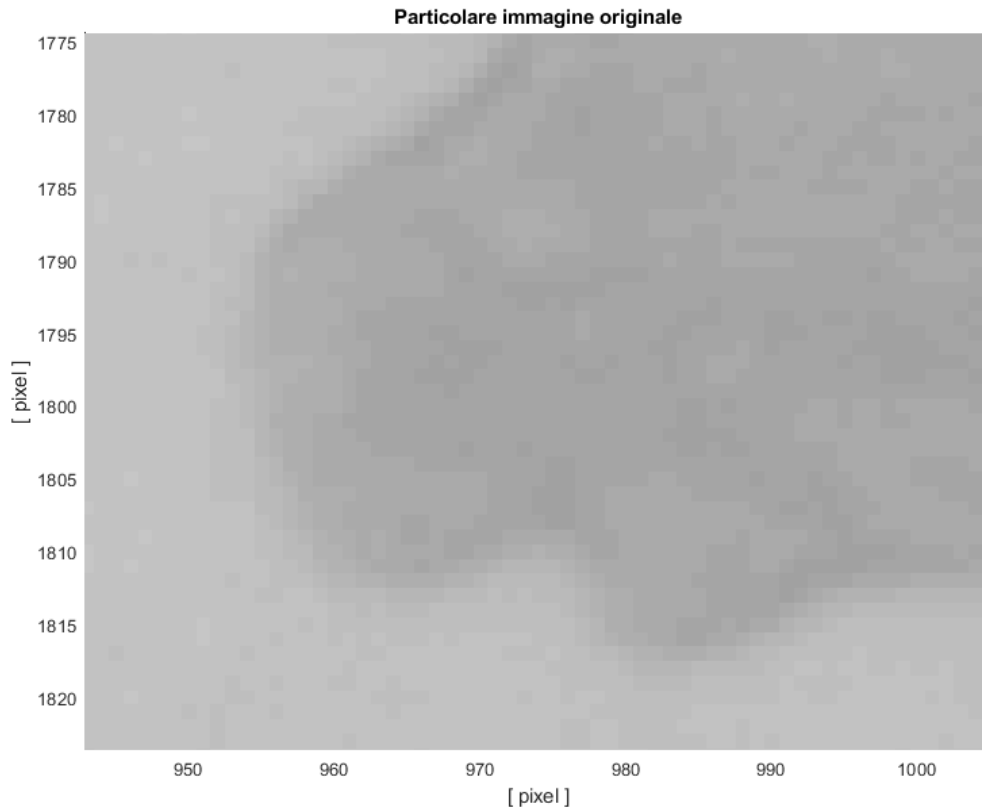


Figura 29 – Particolare di un finger: l'individuazione della posizione del fronte è affetta da un errore minimo dovuto alla qualità dell'immagine

La variazione di intensità entro le celle che compongono il fronte non è così netta da permettere una sicura distinzione. Inoltre, basandosi il metodo sull'applicazione di soglie minime, è certo che una parte di informazione vada perduta, portando a 0 valori che, ad un'indagine visiva, permetterebbero di porre il fronte alcuni pixel più a destra o a sinistra.

In ragione di ciò, si prende atto dei limiti delle immagini ottenute, e si stima una variabilità minima nell'identificazione del fronte, dovuta a questa causa, pari a 5 pixel (che ricordiamo, valgono circa 5 mm).

5.1.2 Metodologia di indagine e di confronto: fascio radiale di semirette

Lo studio del fronte verte sulla descrizione spaziale del suo avanzamento, e sui parametri di distanza totale percorsa e di velocità. Siccome occorrerà confrontare tra loro i risultati delle varie categorie, occorre fin da subito porsi la domanda di come poter eseguire tale confronto.

I vettori che descrivono i fronti, infatti, sono costituiti da una quantità di punti variabile istante per istante e tra un'esperienza e l'altra, in maniera totalmente non prevedibile. Si va da un minimo di alcune decine di coordinate xy nei primissimi istanti, quando sul piano è visibile una quantità irrisoria d'acqua, a circa 10.000 punti negli istanti finali.

Ciò implica che non è possibile definire una corrispondenza biunivoca tra i punti appartenenti ai vari istanti, rendendo complicata la definizione di un vettore che descriva l'avanzamento sul piano di un singolo punto del fronte. Non ultimo, del resto, il fatto che il perimetro dell'onda cresce ad ogni istante in maniera diseguale tra le sue parti.

Inoltre, nell'ottica di effettuare confronti tra dam break appartenenti ad una stessa categoria (5.1.4), e tra le varie categorie (5.1.5), occorre considerare le forme eventualmente radicalmente diverse assunte dalle onde.

5.1.2.1 Fascio radiale di semirette

Preso atto di queste difficoltà, si è deciso di aggirare il problema suddividendo il piano in regioni ben definite, invariabili nel tempo.

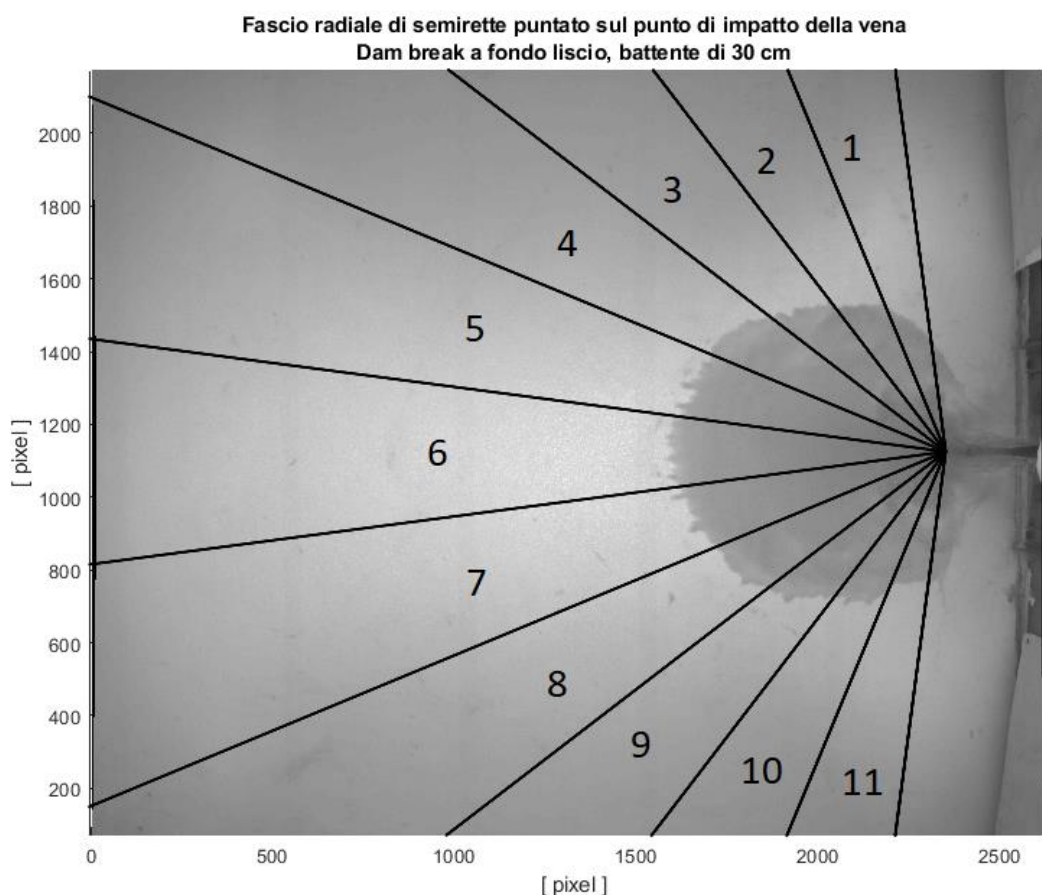


Figura 30 – Fascio radiale di semirette puntato sul punto di impatto della vena. In background, una prova con fondo liscio, con battente di 30 cm

Più in particolare, come evidenziato in Figura 30 si definisce un fascio radiale di semirette, la cui origine è centrata nel punto di impatto della vena. Si definiscono così 11 settori circolari, ciascuno con un'ampiezza di 15° : quello centrale ha il suo asse collimato con l'asse della breccia.

L'apertura dei settori circolari, e quindi la loro numerosità, sono stati oggetto di indagine preliminare, secondo due criteri:

- La possibilità di ottenere una descrizione efficace dei dati (si ricorda la presenza delle protrusioni del fronte, o fingers, che esibiscono larghezze di circa 1 cm – 10 pixel)
- Il confronto, a valle dell'elaborazione dati, allo scopo di individuare variazioni nei risultati più o meno sensate

In particolare, sono stati effettuati confronti tra aperture a 15° , 10° , 5° e 1° . Prendendo a prestito i risultati delle analisi discussi nel prossimo 5.1.3, si dimostra con una semplice indagine che non vi è particolare differenza tra le aperture².

Al netto di queste somiglianze, si è deciso di optare per le ampiezze da 15° allo scopo di avere una descrizione più sintetica del fronte. Tale valore, inoltre, consente di individuare, tra gli 11 totali, 5 settori di particolare interesse, che ben comprendono caratteristiche peculiari dei fronti scabri, che si è ritenuto interessante confrontare con le prove a fondo liscio.

Tali settori sono quello centrale (il numero 6), quelli con un'inclinazione media di 45° (il 3 e il 9) ed infine quelli inclinati a 30° (il 4 e l'8).

Il settore centrale, ovviamente, è di interesse in quanto rappresenta la sezione con più apporto energetico in ogni configurazione. Quelli inclinati a 45° , per contro, descrivono bene quelle che possono essere definite come "direzioni preferenziali" di propagazione dell'onda nei casi scabri, in quanto la geometria uniforme degli ostacoli presenta valori di nascondimento variabili a seconda dell'orientazione: in questi settori, l'onda si muove con particolare velocità, andando talora a superare, nei tempi di propagazione, il diretto concorrente con fondo liscio.

I settori con inclinazione a 30° , infine, rappresentano un buon metro per confrontare le varie categorie secondo rapporti più realistici, senza l'interferenza dei corridoi preferenziali.

L'apertura totale del fascio, infine, è compresa tra $+82.5^\circ$ e -82.5° , se si prende come riferimento il semiasse trasversale alla breccia (che cresce secondo le ascisse negative), o tra $+97.5^\circ$ e $+262.5^\circ$ se si fa riferimento alla circonferenza goniometrica. Esso indaga un'apertura che rasenta l'angolo piatto, ponendo le semirette di confine lungo la direzione media di avanzamento del fronte sui fianchi.

5.1.2.2 Distanze radiali medie

L'utilizzo di settori circolari permette di descrivere i punti del fronte secondo coordinate polari, facendo in particolare riferimento alla distanza radiale. Ogni coordinata xy viene quindi riferita all'origine del fascio e trasformata in radiale.

Come descritto in 5.1.1.3, i fingers vanno considerati come parte dell'onda, e rappresentano un indicatore dell'instabilità del fronte. In particolare, nell'ambito di questa tesi si rinuncia ad approfondire le cause scatenanti di questo fenomeno e la correlazione che può esserci con le instabilità del sistema in scala reale, limitandosi a considerarli come espressione della distribuzione di probabilità dei tempi di propagazione del fronte.

In tal senso, lavorando in maniera indipendente per ogni settore, si calcola un valore medio di distanza radiale, rispetto all'origine del fascio, tra tutti i punti appartenenti al settore in esame. Questo approccio consente di individuare una posizione media del fronte, oltrepassando il problema di individuare un fronte "rappresentativo" al netto dell'eliminazione dei fingers.

Tale distanza media può essere rappresentata con un arco di circonferenza inscritto nel settore in esame, così come espresso in Figura 31.

² Naturalmente, per le aperture minori, nel confronto è stato utilizzato il settore corrispondente al centro del settore con apertura maggiore (15°).

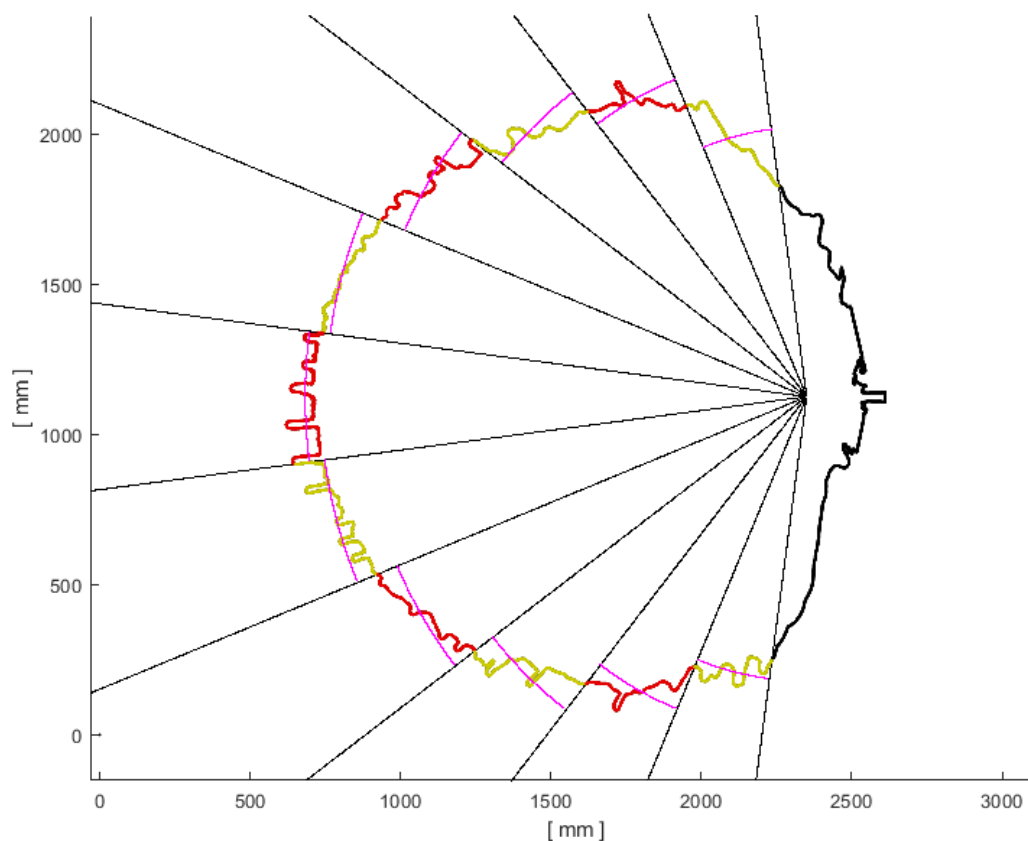


Figura 31 – Descrizione degli archi di circonferenza con raggio pari alla distanza radiale media calcolata per ogni settore nel generico istante (qui istante n° 59, esperienza con fondo liscio, battente 30 cm)

5.1.2.3 Punto di origine del fascio radiale

Il punto di origine del fascio è individuato dal punto di impatto della vena, stimato empiricamente dalle immagini stesse. Ciò produce una serie notevole di conseguenze, che meritano di essere considerate.

Innanzitutto, si è osservato che, per la durata dell'esperimento, la sua posizione rimane sostanzialmente invariata: si sta parlando infatti di circa 1.5 secondi di tempo, durante i quali la portata effluente risulta essere relativamente costante, e soprattutto di scarsa entità rispetto al volume invasato nel serbatoio di monte: prendendo a prestito le analisi in 6.4.1, per battenti di 40 cm si hanno 900 litri a fronte di una portata di 10 l/s, ossia 0.24 l / frame.

Si ipotizza dunque che il punto d'impatto rimanga sostanzialmente fermo in questo lasso di tempo: del resto, ciò rientra nelle tolleranze di un getto che occupa alcuni cm², peraltro dai confini difficilmente individuabili, e la cui posizione viene indicata con un solo pixel (1 mm²).

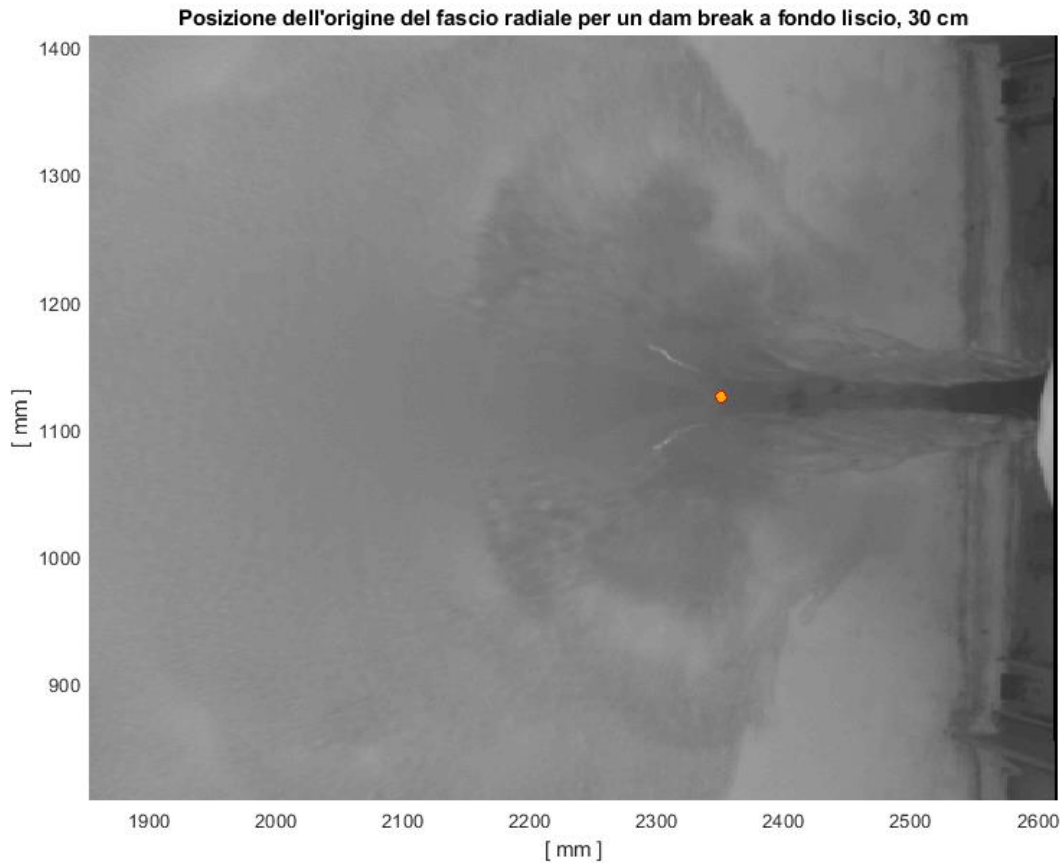


Figura 32 – Individuazione empirica del punto di impatto della vena e quindi dell'origine del fascio radiale di semirette. Si fa riferimento al 20° istante, per convenzione, in quanto si è osservato essere uno dei primi istanti in cui la vena rimane stabile, dopo l'apertura della breccia

Questo approccio implica che la posizione assoluta del punto di origine sarà costante nel tempo ma diversa tra le varie categorie di dam break: l'altezza e la distanza di impatto della vena, infatti sono funzione del battente iniziale. Tra prove della stessa categoria, invece, esso è stato fissato da un unico valore.

Tale posizionamento variabile è una misura necessaria da adottare, rispetto a porre l'origine in un punto comune a tutti, quale potrebbe essere la breccia. Infatti, l'onda evolve secondo una direzione pseudo-radiale a partire dal punto di impatto della vena, non della breccia: applicare un fascio radiale appare molto più corretto nel primo caso. Ciò risulta evidente nelle sovrapposizioni temporali dei fronti (Figura 33) in cui si apprezza l'evoluzione quasi radiale.

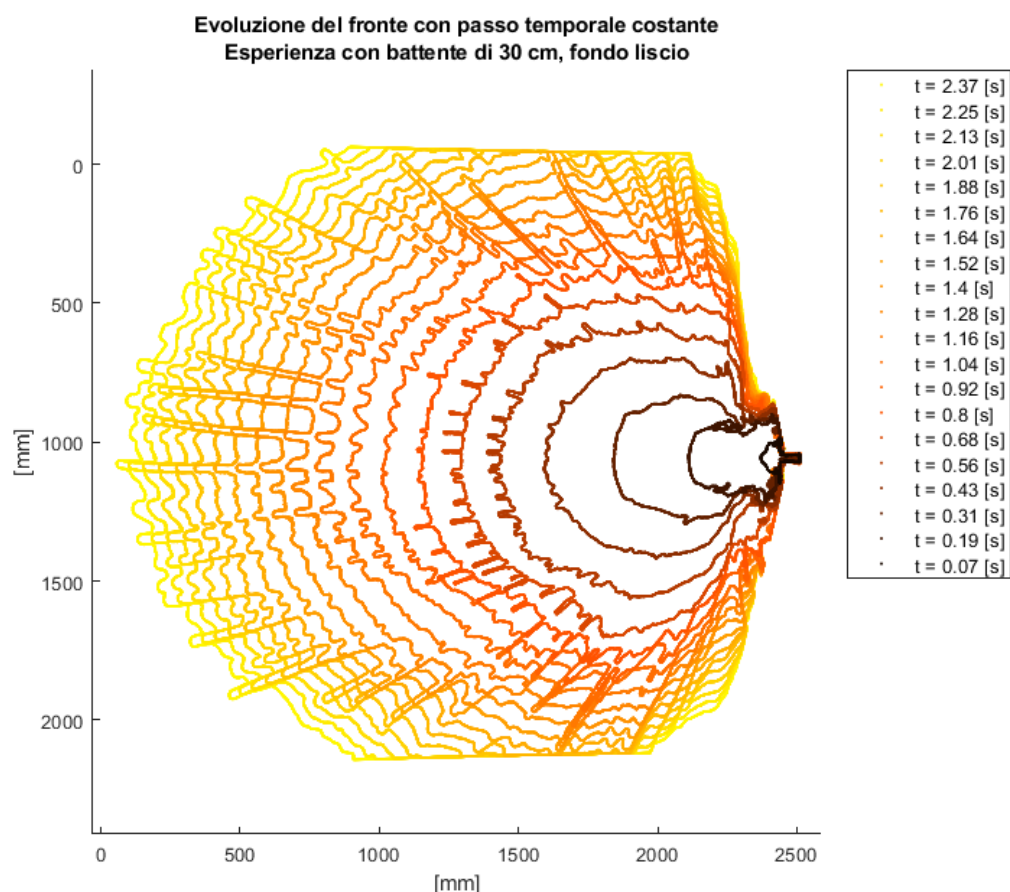


Figura 33 – Evoluzione del fronte con passo temporale costante: si osserva la direzione radiale intrapresa dall'onda rispetto al punto di impatto della vena

Risulta essere anche controproducente applicare un'origine unica per tutti i dam break, anche se puntata, ad esempio, nel punto d'impatto delle prove lisce a 30 cm: gli esperimenti delle altre categorie sarebbero descritti secondo settori non collineari con le direzioni prevalenti di espansione, andando a determinare passaggi di punti del fronte (oltreché di volumi, qui ancora non indagati) tra un settore e l'altro.

Si riportano in Tabella 3 le posizioni dei vari fasci, individuate nel sistema di riferimento delle immagini de-distorte. La loro posizione effettiva, in coordinate millimetriche, sarà ottenuta dal comando PointsToWorld, durante la fase di conversione dell'intero fronte.

	30 cm scabri	30 cm lisci	20 cm lisci	40 cm lisci
Coordinate xy dell'origine [px]	(2363, 1155)	(2335, 1155)	(2440, 1115)	2255, 1123)

Tabella 3 – differenze di posizionamento dell'origine del fascio radiale per le varie categorie di esperimento

Di tali differenze si terrà in conto in fase di confronto (5.1.5).

La posizione dell'origine, individuata in maniera sperimentale, ottiene validazione dallo studio effettuato sulla vena effluente da D'Oria A, nel suo lavoro di tesi, contemporaneo a questo [20].

Nello studio, in cui viene indagata la vena tramite le acquisizioni video ottenute dal fianco della stessa (in qualità 4K, con frame-rate 60 fps), si osserva come l'inclinazione della stessa si mantenga sui 45°.

All'aumentare del battente, rimanendo la larghezza della breccia sempre uguale, la vena risulta via via più energetica, tendendo al valore limite di pendenza pari a -1 (45°). Ciò risulta vero per le categorie a 40 e 30 cm, mentre solo in quella a 20 cm l'energia cinetica minore denota un piccolo rilassamento del pelo libero, che tende a rimanere più basso.

In ragione di ciò, le posizioni da me individuate risultano essere comparabili con le osservazioni sperimentali.

5.1.3 Analisi delle caratteristiche del fronte per singolo esperimento

Verrà di seguito ripercorso lo studio effettuato per un singolo dam-break. In particolare viene scelto, in maniera del tutto scevra da preferenze, uno liscio a 30 cm, effettuato a febbraio 2019.

Una primissima analisi di carattere grafico può essere la semplice sovrapposizione dei fronti individuati, istante per istante, così come già indicato in Figura 33.

Queste sovrapposizioni denotano un andamento pseudo-radiale dell'onda, nella quale tuttavia le velocità di crescita del fronte (la sua velocità di avanzamento) risultano differenti nello spazio e nel tempo.

Dalla suddivisione in settori si estraggono informazioni relative alla distribuzione spaziale di queste velocità, nella forma di grafici i cui assi sono rappresentati dagli istanti temporali e dalle distanze cumulate (pari alla distanza radiale media progressiva, istante per istante).

La presenza dei fingers, come già discusso, può essere tradotta in un'espressione dell'instabilità del fronte. La variabilità delle distanze medie di ogni punto appartenente al generico settore è tuttavia funzione anche dell'orientamento del fronte rispetto al settore in esame.

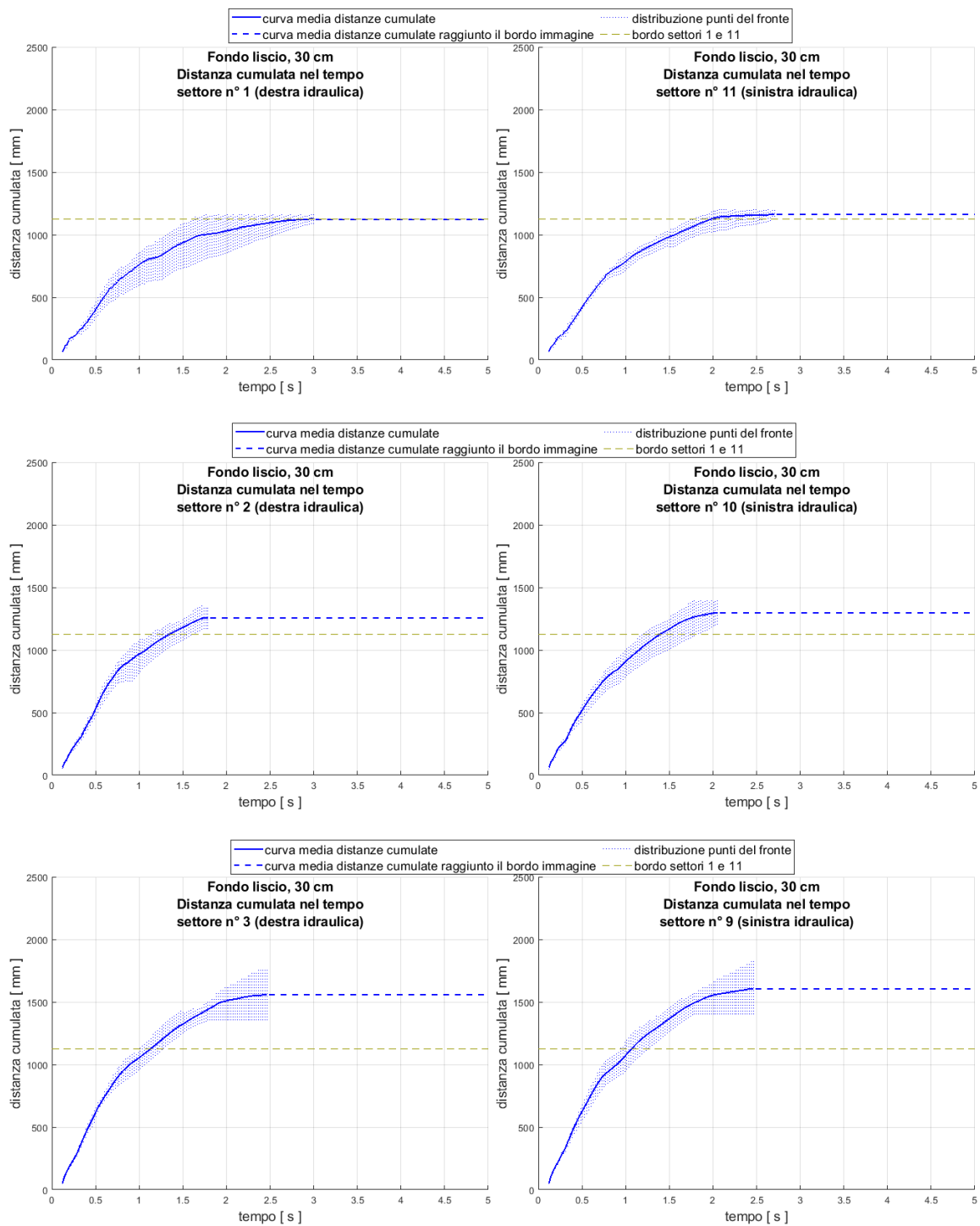
Entrambi questi aspetti concorrono a comporre la dispersione dei dati in ogni istante, così come indicato nella successiva Figura 34. In tal senso, una maggiore dispersione indica sia una maggior presenza di fingers sviluppati (ossia molto allungati rispetto al fronte minimo), sia una non ottimale collinearità tra settore circolare e direzione di sviluppo del fronte. Quest'ultimo aspetto si verifica con più insistenza nei settori più laterali.

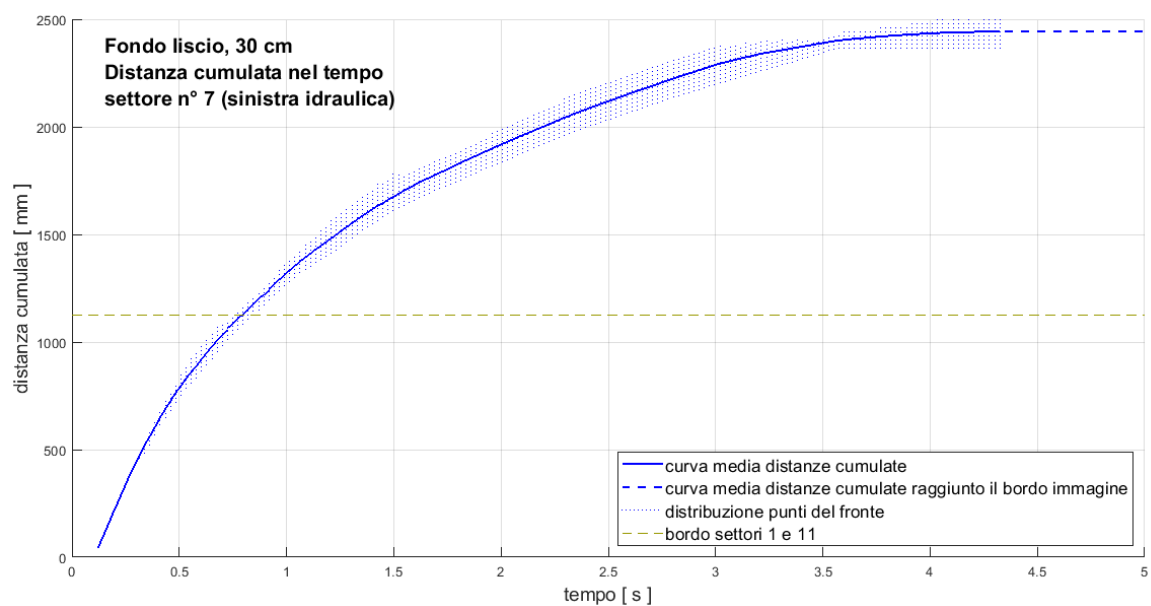
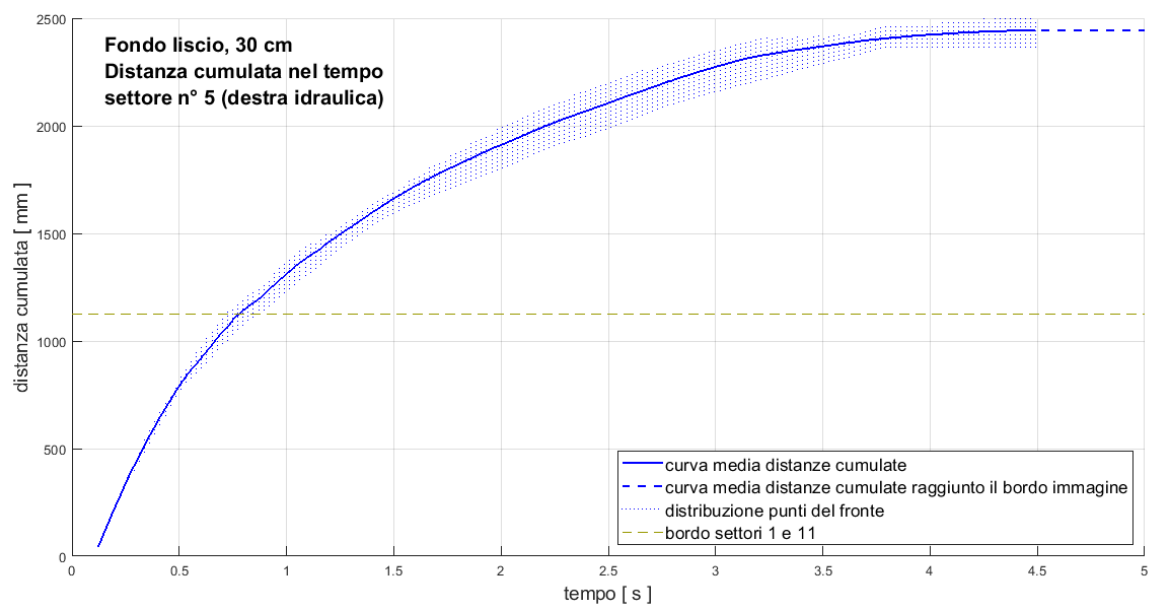
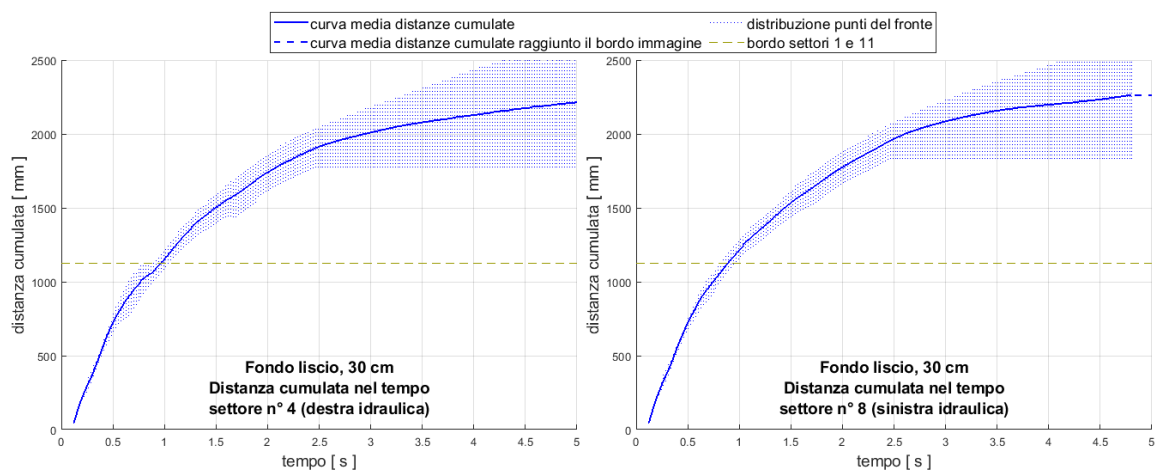
L'analisi dei frame è stata spinta molto in avanti, fino ad interessare quei fotogrammi in cui l'onda non solo è uscita dai bordi, ma ha riempito quasi tutto il piano. Ciò si traduce in 220 frame per le esperienze a 30 cm con fondo liscio, ben 320 per quelle con macroscabrezze, 350 per i lenti esperimenti a 20 cm e soli 120 per gli ovviamente rapidi a 40 cm.

Tutto questo allo scopo di descrivere le curve fino all'ultimo dato disponibile.

Si descrive di seguito il dam break analizzato, a fondo liscio con battente di 30 cm.

Vengono presentate analisi secondo l'evoluzione delle distanze cumulate nel tempo, misurate rispetto all'origine del fascio radiale, e successivamente viene mostrata la sua derivata, che descrive in maniera più chiara le differenze di celerità che esistono tra i vari settori.





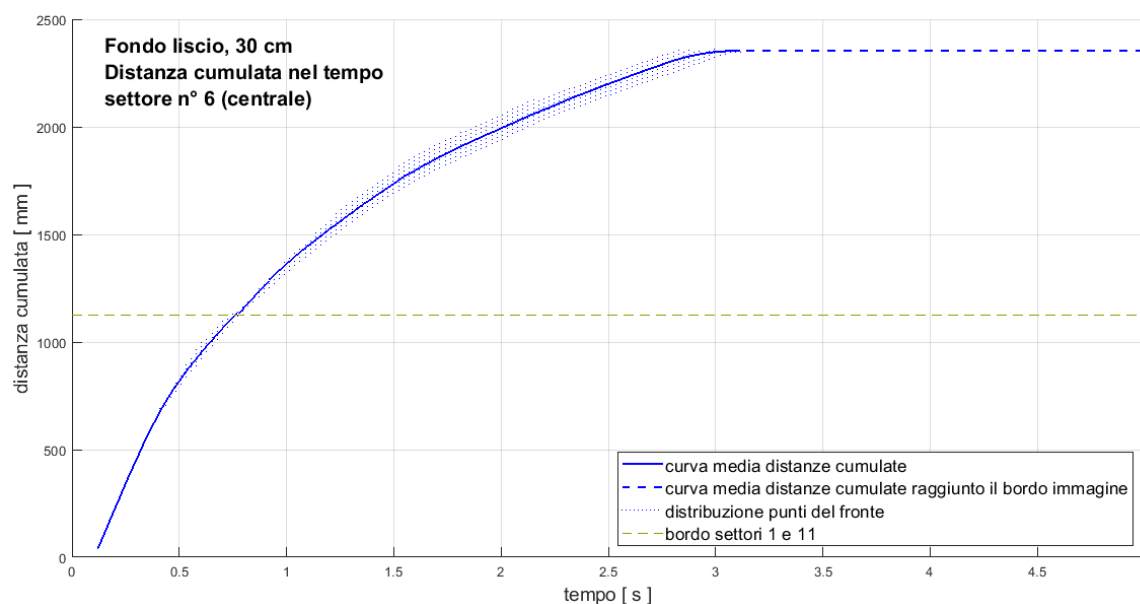
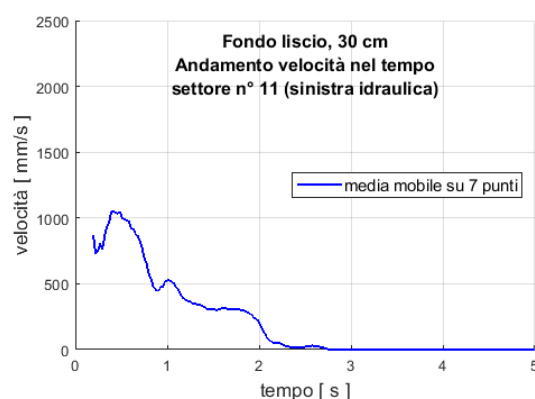
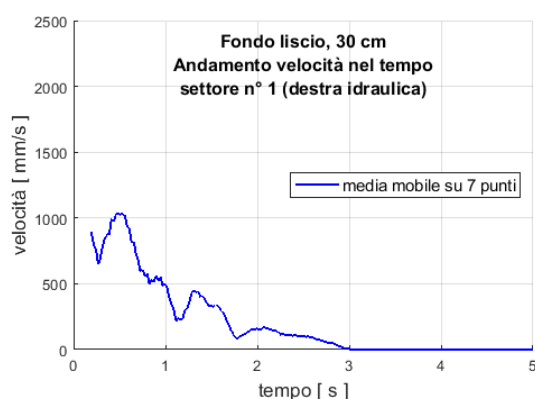


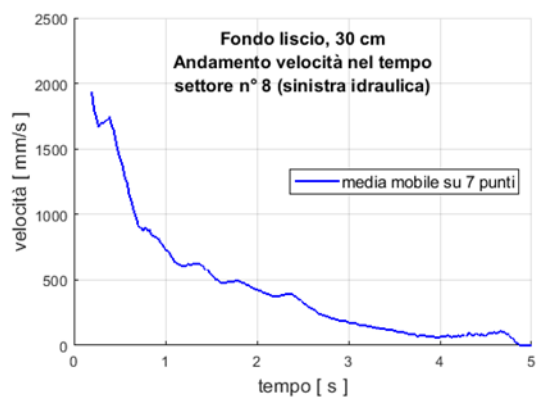
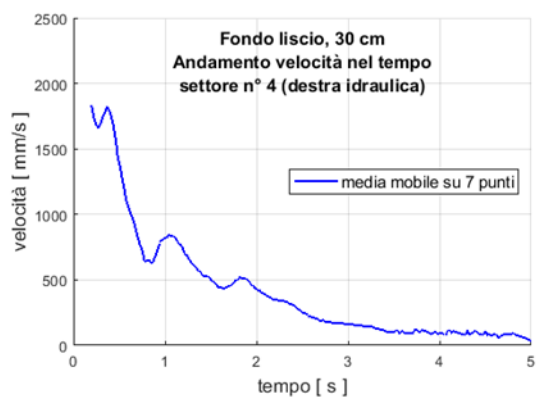
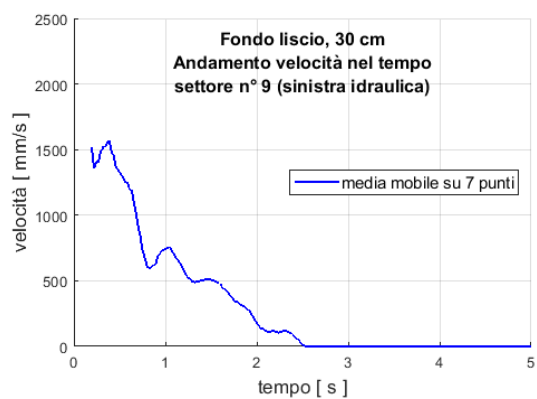
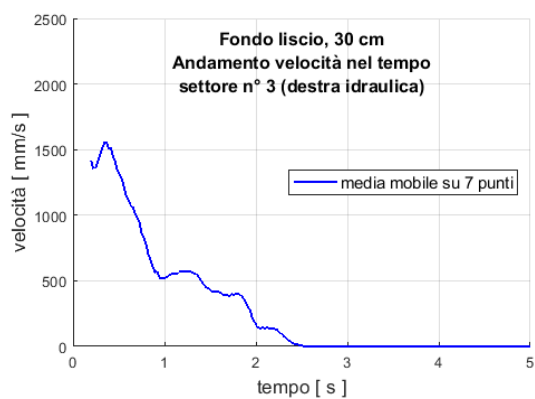
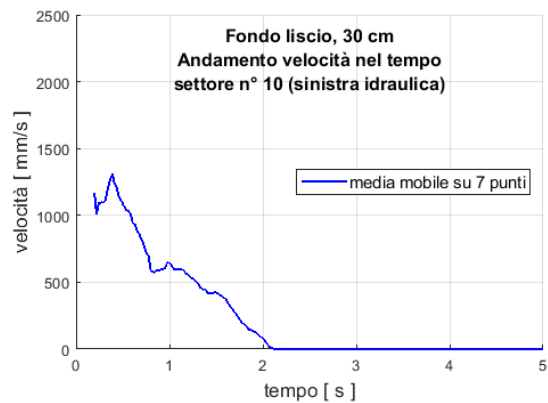
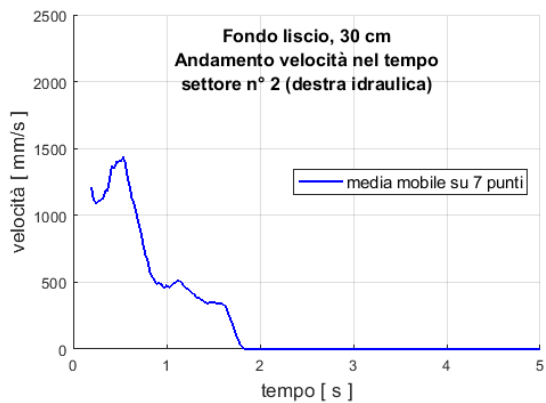
Figura 34 – Andamento nel tempo del valor medio delle distanze cumulate del fronte d'onda, per un dam break a fondo liscio con battente di 30 cm

In Figura 34 è anche indicata, con una retta orizzontale, la distanza limite per i settori più laterali (1 e 11, entrambi posti a 82.5° dall'asse della breccia), ossia quella che indica il bordo immagine. Riportandola anche per gli altri settori, si può avere una semplice stima dei tempi di arrivo dell'onda per una distanza comune per tutti i settori.

Secondo lo stesso schema, viene proposto lo studio, settore per settore, dell'evoluzione delle velocità del fronte nel tempo. Il valore di velocità del fronte risulta piuttosto variabile nel tempo, fornendo un andamento altalenante: ciò è dovuto alla posizione media del fronte, funzione dell'estensione dei fingers, ad esempio, che come è stato osservato, non fanno parte integrante dell'onda, e si spandono e vengono riassorbiti continuamente dal fronte più interno.

Il vettore di velocità del fronte è stato allora raffinato con una media mobile su 7 punti.





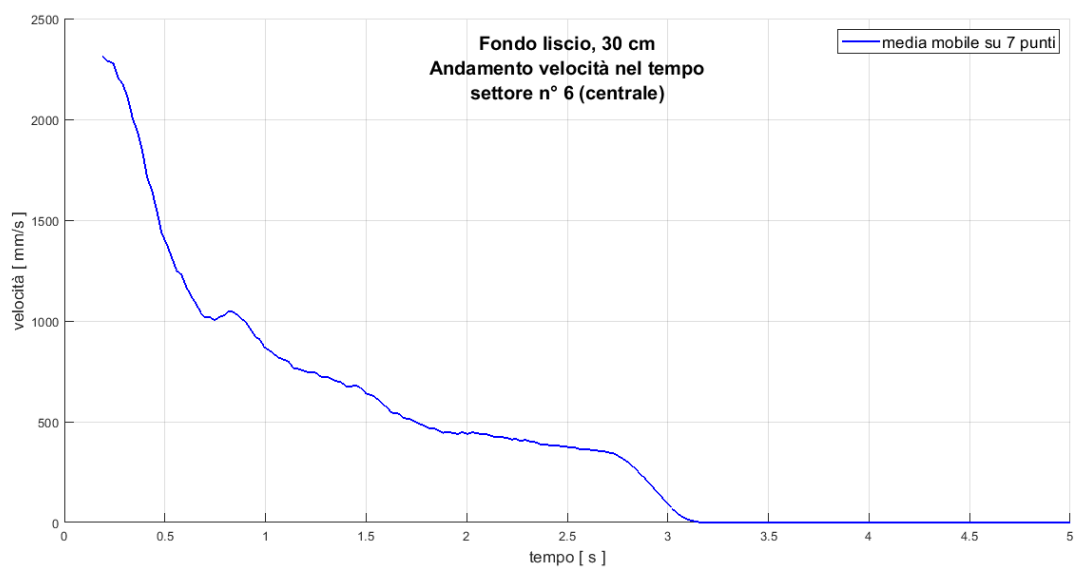
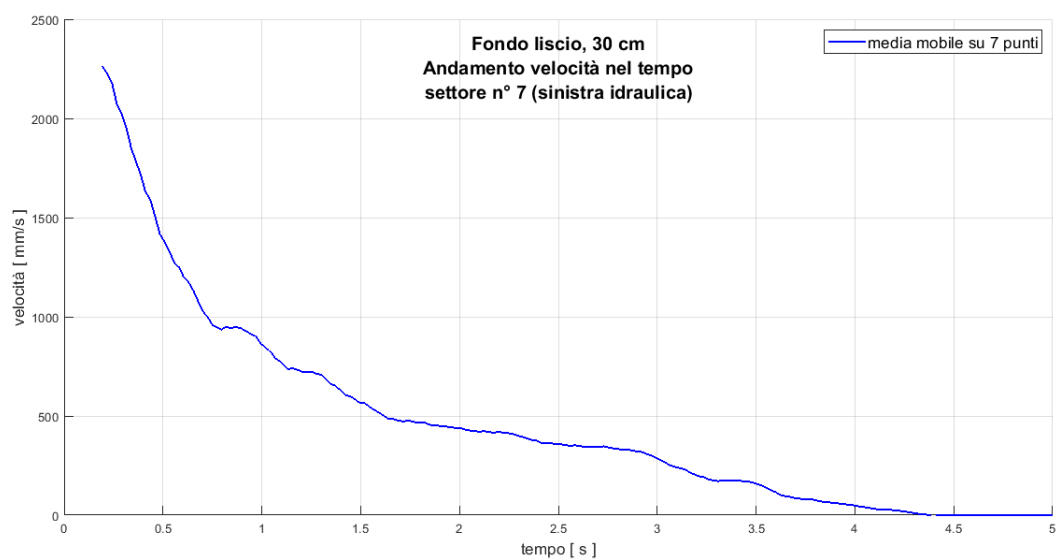
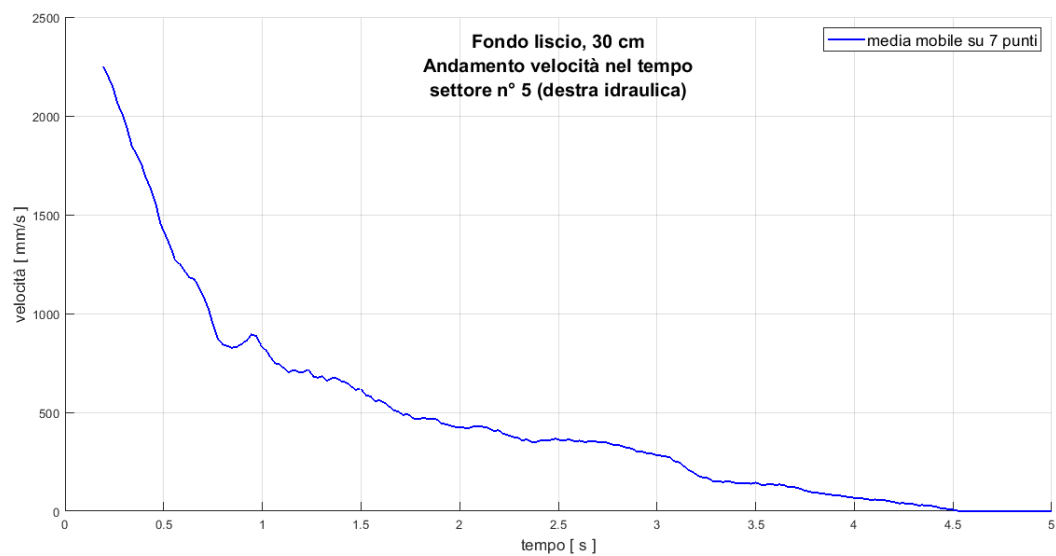


Figura 35 - Andamento nel tempo delle velocità del fronte d'onda, per un dam break a fondo liscio con battente di 30 cm. La curva è ottenuta tramite media mobile su 7 punti

Dallo studio delle velocità del fronte emerge chiaramente, innanzitutto, la dimensione del fenomeno: si va dai 2.5 m/s di velocità nei pressi del getto per i settori centrali (correlati, nello stesso istante, a velocità molto più contenute in direzione trasversale, dell'ordine di 1 m/s) a valori inferiori ai 0.5 m/s negli istanti più avanzati di misura, quando ormai l'intero piano è stato invaso dall'onda.

Una visualizzazione più efficace per confrontare tra loro i settori viene dalla sovrapposizione delle curve medie per ogni settore, come indicato in Figura 36.

Si noti che le curve non iniziano dall'origine: questo perché l'origine del fascio radiale di indagine non coincide con la breccia, e quindi con l'istante iniziale dell'esperimento (inteso come il primo fotogramma in cui si ritrae acqua sul piano).

Dal confronto tra i vari settori risulta evidente la differenza nelle velocità di espansione tra direzione longitudinale e trasversale.

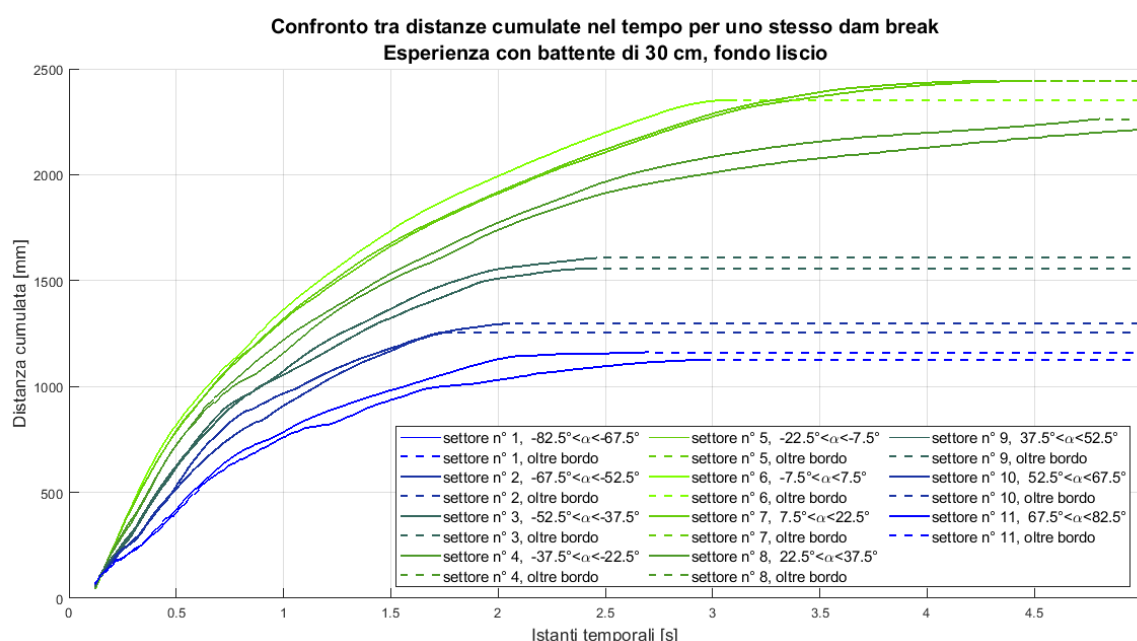


Figura 36 – Confronto tra distanze cumulate (rispetto al punto d'origine del fascio), settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo liscio

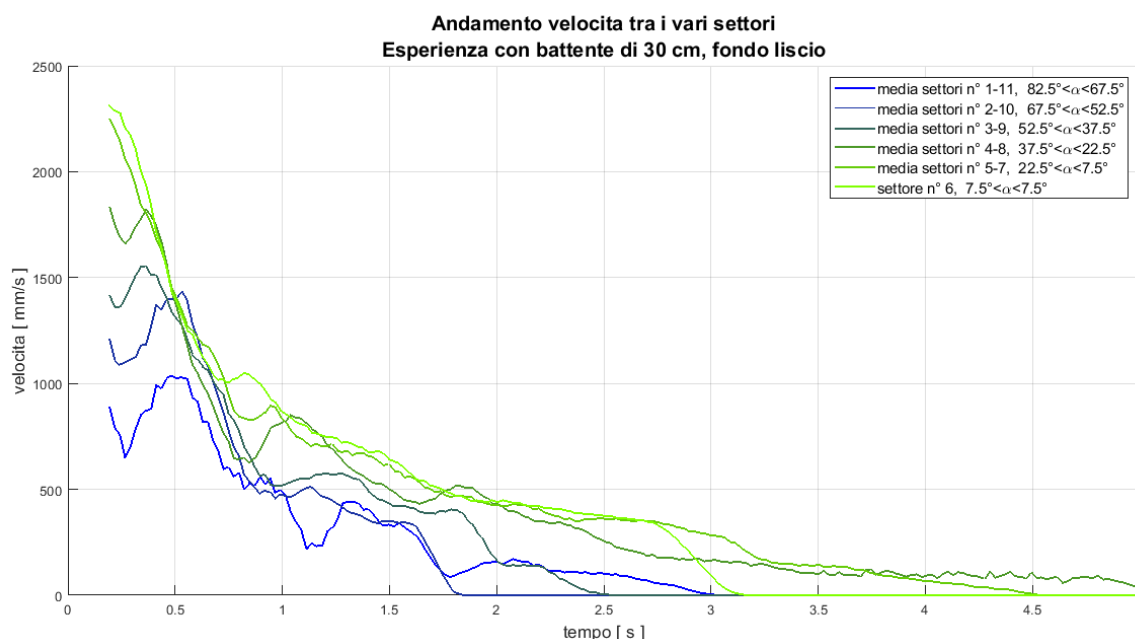


Figura 37 - Confronto tra velocità del fronte d'onda, settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo liscio. I valori, ottenuti da media mobile a 7 punti, sono inoltre mediati tra settori simmetrici per miglior lettura

In Figura 37 sono invece indicate le evoluzioni nel tempo della velocità del fronte d'onda, mediate tra settori simmetrici per un confronto migliore. La velocità è qui intesa come differenza tra due distanze radiali consecutive nel tempo, divise per il frame-rate della camera (0.024 s); in tal senso, questo valore è da intendersi come modulo di un vettore velocità diretto come l'asse del settore in cui è calcolato.

Il valore rappresentato è ottenuto con una media mobile su 7 punti per maggior facilità di lettura. Viene inoltre descritto, per semplicità visiva, una sola curva media tra settori simmetrici tra loro.

Risulta interessante notare come il vettore velocità evidenzia variazioni della stessa nel tempo: l'evoluzione temporale presenta 2 cambi di pendenza nei settori più centrali, e addirittura dei minimi locali per quelli più esterni.

Ciò va ricondotto al comportamento della vena effluente, che viene interessata dall'influenza di un'onda riflessa che viene generata nel serbatoio all'atto dell'apertura della breccia. Tale onda, propagandosi all'indietro sul pelo libero del serbatoio prismatico (che ricordiamo essere a pianta quadrata, con lato 1.5m), viene riflessa ripetutamente dalle pareti, andando ad influenzare il comportamento della vena, che appare come "respirare", alzandosi e abbassandosi nei primi 5 secondi dell'esperimento (quelli indagati). Questo aspetto è stato descritto nella tesi di D'Oria [20].

La correlazione tra questi impulsi e l'evoluzione della velocità del fronte non è tuttavia stata indagata, per cui ci si limita alla descrizione qualitativa.

La variazione della velocità non è contemporanea in tutti i settori, con un ritardo che appare crescere in maniera proporzionale passando dai settori centrali a quelli laterali.

In tutto ciò, occorre tenere sempre conto della non perfetta corrispondenza tra direzione del settore e reale direzione di propagazione: il passaggio di volumi all'interfaccia tra un settore e l'altro risulta in una debolezza del metodo di indagine con il fascio radiale.

5.1.4 Analisi di ripetibilità e confronto tra prove della stessa categoria

Trattandosi di un'applicazione sperimentale, occorre dimostrare la ripetibilità degli esperimenti. Ciò viene realizzato confrontando le curve delle distanze cumulate, settore per settore, tra esperienze appartenenti alla stessa categoria.

Si dispone, ricordiamo, di 6, 5 e 5 esperienze per le prove a fondo liscio, rispettivamente 30, 40 e 20 cm di battente. Per quelle a carattere scabro, si dispone di sole 2 per ogni categoria.

Tuttavia, essendo la differenza tra le prove a fondo liscio e scabro solamente nel tipo di fondo adottato, si ritiene di poter estendere i risultati della prima categoria alla seconda.

Per brevità, sul presente documento sono espressi graficamente i risultati per i soli esperimenti a fondo liscio a 40 cm (mentre nel precedente 5.1.3 se ne era indagato uno a 30 cm).

5.1.4.1 Sovrapposizione grafica

Una prima semplice analisi qualitativa può essere effettuata sovrapponendo i fronti istante per istante.

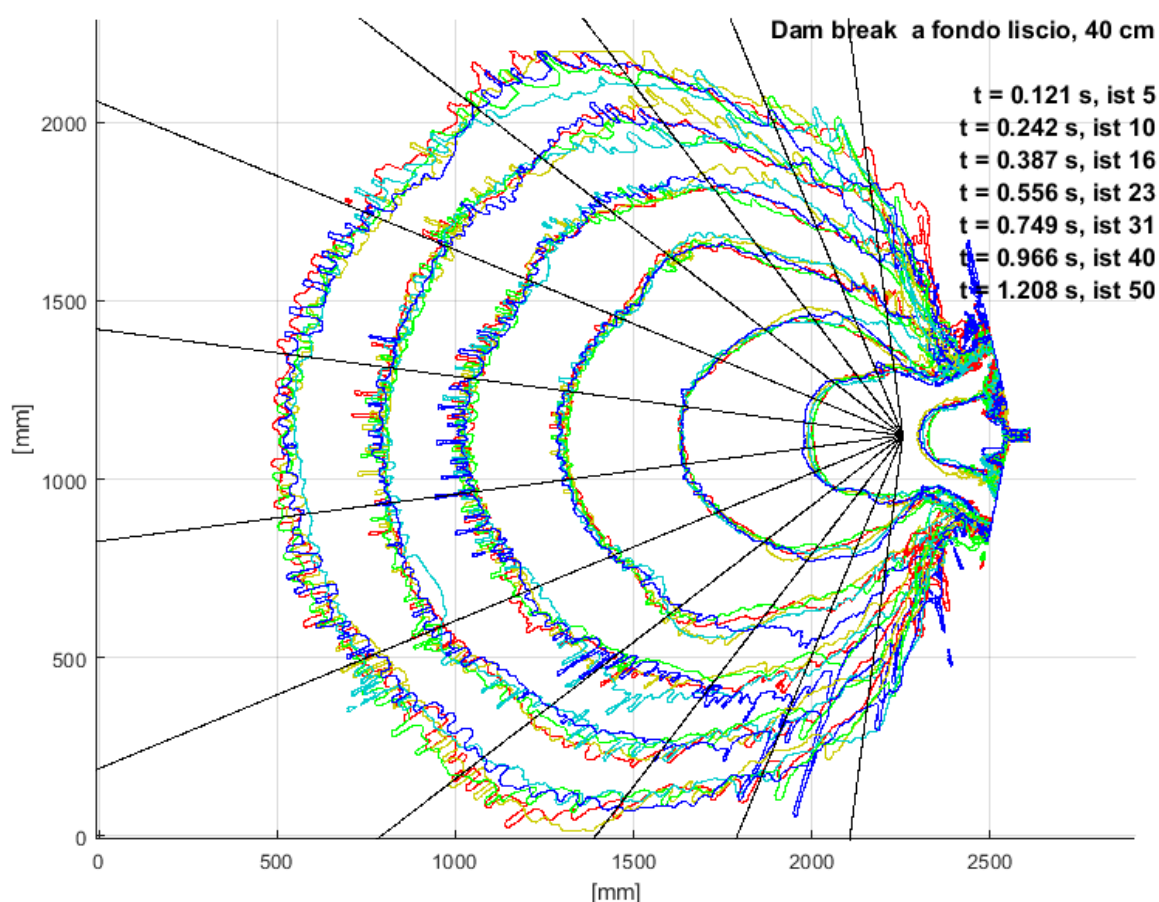


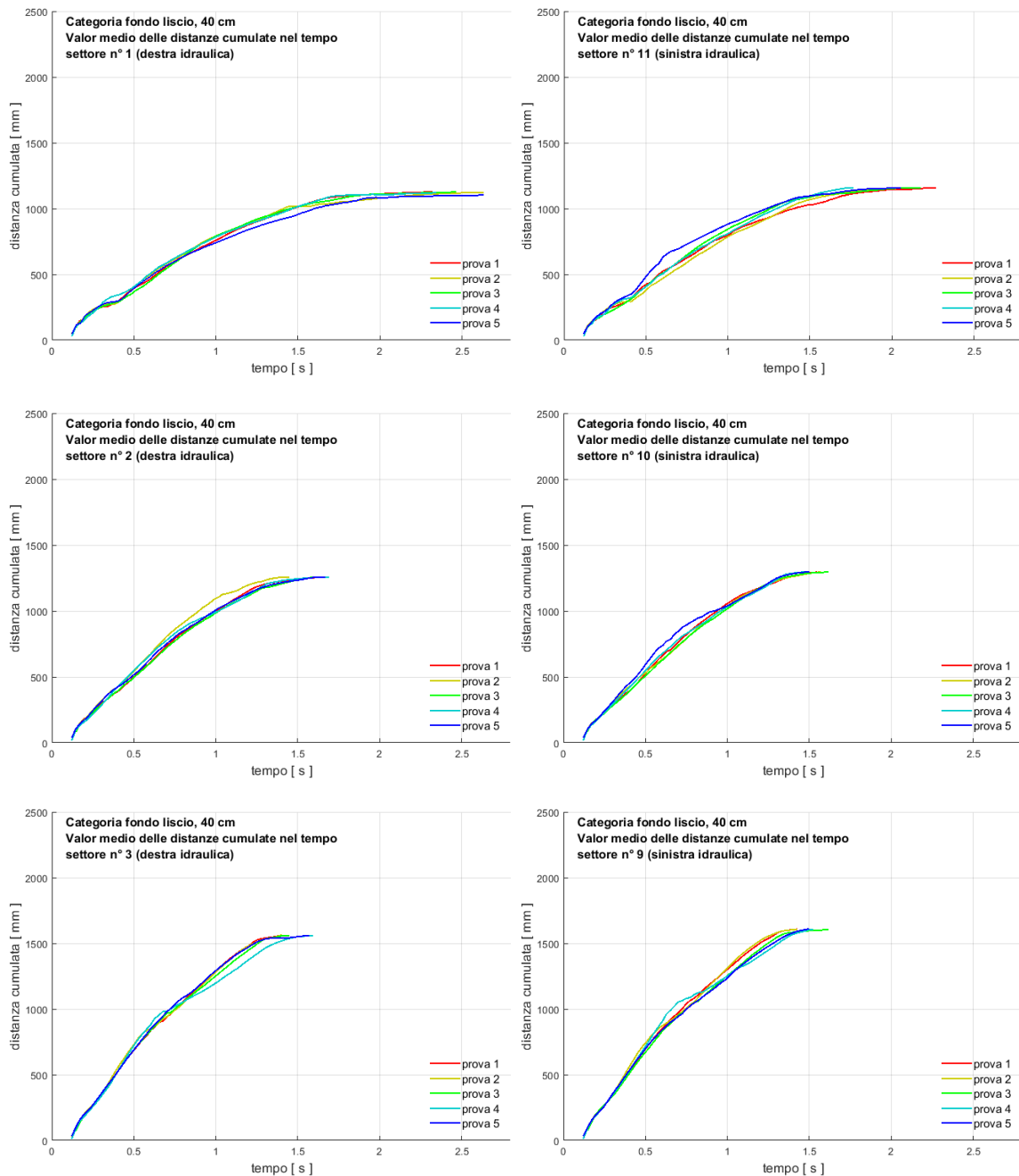
Figura 38 – Sovrapposizione delle 5 prove disponibili per la categoria fondo liscio, 40 cm. Sono indicati i tempi t e gli istanti i (corrispondenti al numero del frame indagato) di ogni realizzazione indagata

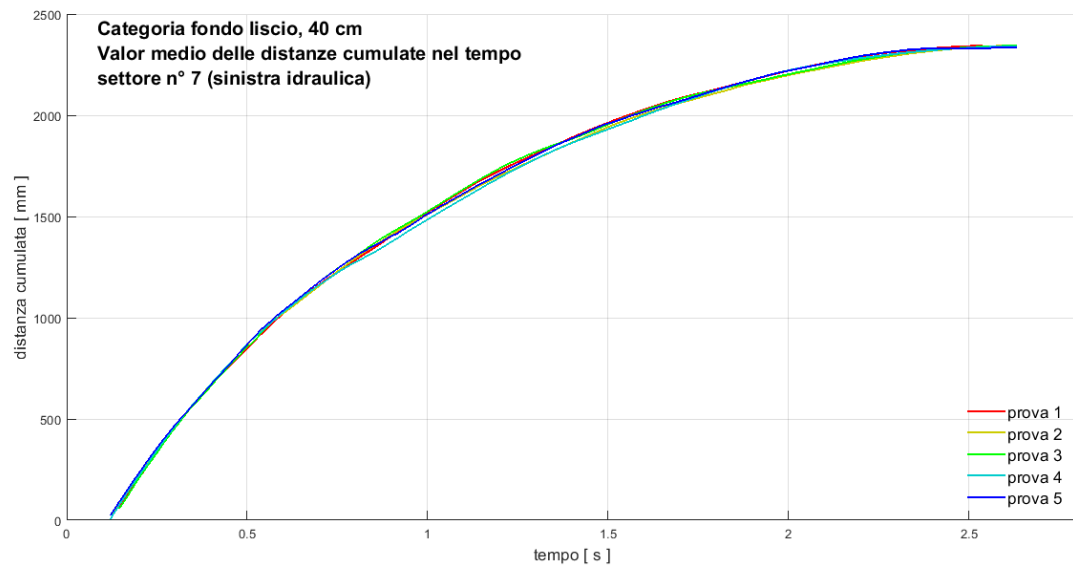
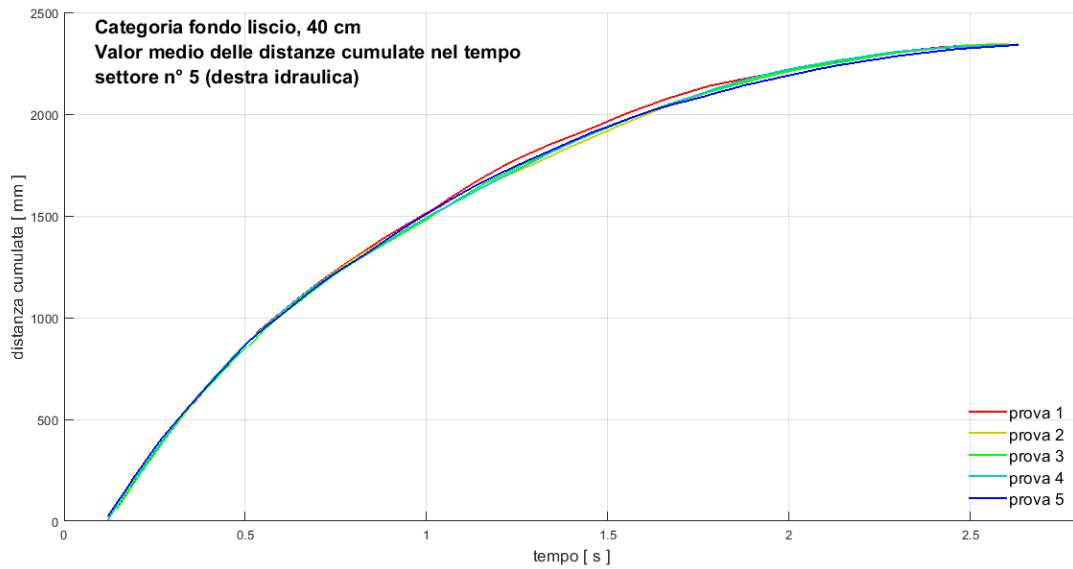
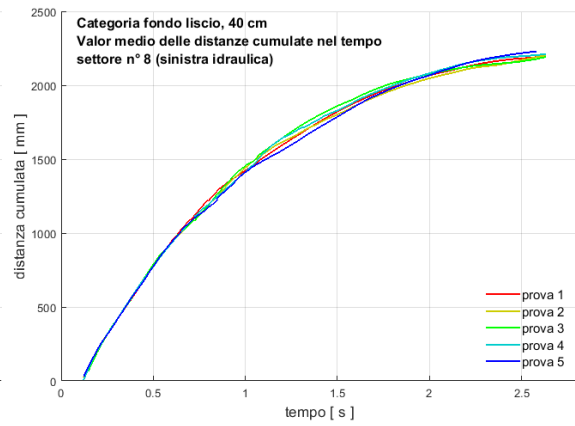
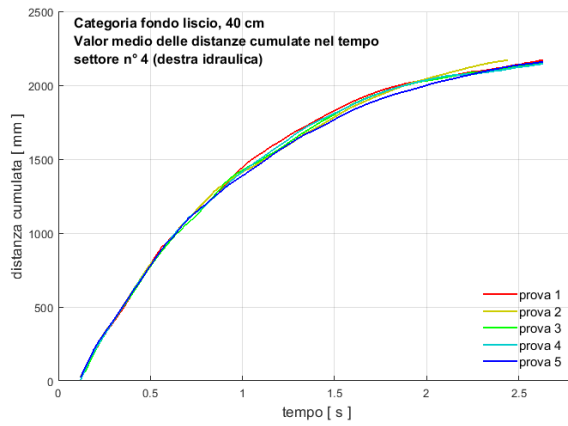
Come espresso in Figura 38, le variazioni maggiori nel comportamento si hanno nei settori più laterali e, in generale per tutte le condizioni, negli istanti più avanzati del fenomeno.

La commistione dei due fenomeni porta ad avere le differenze più elevate nei settori più esterni, nei momenti più avanzati.

5.1.4.2 Analisi quantitativa

La descrizione quantitativa della variabilità viene effettuata confrontando le curve delle distanze cumulate percorse rispetto all'origine del fascio, così come definite in 5.1.3.





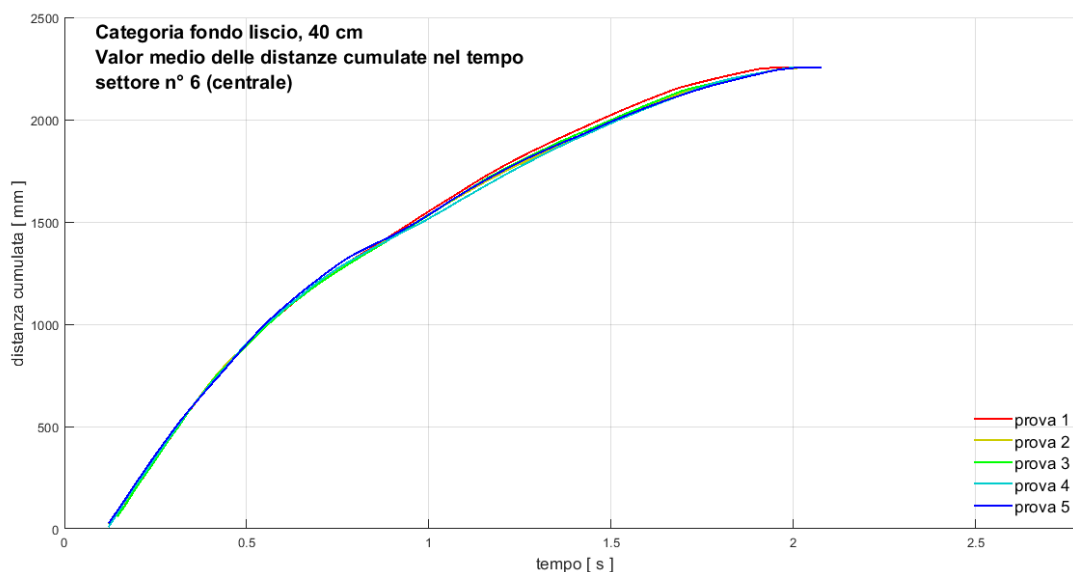


Figura 39 – Andamento delle curve tempo – distanza cumulata per la categoria di dam break a fondo liscio, battente di 40 cm. Le prove disponibili sono 5, ciascuna indicata con lo stesso colore di Figura 38.

Dalla Figura 39 possono essere estratti dati relativi ai tempi di arrivo ed agli scarti dal valor medio.

Per tempi di arrivo si intende, in questa sede, il tempo impiegato dall'onda per raggiungere, in ogni settore, la distanza limite dei settori più laterali (1 e 11), pari a 1120 mm, esattamente quella adottata in 5.1.3 (si noti che in tale capitolo la distanza limite era riferita ad un dam break a 30 cm, mentre in questa sezione si analizzano i dam break a 40 cm).

Tempi di arrivo – dam break a fondo liscio, battente 40 cm							
settore	P1 [s]	P2 [s]	P3 [s]	P4 [s]	P5 [s]	Media [s]	Massimo scarto [%]
1	2.32	2.22	2.22	1.81	2.01	2.12	14.38
2	1.21	1.04	1.23	1.21	1.16	1.17	11.16
3	0.89	0.89	0.89	0.89	0.82	0.88	6.59
4	0.77	0.75	0.77	0.75	0.72	0.75	3.85
5	0.70	0.70	0.72	0.70	0.68	0.70	3.45
6	0.68	0.65	0.68	0.65	0.63	0.66	4.41
7	0.70	0.70	0.70	0.70	0.68	0.70	2.78
8	0.77	0.75	0.77	0.75	0.75	0.76	1.91
9	0.87	0.87	0.92	0.82	0.87	0.87	5.56
10	1.14	1.11	1.16	1.14	1.11	1.13	2.56
11	1.86	1.64	1.76	1.55	1.45	1.65	12.57

Tabella 4 – Tempi di arrivo alla stessa distanza (1120 mm) per le curve di un dam break a fondo liscio, 40 cm

Per quanto riguarda gli scarti, si riportano in Tabella 5 i valori. Lo scarto rispetto al valor medio, calcolato singolarmente per ogni settore e per ogni istante (in ciascuna prova), è stato successivamente mediato sugli istanti temporali: si tratta dei valori presentati nelle colonne relative alle prove (P1, P2 ...). Il loro valor medio, settore per settore, denota una variabilità del tutto attesa, con i settori centrali, meno interessati dal fenomeno dei fingers e più collineari con la reale direzione del flusso, che esibiscono i valori minori.

Di interesse invece il massimo scarto individuato tra queste cinque realizzazioni, notevolmente elevato, con punte dell'ordine del 90% nei settori esterni. Si noti che tale scostamento non viene individuato indagando i soli tempi di arrivo.

In ragione di ciò, la variabilità sembra riconducibile alle diverse pendenze assunte dalle curve.

<i>Scarti rispetto al valor medio – dam break a fondo liscio, battente 40 cm</i>							
<i>settore</i>	<i>P1 [mm]</i>	<i>P2 [mm]</i>	<i>P3 [mm]</i>	<i>P4 [mm]</i>	<i>P5 [mm]</i>	<i>Media [mm]</i>	<i>Massimo scarto [%]</i>
1	9.68	11.71	11.42	12.21	20.75	13.16	57.77
2	6.66	19.49	11.82	8.18	4.83	10.20	91.16
3	8.20	7.93	3.94	16.60	7.60	8.85	87.50
4	13.83	14.35	7.27	8.93	16.66	12.21	40.46
5	13.41	6.62	5.14	5.73	8.59	7.90	69.76
6	9.50	2.96	3.60	6.13	5.44	5.53	71.83
7	8.41	7.81	8.15	9.23	6.02	7.92	24.06
8	6.93	11.65	17.65	10.57	18.93	13.14	47.31
9	8.80	12.43	8.57	13.65	9.10	10.51	29.89
10	5.08	6.19	9.10	3.91	13.70	7.60	80.33
11	14.88	17.50	9.34	8.96	25.52	15.24	67.47

Tabella 5 – Andamento degli scarti rispetto al valor medio della distanza cumulata per un dam break a fondo liscio, 40 cm

5.1.5 Confronto tra le categorie a fondo liscio

Come nel capitolo precedente, verranno presentati confronti per via grafica, e successivamente le analisi quantitative. Il confronto tra categorie differenti richiede di tenere in conto della diversa posizione delle origini dei fasci radiali, così come indicato in Tabella 3, qui riportata.

	<i>30 cm scabri</i>	<i>30 cm lisci</i>	<i>20 cm lisci</i>	<i>40 cm lisci</i>
<i>Coordinate xy dell'origine [px]</i>	<i>(2363, 1155)</i>	<i>(2335,1155)</i>	<i>(2440,1115)</i>	<i>2255,1123)</i>

Tabella 6 – Differenze di posizionamento dell'origine del fascio radiale per le varie categorie di esperimento

Si ricorda che le origini indicate sono espresse nel sistema di riferimento delle immagini cui appartengono, e sono espresse in pixel.

Anticipando quanto sarà espresso in 5.1.5.2, le diverse origini comportano non solo una traslazione dei sistemi di riferimento, ma portano anche a spazzare, con la realizzazione dei settori, aree le cui coordinate sono in realtà diverse tra loro. In sostanza, i vari fasci indagano zone differenti.

Tale applicazione ha tuttavia il vantaggio di poter riportare il confronto sul piano delle distanze cumulate relative, anziché assolute. Avendo rinunciato ad individuare un modo, comune alle varie categorie di dam break, per tracciare e categorizzare il fronte, il confronto in termini di distanze assolute risulta irrealizzabile, e sicuramente non può essere fatto applicando un singolo fascio a tutte le categorie. Per approfondimenti, si rimanda al 5.1.2.

Applicando invece fasci diversi per ogni categoria di dam break, si soddisfa la necessità di tracciare il fronte utilizzando settori che tracciano correttamente le direzioni del flusso, proprie di ogni categoria: trovandosi, infatti, il punto di impatto della vena in zone diverse, ed essendo questo l'elemento che dà origine all'onda, l'andamento pseudo-radiale della stessa interessa, di fatto, zone diverse del piano.

Di conseguenza, mettendo da parte le posizioni effettive (assolute) del fronte rispetto ad un riferimento comune quale può essere la breccia, si possono effettuare confronti basandosi sulla distanza cumulata percorsa (relativamente al variabile punto di impatto della vena) da ogni dam break, settore per settore, visto che ciascuno di essi indaga lo sviluppo dello stesso ramo dell'onda, ma nelle posizioni (assolute) differenti in cui esso si trova.

In Figura 40 sono espressi i fasci per le tre categorie a fondo liscio.

Le traslazioni che si individuano nel posizionamento dei fronti d'onda (evidenti nella lingua che descrive la vena, a destra) verranno naturalmente ricorrette in fase di confronto.

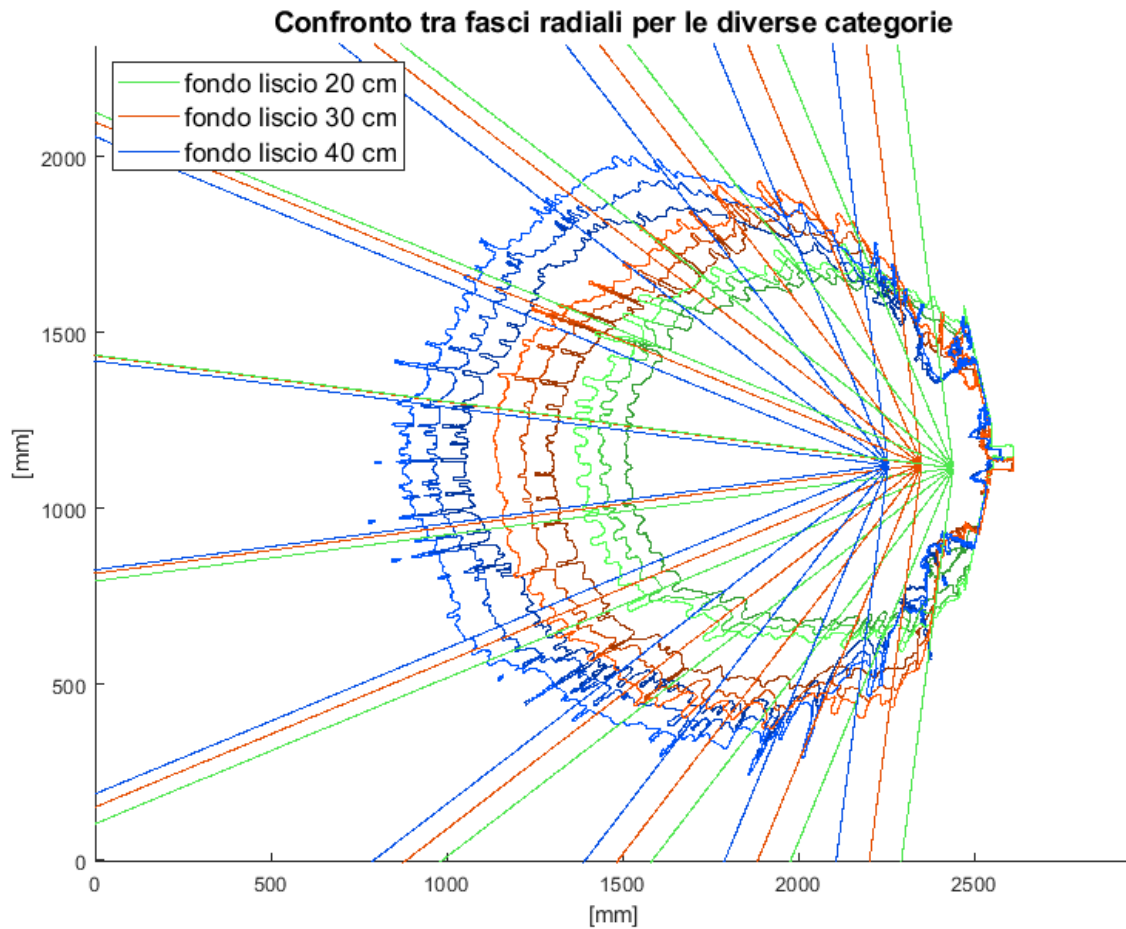


Figura 40 - Differenze tra i fasci radiali per ogni categoria di dam break a fondo liscio. Sono stati omessi quelli a fondo scabro per sola semplicità di visualizzazione. Sono sovrapposti 3 istanti per ogni onda, descritti con passo 3, e riferiti tutti agli stessi istanti (40, 43, 46): si notino le differenze di posizionamento tra le tre categorie.

Successive particolarità saranno analizzate direttamente in seno al 5.1.5.2.

5.1.5.1 Sovrapposizione grafica

Si elencano di seguito i confronti grafici tra le categorie di dam break a fondo liscio. Per esigenze di visibilità, saranno plottati i fronti in pochi istanti di tempo.

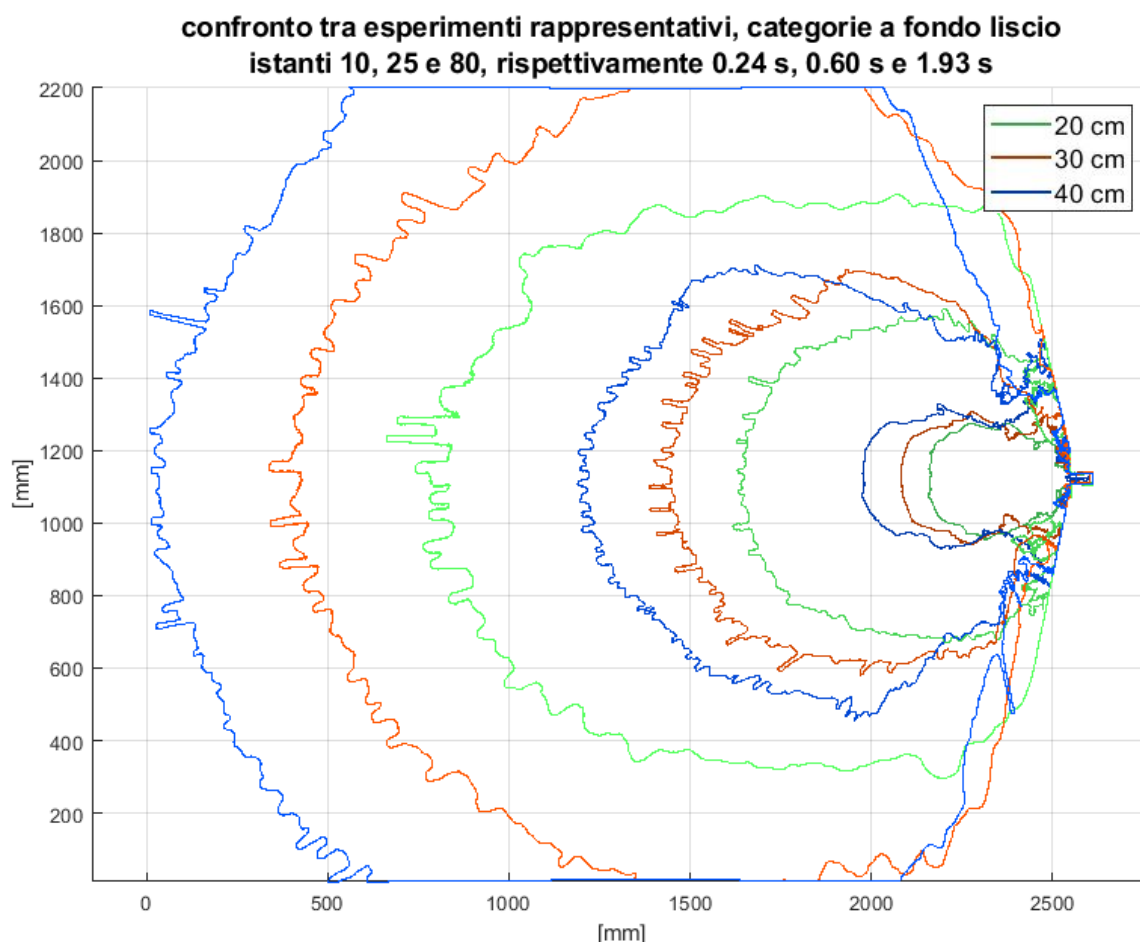


Figura 41 – sovrapposizione in 3 istanti (10, 25 e 80, corrispondenti a 0.24, 0.6 e 1.93 [s]) delle tre categorie di dam break a fondo liscio indagate

A livello qualitativo si può evidenziare, naturalmente, la velocità radicalmente diversa che caratterizza le tre categorie: il battente d'acqua presente nell'invaso, senza sorprese, risulta essere una variabile chiave nel determinare la velocità dell'onda che investe le aree allagate.

Sebbene le aree allagate risultino, infine, uguali (anche le prove con altezza 20 cm raggiungono i confini laterali del piano di valle), i tempi di arrivo e le velocità risultano differenti. Si evidenzia inoltre il comportamento più marcatamente radiale nelle categorie più energetiche, mentre in quella a 20 cm l'onda risulta così debole nella direzione trasversale da assumere una forma più quadrangolare.

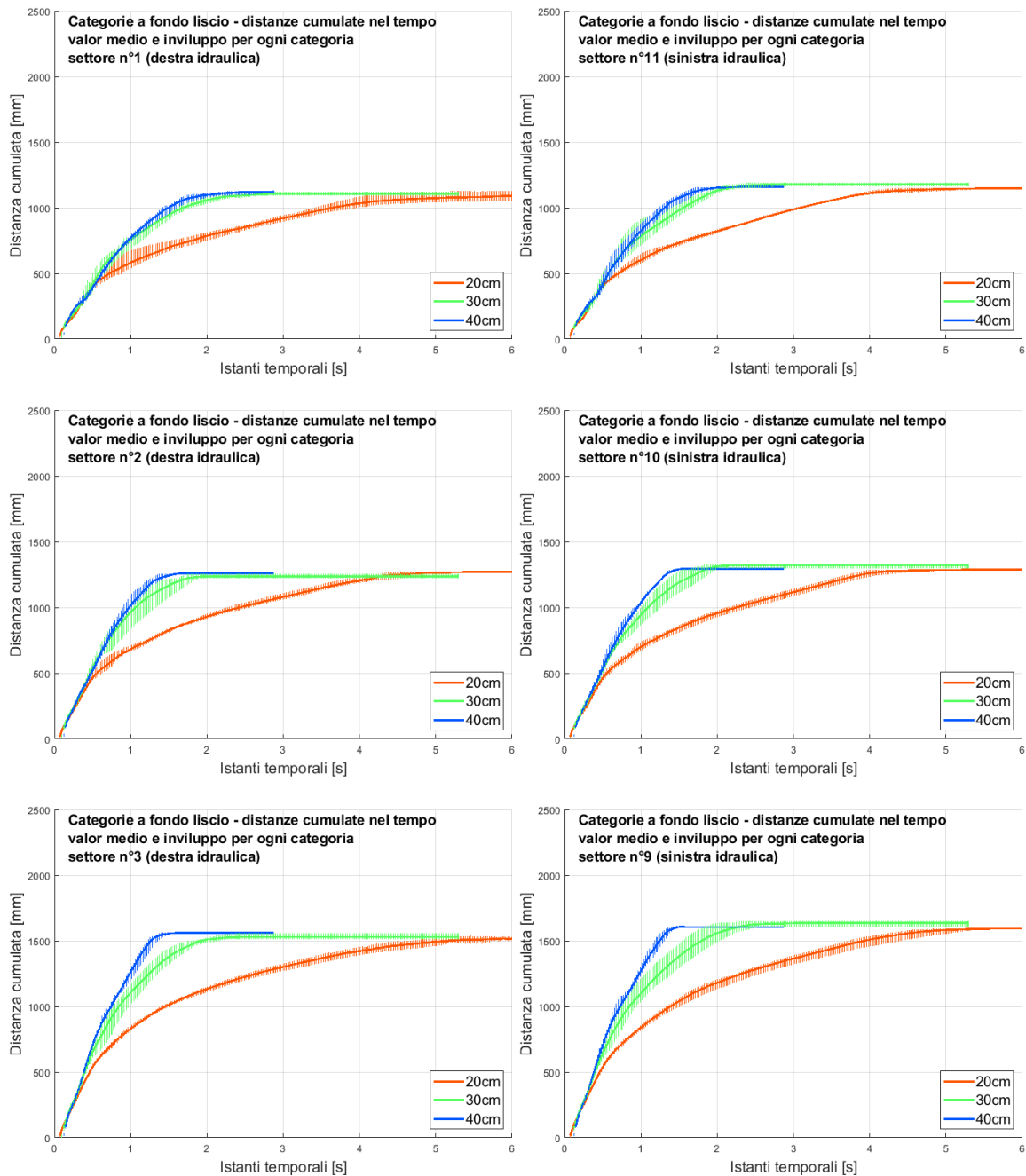
Da un'analisi su tutti gli istanti, che qui non è possibile presentare, la presenza di fingers risulta più marcata nella categoria a 30 cm.

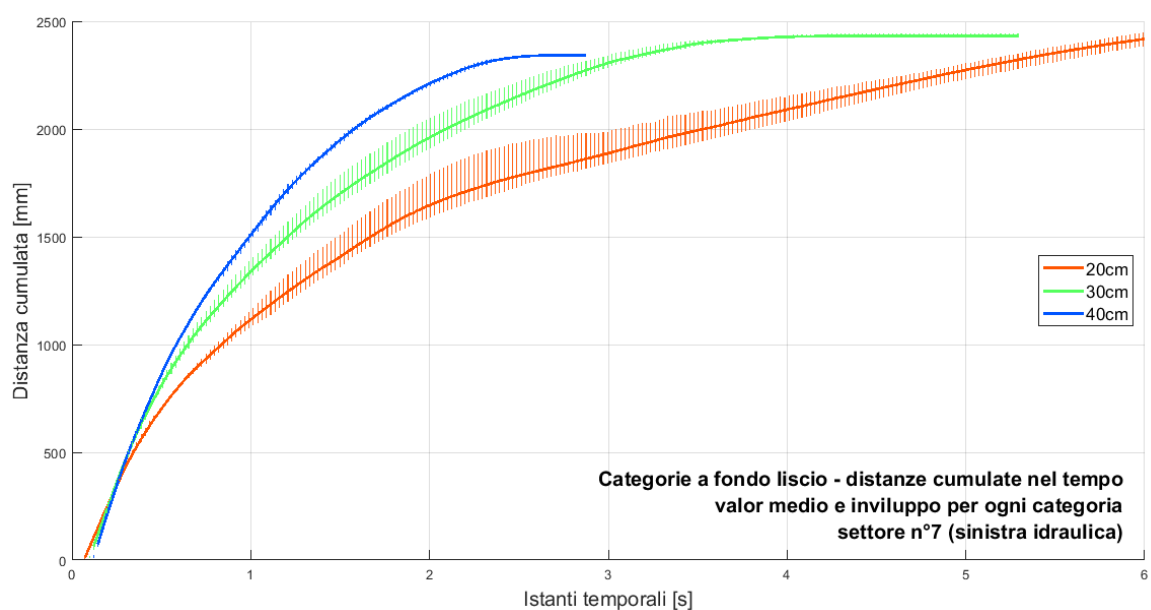
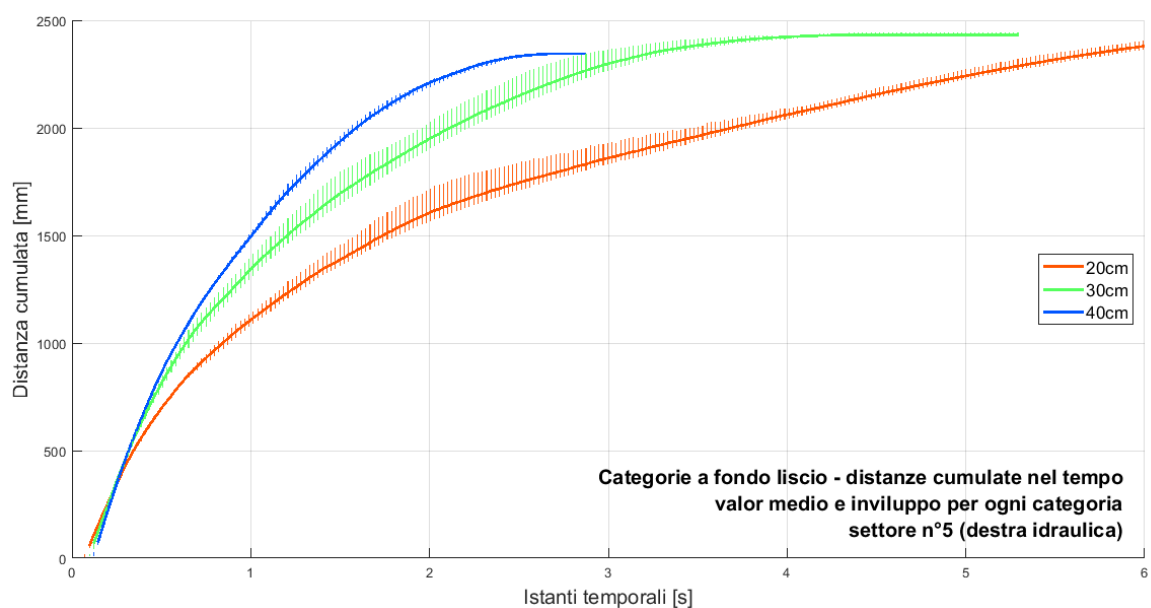
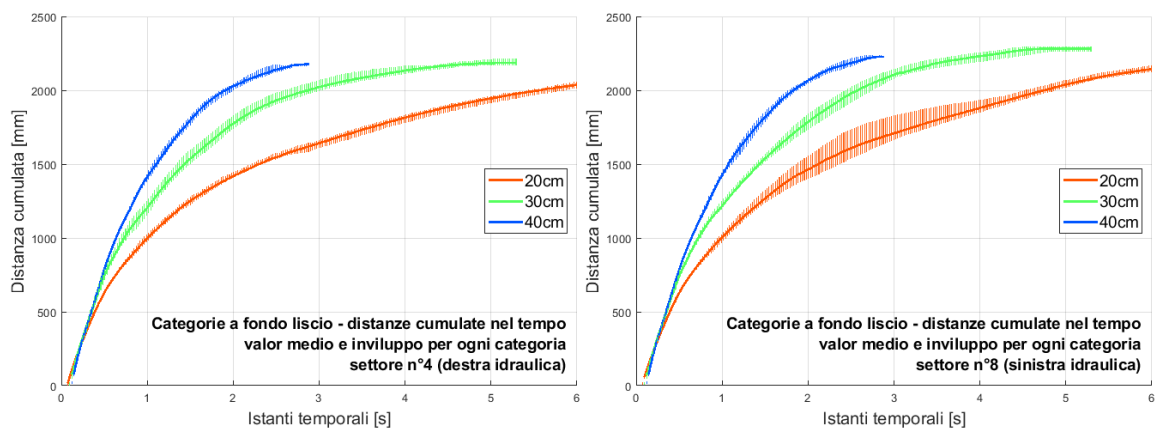
5.1.5.2 Analisi quantitativa

L'analisi quantitativa ripercorre quanto effettuato in 5.1.4.2, ricorrendo ai diagrammi tempo – distanze cumulate per evidenziare le differenze tra categorie, settore per settore.

Le curve cumulate di distanza radiale sono da intendersi, così come spiegato in apertura del 5.1.5, in senso relativo: la distanza è riferita, per ogni categoria, all'origine del proprio fascio radiale.

I valori riportati nei diagrammi, dunque, sono da interpretare allo scopo di comprendere, oltre all'evoluzione del fenomeno (variazione della pendenza), i tempi di arrivo alla generica distanza, e la celerità totale del fenomeno.





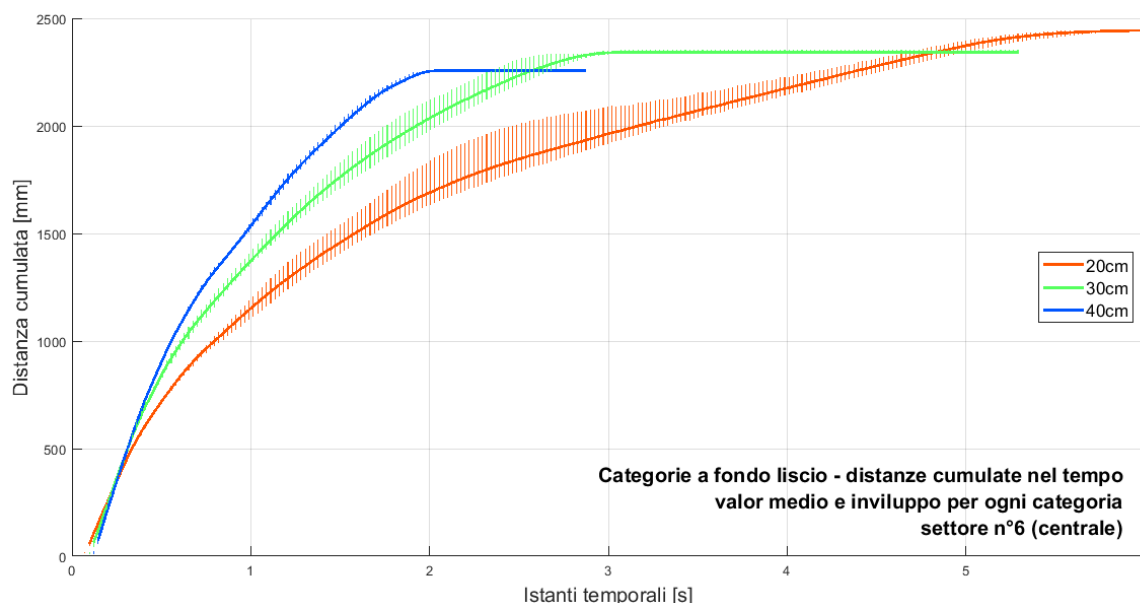


Figura 42 – Confronto tra le categorie a fondo liscio (20, 30, 40 cm). Sono indicati il valor medio e l'inviluppo delle distanze cumulate medie di tutte le prove disponibili per ogni categoria. La distanza è intesa sempre rispetto all'origine del fascio radiale.

Occorre fare un appunto. Come è possibile notare, pur essendo riferite agli stessi settori, le curve non raggiungono la stessa distanza cumulata finale.

Tale discrepanza, dell'ordine dei 100 mm, è da riferirsi a due cause, che interessano i vari settori in maniera differente:

- La diversa posizione delle origini dei fasci radiali, che comporta una distanza totale da percorrere fino al bordo differente per le varie categorie. Questo aspetto, di entità notevole, risulta impattante soprattutto per i settori centrali (5, 6 e 7). Ad esempio, la differenza tra i centri delle categorie 20 e 40 cm vale 185 mm
- L'effetto della de-distorsione delle immagini, che comporta una deformazione della forma della stessa, come descritto nella calibrazione della camera. Ciò significa che i settori più laterali, riferendosi a posizioni assolute differenti, vanno ad individuare il loro limite, ossia il bordo del fotogramma, in punti differenti della curva del fotogramma de-distorto. In questo caso, l'errore risulta più contenuto (inferiore ai 30 mm)

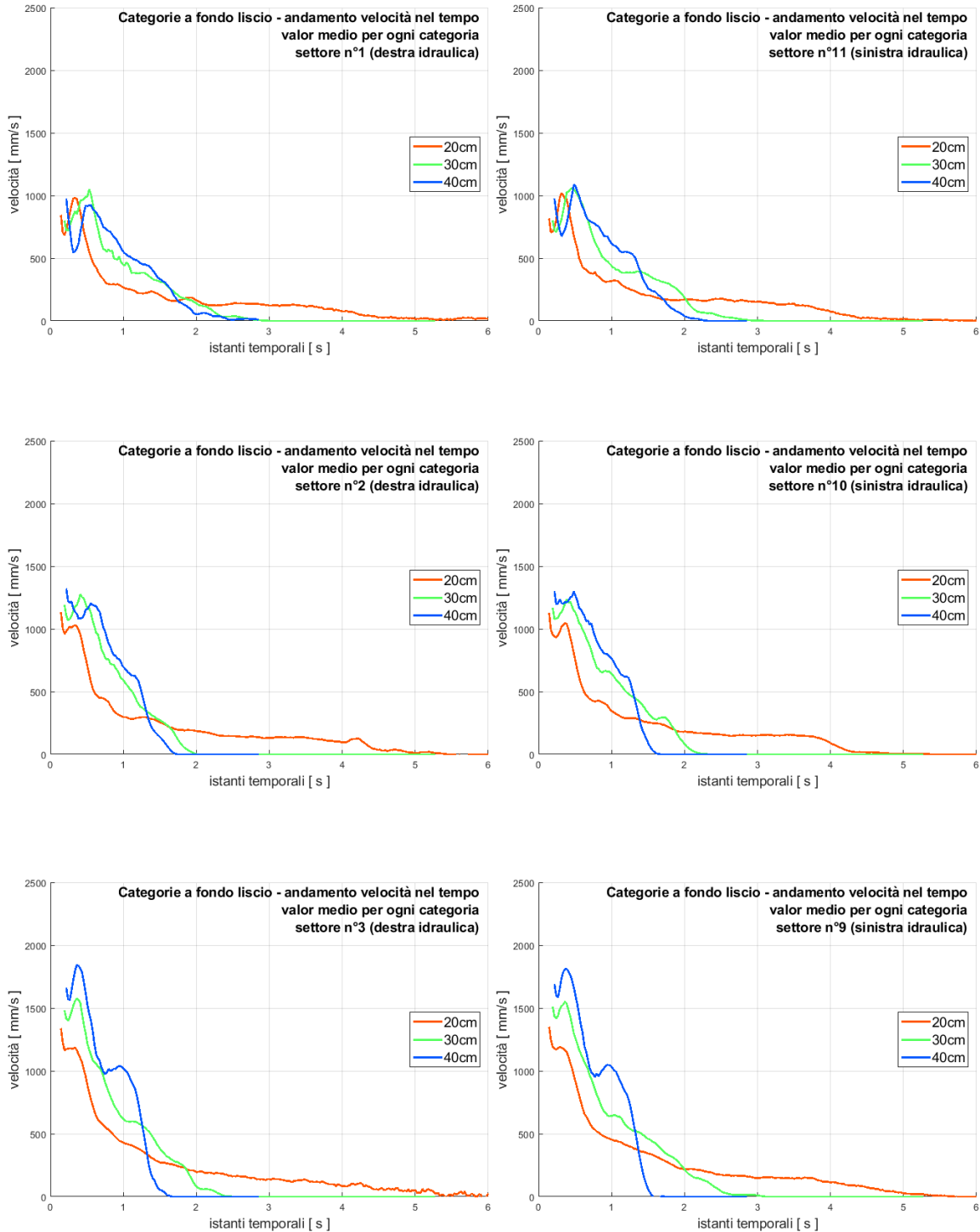
Detto questo, si possono osservare una varietà di comportamenti, interni alle categorie (ampiezza dell'inviluppo) e tra di esse. Se i dam break a 40 cm esibiscono la minor dispersione statistica in ogni settore, con un ottimo in quelli centrali, il comportamento non si riflette in maniera proporzionale nelle altre categorie.

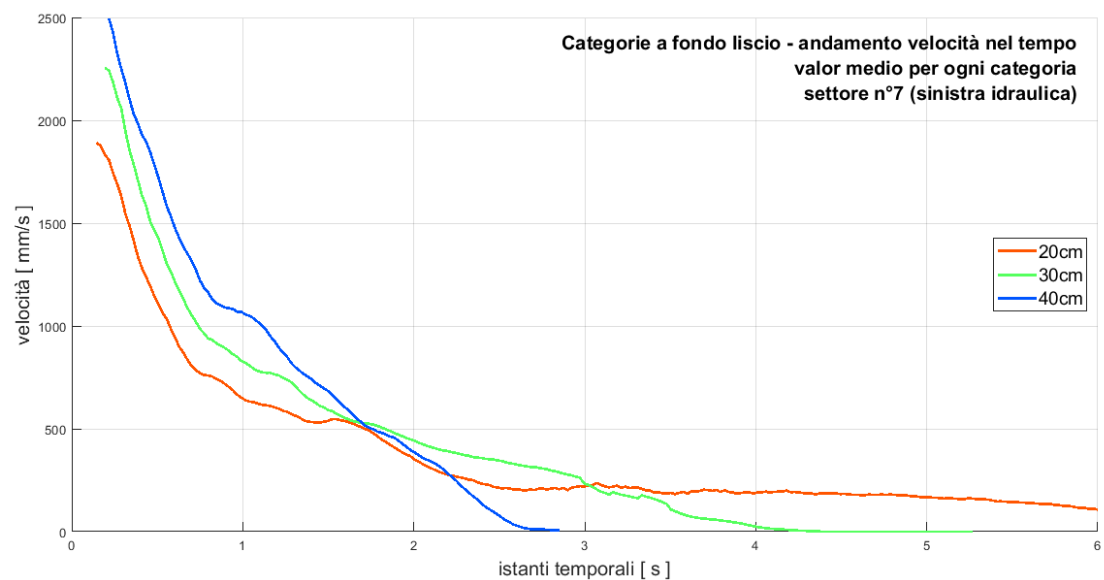
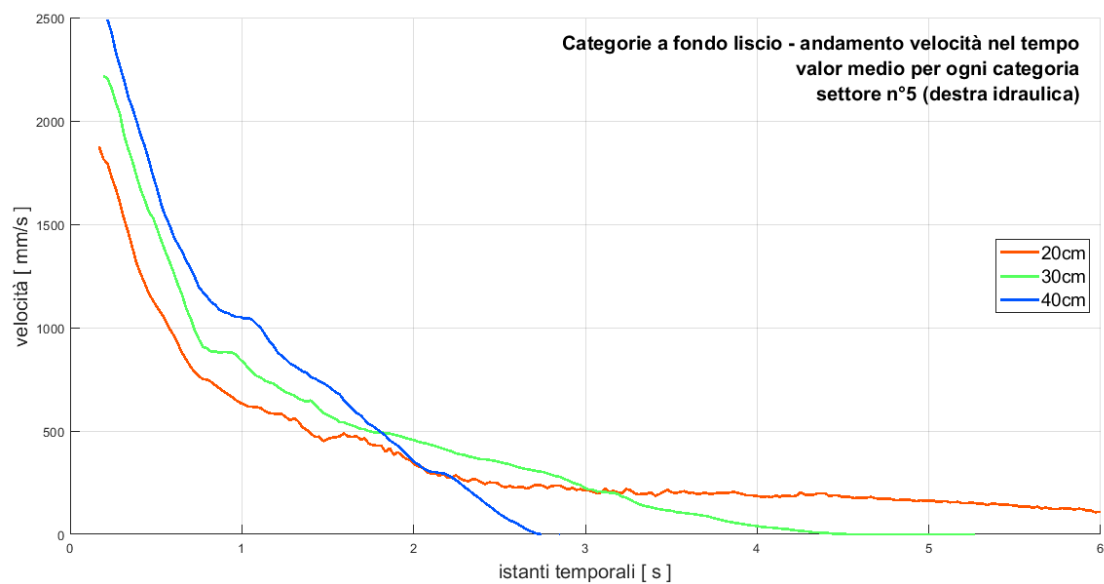
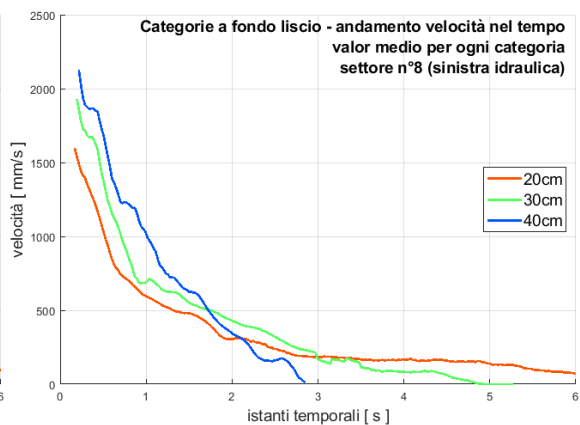
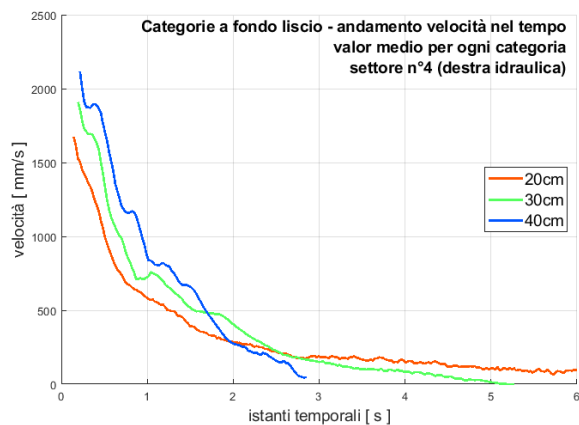
Quelli a 30 cm presentano lo stesso comportamento per quanto riguarda la variabilità per settori, mentre quelli a 20 cm lo fanno in maniera totalmente opposta: complice forse la notevole lentezza in direzione trasversale, la loro dispersione statistica viene assorbita nei settori più laterali.

Sempre nei riguardi della dispersione, occorre tenere in conto che la categoria a 30 cm è stata effettuata su un periodo di tempo lungo quasi un anno, da maggio 2018 a febbraio 2019, mentre tutte le altre sono state raccolte in un tempo totale di 2 settimane ciascuna.

Fattori esterni, non misurati, come la temperatura dell'acqua, possono aver inficiato in maniera sensibile, ma non valutabile, i risultati.

Seguono i confronti tra le prove per quanto riguarda i vettori velocità del fronte nel tempo.





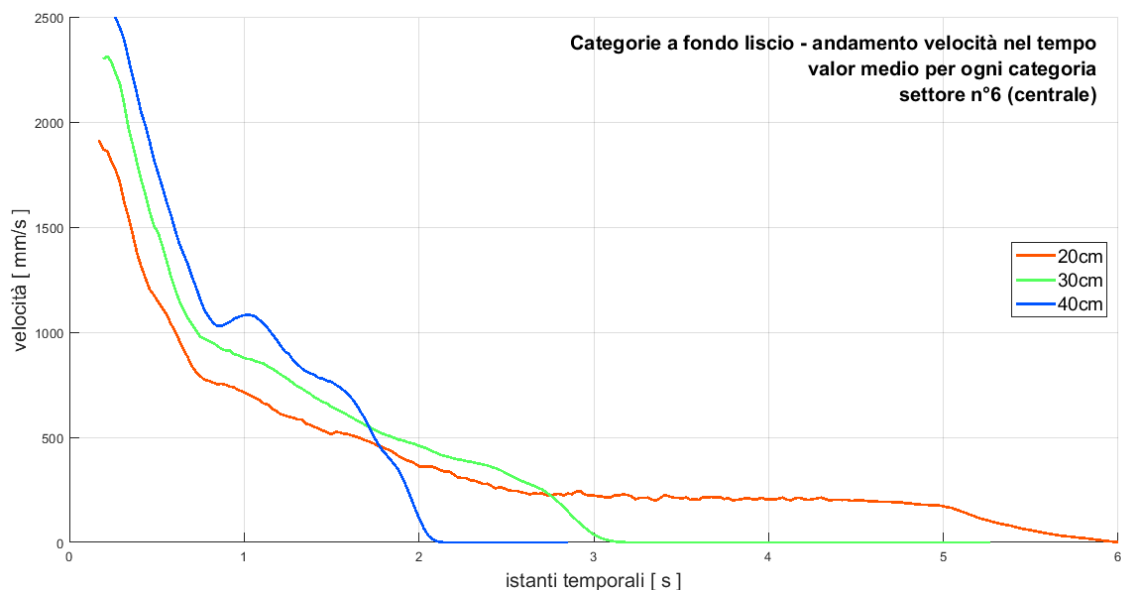


Figura 43 - Confronto tra le categorie a fondo liscio (20, 30, 40 cm). E' indicato il valor medio per la velocità del fronte di tutte le prove disponibili per ogni categoria

Un ulteriore confronto che può essere fatto riguarda il passaggio alle coordinate assolute. Ciò può essere effettuato agevolmente solo per il settore centrale, in quanto è l'unico che spazza (quasi) la stessa superficie tra tutte le categorie indagate.

Le traslazioni da applicare si riferiscono alle differenze tra le origini dei fasci radiali, così come descritte in Tabella 3, alle quali va inoltre aggiunta la distanza che separa l'origine presa come riferimento (quella delle prove a 30 cm, fondo liscio) dalla breccia. In questo caso, 275 mm.

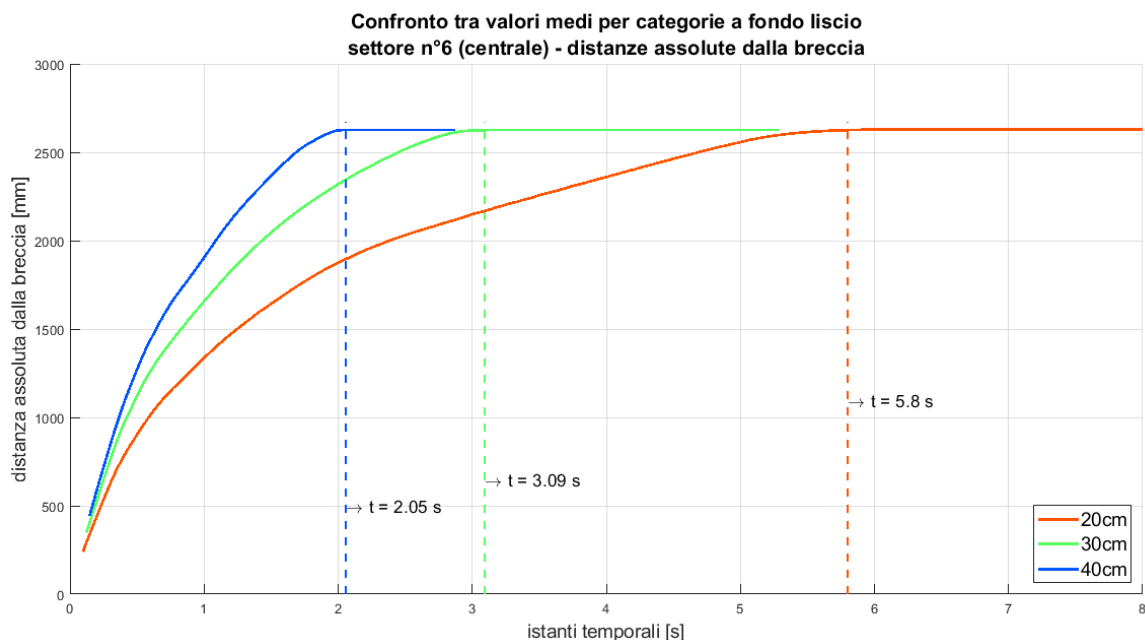


Figura 44 - Confronto tra le categorie a fondo liscio (20, 30, 40 cm), per le distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale della categoria a 30 cm. Le distanze assolute tendono ad uno stesso valore limite, che risulta essere il bordo del fotogramma opposto alla breccia. In evidenza gli istanti di arrivo per ogni categoria

In termini assoluti, risulta ancora più chiaro l'effetto del battente sulla velocità di avanzamento del fronte. Solo negli istanti iniziali si osserva, soprattutto per le categorie a 30 e 40 cm, un comportamento molto simile, che però tende a divergere nell'arco di pochi decimi di secondo.

5.2 Analisi del fronte d'onda per la categoria a fondo scabro

La categoria a fondo scabro comprende quattro diverse configurazioni geometriche di macroscabrezze. I pannelli, costruiti con maglie 50x50 mm e 100x100 mm, sono costruiti in maniera tale da poter essere applicati secondo due differenti angolazioni.

Le quattro possibilità sono indicate in Figura 45.

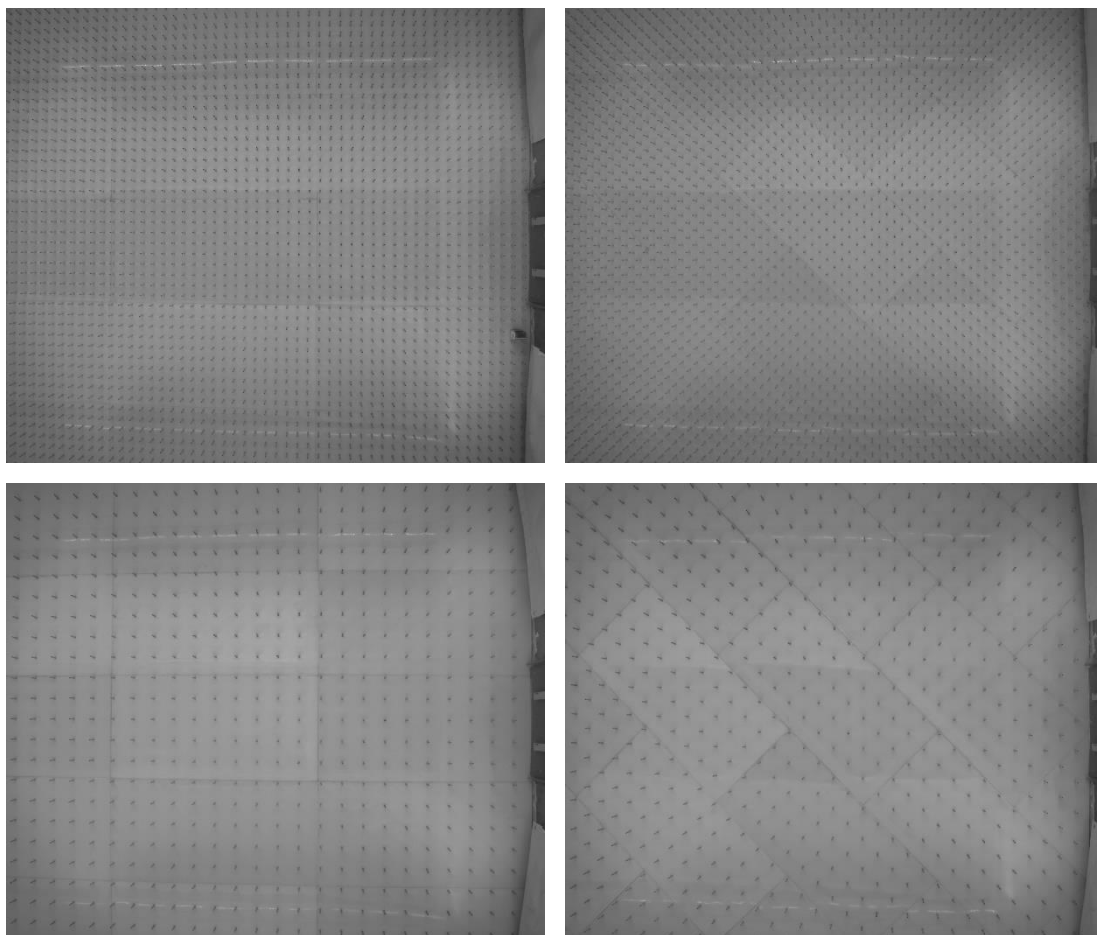


Figura 45 – Le quattro configurazioni di macroscabrezze applicate

Lo studio basato su superfici scabre è risultato leggermente differente da quello prima descritto, per quanto riguarda l'analisi delle immagini, come verrà spiegato.

Per quanto riguarda l'applicazione del fascio radiale, non vi sono differenze di sorta con quanto indicato in 5.1.2, per cui la questione non verrà trattata. Stesso discorso per l'analisi di ripetibilità, in quanto la scarsità di esperimenti disponibili (2 per categoria) non permette di effettuare una qualsiasi analisi.

5.2.1 Analisi delle immagini per la categoria a fondo scabro

L'analisi ripercorre i passi già presentati in 5.1.1, con una sola differenza. La presenza delle macroscabrezze costituisce una fonte di rumore più complicata da isolare.

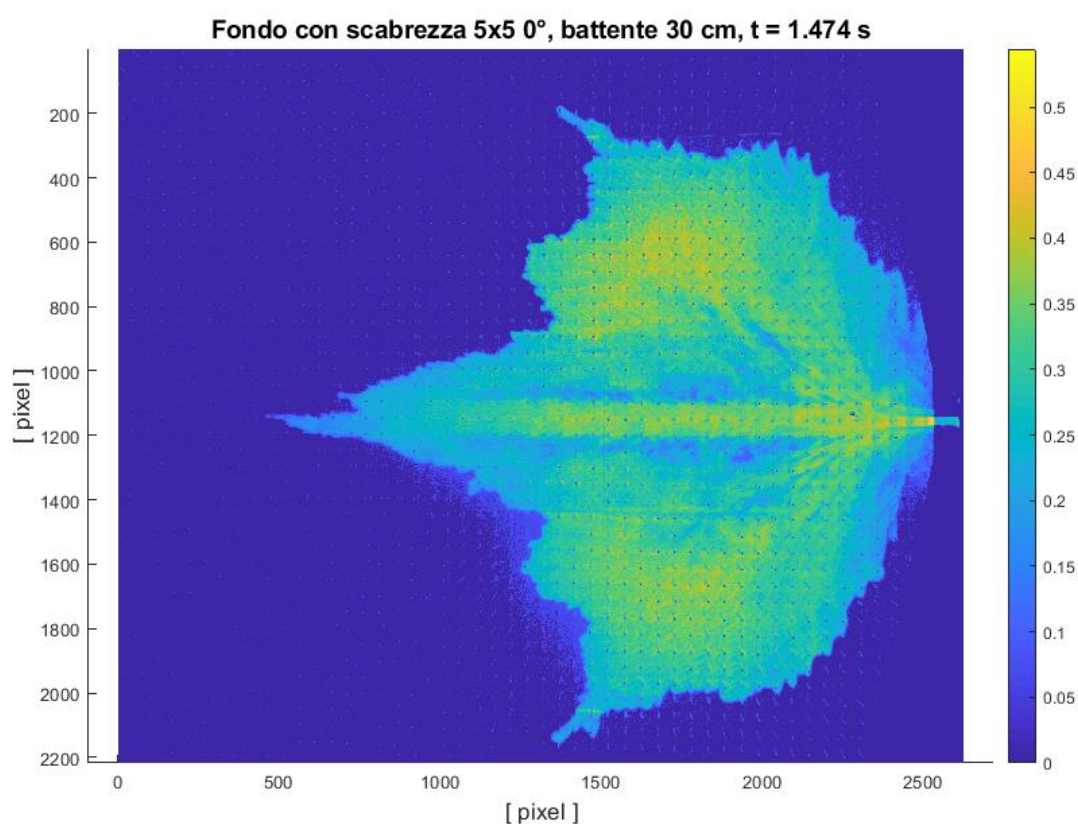


Figura 46 – Immagine normalizzata di un esperimento a fondo scabro 5x5 0°: è descritto l'istante 59.

Dall'operazione di binarizzazione emerge infatti un'immagine piuttosto sporca, come indicato in Figura 47, e sono presenti:

- “buchi” nell'onda, in special modo ai lati della vena, laddove per molti istanti la copertura d'acqua è costituita da un velo sottilissimo e spesso frammentato.
- cluster esterni all'onda, espressione del rumore, della variazione di luminosità nel tempo e, nel caso delle macroscabrezze, di leggere vibrazioni della camera che comportano un non perfetto allineamento dei pixel che descrivono le bacchette.

Se questo disallineamento può risultare influente per gli altri aspetti di image detection, così non è per le scabrezze: la sottrazione di pixel che le descrivono ad altri che descrivono il pvc bianco ha l'effetto di produrre, ovviamente, valori falsi che non vengono intercettati dalla soglia di cui sopra.

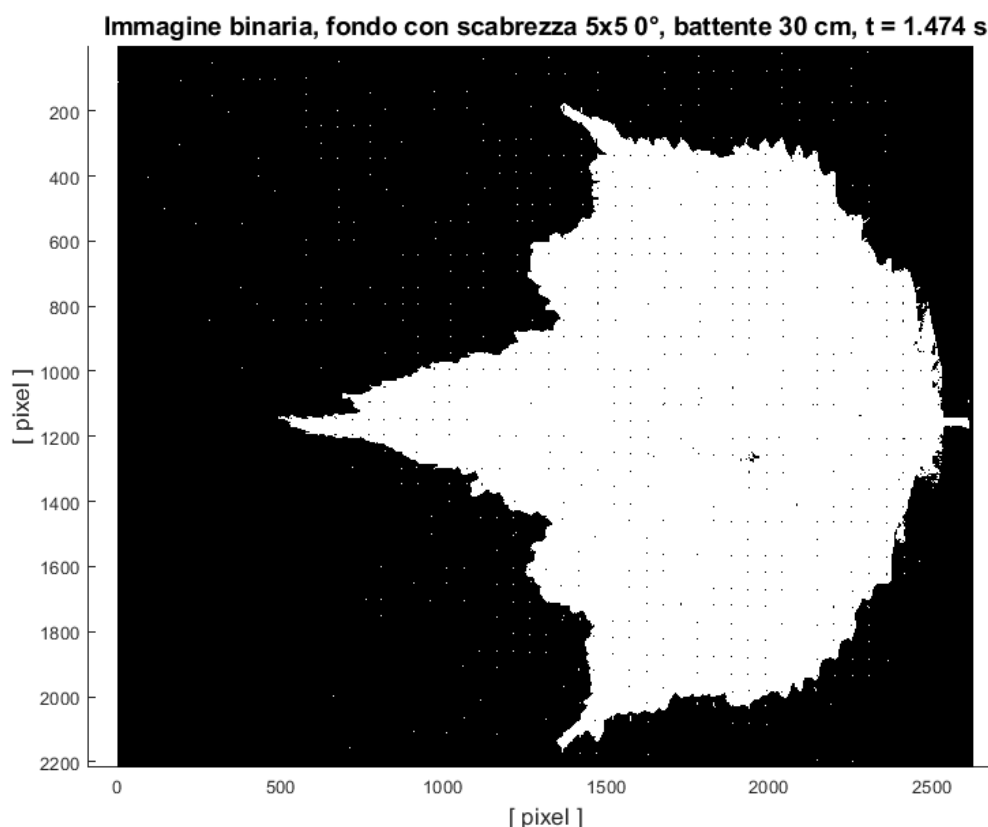


Figura 47 – Immagine binaria non ancora trattata con filtri di un esperimento a fondo scabro 5x5 0°: è descritto l'istante 59.

Allo scopo di abbattere le imperfezioni si fa ricorso, come prima, al comando “imfill” per riempire i vuoti entro la regione bianca dell’onda.

Per eliminare invece i cluster di valori logici positivi, indicanti le scabrezze, che si trovano all’esterno, si utilizza il già citato “bwareaopen”, che era effettivamente stato adottato per eliminare il problema nelle immagini con scabrezza, piuttosto che in quelle lisce.

La dimensione massima dei cluster da eliminare risulta variabile tra le categorie di dam break macroscabri, ma la sua determinazione è un lavoro piuttosto semplice: infatti, grazie alla binarizzazione l’onda è un’unica macro-regione, per la quale non esiste possibilità di essere cancellata dal comando. Occorre solo prestare attenzione e non porre comunque valori sopra il 150 – 200, poiché rari piccoli cluster che definiscono gocce di fronte isolate possono esistere (raro, in realtà, per i dam break scabri).

I risultati dell’applicazione sono indicati in Figura 48 e Figura 49.

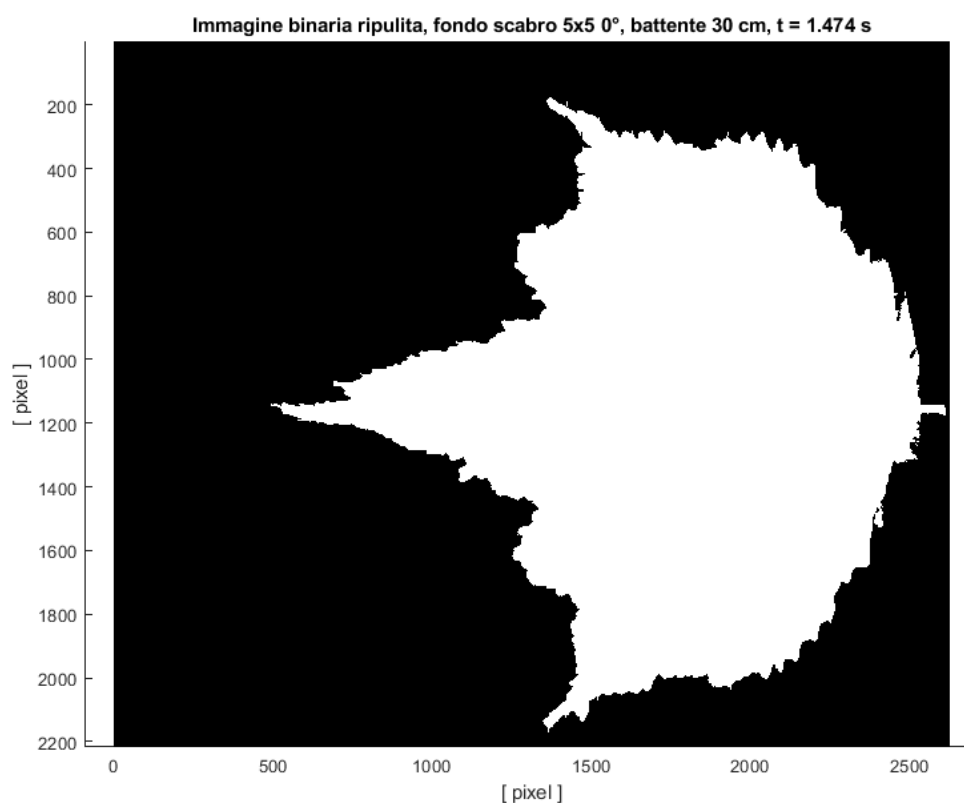


Figura 48 - Immagine binaria trattata con filtri di un esperimento a fondo scabro 5x5 0°

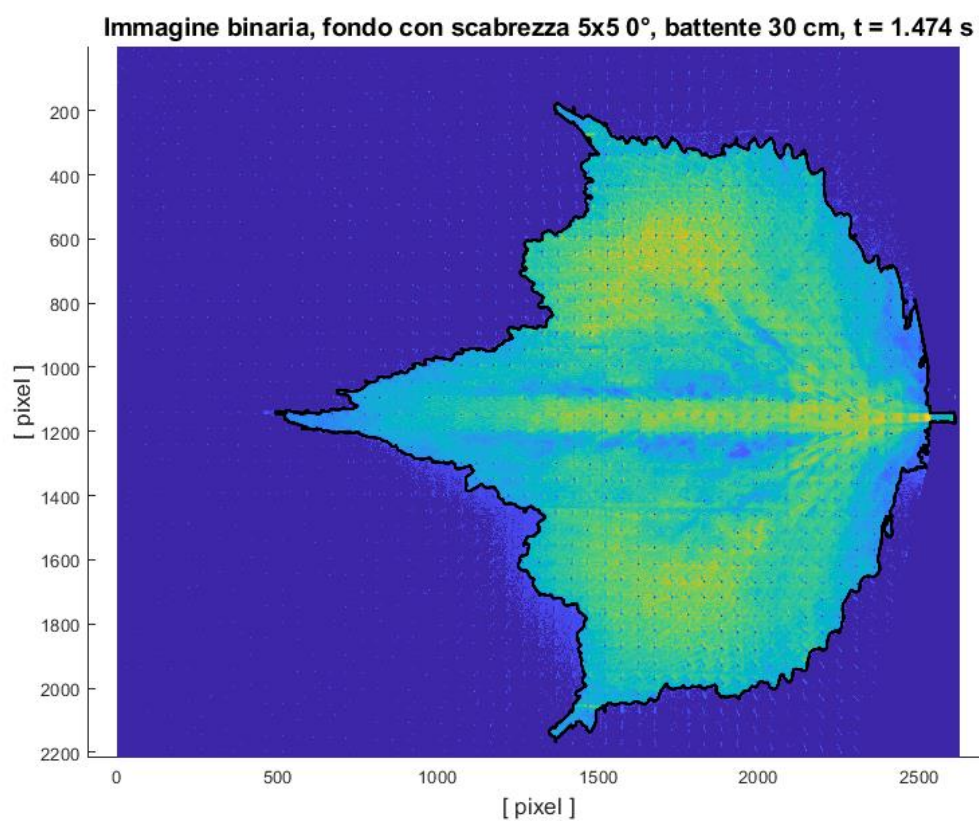


Figura 49 - Fronte d'onda individuato (in nero) su un esperimento a fondo scabro 5x5 0°

Come ben visibile in Figura 49, si può affermare che la procedura adottata per le categorie a fondo liscio funziona anche per quelle a fondo scabro.

5.2.2 Analisi delle caratteristiche del fronte per singolo esperimento

Con lo stesso spirito del sotto capitolo 5.1.3, si procede allo studio di un singolo esperimento appartenente alla categoria degli esperimenti a fondo scabro.

Si sceglie in particolare un dam break con maglia 5x5 e angolo 0° , la cui conformazione è riportata in Figura 50.

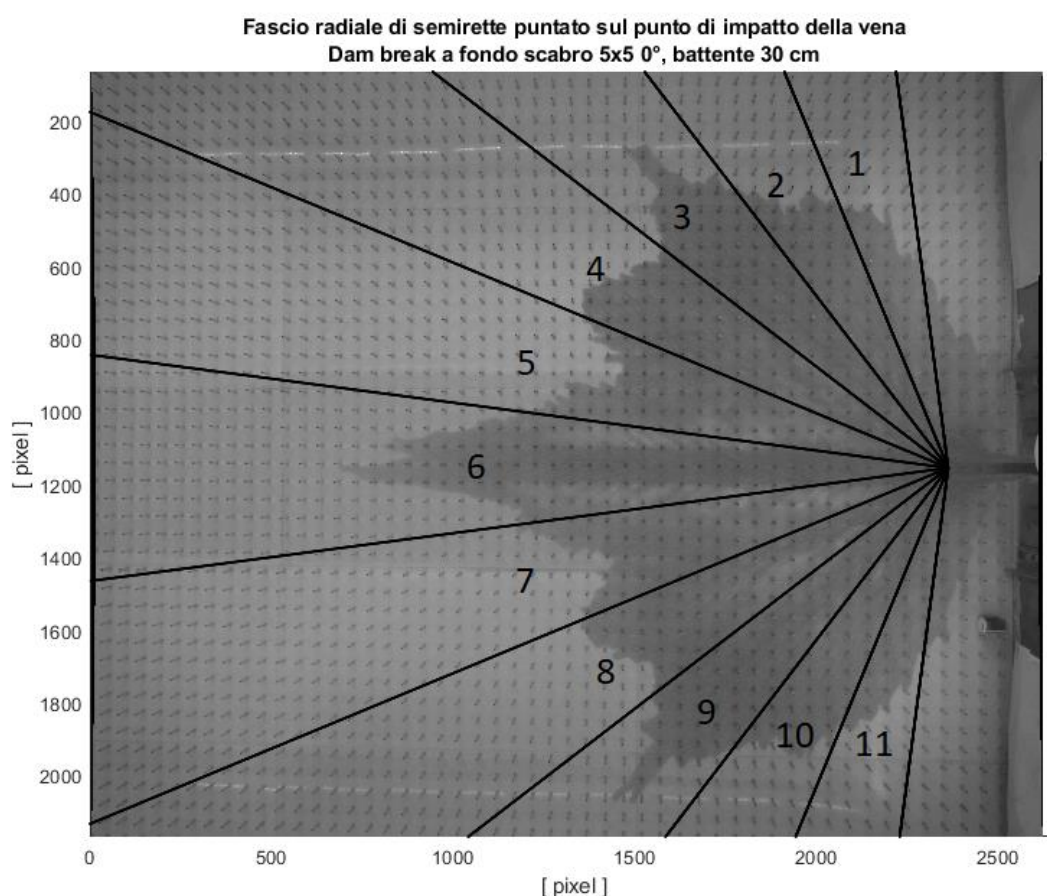


Figura 50 - Fascio radiale di semirette puntato sul punto di impatto della vena. In background, una prova con fondo scabro 5x5 0° , con battente di 30 cm

In Figura 51 è indicata la sovrapposizione dei fronti con passo temporale costante, per il dam break in esame. Si noti come, anche per la categoria scabra, l'ipotesi di avanzamento quasi radiale del fronte sia verificata. Ciò permette di ottenere risultati coerenti dall'analisi con il fascio radiale.

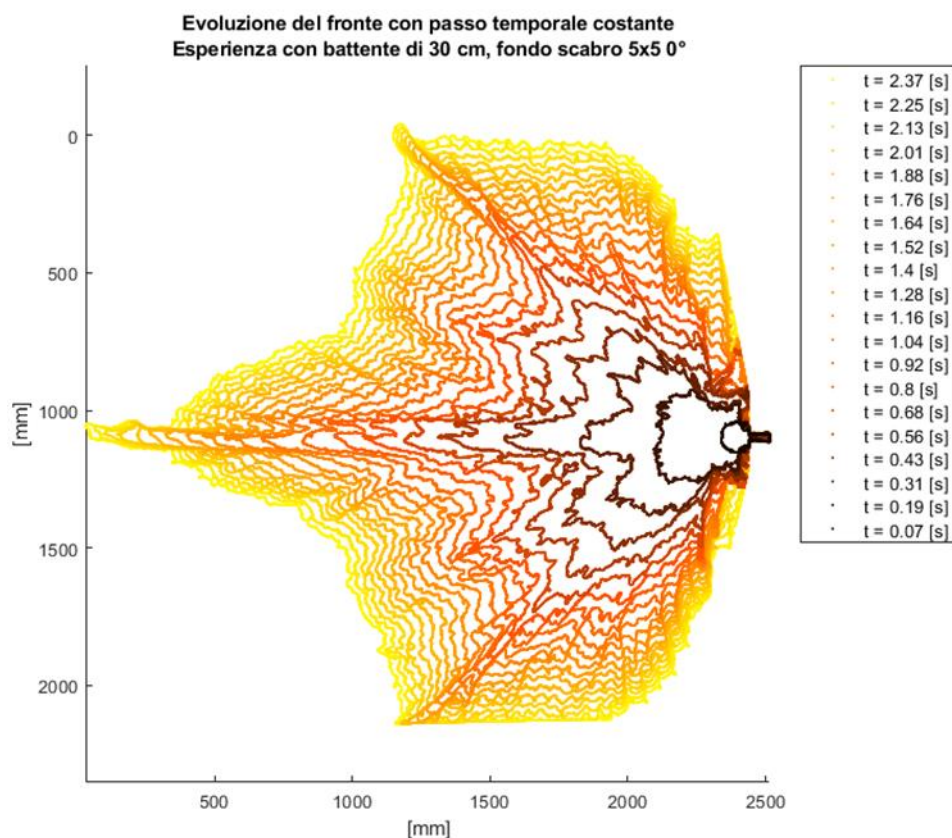
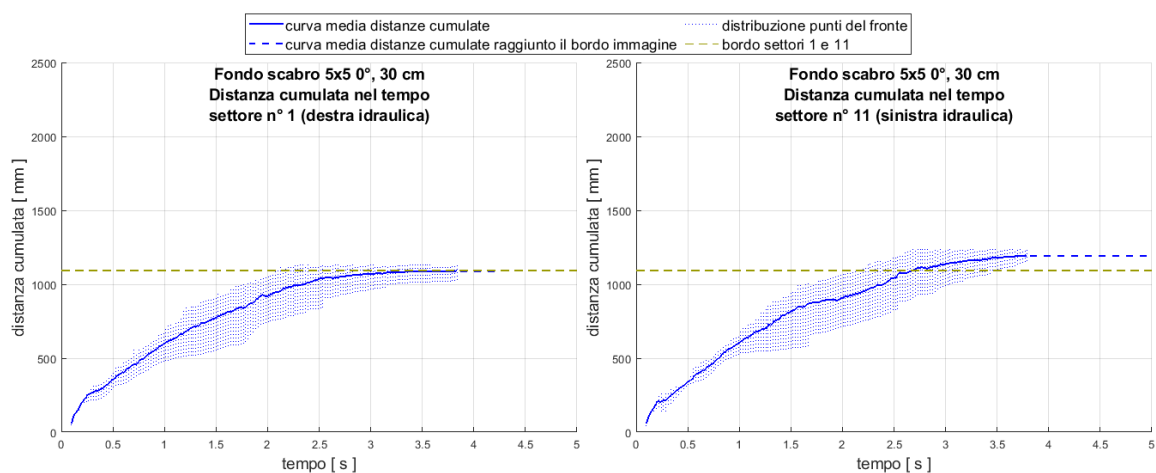
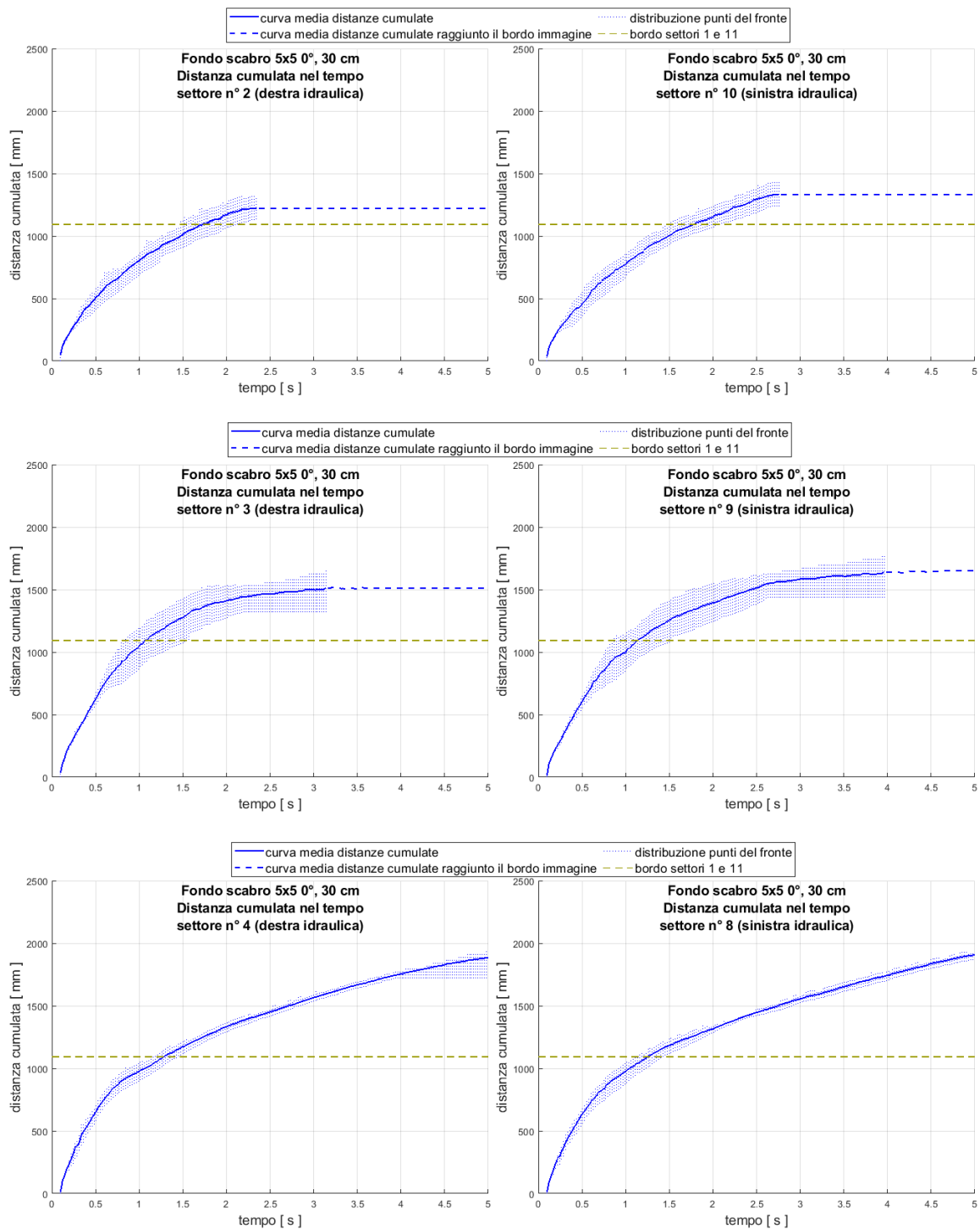


Figura 51 - Evoluzione temporale del fronte d'onda con passo costante (5) su 20 istanti, in coordinate metriche, per una prova a fondo scabro 5x5 0°, battente 30 cm

Si elencano di seguito i risultati dell'analisi quantitativa basata sulla posizione media del fronte, per le distanze cumulate nel tempo, rispetto all'origine del fascio radiale.





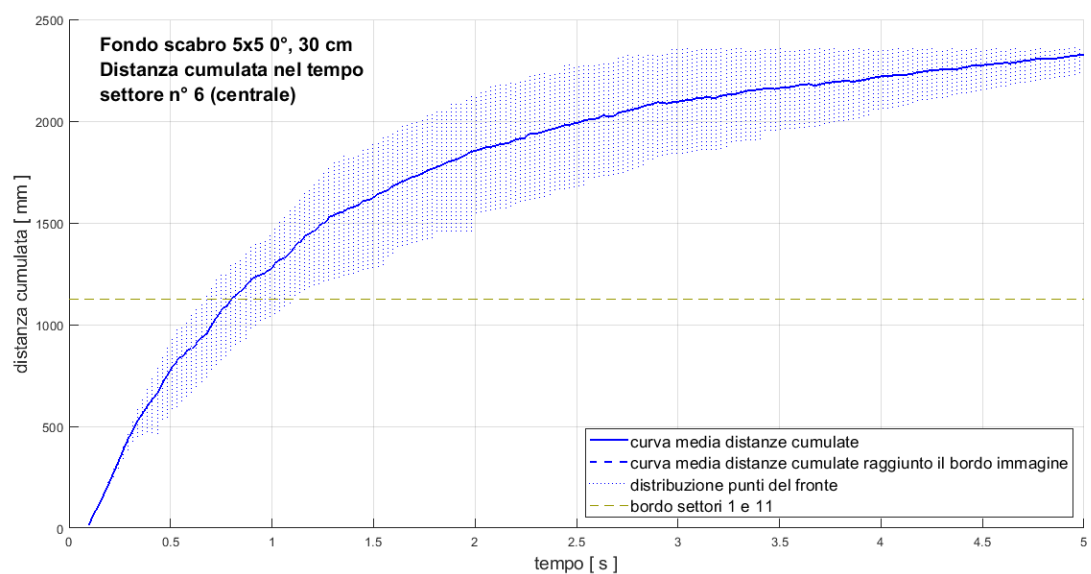
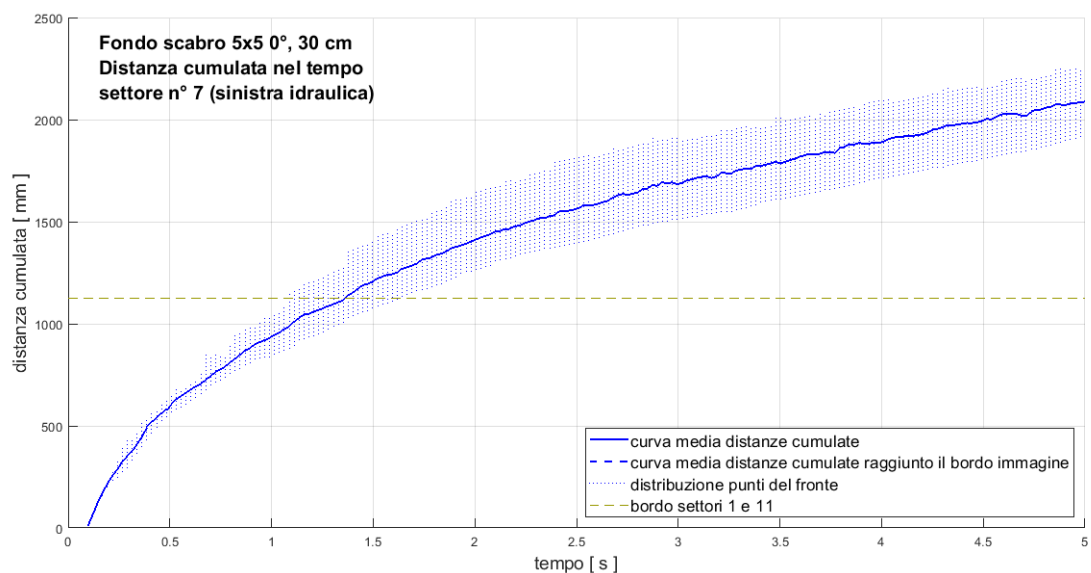
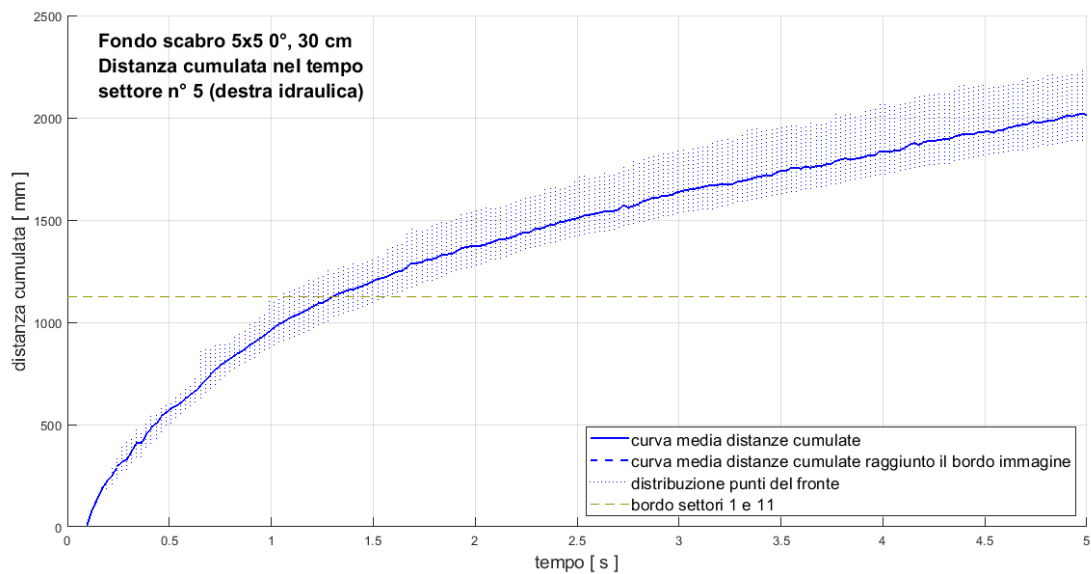
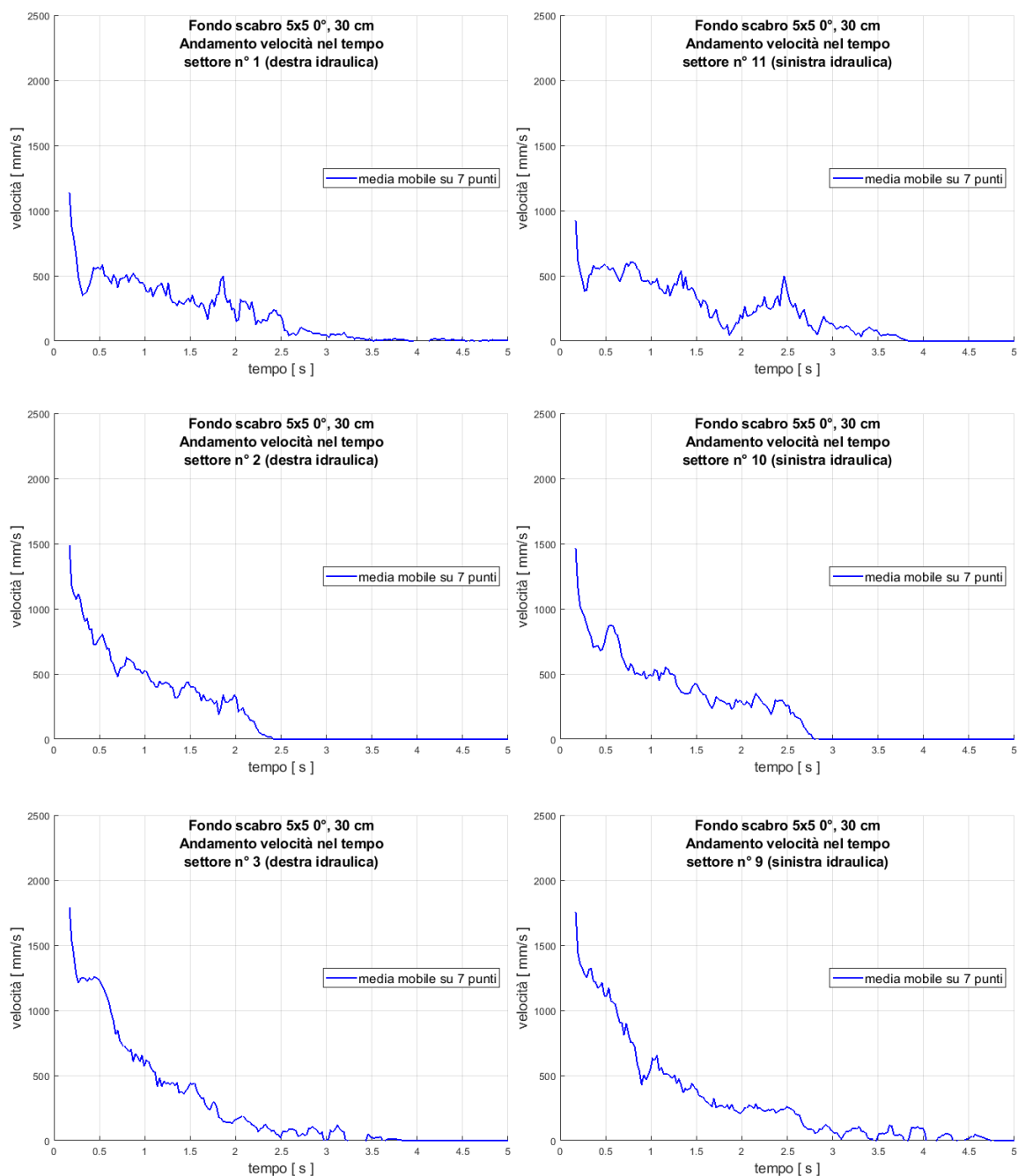


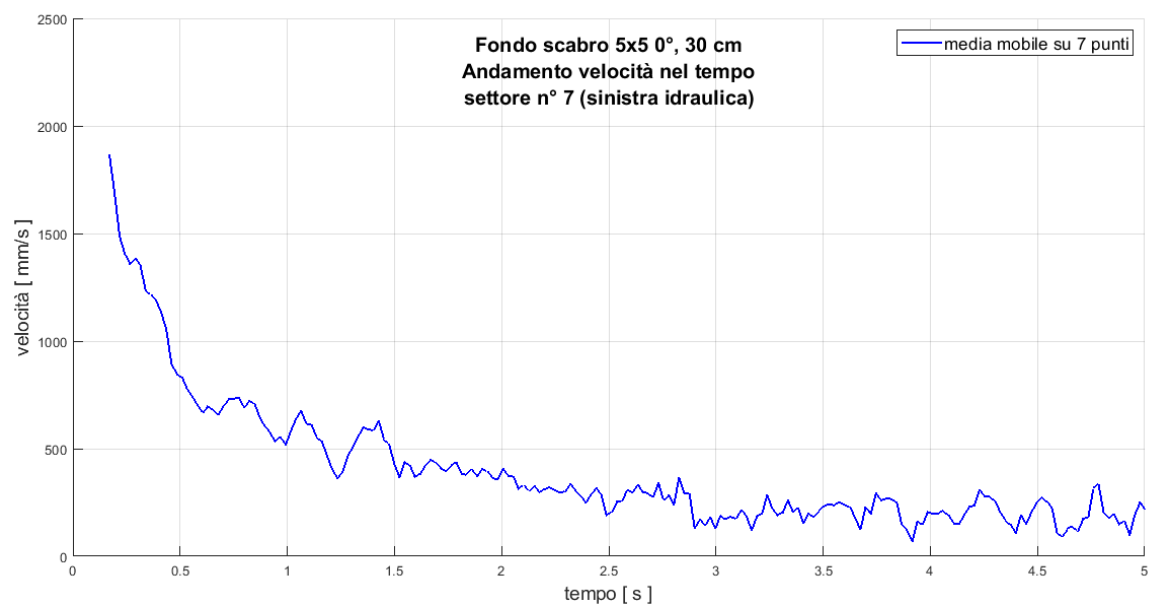
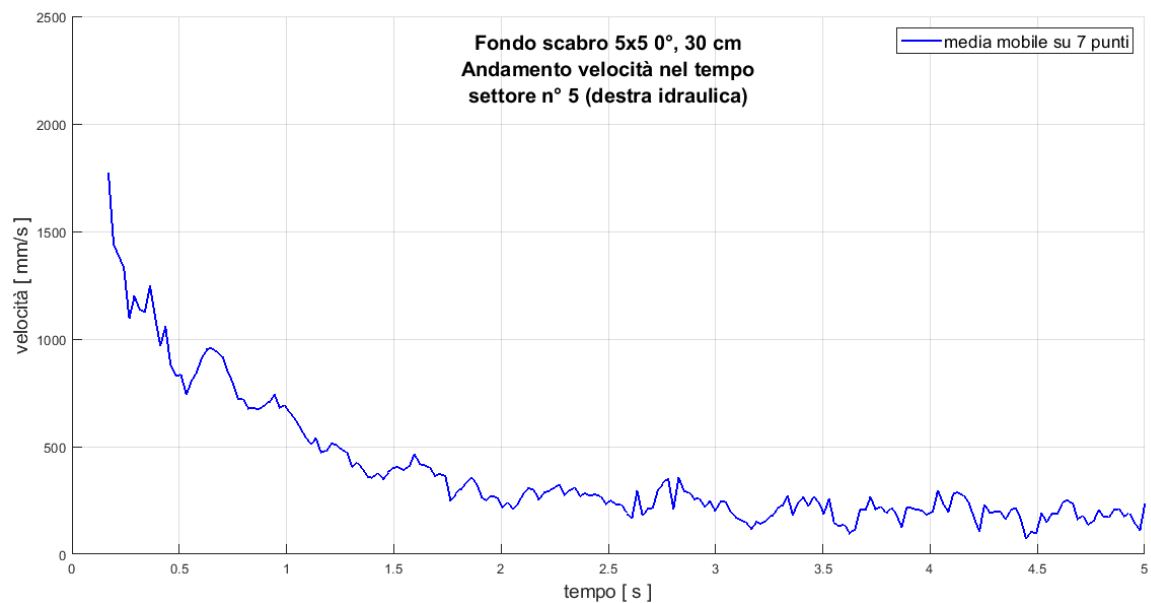
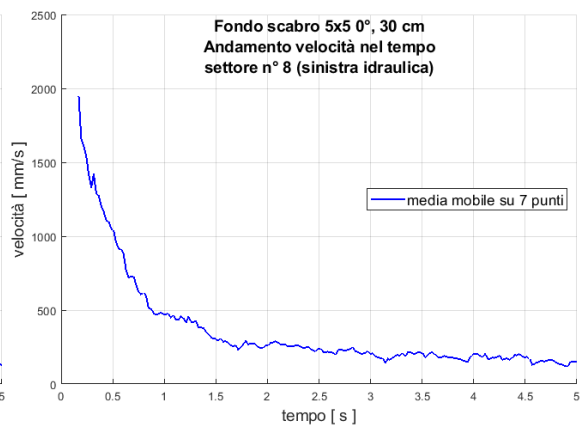
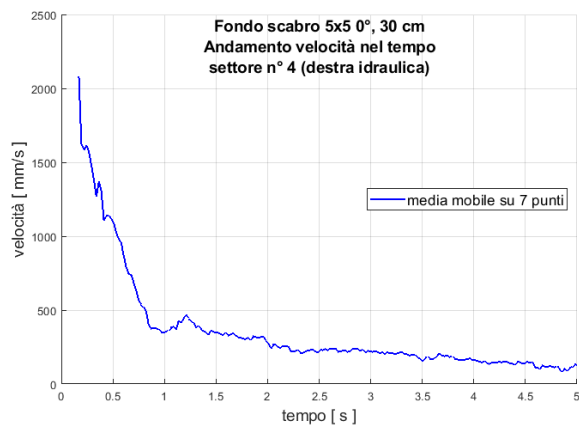
Figura 52 - Andamento nel tempo del valor medio delle distanze cumulate del fronte d'onda, per un dam break a fondo scabro 5x5 0°, con battente di 30 cm

Si nota, per la categoria a fondo scabro, una variabilità molto elevata delle posizioni del fronte. A differenza che nella categoria a fondo liscio, qui non si tratta di fingers, così come sono stati definiti (protrusioni del fronte che rimangono isolate dal moto totale), ma piuttosto si osserva un fronte più frammentato, con ampie differenze di posizione tra i vari punti.

Ciò è da ricondursi alla presenza delle macroscabrezze, che naturalmente “rompono” il fronte. Inoltre, va considerato che la scabrezza del piano ora è molto minore, in virtù del fatto che l’acqua scorre non più su pvc, ma su vetro sintetico.

Si elencano ora i risultati dell’analisi delle velocità del fronte per ogni settore





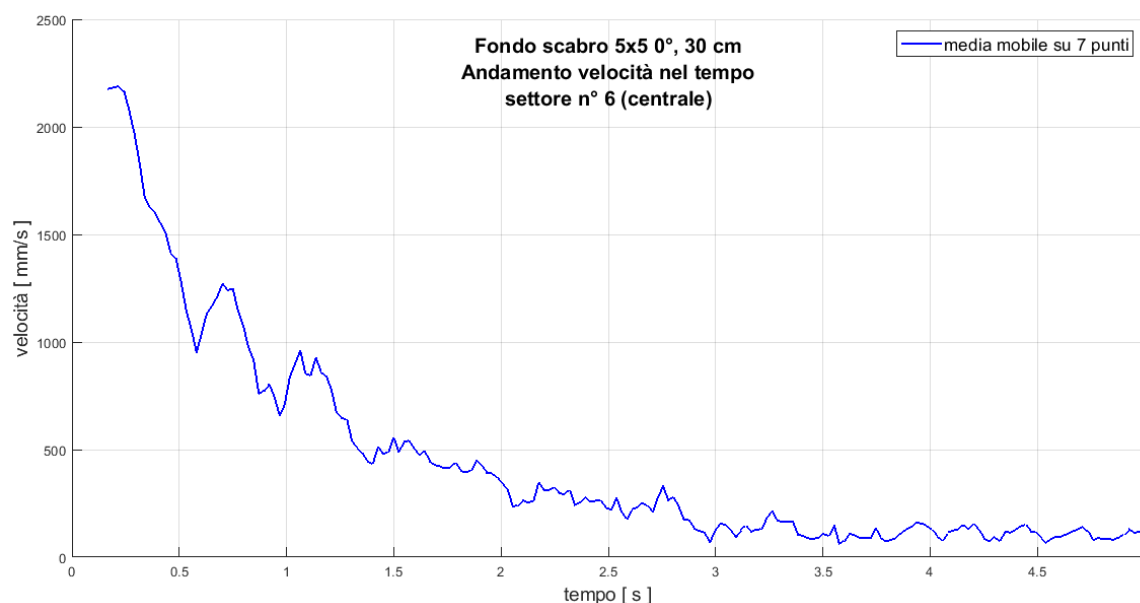


Figura 53 - Andamento nel tempo delle velocità del fronte d'onda, per un dam break a fondo scabro 5x5 0°, con battente di 30 cm. La curva è ottenuta tramite media mobile su 7 punti

Dallo studio delle velocità emerge chiaramente, innanzitutto, la dimensione del fenomeno: si va dai 2.5 m/s di velocità nei pressi del getto per i settori centrali (correlati, nello stesso istante, a velocità molto più contenute in direzione trasversale, dell'ordine di 1 m/s) a valori inferiori ai 0.5 m/s negli istanti più avanzati di misura, quando ormai l'intero piano è stato invaso dall'onda.

Rispetto alla categoria a fondo liscio, si può dire che il modulo della velocità, negli istanti iniziali, come ci si può attendere, risente poco della condizione di scabrezza (troppo poco spazio entro cui questa si manifesta), per poi comportare un generale rallentamento dell'onda in tutti i settori.

Una visualizzazione più efficace per confrontare tra loro i settori viene dalla sovrapposizione delle curve medie per ogni settore, come indicato in Figura 54.

Si noti che le curve non iniziano dall'origine: questo perché l'origine del fascio radiale di indagine non coincide con la breccia, e quindi con l'istante iniziale dell'esperimento (inteso come il primo fotogramma in cui si ritrae acqua sul piano).

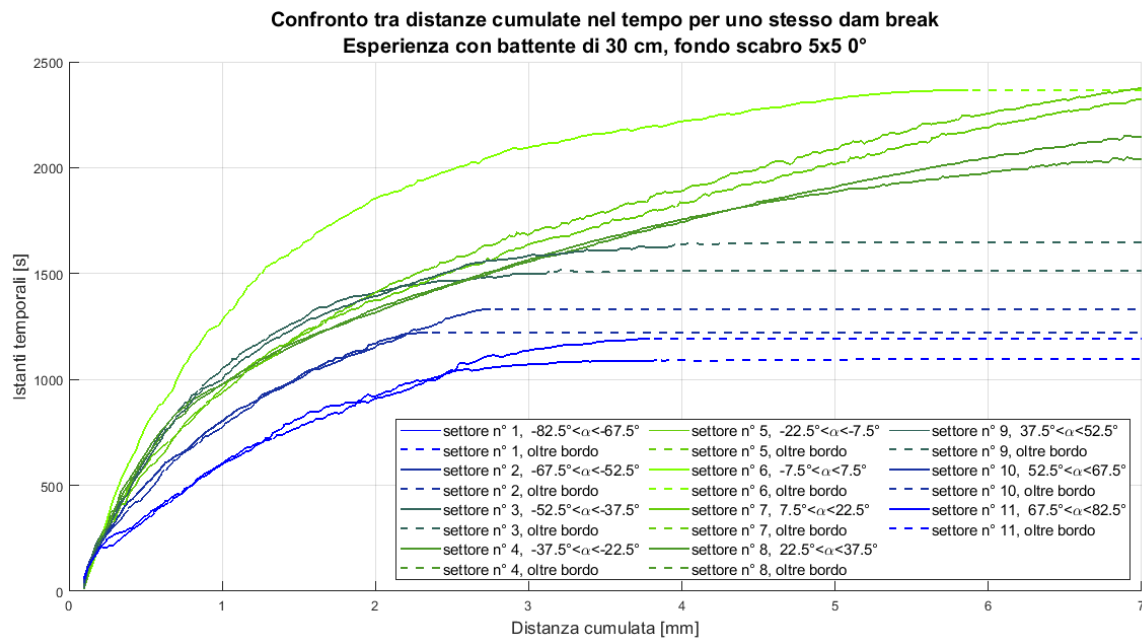


Figura 54 - Confronto tra distanze cumulate (rispetto al punto d'origine del fascio), settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo scabro

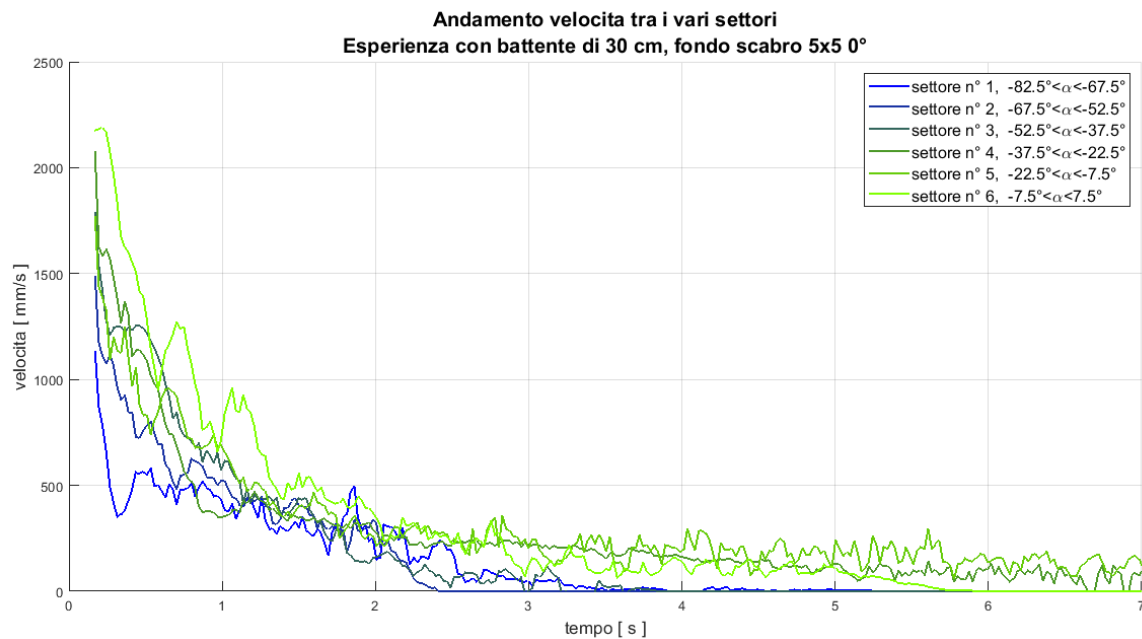


Figura 55 - Confronto tra velocità del fronte d'onda, settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo scabro. I valori, ottenuti da media mobile a 7 punti, sono inoltre mediati tra settori simmetrici per miglior lettura

Dal confronto tra i vari settori risulta evidente la differenza nelle velocità di espansione tra direzione longitudinale e trasversale.

Rispetto alla configurazione a fondo liscio, questa scabra si distingue per una maggior variabilità del dato, funzione del fronte molto più frammentato, e di una maggior lentezza nella maggior parte dei settori. Come verrà evidenziato nei confronti tra categorie, infatti, i settori 3, 9 e 6 presentano comportamenti molto più rapidi degli altri.

5.2.3 Confronto tra le categorie a fondo scabro

Le quattro categorie a fondo scabro presentano prima di tutto una diversa densità di scabrezze secondo le direzioni di propagazione dell'onda. Questa diversità produce comportamenti differenti nell'espansione della stessa, che avanza molto più rapidamente laddove la densità di scabrezze "vista" dal fronte risulta minore. In generale, questi settori sono il 6 (centrale) e i due inclinati di 45° (3 e 9).

5.2.3.1 Sovrapposizione grafica

Si elencano di seguito i confronti grafici tra le categorie di dam break a fondo scabro.

Per esigenze di visibilità, saranno plottati i fronti in pochi istanti di tempo.

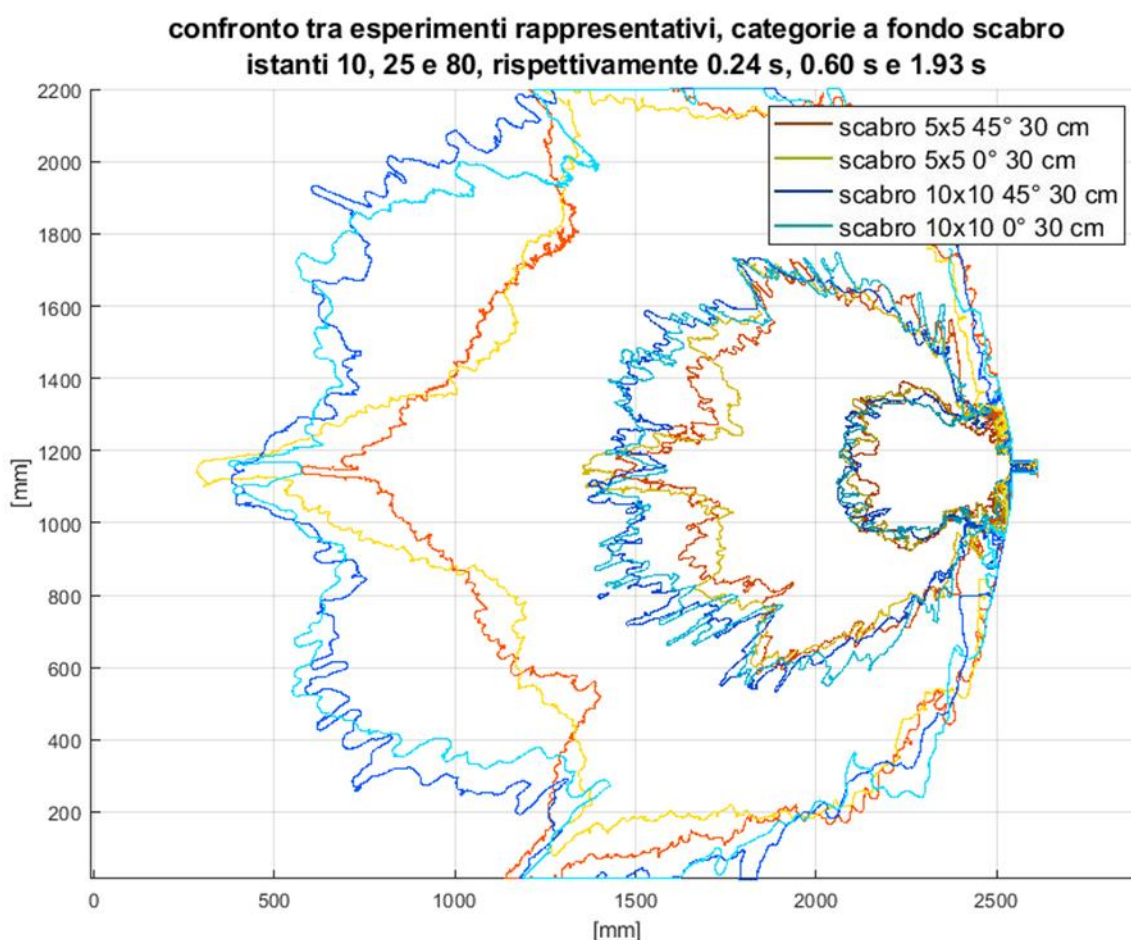


Figura 56 - sovrapposizione in 3 istanti (10, 25 e 80, corrispondenti a 0.24, 0.6 e 1.93 [s]) delle quattro categorie di dam break a fondo scabro indagate

Per quanto riguarda i fronti su fondo scabro, salta subito all'occhio la forma che l'onda assume, in ragione della distribuzione delle scabrezze.

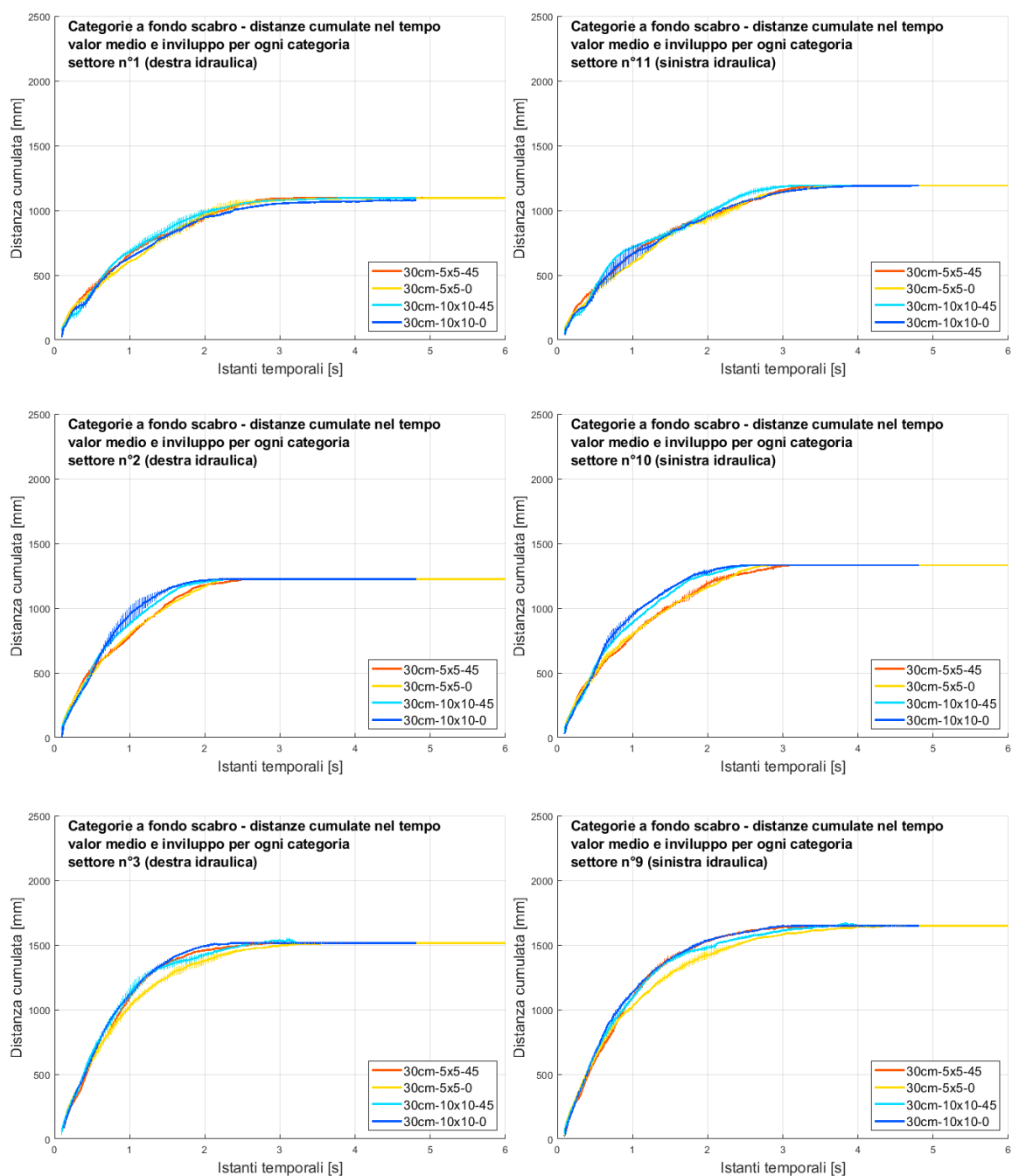
Sebbene queste siano posizionate geometricamente in maniera uniforme, per l'onda evidenziano delle differenze: esistono infatti dei "corridoi preferenziali" lungo i quali l'onda vede, di fatto, una scabrezza ridotta.

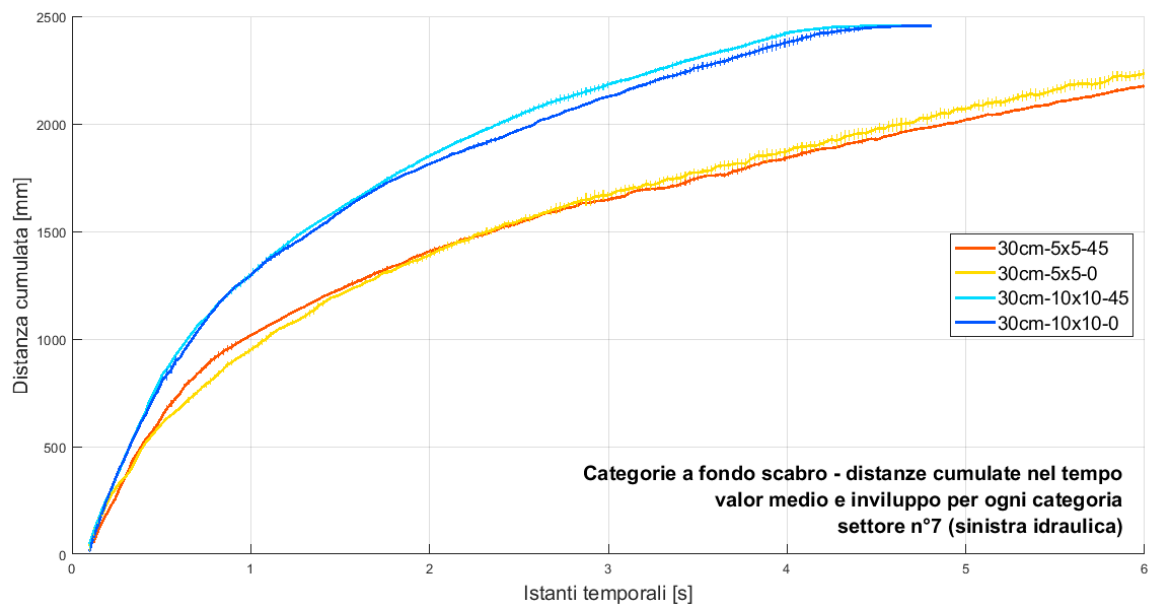
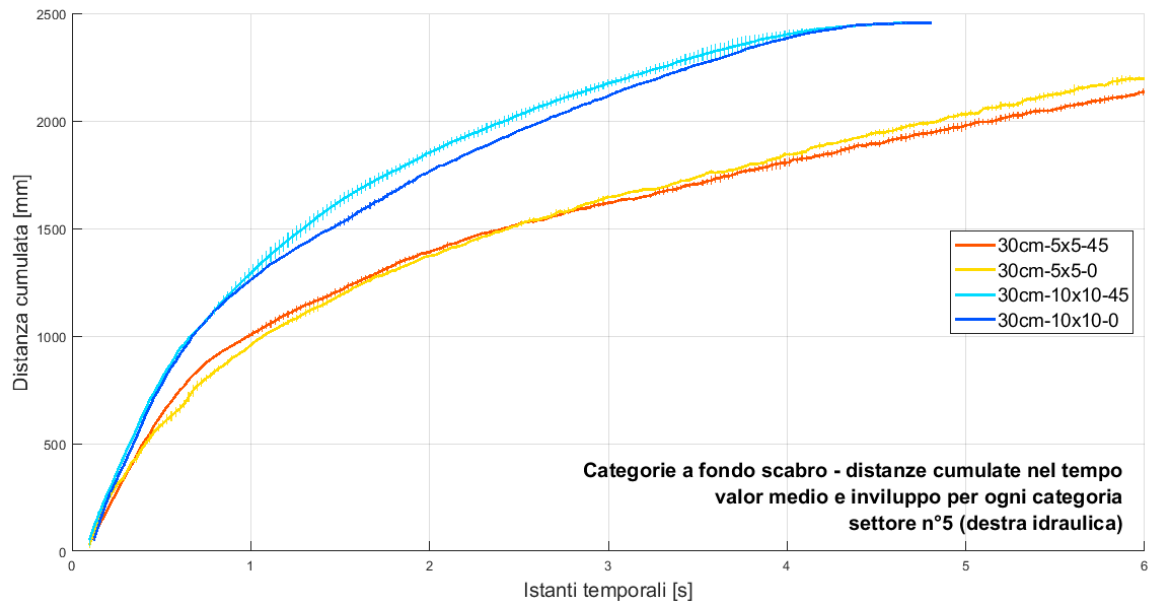
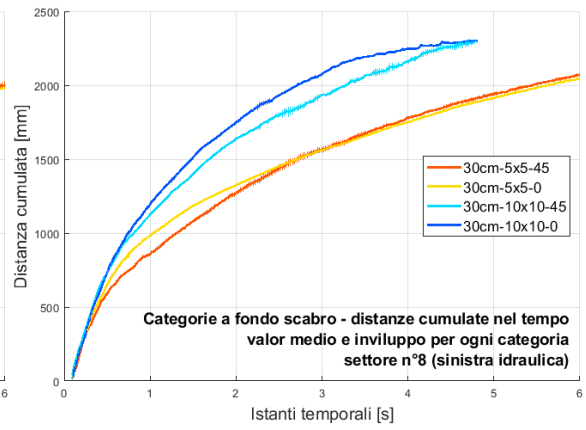
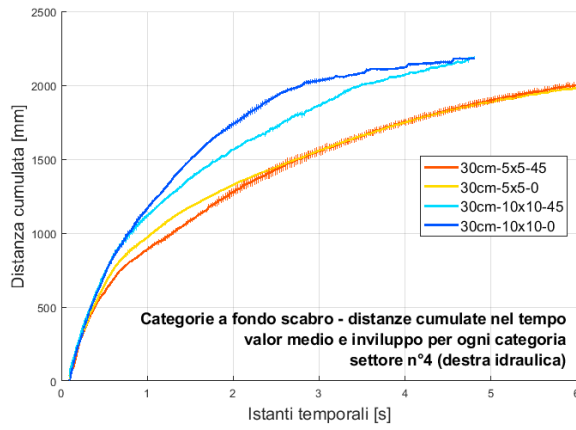
Questi sono descritti dai settori centrale (6) e laterali a 45° rispetto all'orizzontale (3 e 9). L'effetto è particolarmente visibile nelle configurazioni con vegetazione più densa (maglie 5x5), per le quali l'onda avanza in maniera vistosamente più rapida che negli altri settori.

Per vegetazioni meno dense (maglie 10x10) l'effetto è comunque perfettamente visibile, ma di minor entità. Si faccia riferimento alle Figura 58 59 60 e 61 per avere una descrizione visiva della densità delle scabrezze secondo i settori.

5.2.3.2 Analisi quantitativa

Si propone di seguito il confronto tra i valori medi delle distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale per la categoria a fondo scabro.





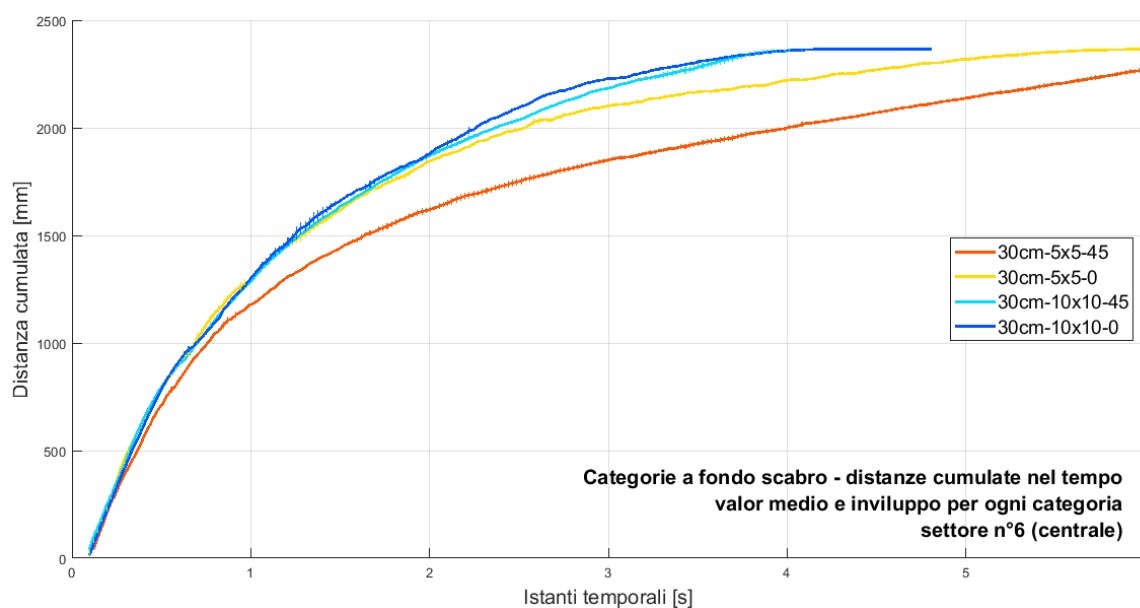


Figura 57 - Confronto tra le categorie a fondo scabro. Sono indicati il valor medio e l'inviluppo delle distanze cumulate medie di tutte le prove disponibili per ogni categoria. La distanza è intesa sempre rispetto all'origine del fascio radiale.

Per la categoria a fondo scabro risultano di particolare interesse i settori a 45° (numero 3 e 9), e quello centrale (numero 6), nei quali si sviluppano i corridoi preferenziali.

Mentre in quelli più laterali (1, 2, 10, 11) il comportamento risulta piuttosto simile, con differenze di velocità del tutto prevedibili, nei settori 3 e 9 le quattro curve si sovrappongono con decisione, lasciando fuori solamente una configurazione con maglia 5x5 (quella ad angolo pari a 0°). Cionondimeno, invece, nel settore centrale i ruoli si invertono: fermo restando che le maglie 10x10 permettono, come ovvio, velocità maggiori, è la configurazione 5x5 0° a muoversi più rapidamente.

In entrambi i casi, la risposta ai quesiti va ricercata nella densità di macroscabrezze effettivamente vista dall'onda, indicata nelle seguenti:

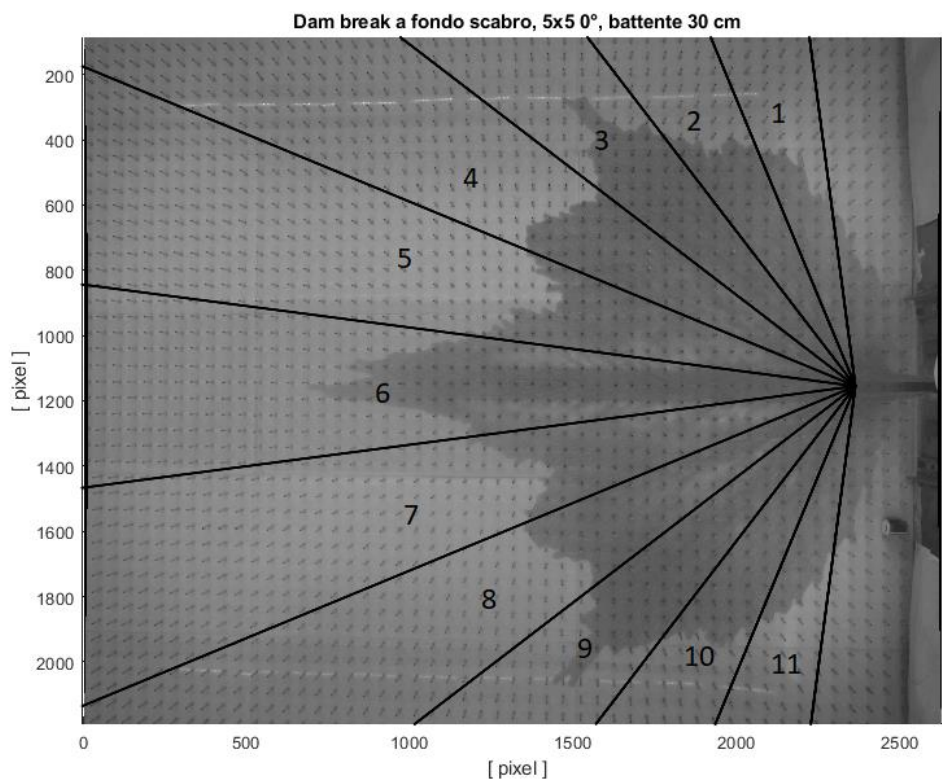


Figura 58 - Configurazione di scabrezze 5x5 0°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore

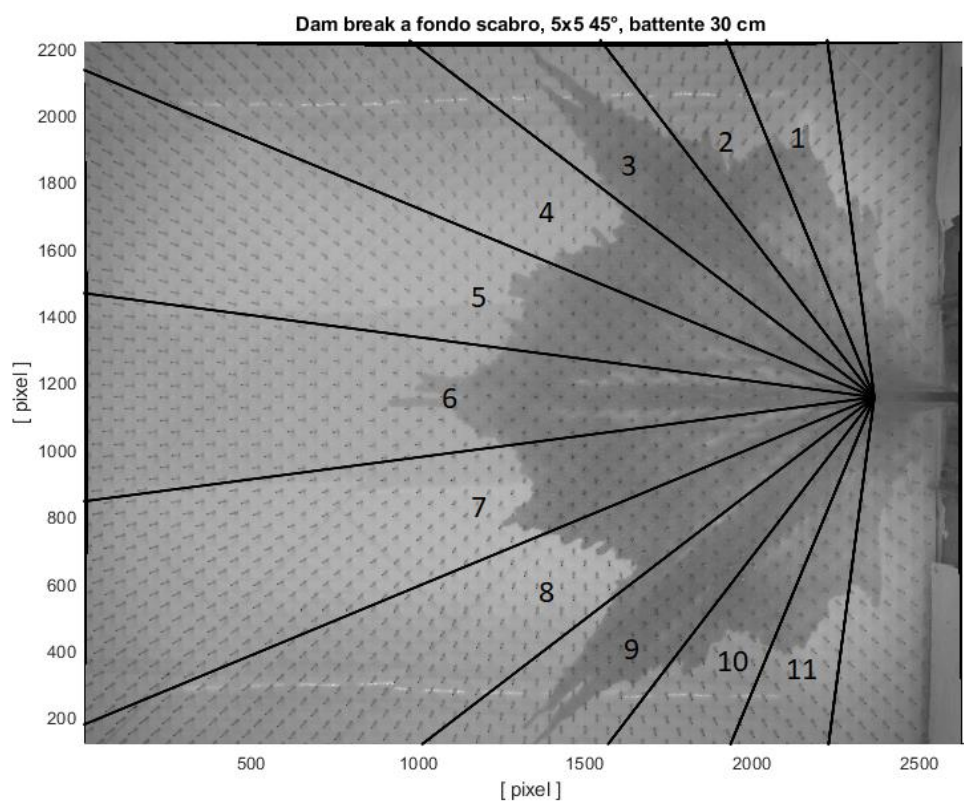


Figura 59 - Configurazione di scabrezze 5x5 45°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore

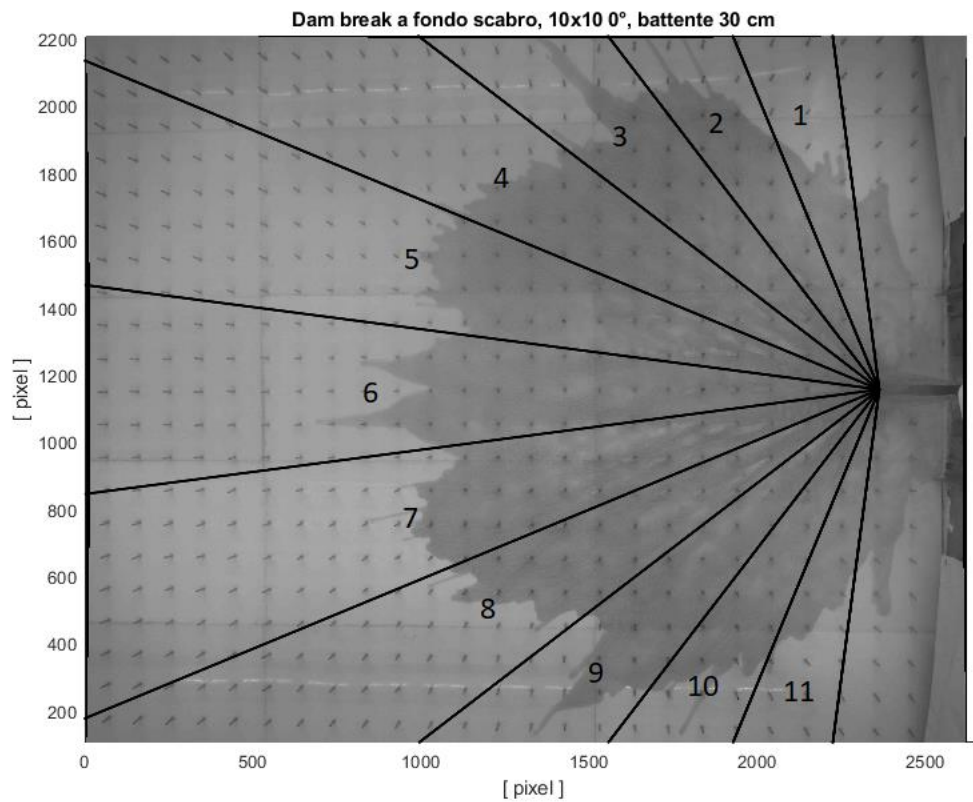


Figura 60 - Configurazione di scabrezze 10x10 0°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore

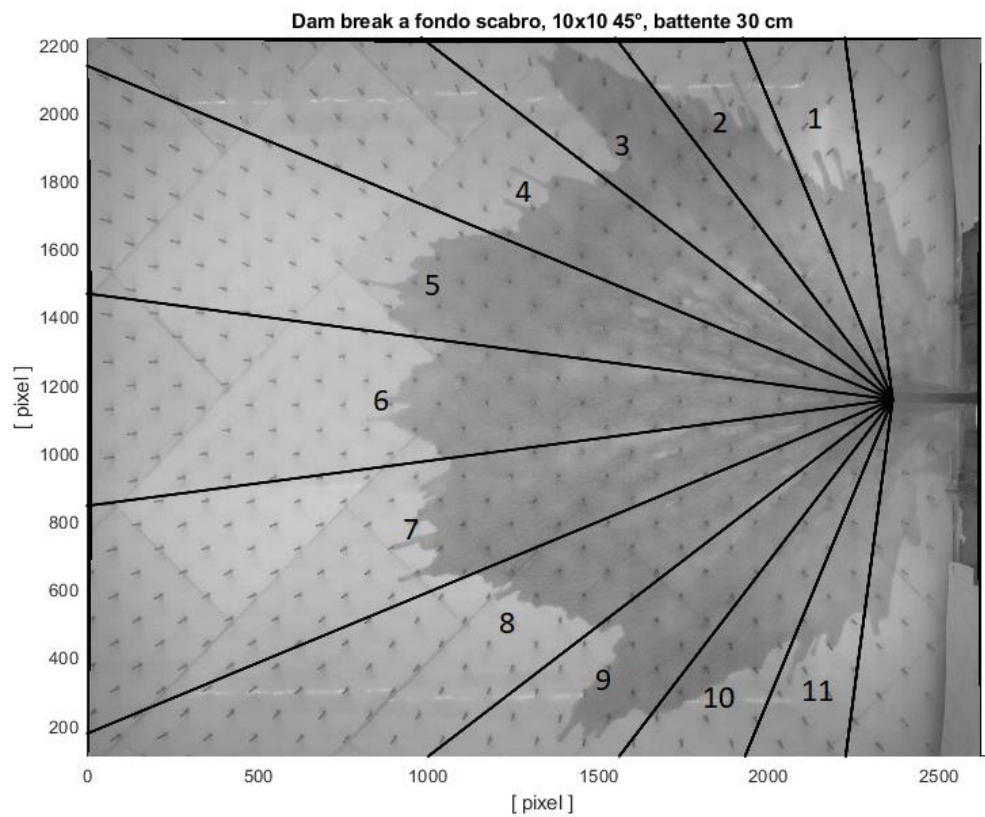
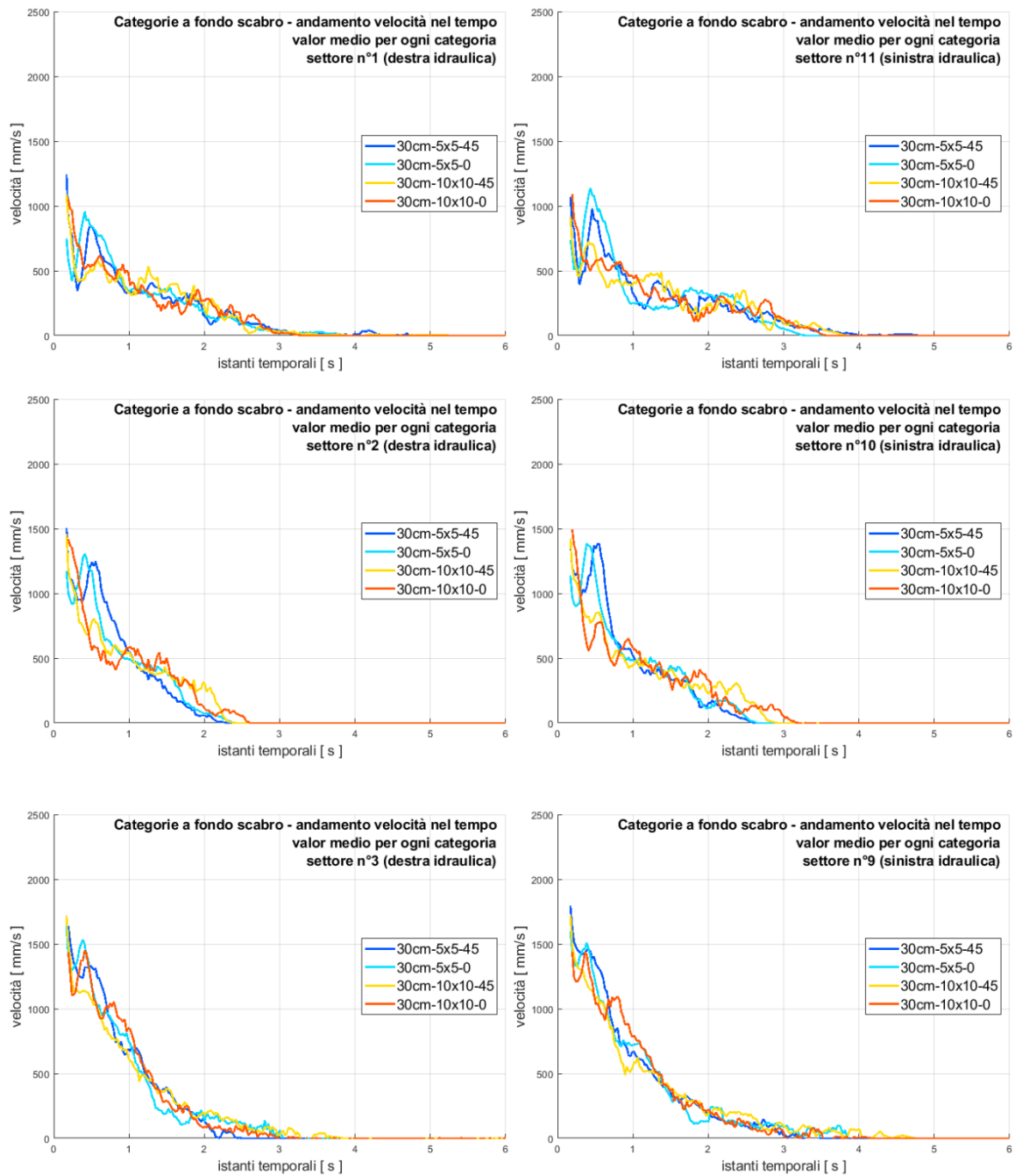
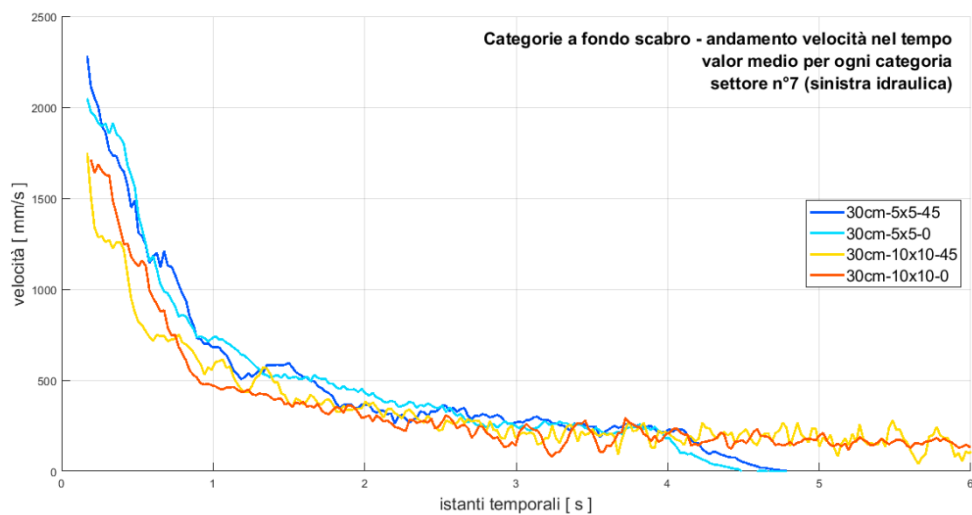
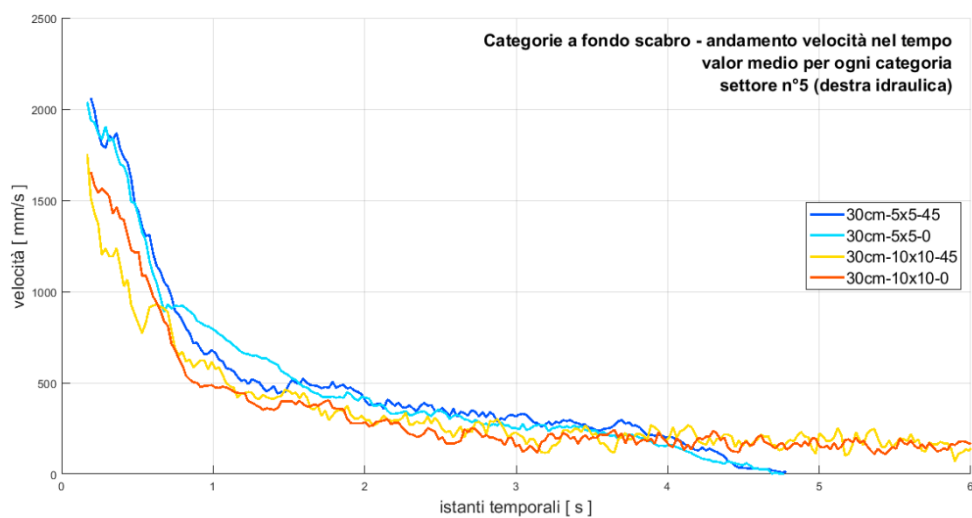
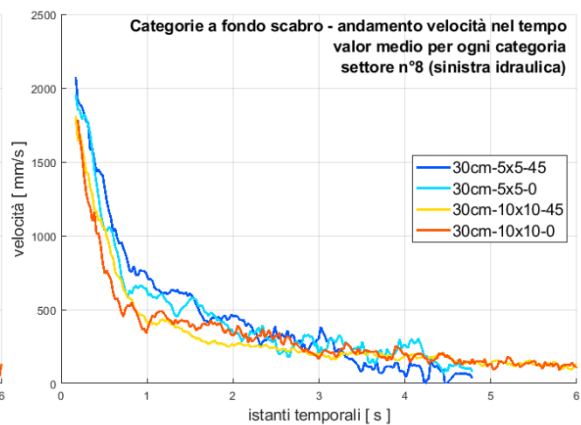
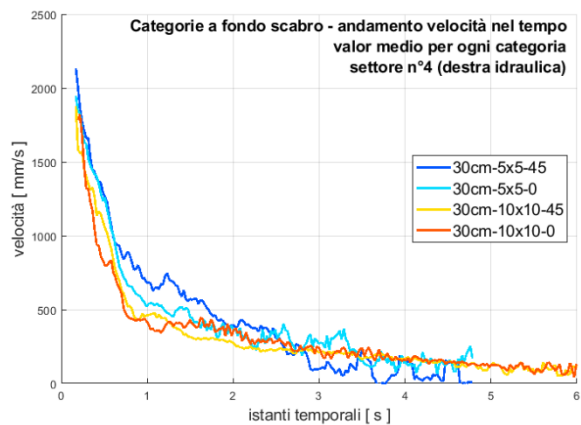


Figura 61 - Configurazione di scabrezze 10x10 45°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore

Per quanto riguarda le velocità del fronte, si hanno i seguenti rapporti tra categorie





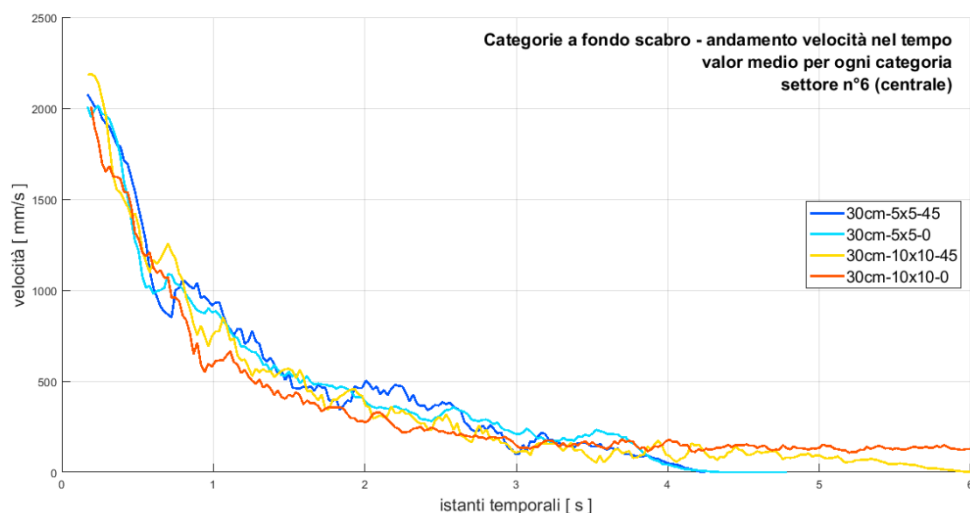


Figura 62 - Confronto tra le categorie a fondo scabro. E' indicato il valor medio per la velocità del fronte di tutte le prove disponibili per ogni categoria

Un ulteriore confronto che può essere fatto riguarda il passaggio alle coordinate assolute. Ciò può essere effettuato agevolmente solo per il settore centrale, in quanto è l'unico che spazza (quasi) la stessa superficie tra tutte le categorie indagate.

Le traslazioni da applicare si riferiscono alle differenze tra le origini dei fasci radiali, così come descritte in Tabella 3, alle quali va inoltre aggiunta la distanza che separa l'origine presa come riferimento (sempre quella delle prove a 30 cm, fondo liscio) dalla breccia. In questo caso, 275 mm.

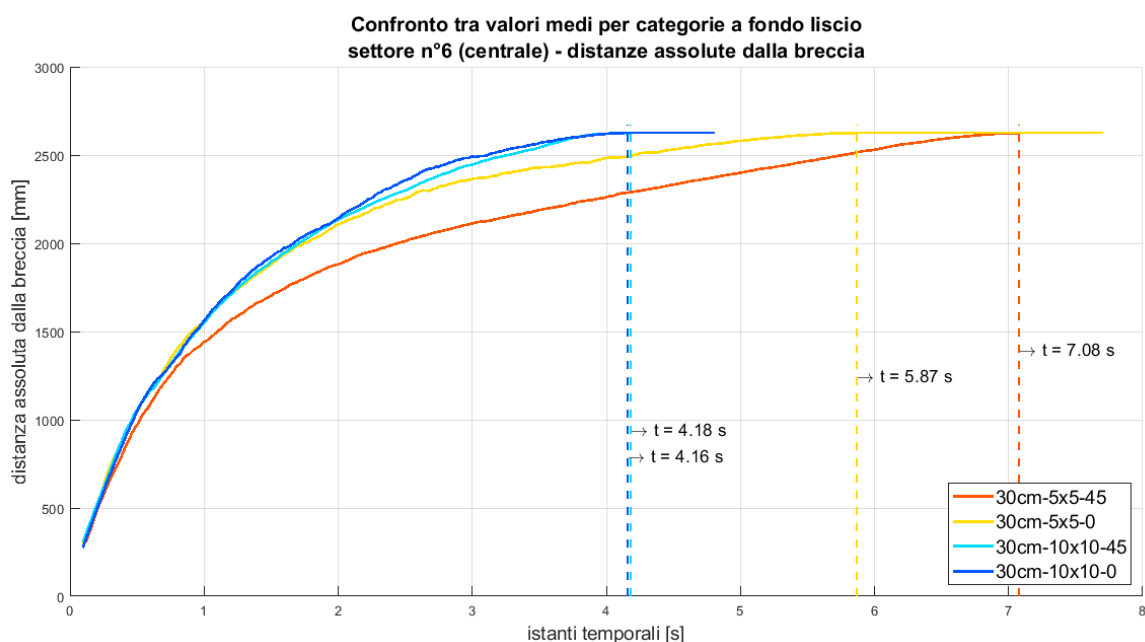


Figura 63 - Confronto tra le categorie a fondo scabro, per le distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale della categoria liscia a 30 cm. Le distanze assolute tendono ad uno stesso valore limite, che risulta essere il bordo del fotogramma opposto alla breccia. In evidenza gli istanti di arrivo per ogni categoria

5.3 Confronto tra categorie a fondo scabro e liscio con battente 30 cm

Si descrive di seguito il confronto tra le categorie scabre e lisce che condividono la condizione di battente a 30 cm.

Il confronto diretto risulta interessante in quanto entro alcuni settori (3, 6 e 9, ossia laterali a 45° e centrale) i dam break a fondo scabro hanno abbastanza energia cinetica da tenere il passo dell'avanzamento del fronte della categoria a fondo liscio.

I motivi di ciò, già presentati nel precedente 5.2.3, sono ulteriormente indagati nei prossimi paragrafi.

5.3.1 Sovrapposizione grafica

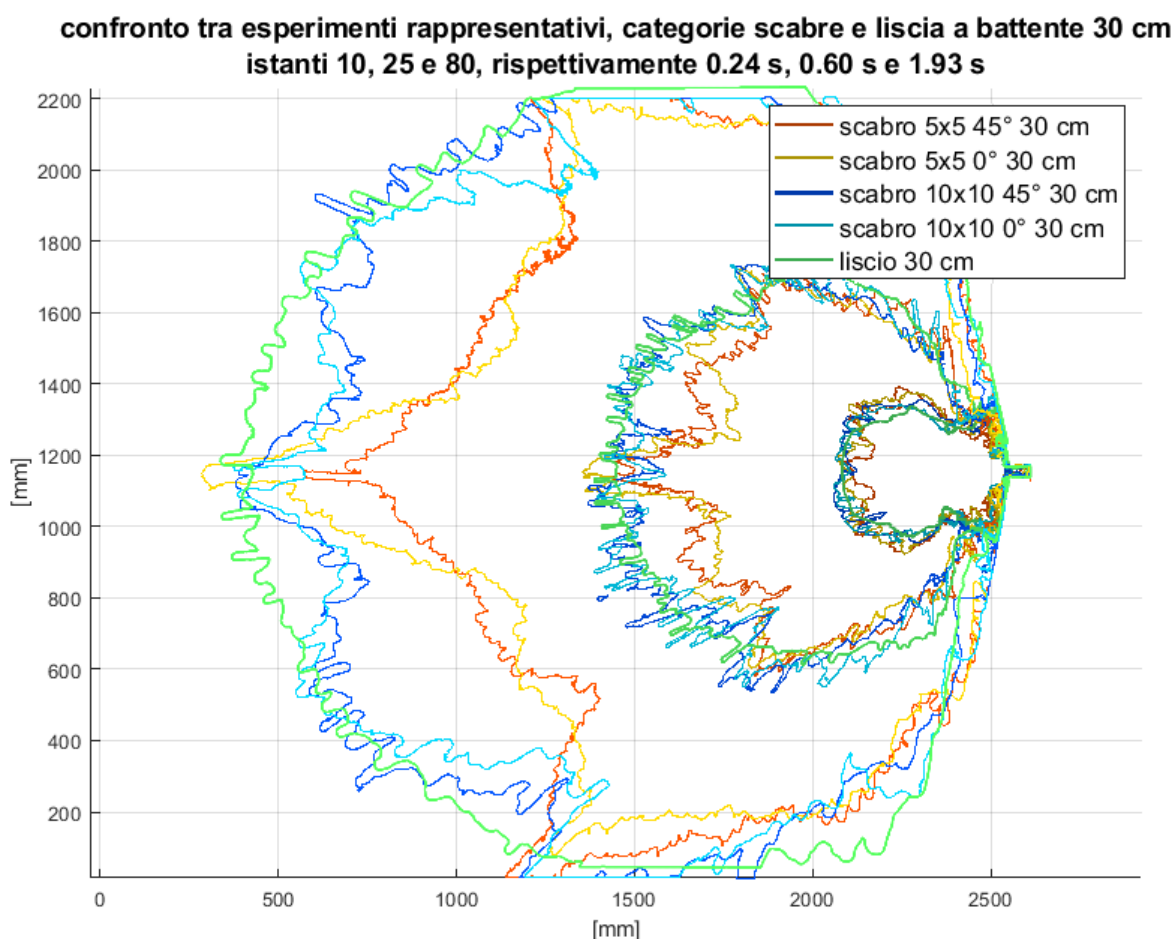


Figura 64 – sovrapposizione in 3 istanti (10, 25 e 80, corrispondenti a 0.24, 0.6 e 1.93 [s]) delle cinque categorie di dam break a battente di 30 cm indagate

Il confronto diretto, mantenendo inalterato il carico totale nel serbatoio, tra le varie condizioni di scabrezza risulta interessante.

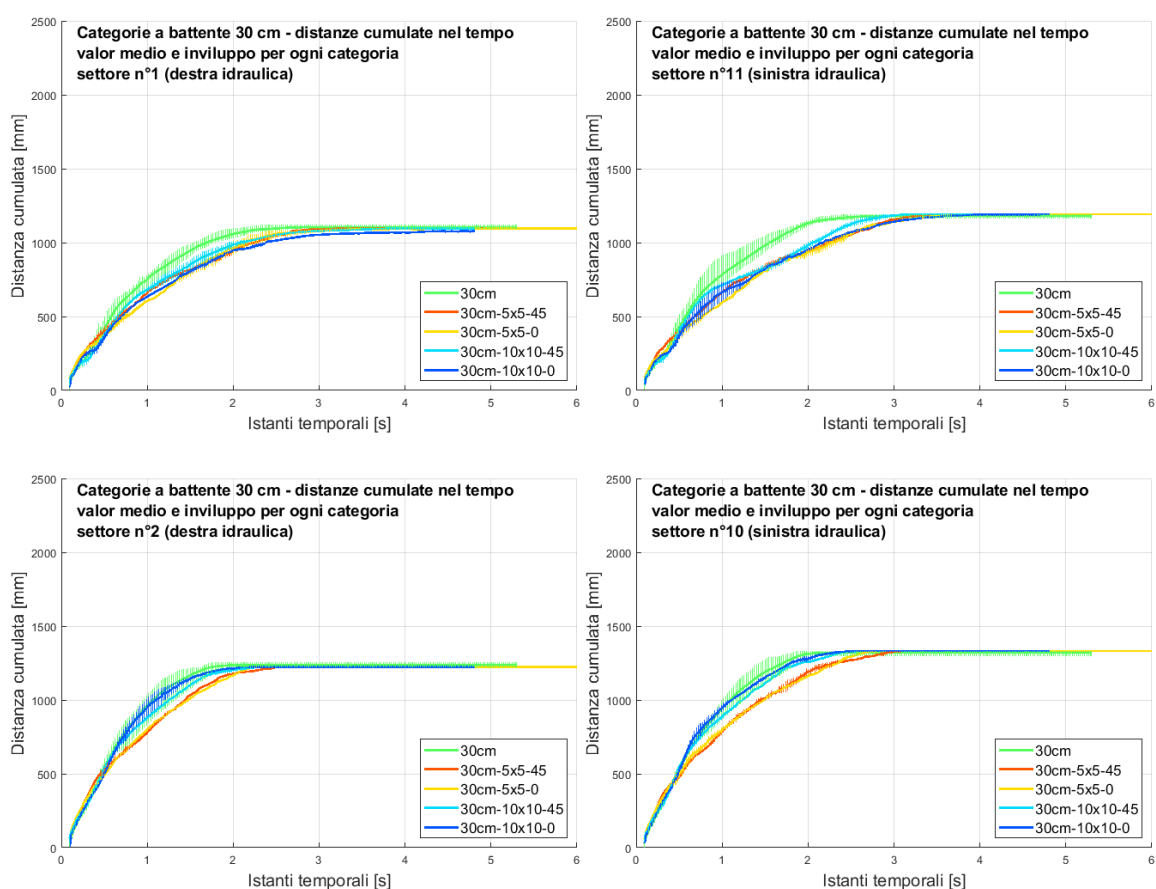
Si evidenzia infatti come, per tutta la durata dell'esperimento, l'onda che progredisce lungo i corridoi preferenziali prima descritti riesce a tenere il passo, o addirittura a superare, quella che avanza su fondo liscio. Naturalmente, invece, lungo i settori nei quali l'onda "vede" più ostacoli, la velocità su fondo liscio risulta molto maggiore.

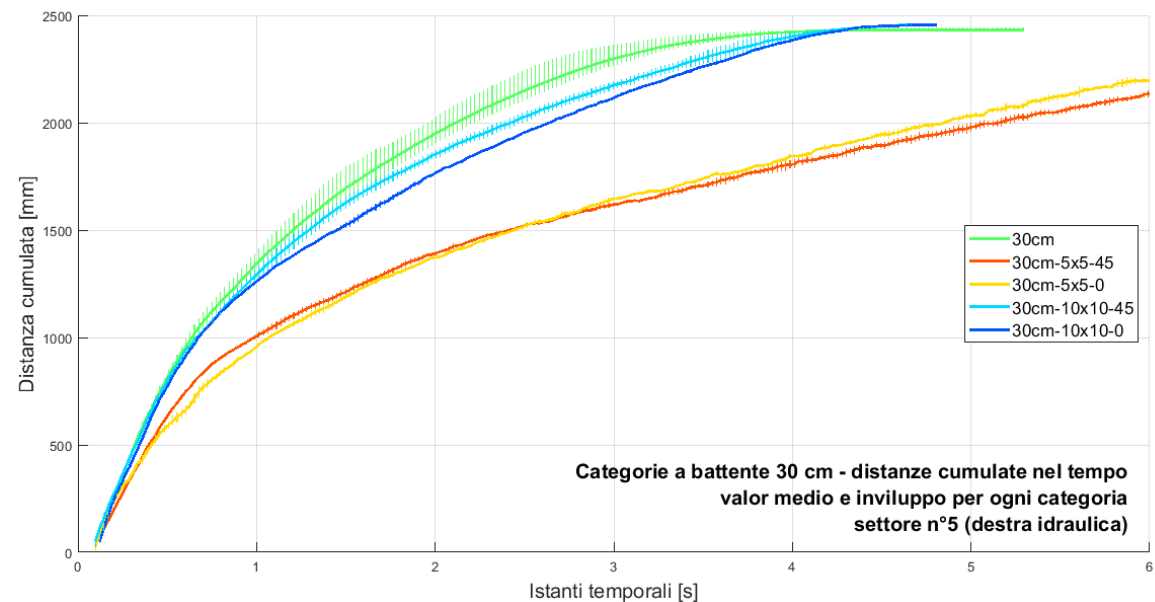
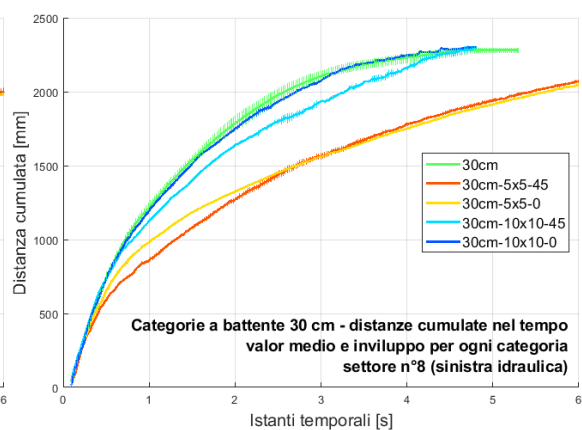
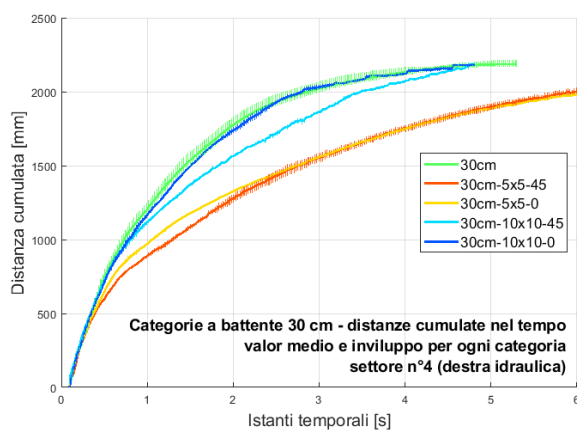
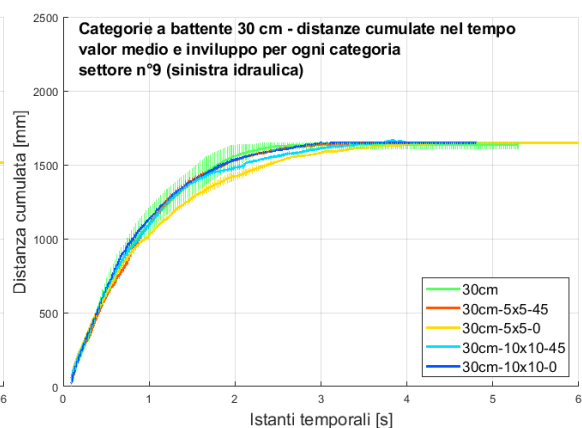
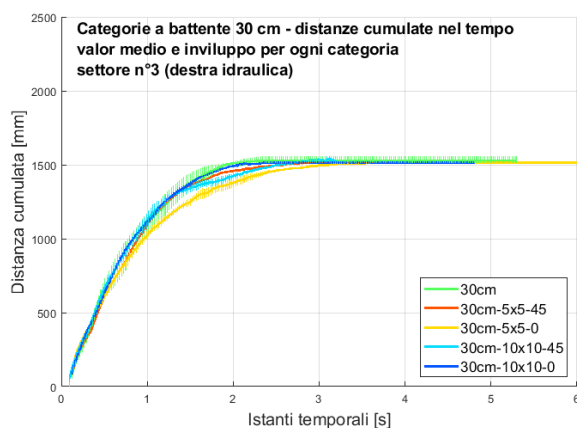
La notevole velocità acquisita nei corridoi, si ipotizza, può essere spiegata con un trasferimento energetico tra settori: il rallentamento subito nei settori 2, 4, 5, 7, 8 e 10 (quelli situati ai fianchi dei 3, 6 e 9, i preferenziali) denota un innalzamento del pelo libero dell'onda (così come accadrebbe qualora una corrente dovesse superare un restringimento dell'alveo, ad esempio), funzionale al superamento della zona con elevata scabrezza.

Ma tale innalzamento, data la natura bidimensionale e non monodimensionale della corrente, è possibile che comporti una spinta ulteriore sulla corrente dei corridoi preferenziali, offrendo quel surplus energetico che spiegherebbe l'altrimenti controintuitiva velocità (si tratta pur sempre di fondo scabro).

Un'altra possibilità è data dal fatto che la composizione delle scabrezze dei pannelli, molto più lisci del pvc sottostante, e dei pochi cilindri d'alluminio presenti nei corridoi preferenziali (di fatto, una sola fila, o due) non riesca ad equiparare quella del pvc. Ciò spiegherebbe le velocità simili in settori specifici (solo quelli in cui la densità di scabrezze è minima).

5.3.2 Analisi quantitativa





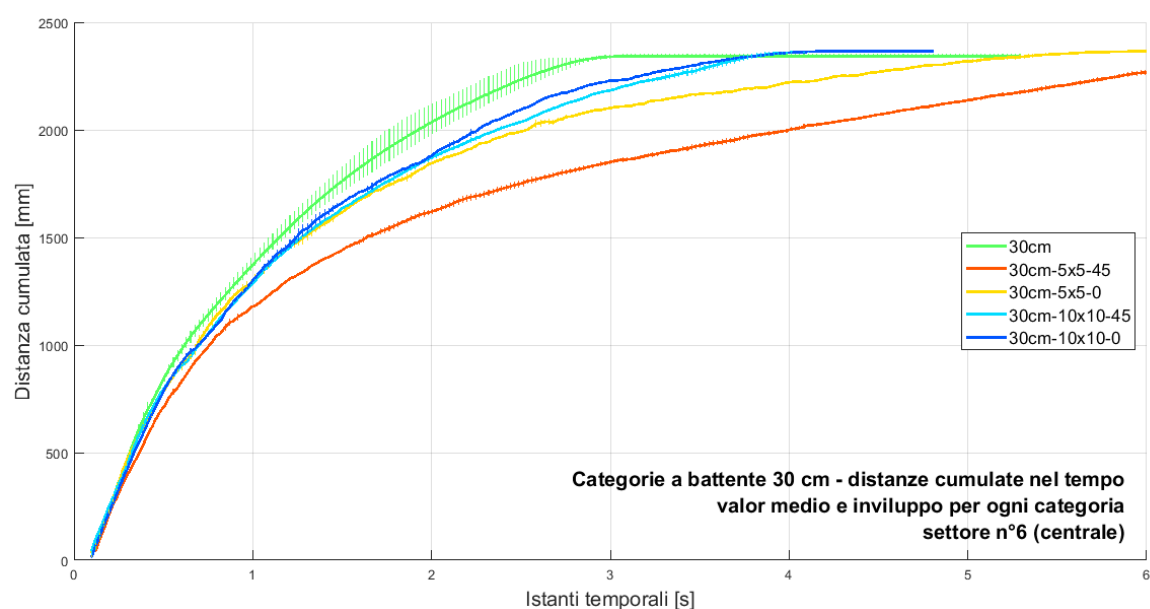
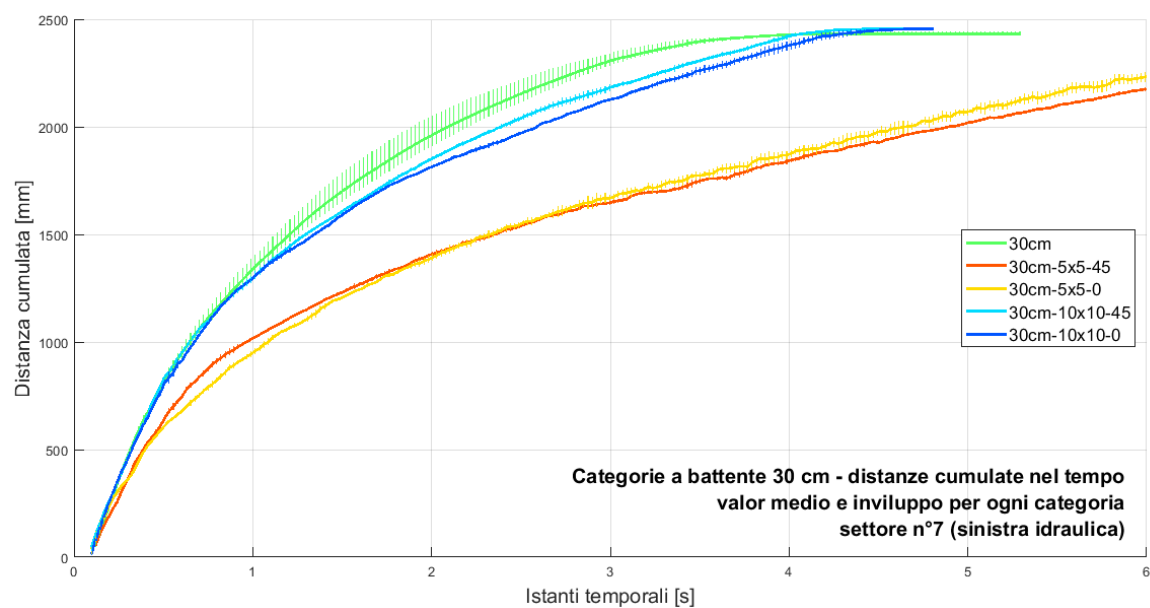
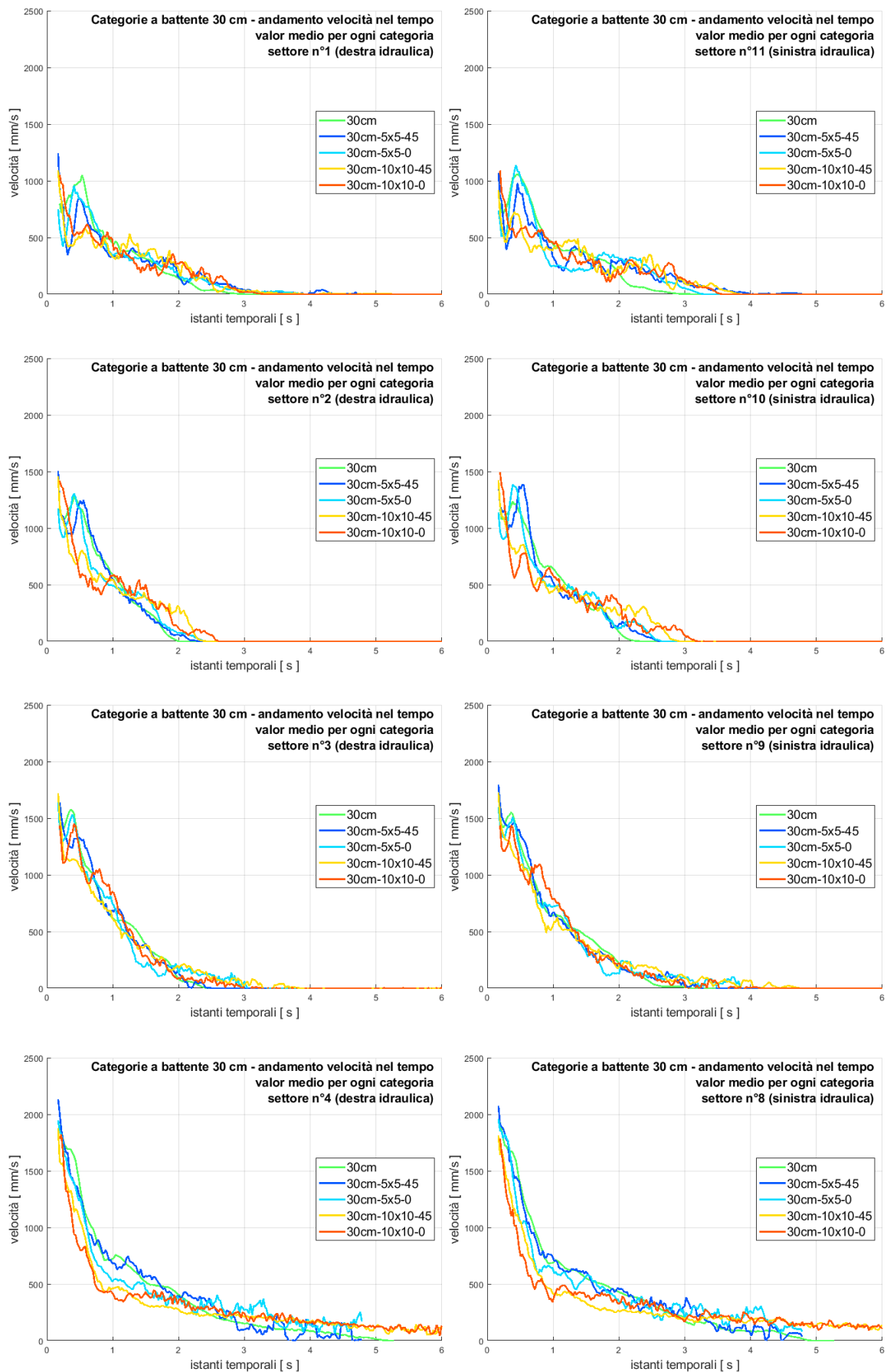


Figura 65 - Confronto tra le categorie a battente 30cm. Sono indicati il valor medio e l'involuppo delle distanze cumulate medie di tutte le prove disponibili per ogni categoria. La distanza è intesa sempre rispetto all'origine del fascio radiale.

Per quanto riguarda le velocità del fronte d'onda, sono stati ottenuti i seguenti risultati:



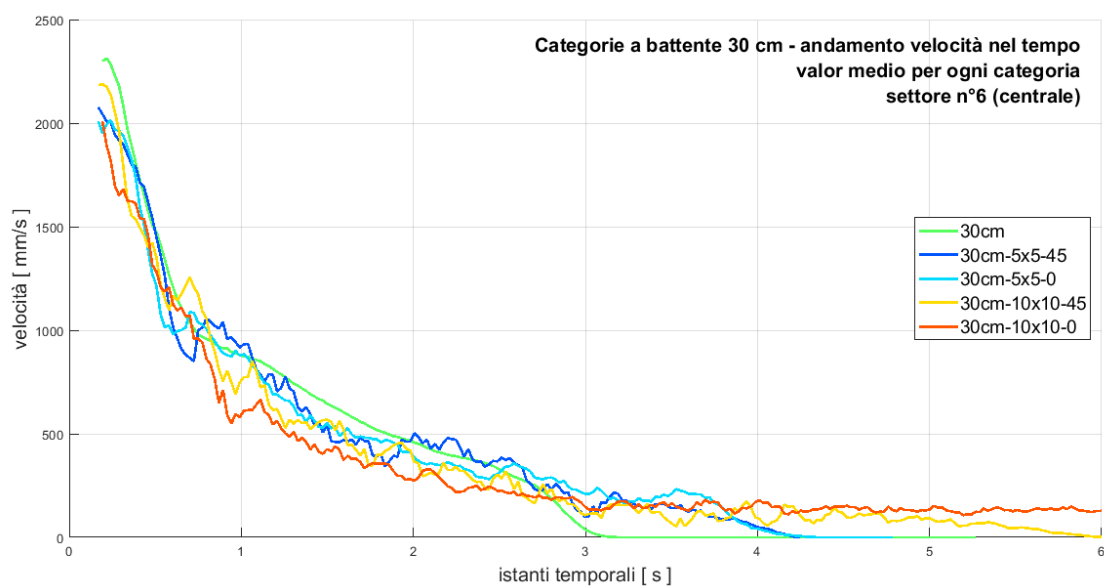
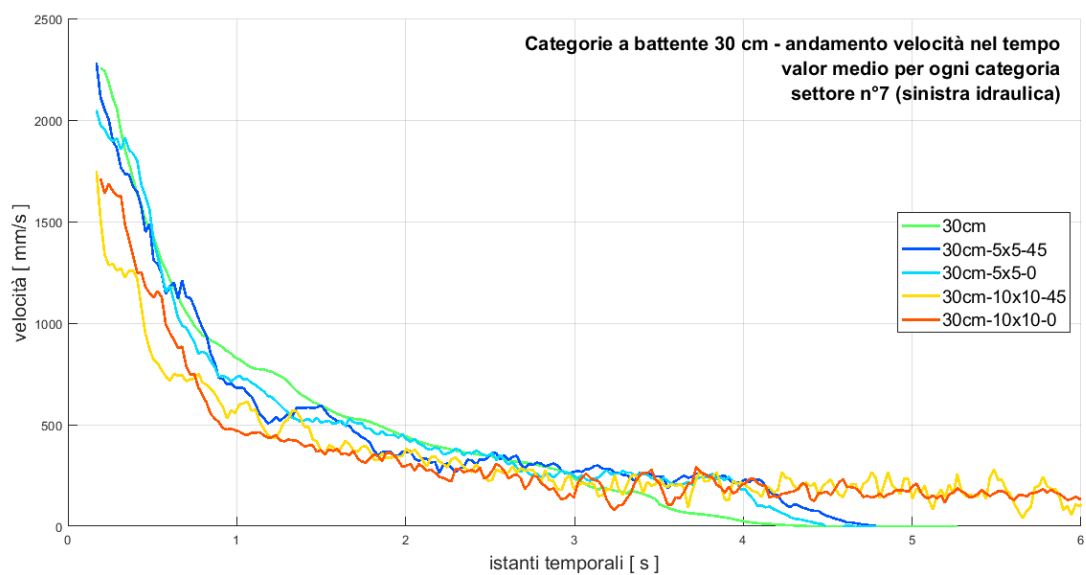
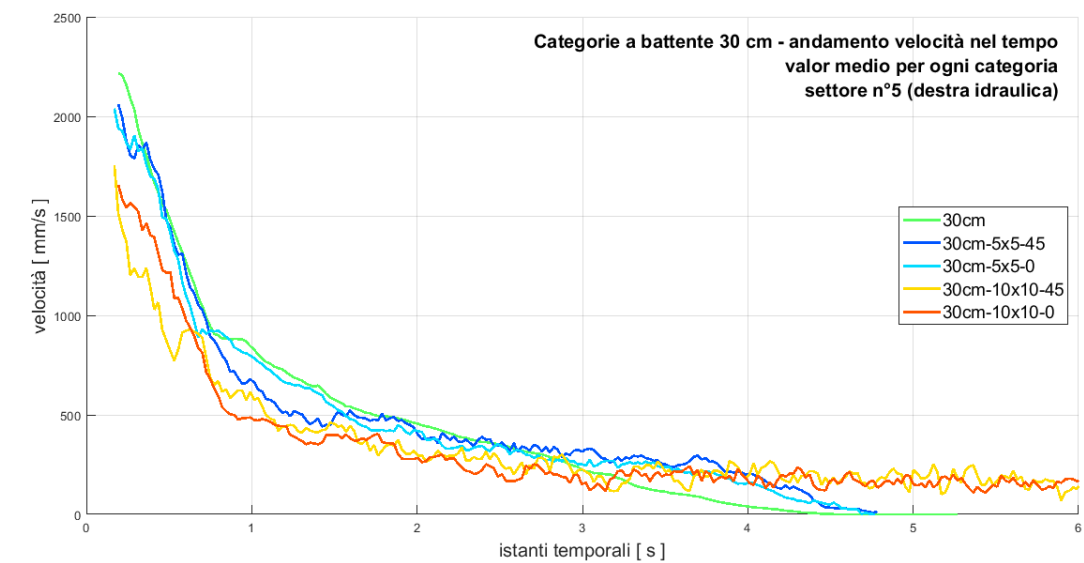


Figura 66 - Confronto tra le categorie a battente 30 cm. E' indicato il valor medio per la velocità del fronte di tutte le prove disponibili per ogni categoria

Di interesse risulta essere, in questo caso, come già evidenziato dalla sovrapposizione grafica, l'analisi delle notevoli velocità che si sviluppano nei corridoi preferenziali (settori 3, 9 e 6).

Si faccia riferimento alle figure 58, 59, 60 e 61.

Se nel settore centrale (il 6) l'ipotizzato contributo di spinta non risulta sufficiente a raggiungere le velocità nella condizione di fondo liscio, ciò accade invece per quasi ogni categoria nei settori a 45° (3 e 9). L'unica esclusa è la 5x5 0°, che affronta una densità eccessiva di vegetazione.

Ugualmente interessanti i comportamenti in direzione trasversale, in cui sembra contare di più la minor energia totale disponibile che non la presenza di scabrezze (come naturale che sia, vista la dipendenza delle dissipazioni dalla velocità).

Infine, gli ultimi settori, quelli con deboli angolazioni rispetto all'asse breccia (4, 5, 7, 8) presentano un comportamento più simile a quello che si potrebbe ipotizzare senza strumenti alla mano: maglie 10x10 più rapide di quelle 5x5, scarse differenze tra le angolazioni, e un'unica nota: la maglia 10x10 a 0°, nei settori con angolazioni di 30° (4 e 8) ricalca l'andamento del fondo liscio.

Un ulteriore confronto che può essere fatto riguarda il passaggio alle coordinate assolute. Ciò può essere effettuato agevolmente solo per il settore centrale, in quanto è l'unico che spazza (quasi) la stessa superficie tra tutte le categorie indagate.

Le traslazioni da applicare si riferiscono alle differenze tra le origini dei fasci radiali, così come descritte in Tabella 3, alle quali va inoltre aggiunta la distanza che separa l'origine presa come riferimento (sempre quella delle prove a 30 cm, fondo liscio) dalla breccia. In questo caso, 275 mm.

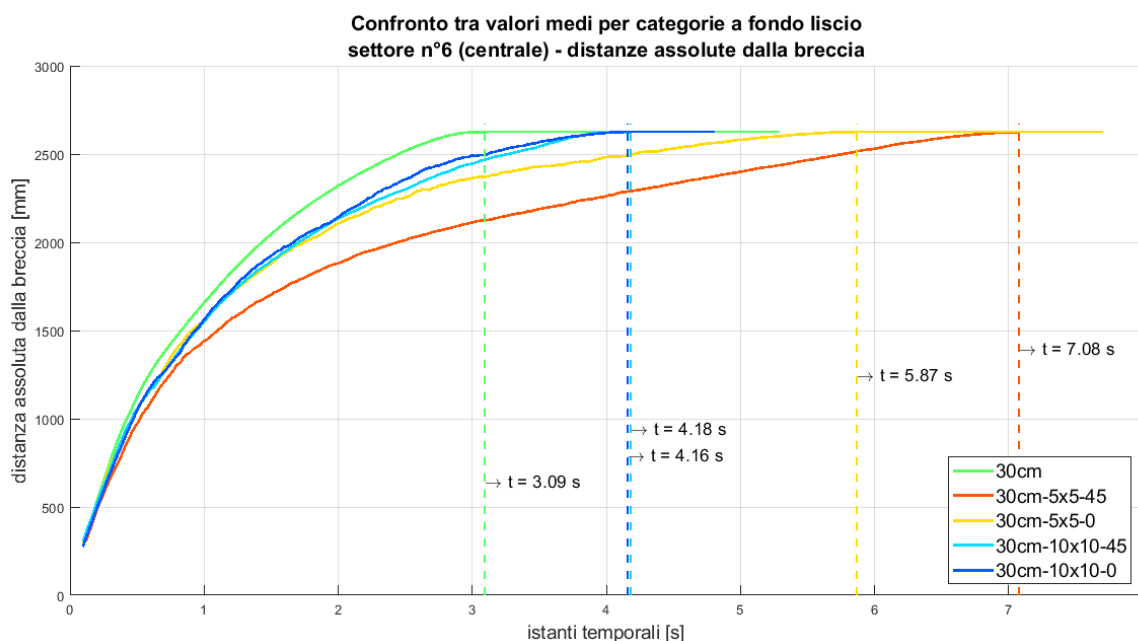


Figura 67 - Confronto tra le categorie a battente 30 cm, per le distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale della categoria liscia a 30 cm. Le distanze assolute tendono ad uno stesso valore limite, che risulta essere il bordo del fotogramma opposto alla breccia. In evidenza gli istanti di arrivo per ogni categoria

6 Campo di altezze d'acqua

La determinazione del campo di altezze d'acqua rappresenta una sfida in questa tesi. L'idea su cui ci si basa, come già preannunciato, è quella di sfruttare la relazione esistente tra gradazione di colore dell'acqua rossa e la sua profondità. Ciò permetterebbe di sfruttare la fotografia stessa come fonte di dati, che sarebbero quindi molto numerosi e distribuiti in maniera continua su tutta la superficie dell'onda.

Dal punto di vista operativo, questo si traduce nell'individuare un valore di altezza d'acqua per ogni pixel, che sia funzione del valore registrato in quello stesso pixel, in scala di grigi, dalla telecamera Andor Zyla.

Un primo approccio, basato sulla determinazione di curve di taratura intensità-altezza, non ha fornito risultati soddisfacenti.

Il confronto tra la variazione di volume, istante per istante, dell'onda (calcolato sommando i volumi determinati per ogni pixel appartenente all'onda) e la variazione di volume misurata nel serbatoio dalle sonde Balluff ha evidenziato una criticità nel metodo stesso, in quanto i dati non trovavano soddisfacente corrispondenza.

Tutto ciò sebbene le curve di taratura tenessero in conto di due aspetti importanti:

- La progressiva diminuzione dell'intensità luminosa percepita dalla camera, dovuta all'espansione dell'onda rossa su quello che prima era un fondo bianco. Tale oscuramento variabile nel tempo è stato tenuto in conto normalizzando i valori di intensità registrata secondo un coefficiente correttivo
- La variazione spaziale di luminosità, il cui effetto è stato by-passato creando una curva di taratura specifica per ogni zona dell'immagine (la foto è stata suddivisa in strisce verticali)

Alla luce di queste difficoltà, si è rivolta l'attenzione verso la legge di Lambert-Beer, che regola la relazione tra proprietà del mezzo attraversato (spessore e assorbanza) e intensità luminose incidenti e trasmesse.

L'analisi di tale legge comporta la necessità di effettuare misure di spettrometria, in quanto valida per sole radiazioni monocromatiche, come sarà più ampiamente spiegato nei prossimi sotto capitoli, allo scopo di determinare la costante k della legge stessa.

Poiché, tuttavia, non è possibile individuare una relazione analitica che regga l'evoluzione della costante secondo le lunghezze d'onda nello spettro del visibile, viene individuata una costante alternativa, funzione delle altezze, la cui curva verrà infine utilizzata per calcolare l'altezza d'acqua in ogni pixel.

Il campo di altezze così individuato descrive un volume dell'onda, che può essere confrontato, così come era stato fatto per il primo approccio, con l'evoluzione del volume uscente dal serbatoio di monte: in questo caso, il bilancio dei volumi risulta soddisfatto in misura maggiore.

6.1 Legge di Lambert-Beer

La legge di Lambert Beer descrive la propagazione della luce in un mezzo, mettendo quindi in relazione l'attenuazione della luce alle proprietà del materiale attraversato ed al cammino ottico effettuato.

La legge è comunemente utilizzata in ambito chimico, per misurare i valori di concentrazione di soluto in una soluzione, e in fisica ottica, allo scopo di descrivere quei fenomeni che la teoria dei raggi in geometria ottica non può cogliere.

La legge, inizialmente di matrice empirica, fu scoperta da Pierre Bouguer nel 1729 [21], ma attribuita invece a J.H. Lambert perché da lui descritta nel trattato *Photometria* del 1760 (anche se nel citarla indicò l'appartenenza della stessa a Bouguer) [22]. Essa stabiliva una relazione di proporzionalità diretta tra cammino ottico e assorbanza del materiale. A metà Ottocento August Beer la descrisse in maniera differente, stabilendo una correlazione tra il grado di attenuazione dell'intensità luminosa passante e la concentrazione della specie attenuante (il soluto) [23].

Ad oggi, la formulazione finale della legge tiene conto di entrambi questi aspetti [24].

In fisica matematica, questa legge nasce come soluzione dell'operatore di Bhatnagar–Gross–Krook (abbreviato in BGK), un termine che compare nelle soluzioni dell'equazione di Boltzmann nella sua declinazione del metodo reticolare di Boltzmann.

I metodi reticolari di Boltzmann (abbreviati in inglese in LBM) compaiono in fluidodinamica computazionale. Questa metodologia si propone di risolvere la dinamica dei fluidi non attraverso le equazioni di Navier Stokes, ma attraverso l'equazione di Boltzmann (descrizione statistica delle particelle di un fluido mediante equilibrio termodinamico), descrivendo il moto di fluidi newtoniani mediante modelli di collisione, come ad esempio proprio l'operatore BGK [25].

La legge di Lambert Beer si presenta nella seguente forma

$$\log \left(\frac{\phi_e^t}{\phi_e^i} \right) = -k \cdot l \quad (6-1)$$

Dove

- ϕ_e^t [W] rappresenta il flusso radiante di segnale luminoso trasmessa attraverso il mezzo
- ϕ_e^i [W] rappresenta il flusso radiante di segnale luminoso incidente il mezzo
- k rappresenta la costante di Lambert-Beer, che è comprensiva delle caratteristiche (prettamente chimiche) del mezzo che regolano l'attenuazione del segnale luminoso passante.
- l [m] rappresenta il cammino ottico entro il mezzo

La legge viene descritta tramite una ODE lineare omogenea.

Si suppone che un raggio di luce entri in una soluzione liquida campione. Definito l'asse z come parallelo alla direzione del raggio entro la soluzione (avendo già preso in conto il fenomeno di rifrazione all'interfaccia tra due mezzi), la propagazione del segnale luminoso viene descritta suddividendo in strati infinitesimi lo spessore del mezzo stesso. Lo spessore Δz deve essere tale da evitare che le particelle di soluto si oscurino l'una con l'altra.

Il flusso ϕ_e^t [W] che emerge dal singolo strato Δz viene ridotto di una quantità, funzione di fenomeni come scattering e assorbimento dovuti alla presenza di soluto, descritta secondo la seguente equazione differenziale

$$d\phi(z) = -k(z) \cdot \phi(z) dz \Rightarrow \frac{d\phi(z)}{dz} = -k(z) \cdot \phi(z) \quad (6-2)$$

La cui generica soluzione esponenziale comporta l'ottenimento della seguente formulazione

$$T = \frac{\phi_e^t}{\phi_e^i} = e^{-\int_0^l k(z) dz} \quad (6-3)$$

Essendo T la trasmittanza del campione sul cammino ottico l (attenzione, cammino ottico e spessore del mezzo non coincidono se il raggio non è perfettamente incidente).

Non è stato finora indagato cosa comprenda la costante k. Essa viene tipicamente descritta come il prodotto tra il coefficiente di attenuazione molare ϵ e il valore di concentrazione c , o alternativamente come prodotto tra l'"attenuation cross section" σ e il numero di densità n (che descrive il grado di concentrazione nello spazio).

I due prodotti, differenti nella forma, si riferiscono allo stesso comportamento. Semplicemente, si fa riferimento a due grandezze, la profondità ottica τ e l'assorbanza A, che nel loro rapporto con la trasmittanza T del campione differiscono solamente per la tipologia di logaritmo adottato. Valgono le seguenti relazioni di forma:

$$\tau = \ln\left(\frac{\phi_e^i}{\phi_e^t}\right) \quad A = \log_{10}\left(\frac{\phi_e^i}{\phi_e^t}\right), \text{ sussistendo la } A = \frac{\tau}{\ln 10} \quad (6-4)$$

$$T = e^{-\tau} = 10^{-A} \quad (6-5)$$

Dato un numero N di specie attenuanti, valgono rispettivamente per profondità ottica τ e assorbanza A le seguenti:

$$T = e^{-\tau} = e^{-\sum_{i=1}^N \tau_i} = e^{-\sum_{i=1}^N \sigma_i \int_0^l n_i(z) dz}$$

$$T = 10^{-A} = 10^{-\sum_{i=1}^N A_i} = 10^{-\sum_{i=1}^N \epsilon_i \int_0^l c_i(z) dz} \quad (6-6)$$

Assumendo che la distribuzione del soluto sia uniforme lungo il cammino ottico – condizione soddisfatta per la nostra situazione – l'integrale si risolve nel semplice prodotto tra cammino ottico e fattore n_i o c_i [26].

Casi di non uniformità si hanno, per esempio nelle applicazioni di scienze dell'atmosfera e di radiation shielding.

Il prodotto tra valori di concentrazione di soluto e capacità di assorbimento dello stesso viene spesso descritto con un unico valore, detto coefficiente di attenuazione, che sarebbe il valore k.

Al netto delle due semplificazioni di cui sopra, gli argomenti degli esponenziali valgono adesso

$$\tau = k \cdot l \quad A = k_{10} \cdot l \quad (6-7)$$

Il che ci porta alla formulazione della legge di Lambert Beer così come più comunemente nota

$$T = e^{-k \cdot l} = 10^{-k_{10} \cdot l} \quad (6-8)$$

$$\frac{\phi_e^t}{\phi_e^i} = 10^{-k_{10} \cdot l} \rightarrow \log_{10} \frac{\phi_e^t}{\phi_e^i} = -k_{10} \cdot l \quad (6-9)$$

La legge è valida solo in un campo controllato di condizioni, nel quale viene rispettata una relazione lineare tra attenuazione del flusso trasmesso e concentrazione di soluto [27].

Vanno rispettate tutte le seguenti condizioni, pena deviazioni di stima dell'ordine anche del 100% [28]:

- Le specie attenuanti devono risultare indipendenti le une dalle altre nella loro azione
- Il mezzo attraversato deve presentare caratteristiche omogenee lungo tutto il percorso ottico
- Il mezzo attraversato non deve produrre scattering (ossia non deve presentare torbidità)
- La radiazione incidente deve consistere di raggi paralleli, che percorrano la stessa distanza entro il mezzo
- La radiazione deve essere monocromatica o quasi. Qualora, come spesso accade, si trattasse di luce bianca, occorre fare ricorso ad uno spettrometro per descrivere il flusso uscente, in luogo del fotodiodo di una fotocamera, che non è in grado di offrire risultati sensibili alle variazioni di lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico [28]

Il flusso incidente non deve eccitare le molecole del mezzo provocando reazioni indesiderate, come luminescenza o saturazione ottica.

Occorre inoltre tenere presente che la legge perde di valore quando il soluto raggiunge concentrazioni molto elevate, specialmente se il soluto produce scattering.

Anche una radiazione luminosa molto intensa può produrre effetti ottici non lineari [29].

6.2 Applicazione al modello sperimentale

La legge così com'è descritta richiede che i raggi luminosi, paralleli tra loro, attraversino il mezzo in maniera tale che percorrano tutti lo stesso cammino ottico o quasi. Il dispositivo di acquisizione dei risultati (fotocamera o spettrometro che sia) deve trovarsi all'uscita dei raggi dal mezzo. Idealmente, fonte luminosa, mezzo e strumento di acquisizione dovrebbero trovarsi tutti su una stessa retta. La sua posizione inficia il valore dei risultati, naturalmente.

Nel nostro caso la situazione appare relativamente più complessa. Le fonti luminose nel set-up sono costituite dalle due file di fari a led, posizionati, come già descritto in 3.1.3, a 1.7 metri dal piano, secondo un'inclinazione di 5° rispetto all'orizzontale.

L'utilizzo dei teli bianchi, posti su quasi ogni superficie interna, permette di ottenere valori di illuminamento piuttosto uniformi nello spazio del piano in pvc, come evidenziato nella tesi di Guerra, P. [9].

Se tale configurazione offre un vantaggio in termini di illuminamento della scena, essa costituisce un problema nell'interpretazione del percorso luminoso.

L'applicazione rigorosa della legge vorrebbe infatti che fosse il piano stesso a costituire l'unica fonte di luce nell'ambiente. In tal modo, la luce attraverserebbe immediatamente l'acqua rossa, venendone attenuata nelle quantità stimate dalla legge, per poi viaggiare nell'aria fino a raggiungere l'obiettivo della telecamera posta al di sopra della scena.

Ciò rispecchia quanto effettuato da Aureli e al. (2010) [30], che utilizzano un piano retroilluminato, costituito da materiale abbastanza diffondente da permettere un'emittenza dello stesso il più uniforme possibile.

Nel nostro caso, invece, il piano è una superficie riflettente (da considerarsi come perfettamente diffondente, visto il materiale di cui è costituita), non dotato di emittenza propria. Il generico raggio luminoso parte dai fari, colpisce i diffusori orizzontali posti sul soffitto della struttura (costituiti da telo bianco come quello delle pareti), e tramite un percorso naturalmente non decifrabile per ciascun raggio, impatta il piano orizzontale, che risulta essere l'unico oggetto inquadrato dalla fotocamera. Dei raggi che impattano il piano, solo quelli con la corretta angolazione raggiungono l'obiettivo ed eccitano i fotodiodi, producendo il valore registrato infine sui pixel. In tutto ciò, occorre tenere conto che il materiale che costituisce i teli, come già accennato, è una superficie opaca assimilabile ad un materiale perfettamente diffondente.

Ciò implica un ripensamento nell'applicazione della legge di Lambert-Beer al nostro modello.

1. Percorso non più lineare e raggi non paralleli.

Il valore di intensità luminosa sorgente da adottare ϕ_e^i rimane chiaramente il valore di background del piano quando l'esperimento non è ancora avviato. Ciò che registrano i pixel in questo momento risulta essere la composizione delle multiple riflessioni dei raggi luminosi, composizione di cui non interessa la natura, ma solo il risultato. Il valore di intensità luminosa trasmessa ϕ_e^t risulta essere, necessariamente, il prodotto di un percorso articolato del generico raggio luminoso, che va invece indagato e comprende:

- a. Attraversamento dello spessore dell'onda
- b. Riflessione sul piano in pvc
- c. Ulteriore attraversamento dell'onda, e raggiungimento del sensore della fotocamera

Il tutto va inoltre considerato senza poter valutare il percorso del singolo raggio. Il percorso entro il mezzo attenuante, in ogni caso, risulta almeno raddoppiato (per cui il cammino ottico nella legge varrà $2 \cdot h$).

2. Lo spettro della radiazione elettromagnetica non conserva le sue caratteristiche nel tempo. Ricordando che la legge di Lambert-Beer è valida per radiazioni monocromatiche, non si può non tenere conto del fatto che la fonte luminosa sorgente non solo non è monocromatica (ma invece esibisce un certo spettro di luce bianca), ma la sua composizione varia nel tempo: man mano che l'acqua, rossa, invade il piano si hanno due effetti:
 - a. La luminosità totale diminuisce in virtù del fatto che il colorante E124 assorbe più dei teli bianchi
 - b. Tale diminuzione di luminosità non interessa lo spettro elettromagnetico allo stesso modo (determinandone una semplice scalatura omogenea), ma invece produce una sua deformazione, in quanto vengono assorbite maggiormente le frequenze nei campi differenti dal rosso.

Occorre allora determinare le variazioni cui lo spettro elettromagnetico va incontro. Esse infatti si ripercuotono sul valore registrato dalla camera in ogni suo pixel, in quanto tale valore risulta essere espressione dell'energia totale cui è sottoposto: questa energia, naturalmente, può essere espressa come integrale dello spettro nel campo del visibile.

In maniera altrettanto naturale, tuttavia, il valore registrato, essendo un semplice valore scalare, espressione dell'intero integrale, non può offrire le informazioni necessarie a comprendere come la curva spettrometrica vari, mentre l'onda avanza sul piano, per ogni lunghezza d'onda nel visibile.

Si rende allora necessario effettuare delle misure di spettrometria, utilizzando lo spettrometro Spectromaster-C700 Sekonic (3.1.6).

6.2.1 Misure di spettrometria e individuazione della costante k

Viene effettuata una campagna di misurazione con lo spettrometro. Lo strumento, le cui caratteristiche sono descritte in 3.1.6, può effettuare tuttavia misure secondo una frequenza accettabile per la velocità dell'esperimento. Non potendo dunque avere spettri relativi all'evento, sono state fatte misurazioni sul piano allagato, con diversi battenti d'acqua.

In particolare, durante la fase di sperimentazione si è cercato di individuare l'effetto di multiple variabili sullo spettro:

- Il pigmento rosso contenuto nell'E124, naturalmente
- l'increspatura del pelo libero rispetto ad una condizione di calma dello stesso: quanto la perturbazione dell'onda, e quindi l'orientamento delle sue superfici potesse influire sui valori registrati. Lo stesso problema è stato sollevato da Aureli nel suo lavoro [30].
- l'effetto del solo solvente (acqua senza colorante) in relazione al battente
- contributo allo spettro delle pareti in telo bianco, in quanto esse continuano a fornire un elemento di luce bianca che va ad indebolire quantitativamente la deformazione dello spettro indotta dall'onda rossa

L'ultima variabile può essere eliminata restringendo il cono visivo dello spettrometro, che rasenta l'angolo piatto solido. Dovendo infatti relazionarsi all'angolo visivo della fotocamera Andor Zyla, esso deve ricevere lo stimolo luminoso dalla stessa superficie, senza contributi laterali (come i teli, non inquadrati). Per ottenere ciò, è stato stampato in 3D un tronco di cono che simulasse l'apertura dell'angolo solido della camera, calcolato in 21° rispetto all'asse, che calzasse l'ottica dello spettrometro. Il tronco di cono equipaggiato sullo strumento è visibile in Figura 68.



Figura 68 – Tronco di cono stampato in 3D equipaggiato sullo spettrometro Sekonic al fine di simulare l'angolo solido della fotocamera Andor Zyla

I dati in output dello spettrometro sono costituiti da una rappresentazione grafica in .jpeg dello spettro misurato, e da un file .xlsx in cui trovano posto valori come l'illuminamento [lux].

L'analisi dei dati ha richiesto la scrittura di un codice Matlab per ottenere la curva dello spettrometro in forma di vettore di coordinate. Il metodo utilizzato è stato lo stesso descritto per le immagini delle onde di dam break (5.1.1.5), lavorando sul canale rosso dell'immagine .jpeg a colori. La precisione nell'individuazione è elevata, nell'ordine del pixel, visto che il confine tra spettro (colorato) e sfondo bianco è più che netto.

In parallelo alle misure spettrometriche, sono state scattate fotografie con la Andor Zyla, di modo da poter confrontare i dati.

In Figura 69 sono indicati gli spettri risultanti dalle analisi su fondo asciutto, una senza cono applicato, l'altra con. Si evidenzia immediatamente un valore energetico 100 volte minore (il picco del rosso vale circa $0.97 \text{ W/m}^2\text{nm}$ nel primo caso, e circa $0.0082 \text{ W/m}^2\text{nm}$ nel secondo) ed una forma leggermente differente dello spettro. Come preannunciato, quest'ultimo effetto si deve al contributo delle pareti, che va eliminato.

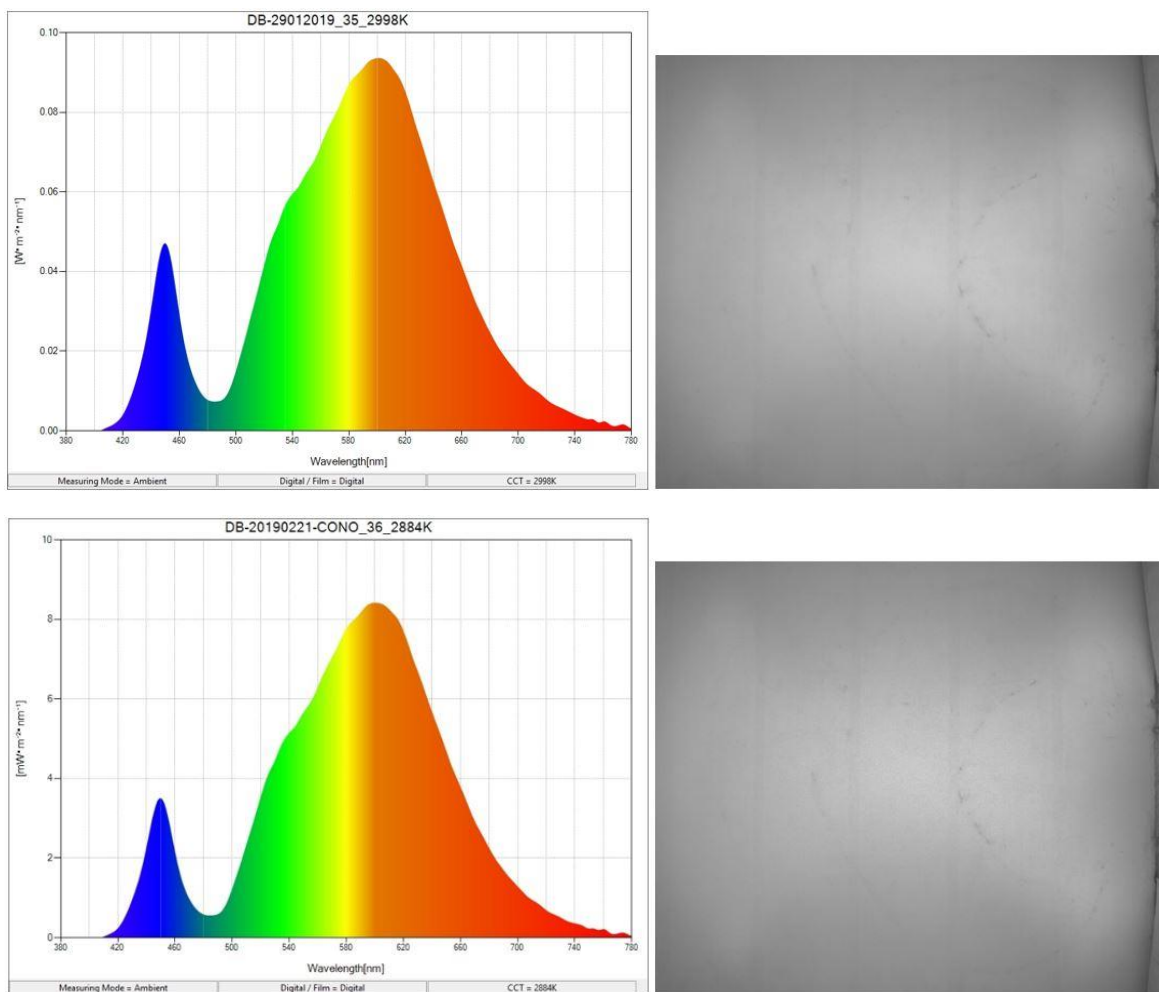


Figura 69 – Confronto tra spettri acquisti, nelle medesime condizioni di fondo asciutto (come testimoniato dalle immagini, accanto, ottenute da Zyla), dallo spettrometro senza e poi con il cono. Si presti attenzione alla scala delle ordinate, nel caso senza cono si parla di W/m^2nm , con il cono si hanno mW/m^2nm . La differenza è di due ordini di grandezza

L'effetto dell'increspatura dell'acqua è stato indagato utilizzando acqua non pigmentata (quindi normale così come ottenuta dall'acquedotto) a differenti altezze d'acqua.

Poiché non è possibile effettuare misure di spettrometria durante l'esperimento, il battente d'acqua che occupava tutto il piano è stato movimentato con l'azione di diverse piccole pompe poste ai bordi della struttura.

Come evidenziato in Figura 71, la sovrapposizione degli spettri per ciascuna altezza d'acqua indagata mostra come ci sia solo una differenza molto sottile tra la condizione di pelo libero fermo (in legenda, "liscio") e increspato.

Questo esclude l'ipotesi che le misure da noi acquisite per tarare la costante k , esclusivamente su acqua ferma, possano essere affette da un grande errore dovuto all'effetto di riflessione delle onde e increspature.

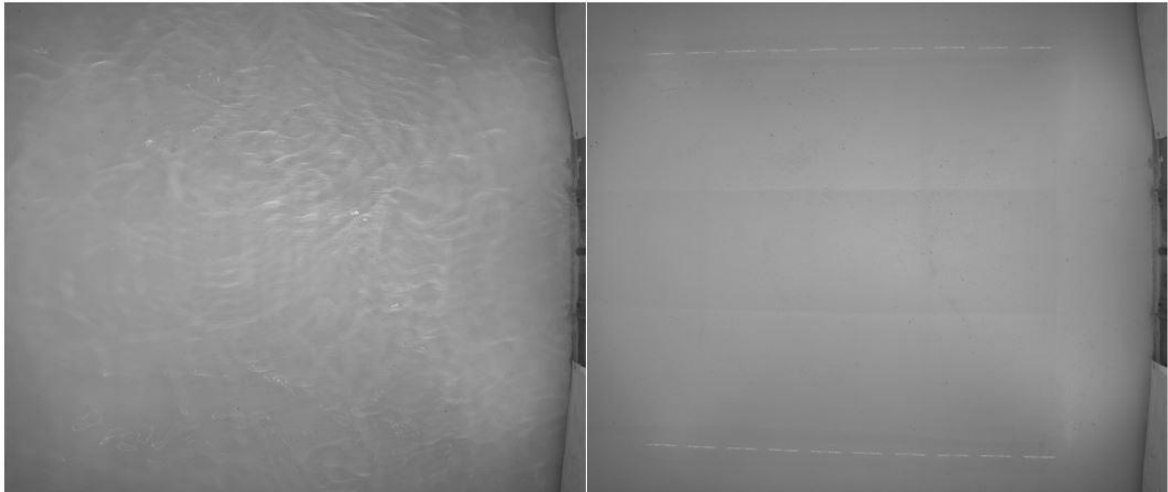


Figura 70 – Fotografie acquisite da Zyla, acqua normale, pelo libero increspato e fermo (liscio) per un battente di 4.95 cm

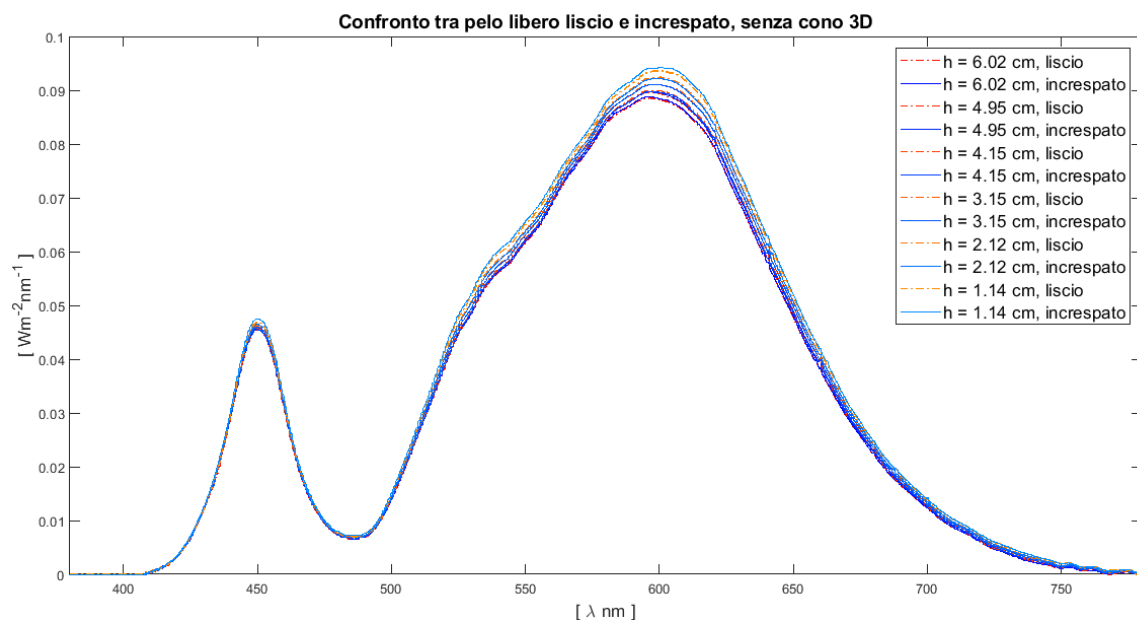


Figura 71 – Confronto tra gli spettri ottenuti dalle misure, su acqua normale con pelo libero increspato e fermo (liscio), per 6 differenti altezze d'acqua

Dopo questi tentativi preliminari, sono state effettuate altre due tipologie di prove: una campagna di misure su acqua rossa con pelo libero fermo, a differenti battenti, ed una effettuata su un differente set-up, che consentisse di avere fonte luminosa, mezzo assorbente e spettrometro tutti su una stessa linea.

La campagna di misura sul piano, con acqua rossa con pelo libero fermo, ha prodotto i seguenti risultati finali, esemplificati in Figura 72.

Si noti che sono stati plottati tutti gli spettri acquisiti in misurazione, più ulteriori di confronto. Per la sola altezza di 5.17 cm, viene indicato anche il corrispettivo spettro, fuori scala, acquisito senza tronco di cono applicato.

In nero, vicino all'asse delle ascisse, corre lo spettro acquisito ponendo un telo nero sul fondo asciutto: il tentativo era quello di isolare e definire il più possibile il solo spettro offerto dalle pareti, escludendo il piano.

I risultati di questa campagna verranno utilizzati direttamente per tarare la costante k . Per determinare il comportamento rispetto alle lunghezze d'onda, tuttavia, è stato necessario passare per le misure sull'acquario, descritte in seguito.

Per ora, si possono fare delle considerazioni qualitative.

Si nota che la deformazione dello spettro risulta, come si era ipotizzato e come ci si aspetta, variabile secondo le lunghezze d'onda: il campo dei rossi, compreso tra 600 e 700 nm, si abbassa in maniera pressoché impercettibile, mentre il campo dei blu (intorno del valore 450 nm) vede appianato il proprio picco, man mano che si effettuano misure con battenti più elevati, e quindi più scuri.

Il picco più elevato, che descrive il campo del giallo-rosso, tende a spostarsi verso destra, verso i rossi.

Il campo dei verdi, infine (500 – 600 nm) vede il proprio valore calare vistosamente già con la prima acqua: i valori molto elevati che si osservano su fondo asciutto (il “rigonfiamento”) vengono abbattuti già con battenti irrisori, per poi diminuire in maniera graduale e proporzionale all'aumentare dell'altezza d'acqua, seguendo lo spostamento dello spettro verso destra.

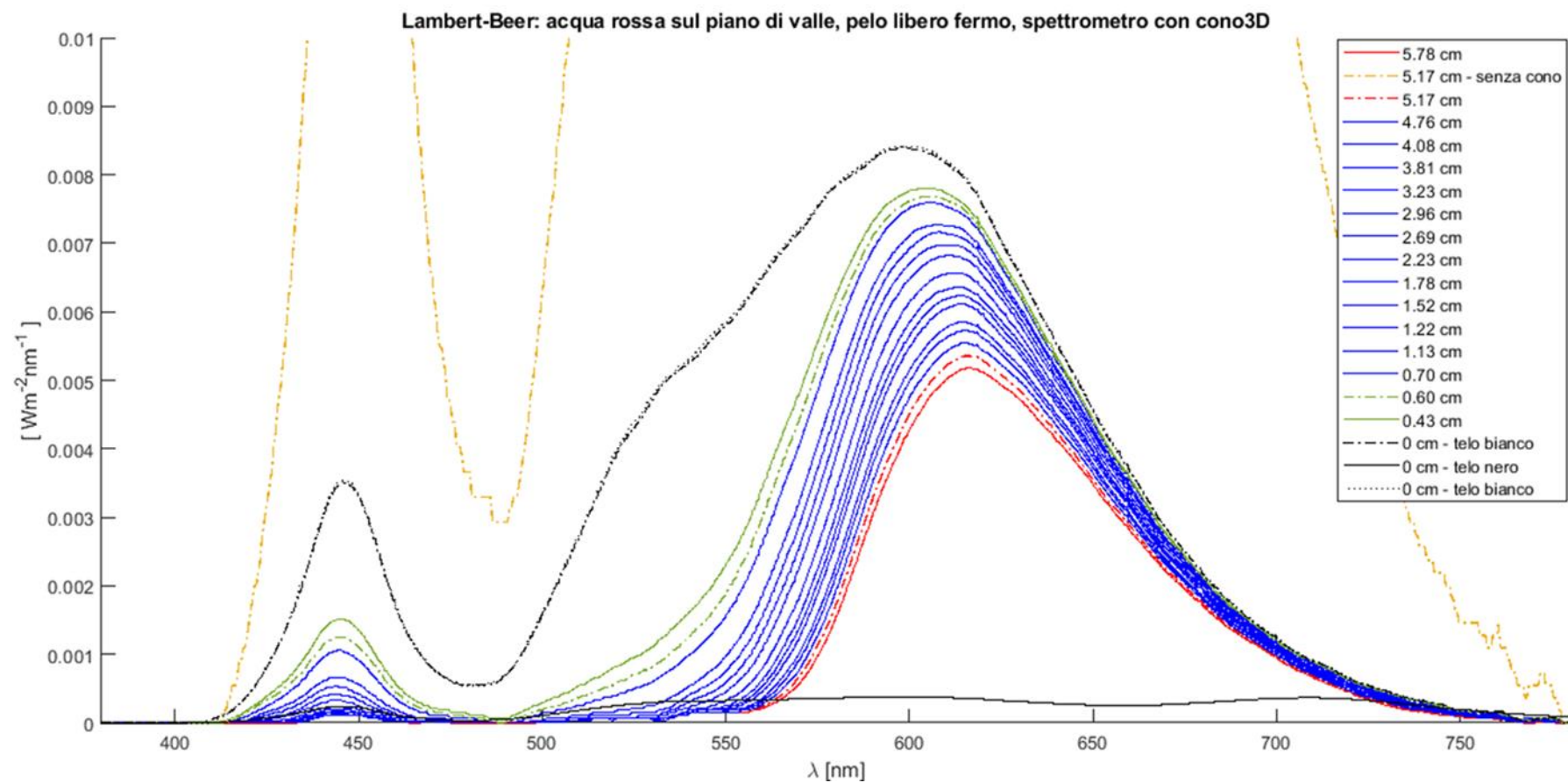


Figura 72 – Sovrapposizione degli spettri elettromagnetici per le prove eseguite sul piano di valle, pelo libero fermo, con tronco di cono

La seconda misura è stata effettuata in una vasca di vetro, ed è servita ad ottenere una valutazione spettrale libera da effetti nascosti, come la riflessione multipla ed il complicato percorso del raggio luminoso nella camera del piano di valle.

A questo scopo ci si è serviti di una vasca prismatica in vetro trasparente di medie dimensioni ($1.2 \times 0.4 \times 0.5 \text{ m}^3$), con fondo in vetro. Uno dei fari a led che illuminano il piano di valle è stato smontato e posto sotto la vasca, di modo che lo illuminasse dal basso. Nota la geometria della stessa, sono stati via via aggiunti volumi d'acqua rossa noti e uguali tra loro per ottenere diversi battenti. La struttura è stata adeguatamente schermata dalla luce esterna utilizzando gli stessi teli neri adottati per il piano di valle.

I risultati della misura sono indicati in Figura 73.

Si specifica che le misure effettuate in vasca sono state riprese con lo solo spettrometro, in quanto non era possibile spostare la camera Zyla dalla sua installazione. Inoltre, il set up era tale per cui l'unica superficie inquadrata dallo spettrometro fosse il pelo libero dell'acqua, retroilluminato dal faro a led sottostante. La distanza totale tra il sensore e i fari a led non supera gli 0.6 m.

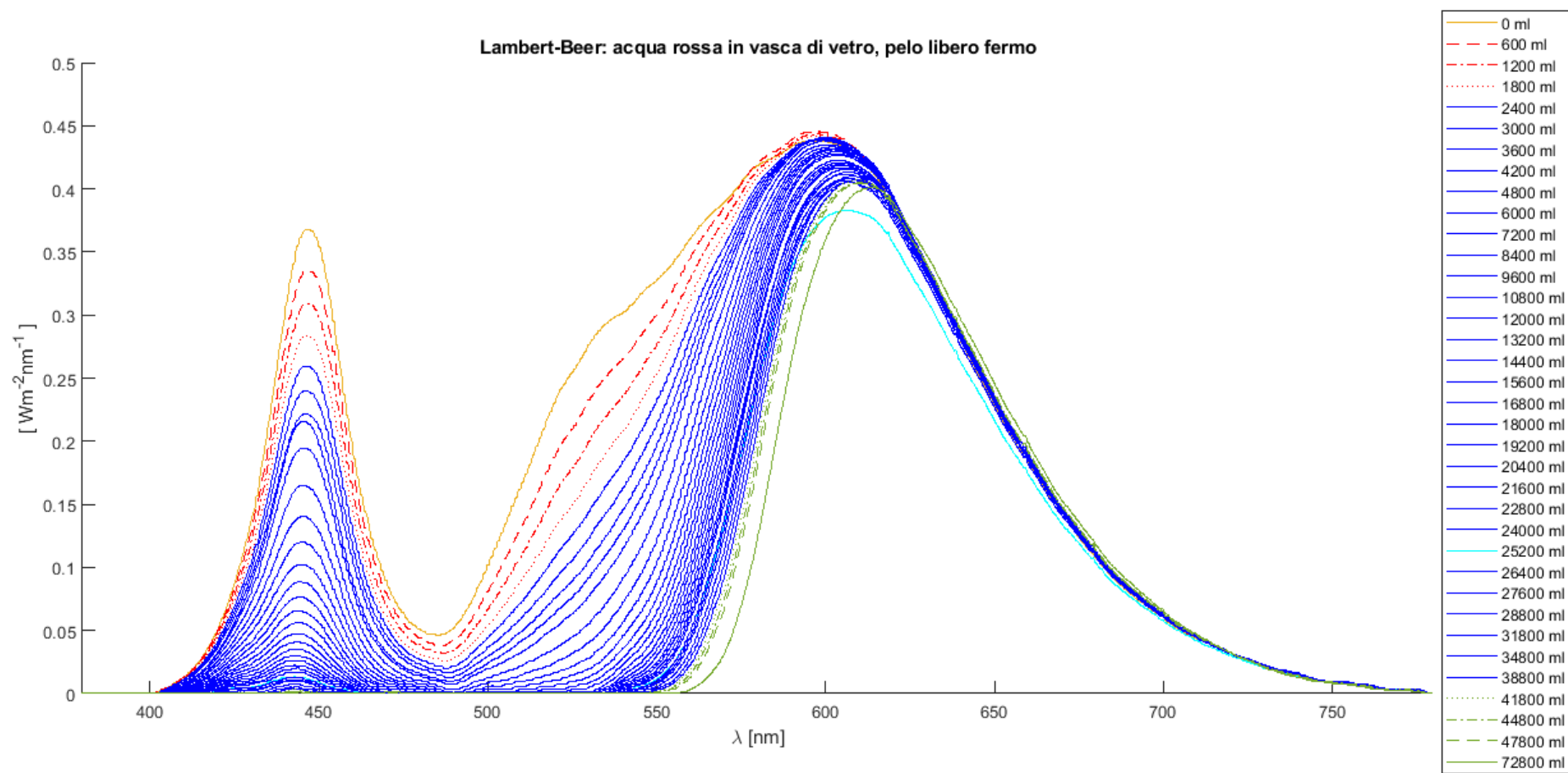


Figura 73 - Sovrapposizione degli spettri elettromagnetici per le prove eseguite nella vasca di vetro, pelo libero fermo.

L'analisi dei dati ha condotto a riportare in un diagramma $\lambda - k$ l'andamento della costante di Lambert-Beer in funzione della lunghezza d'onda. Nello spirito della formulazione, la costante k è stata ottenuta esplicitandola come segue

$$k_i = \frac{-\ln\left(\frac{I_i}{I_0}\right)}{h_i} \left[\frac{1}{m} \right] \text{ con "i" numero di osservazioni}$$

(6-10)

I valori di intensità I sono stati intesi come il flusso radiante (per lunghezza d'onda) misurato dallo spettrometro. In altre parole, si tratta dell'ordinata registrata nella curva in ogni lunghezza d'onda dello spettro visibile. Il valore di riferimento I_0 è inteso come quello ottenuto a fondo vasca asciutto. Le altezze d'acqua sono note.

Il risultato è espresso in Figura 74.

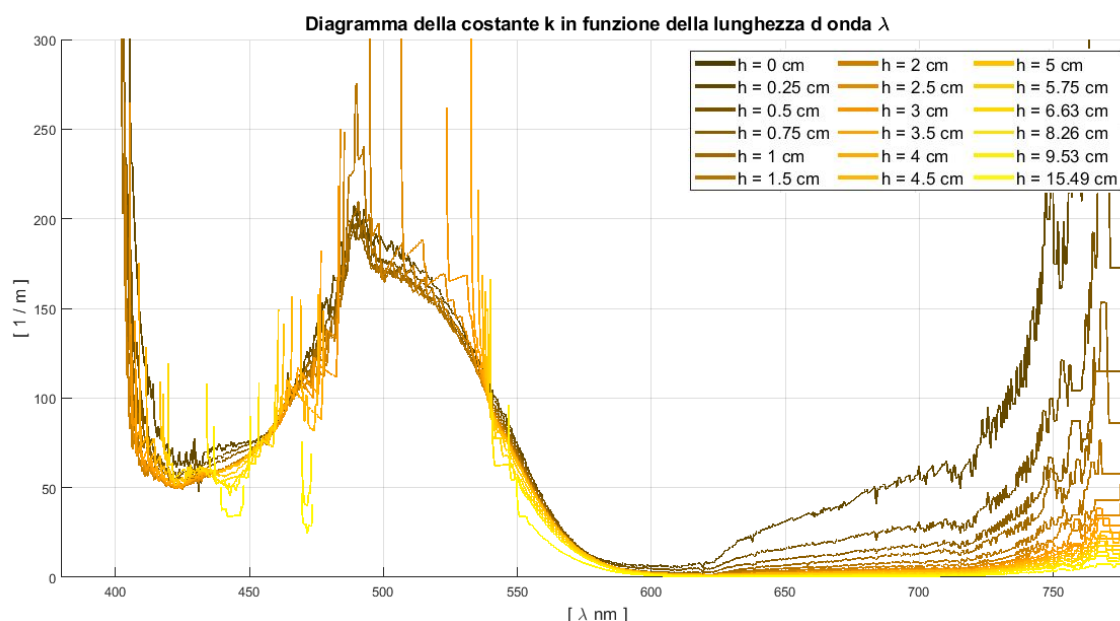


Figura 74 – Andamento della costante k in funzione della lunghezza d'onda

Si osserva, al netto del rumore sicuramente dovuto in parte alla sperimentazione, un andamento piuttosto chiaro della curva k in funzione della lunghezza d'onda λ .

Ciò che risulta più importante, è la scarsa dipendenza della funzione dall'altezza d'acqua, almeno entro il range che va dai 400 nm ai 600 nm. Oltre, entrando nel campo dei rossi, le curve assumono un andamento altezza-dipendente, andando ad indicare che l'assorbanza definita da Lambert-Beer, almeno nel nostro specifico caso, risulta essere funzione sia del battente puro, sia dell'influenza che esso ha sulla costante, che ricordiamo essere prima di tutto espressione della chimica del mezzo.

Non è stato indagato se tale effetto sia dovuto ad una qualche proprietà specifica del colorante E124, o della rimanente cocciniglia, anche se risulta lapalissiano che l'andamento proprio della curva sia prima di tutto funzione del tipo di liquido utilizzato.

Lo stesso diagramma viene proposto in Figura 75 utilizzando i soli dati acquisiti entro 1 cm di battente. Si nota immediatamente una configurazione più pulita: come noto dalla letteratura, per battenti più elevati la legge inizia a perdere di efficacia.

Ignorando l'ovvio dato a 0 cm e quello a 0.13 cm, le curve collassano tutte su una stessa curva portante fino ai 600 nm, per poi riprendere per lunghezze d'onda superiori il comportamento deviatorio, funzione dell'altezza d'acqua, già descritto in precedenza.

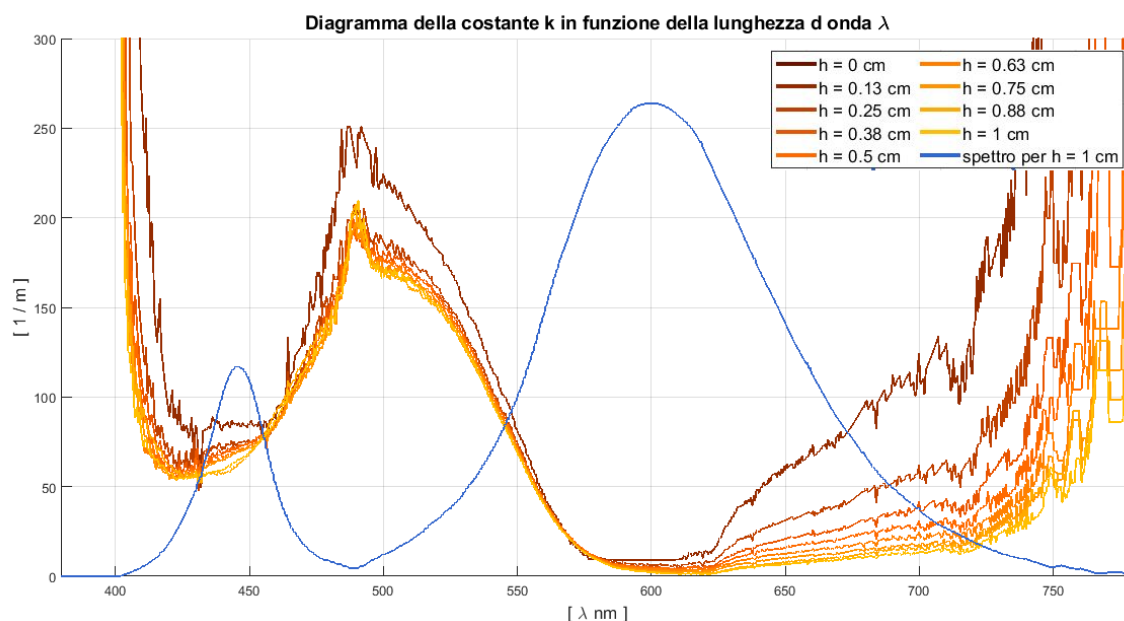


Figura 75 - Andamento della costante k in funzione della lunghezza d'onda, per il primo cm d'acqua

A questo punto, nota la funzione che descrive $k(\lambda)$, si potrebbe semplicemente integrare la funzione sulle lunghezze d'onda ed ottenere così il rapporto tra le intensità luminose, secondo la seguente:

$$\frac{I(h)}{I_0} = \int_0^\infty e^{-k(\lambda) \cdot h} d\lambda \quad (6-11)$$

Si noti che, se $k(\lambda)$ fosse una costante, l'equazione si risolverebbe come la formulazione monocromatica della legge di Lambert-Beer.

Purtroppo, la variabilità della curva oltre i 600 nm e la generale incertezza della misura non permettono di definire in maniera semplice una formulazione analitica della relazione che intercorre tra la costante k e, a valle, i dati forniti dalle immagini (ossia le intensità luminose per ogni pixel). Questo significa che, qualora si adottasse la definizione di k data da queste curve, occorrerebbe stimarne il valore di volta in volta.

Si vuole invece ottenere una definizione più pulita, una singola relazione che possa essere implementata senza dover fare riferimento ad una integrazione numerica di volta in volta.

Si decide di optare per un secondo approccio, forti delle conoscenze acquisite in questo primo.

Il secondo approccio si basa sulla determinazione di una costante equivalente k' , funzione delle altezze, che possa essere utilizzata come parametro di collegamento tra il rapporto di intensità ottenuto dalle immagini di Zyla e l'altezza effettiva d'acqua.

Nel determinare questa costante, si manterrà l'informazione legata alla spettrometria, adottando le aree sottese dagli spettri stessi. Ciò è reso attuabile dalle relazioni con cui la legge di Lambert-Beer è espressa dalla camera Andor Zyla e dallo spettrometro, di seguito indicate.

Il sensore della fotocamera, come detto, registra un valore che rappresenta l'integrale (ossia l'energia) del flusso luminoso emesso nelle lunghezze d'onda del visibile dal piano di valle. In tal senso, il valore di intensità luminosa che compare nella legge risulta essere funzione del cammino ottico e della lunghezza d'onda. Per la fotocamera Andor Zyla si ha:

$$\frac{I(\lambda, h)}{I_0(\lambda, h)} = \frac{\int_0^\infty I(\lambda, h) d\lambda}{\int_0^\infty I_0(\lambda, h) d\lambda} = e^{-k(\lambda) \cdot h}$$

(6-12)

In cui il valore I_0 rappresenta l'intensità luminosa del background, ossia il piano senza acqua.

La (6-12) vale per ogni singolo pixel dell'immagine. Essa, che ricalca la (6-11), non ha tuttavia soluzione, in quanto non è nota la distribuzione della costante k in funzione della lunghezza d'onda e dell'altezza d'acqua.

Per quanto riguarda invece lo spettrometro, esso presenta il vantaggio di esplicitare la relazione tra energia e lunghezza d'onda, oltretutto dimostrare la scarsa dipendenza dall'altezza d'acqua nei range da noi considerati. La costante k , quindi, può essere espressa come sola funzione della lunghezza d'onda con una precisione sufficiente. Si ignora cioè la dipendenza che essa esprime, nel solo range 600-780 nm, dall'altezza d'acqua.

Si precisa che, trovandosi le informazioni di intensità luminosa entro un rapporto, esse possono essere sostituite da una grandezza affine, quale ad esempio il flusso registrato dallo spettrometro.

Si ricerca quindi la costante k utilizzando le informazioni offerte dalla spettrometria: gli integrali delle curve spettrali sono utilizzati per indicare le intensità luminose. La stessa formulazione (6-10) viene qui riadattata

$$k_i = -\frac{\ln\left(\frac{A_i}{A_0}\right)}{h_i} \text{ con } A_i = \int_0^\infty I(\lambda) d\lambda$$

(6-13)

Descrivendo l'integrale senza tenere in conto della sua dipendenza da h .

Utilizzando i dati degli spettri ottenuti nella vasca di vetro (esplicitati in Figura 73) si diagrammano le costanti k equivalenti così definite rispetto all'altezza d'acqua, ottenendo il seguente grafico

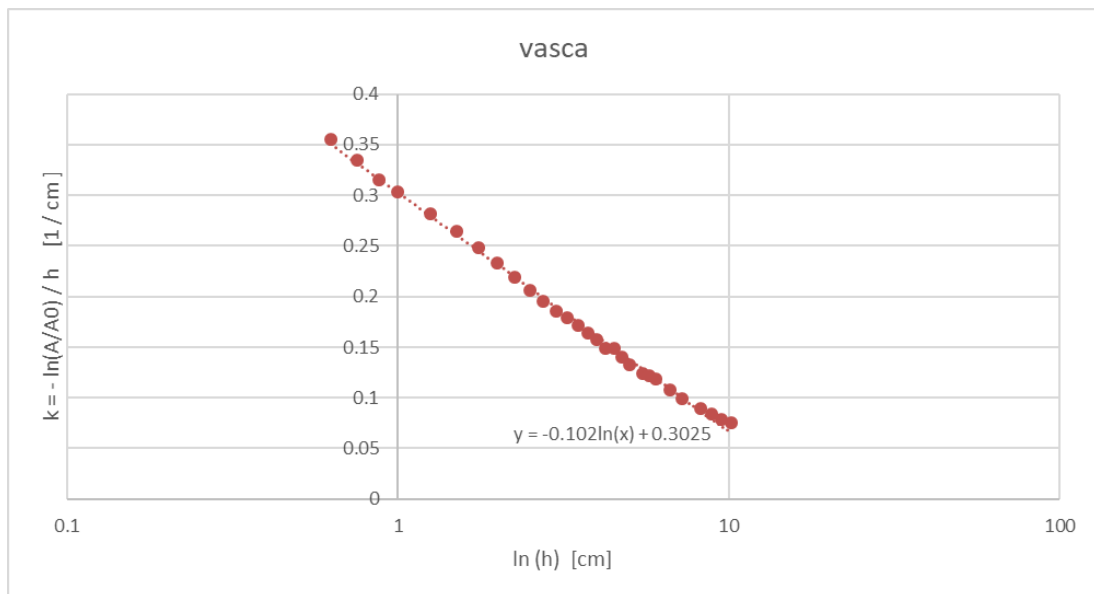


Figura 76 – Andamento della costante k' rispetto all'altezza h , per le prove in vasca di vetro

Applicando la scala logaritmica all'asse delle ascisse, si ottiene una relazione lineare. Essa devia dalla linearità per valori di altezze piuttosto elevati, intorno ai 10 cm, ben fuori dal range di nostro interesse. La retta di regressione viene calcolata escludendo questi ultimi punti. Essa descrive quindi la relazione che intercorre tra il logaritmo in base 10 delle altezze e la costante equivalente k' .

$$k' = -0.102 \cdot \ln(h) + 0.3025$$

(6-14)

6.2.2 Determinazione della relazione intensità luminosa – altezza d'acqua

La relazione individuata risulta valida per le sole misure effettuate nella vasca di vetro, quindi applicando in maniera più restrittiva le ipotesi iniziali della legge di Lambert-Beer.

Per dimostrare la validità della relazione anche per le misure effettuate sul piano, occorre diagrammarle rispetto alla relazione di Figura 76. In base a quanto espresso in 6.2, non ci si aspetta che le curve si sovrappongano, ma siano piuttosto collegate tra loro da un coefficiente di proporzionalità. Il percorso effettuato dai raggi luminosi infatti implica che il battente d'acqua rossa viene attraversato due volte, secondo un'inclinazione che non è quella perpendicolare. I valori attesi dunque si attestano intorno al 2.

Utilizzando tutti i dati in proprio possesso, si costruiscono curve $k' - h$ basate su:

- Le misure di sola spettrometria effettuate nella vasca di vetro e già presentate. In questo caso, sono state utilizzate le aree degli spettri
- Le misure effettuate sul piano con lo spettrometro privo del tronco di cono. Anche in questo caso, sono state utilizzate le aree degli spettri
- Le acquisizioni di Zyla basate sulle onde statiche che erano state create durante il primo approccio (curve di taratura per le altezze d'acqua). In questo caso sono stati utilizzati valori medi di intensità luminosa da Zyla
- Le misure effettuate sul piano con lo spettrometro con tronco di cono equipaggiato, i cui spettri sono descritti in Figura 72. In questo caso, sono state utilizzate le aree degli spettri

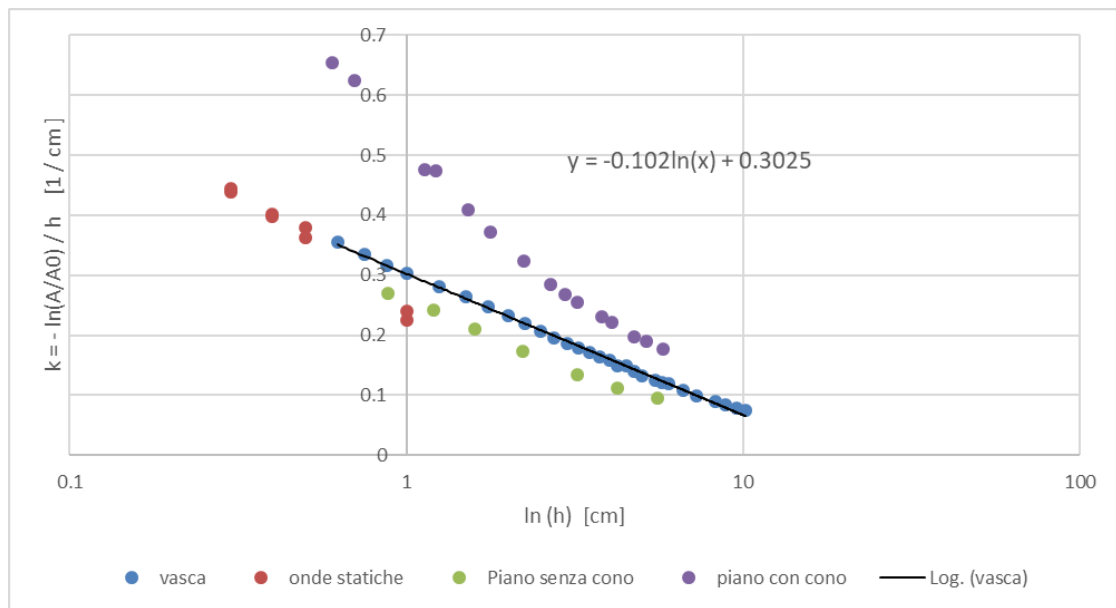


Figura 77 - Andamento della costante k' rispetto all'altezza h , per tutte le tipologie di prove disponibili

Come ci si attendeva, le curve calcolate sul piano non fittano quella in vasca. Moltiplicando ciascuna curva per un valore scalare fisso dedicato, tuttavia, si ottiene che tutte descrivono in maniera più che soddisfacente la retta di regressione della vasca.

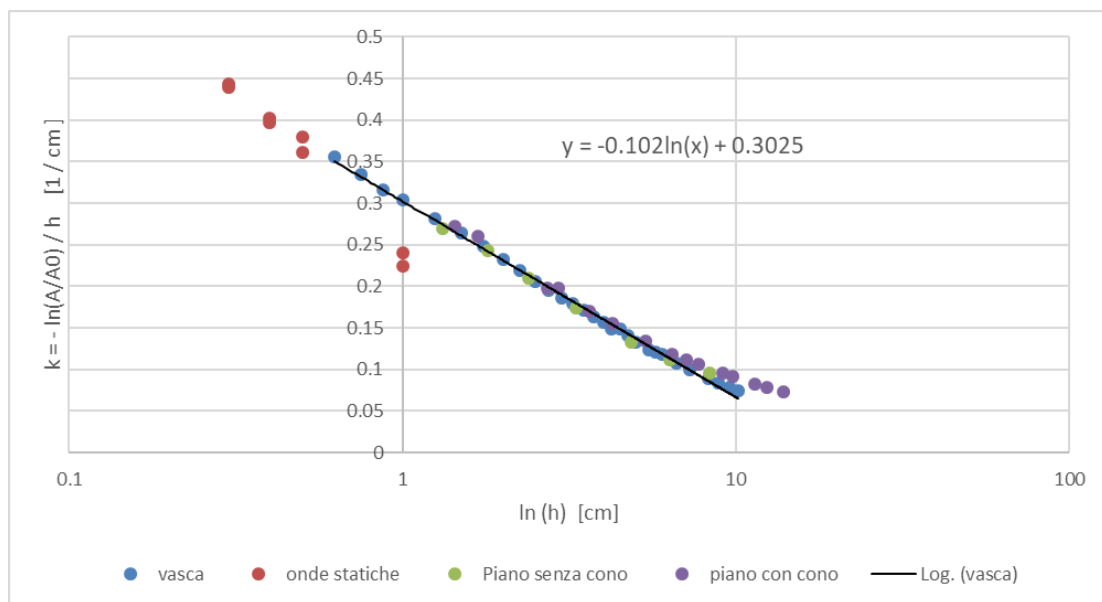


Figura 78 - Andamento della costante k' rispetto all'altezza h , per tutte le tipologie di prove disponibili, dopo aver applicato un coefficiente correttivo scalare costante

Tali fattori risultano essere 2.3 per le prove con tronco di cono equipaggiato, e 1.5 per quelle senza.

Ciò costituisce un ottimo risultato, in quanto, al netto di un fattore moltiplicativo costante, che ci si attendeva, la legge di Lambert-Beer e la costante equivalente k' possono essere applicate alle acquisizioni della fotocamera effettuate sul piano.

Si può dunque costruire una curva che permetta, noto il rapporto tra le intensità luminose (che è il dato offerto, pixel per pixel, istante per istante, da Zyla) di entrare nella curva stessa con tale valore e uscirne con il valore di altezza d'acqua corrispondente.

Ciò risulta possibile combinando la relazione lineare individuata (6-14) e la legge usata per estrarre la curva delle k' (6-11):

$$-\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{h} = k' = -0.102 \cdot \ln(h) + 0.3025 \quad (6-15)$$

Esplicitando in funzione del rapporto tra intensità, si ottiene la formula finale.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-h \cdot (-0.102 \cdot \ln(h) + 0.3025)} \quad (6-16)$$

Si diagrammano quindi in Figura 79:

- I dati sperimentali ottenuti dalla vasca
- I risultati della relazione (6-16), utilizzando come ascisse le stesse altezze adottate nella prova in vasca
- I dati sperimentali ottenuti dallo spettrometro con tronco di cono sul piano

Naturalmente, anche qui occorre applicare un coefficiente correttivo, che risulta essere pari a 2.3.

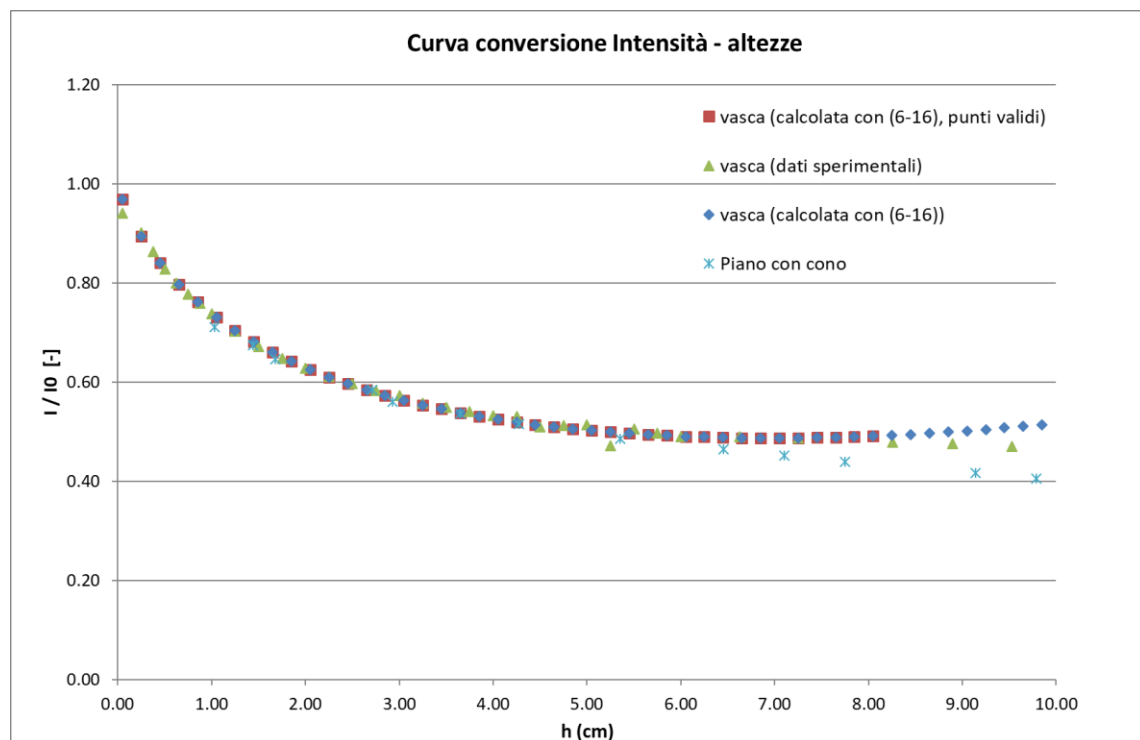


Figura 79 – Andamento della curva di conversione Intensità-altezze, e dei dati sperimentali collegati

Si osserva come le curve, non più rappresentate in forma logaritmica, si sovrappongano in maniera efficace. Per altezze elevate (sopra i 7 cm) la legge determinata inizia a perdere di validità: mentre i dati sperimentali, come peraltro ci si attenderebbe, descrivono un andamento monotono decrescente, i risultati della legge offrono valori di I/I_0 più elevati, il che è assurdo.

La perdita di validità è tuttavia da ricondursi ad un eccessivo ispessimento del mezzo assorbente: come affermato in letteratura, la legge è valida solo entro un preciso range.

La procedura per ottenere le altezze è quindi, in estrema sintesi:

- Estrarre il rapporto $\frac{I}{I_0}$ per ogni pixel, in ogni istante
- Applicare il coefficiente correttivo per l'oscuramento progressivo nel tempo
- Applicare il coefficiente correttivo che lega le misure in vasca a quelle sul piano
- Con il rapporto ottenuto, entrare nella curva di conversione ed estrarre il valore di altezza

6.3 Calcolo campo di altezze

Richiamando i passi accennati al termine di 6.2.2, lo studio viene effettuato su ogni pixel della t-esima immagine.

Riguardo il coefficiente di oscuramento, se ne richiama brevemente il significato.

La luminosità totale presente sul piano, e percepita (registrata) dalla camera Zyla è un valore variabile nel tempo, legato in maniera proporzionale al volume di acqua che nel tempo invade il piano: essendo rossa, l'acqua assorbe molto di più del piano o dei teli (entrambi bianchi), determinando questo oscuramento progressivo.

I valori registrati in ogni cella della camera, dunque, risultano più bassi di quello che dovrebbero essere, in virtù di questo effetto. Non tenerne conto comporterebbe una sovrastima crescente nel tempo dell'altezza d'acqua.

Questo coefficiente viene individuato calcolando un valor medio della luminosità entro una zona del piano, decisa in modo arbitrario: si sceglie un rettangolo 800x250 pixel nella zona più a valle, in asse breccia.

In particolare, si calcola un valor medio per ogni istante, e lo si rapporta al valor medio dell'immagine di background: in sostanza, si tratta di una proporzione entro punti del piano che non vengono invasi dall'onda. La variazione che essi registrano è quindi unicamente funzione del progressivo oscuramento.

A questo punto, si istituisce un calcolo ciclico, che va ad indagare ogni immagine cella per cella. Si noti che, diversamente da quanto fatto per i fronti, il valore della cella viene solamente normalizzato rispetto al valore della cella corrispondente nell'immagine di background: non vengono effettuate sottrazioni. Il valore normalizzato, al quale viene diviso il coefficiente di oscuramento, viene infine introdotto nella curva di conversione tramite un semplice "interp1" di Matlab.

Si noti che il rapporto normalizzato risulta essere minore di 1 per i punti appartenenti all'onda. Per tutti i punti esterni, che esibiscono invece valori superiori, viene posta una condizione per cui il loro valore in altezza viene posto pari ad un valore infinitesimo.

Si ottiene in tal modo il campo di altezze, nella forma di una matrice con le stesse dimensioni dell'immagine sorgente. Per quanto semplice, il peso computazionale dell'operazione è risultato elevato. Il fattore 2.3 deve ancora essere utilizzato: esso può essere applicato, invariabilmente, ad ogni valore di altezza, oppure al volume finale. Verrà introdotto più avanti.

6.4 Validazione tramite bilancio di volumi

La validazione della procedura viene effettuata confrontando i volumi presenti sul piano (stimati dalle altezze d'acqua) con il dato di abbassamento di livello fornito dalle 12 sonde Balluff nel serbatoio di monte, che acquisiscono in continuo da prima che l'esperimento parta.

Il concetto, basato sull'equazione di continuità, asserisce che, nell'unità di tempo, il volume uscente dal serbatoio deve essere ritrovato sul piano (come sommatoria dei volumi discreti descritti da ogni pixel). Allo stesso modo, i volumi cumulati nel tempo misurati a monte e a valle, devono essere il più rispondenti possibile.

Naturalmente, viene utilizzato il dato delle sonde come benchmark, al quale riferire il dato prodotto dal campo di altezze.

Inoltre, a margine dello studio della vena effluente effettuato da D'Oria [20], si presenta una soluzione analitica delle portate – e quindi dei volumi – effluenti, presentato di seguito.

6.4.1 Volumi dalle sonde (monte)

Le sonde a ultrasuoni acquisiscono con una frequenza quasi doppia rispetto al frame-rate delle fotografie (80 Hz contro 41.39 hZ), ed il dato che forniscono è di semplice interpretazione: 12 vettori temporali di abbassamento del livello, di un volume contenuto entro un serbatoio prismatico dalle dimensioni perfettamente definite ($1.5 \times 1.5 \times \text{battente [m]}$). Il dato, quindi, seppur affetto da fluttuazioni dovute allo strumento di misura (misurate in $\pm 0.2 \text{ mm}$), può essere considerato affidabile ed essere utilizzato come metro di confronto e validazione di quello del campo di altezze.

Per ottenere tale volume, risulta sufficiente calcolare una media dei valori di misura, ed effettuare un ricampionamento del dato per ottenere la stima del volume uscente negli stessi istanti delle fotografie.

6.4.2 Volumi dal campo di altezze (valle)

Prima di effettuare il confronto, il dato del campo di altezze viene raffinato. Infatti, sono presenti numerosissimi spike e avvallamenti, ben visibili estraendo una singola sezione dalla matrice. Si effettua un semplice ricampionamento tramite un resize della matrice: i dati, disponibili pixel per pixel in una matrice 2160×2560 , vengono raggruppati in cluster da 25 elementi (square 5×5), ed i loro valori semplicemente mediati.

Questa operazione di interpolazione consente di abbattere gli outliers mantenendo comunque la loro informazione, in quanto non si può a priori pensare di escluderli dal computo.

Si ottengono dunque matrici 432×512 elementi. La dimensione è ancora in pixel: con riferimento ai parametri intrinseci della camera 4.1, le corrette dimensioni possono essere ottenute applicando il rapporto $[\text{px/mm}]$ (invero molto modesto, valendo circa 0.995 in entrambe le direzioni) direttamente in fase di calcolo del volume di ogni cluster.

Di conseguenza, il volume viene calcolato sommando i volumi di ogni cluster (ottenuti dall'altezza dello stesso per la sua base, nota, di circa 25 mm^2) dalle matrici 432×512 , e dividendo quindi per il coefficiente correttivo. Allo stesso modo, e in maniera più corretta dal

punto di vista teorico, le altezze singolarmente possono essere divise per il coefficiente e poi sommate per comporre il volume.

È stato calcolato il campo di altezze solo di una parte delle prove effettuate. In particolare, sono stati calcolati tutti gli esperimenti delle categorie a fondo liscio, ma uno per la categoria a fondo scabro (uno a maglia 5x5, angolo di 45°).

Per la categoria a fondo scabro, infatti, l'operazione di calcolo del campo di altezze è risultata più complicata a causa della presenza delle bacchette: il loro valore di intensità luminoso, che nulla ha a che fare con la profondità dell'acqua, produce dalle curve di conversione un risultato che non ha alcun valore.

Nondimeno, i pannelli in vetro sintetico comportano una riflessione troppo puntuale rispetto alla riflessione diffusa del pvc: si osserva così, dalla sensibilità della fotocamera, uno spazio scuro nella zona centrale, riflessione fedele dello spazio nero da cui si affacciano le fotocamere. Per ovviare a questi problemi, è stato utilizzato come base un background di un dam break a fondo liscio.

Questa applicazione ha permesso inoltre di poter stimare da subito l'altezza (senza valore fisico) delle scabrezze, usando le leggi di conversione su un istante iniziale (in cui non vi sia ancora acqua sul piano), per ottenere quindi un volume definito esclusivamente dalle scabrezze. Tale volume – fittizio - può semplicemente essere sottratto al volume totale calcolato nei vari istanti, ottenendo così la sola quota costituita dall'onda.

6.4.3 Volumi da trattazione analitica

La definizione analitica per la portata effluente da una fessura in un serbatoio – quale è il nostro caso – può essere ricercata come derivazione innanzitutto del teorema di Torricelli.

Il teorema di Torricelli, si ricorda, definisce la traiettoria di un getto d'acqua effluente da un foro praticato in un serbatoio come il moto di un grave. La traiettoria, cioè, è di tipo balistico, e le sue caratteristiche (velocità all'uscita, distanza di caduta, traiettoria geometrica) possono essere desunti da semplici considerazioni basate sul teorema di Bernoulli.

In un lavoro del 1907 di Horton R. E. [31] si descrive l'applicazione del teorema di Torricelli ad uno stramazzo: si considera cioè una serie molto numerosa di fori, in numero ed estensione tale da costituire, di fatto, un'unica apertura, come è il caso degli stramazzi (Figura 80).

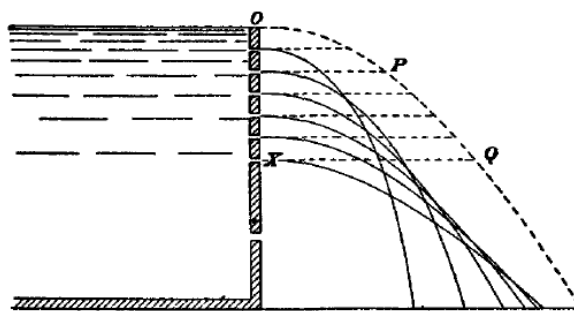


FIG. 1.—Torricellian theorem applied to a weir.

Figura 80 – Traiettorie effluenti da fori praticati in un serbatoio secondo la teoria di Torricelli

Con riferimento alla definizione della portata effluente da uno stramazzo in parete sottile, si ottiene, per numerosi orifizi non comunicanti tra loro, la seguente:

$$Q_{tot} = M \cdot \sqrt{2g} (A_1 H_1^{\frac{1}{2}} + A_2 H_2^{\frac{1}{2}} + A_3 H_3^{\frac{1}{2}} + \dots) \quad (6-17)$$

Dove:

- M coefficiente di contrazione da dedursi caso per caso
- A area della sezione geometrica di efflusso del singolo foro
- H carico totale all'altezza cui si trova il foro

Nell'applicazione di Horton, gli orifizi di Torricelli vengono considerati come successivi incrementi del carico totale H del serbatoio. Considerando n orifizi, o strisce, ciascuna esibisce un'altezza pari ad $\frac{H}{n}$, per cui il loro carico totale, in maniera sequenziale, vale $\frac{H}{n}, \frac{2H}{n}, \dots$, e la portata totale vale

$$Q_{tot} = \frac{MLH}{n} \cdot \sqrt{2g} \left(\sqrt{\frac{H}{n}} + \sqrt{\frac{2H}{n}} + \sqrt{\frac{3H}{n}} + \dots \right)$$

dove $\frac{LH}{n} = A_1 + A_2 + \dots$ per uno stramazzo rettangolare

(6-18)

Estraendo i rapporti $\sqrt{\frac{H}{n}}$, rimane tra parentesi una sommatoria di termini sotto radice. Il semplice sviluppo in serie dei termini comporta: $\sqrt{1} + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \dots + \sqrt{n} = \sum_{i=1}^n \sqrt{i} = \frac{2}{3} n^{\frac{3}{2}}$

Il che permette di ottenere la seguente formulazione finale

$$Q_{tot} = \frac{MLH}{n} \cdot \sqrt{2g} \cdot \sqrt{\frac{H}{n}} \cdot \frac{2}{3} n^{\frac{3}{2}} = \frac{2}{3} MLH \sqrt{2gH} \quad (6-19)$$

La trattazione ha validità nel caso in cui venga mantenuta l'ipotesi di traiettorie indipendenti tra le particelle effluenti.

Nel nostro caso, in cui la fessura si sviluppa a tutta altezza, l'involuppo delle traiettorie, assumendo che queste rimangano indipendenti tra di loro, produrrebbe quindi un risultato come quello presentato in Figura 81, prima immagine.

La pendenza della vena effluente risulterebbe essere pari a -1, ossia a 45°.

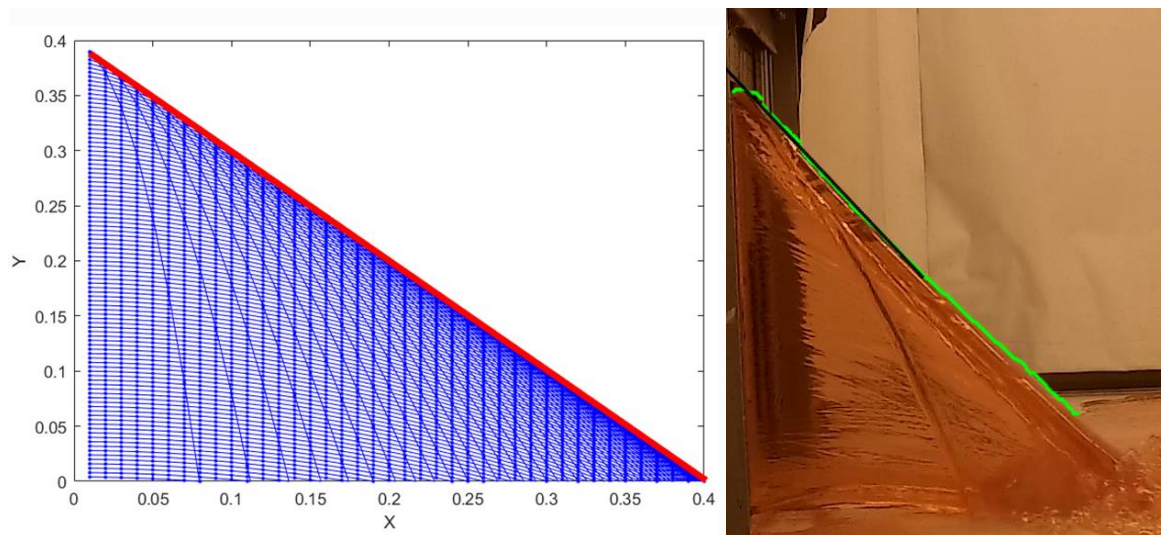


Figura 81 – Inviluppo delle traiettorie indipendenti Torricelliane, e frame di un video ritraente la vista laterale della vena. Su di essa, in verde, l'identificazione del profilo da essa descritto

Il risultato è validato dall'evidenza sperimentale, in cui si osserva la forma della vena effluente per un dam break a 40 cm, fondo liscio. Il profilo della vena mantiene questa conformazione nel tempo, naturalmente traslando verso il basso man mano che l'acqua defluisce [20].

A differenza dell'esperienza di Torricelli, in cui le traiettorie si incrociano tra di loro, qui il comportamento fisico è differente. Trovandosi le particelle in posizione più elevata con una minor energia cinetica rispetto a quelle sottostanti, e stando il principio di minor dispendio di energia, è corretto pensare che le particelle evitino di compenetrare il flusso sottostante, limitandosi ad appoggiarvi, e proseguendo nella loro traiettoria originale, ma spostandosi su percorsi più laterali. Questo risulta nuovamente validato dalle sperimentazioni, con una vista dall'alto del fenomeno.



Figura 82 – Vista dall'alto della vena effluente in un dam break a fondo liscio, 40 cm

Si osserva un corpo scuro centrale che descrive la vena a tutta altezza, e un suo allargamento laterale, che va a superare i 3 cm di larghezza della breccia, di scurezza inferiore: questo allargamento, che interessa le parti superiori della vena, descrive il fenomeno analitico.

Un valore per il coefficiente M, non specificato, è stato individuato da una ricerca in letteratura, dal “Meccanica dei Fluidi – principi e applicazioni idrauliche”, di Marchi E., Rubatta A. [32].

Nella sezione relativa ai moti irrotazionali, viene studiato l’efflusso piano attraverso una fenditura (originariamente studiato da Kirchoff nel 1869), così come descritta in Figura 83.

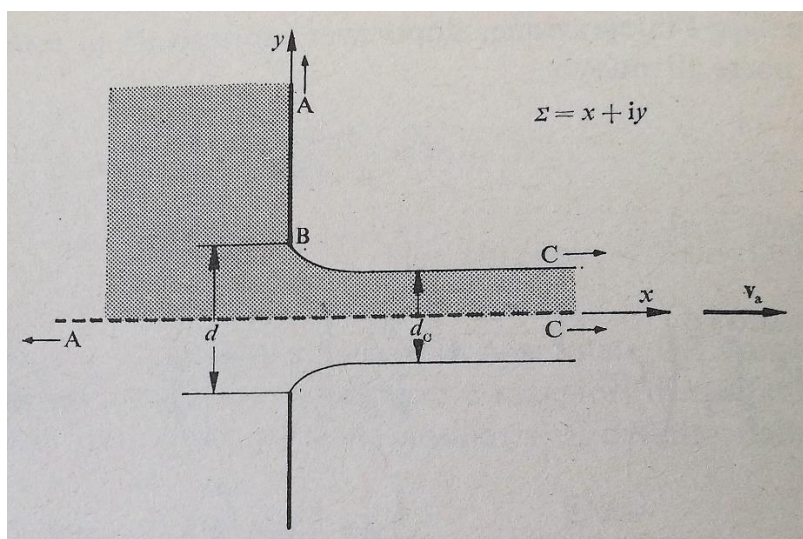


Figura 83 – Schema in pianta dell’efflusso attraverso una fenditura di larghezza d.

Per questa specifica configurazione il coefficiente di efflusso $C = \frac{d_0}{d}$, a valle della laboriosa trattazione, viene calcolato il valore

$$C = \frac{d_0}{d} = \frac{\pi}{\pi + 2} = 0.611 \quad (6-20)$$

L’applicazione di questo risultato alla formula delle portate effluenti, in luogo del coefficiente M, porta a definire un valore finale moltiplicativo pari a 0.4073:

$$Q_{tot} = \frac{2}{3}MLH\sqrt{2gH} = \frac{2}{3}0.611 \cdot f = 0.4073 \cdot f \quad (6-21)$$

Risulta così possibile stimare la portata effluente dalla breccia del set-up, le cui dimensioni sono note. Larghezza 3 cm, carico totale in funzione dell’esperimento in corso.

Nota la portata, è naturalmente possibile ottenere il volume cumulato effluito, basandosi su un vettore temporale uguale a quello utilizzato per la determinazione dal campo di altezze.

6.4.4 Confronto tra volumi

Si presentano di seguito i confronti, per le tre categorie a fondo liscio.

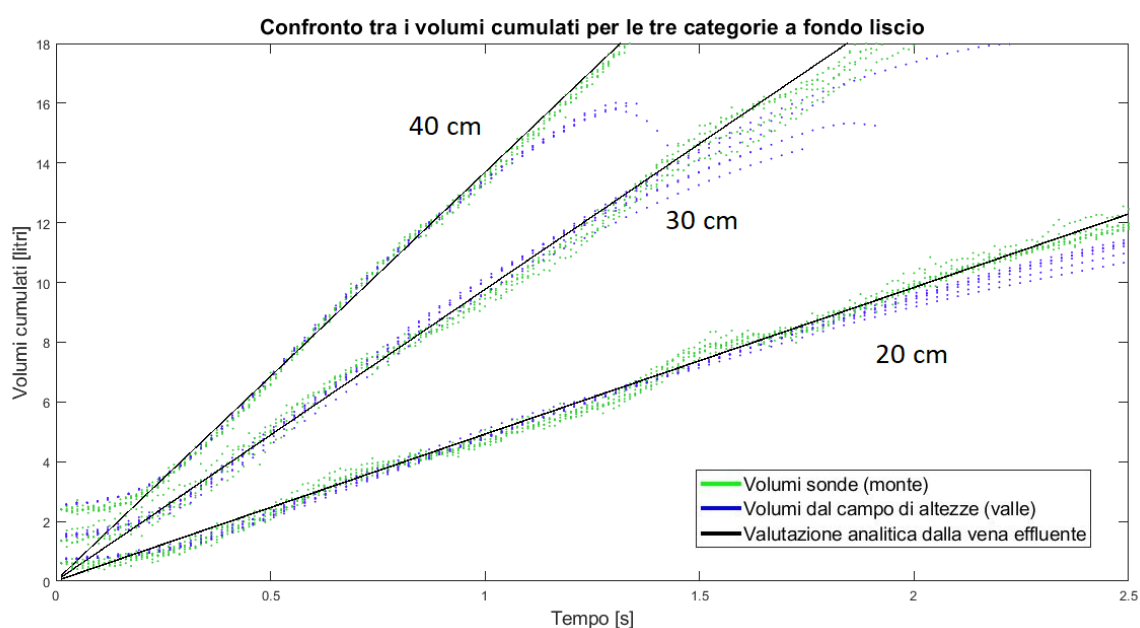


Figura 84 – Confronto tra i volumi cumulati per le tre categorie a fondo liscio

Si osserva una buona corrispondenza di risultati, in quanto i dati delle sonde, espressi in verde, vengono seguiti nel loro percorso in maniera soddisfacente dai volumi stimati per il campo di altezze (in blu).

La deviazione che si osserva negli istanti finali della misura è dovuta probabilmente al limitato range di validità dell'applicazione della legge di Lambert Beer che abbiamo utilizzato.

Si noti la traslazione delle curve sperimentali, la cui origine al tempo 0 è fissata ad un volume diverso da 0: tale volume risulta essere quello contenuto nella vena, il cui ammontare può essere considerato costante nell'intervallo di tempo da noi considerato (come da evidenza sperimentale).

Ciò significa che, a fronte dell'involuppo delle traiettorie, che porta ad una pendenza di 45° della vena, il volume in esso contenuto è ottenibile tramite la semplice

$$V_{vena} = \frac{1}{2} H^2 L_{breccia} \quad (6-22)$$

Tale valore, funzione dell'altezza del pelo libero nel serbatoio, può in prima approssimazione essere sommato alla curva dei volumi (sia delle sonde, sia dei campi di altezze) per completarli con il valore contenuto nella vena. L'effetto nel diagramma è una traslazione verso l'alto.

Risulta di notevole interesse l'efficace sovrapposizione che si ottiene tra tutte le tre famiglie di curve.

La traslazione delle sperimentali risulta dell'esatta entità necessaria per poter coincidere con la curva analitica.

La sovrapposizione tra i dati delle sonde di monte e la stima dal campo di altezze a valle costituisce l'elemento di validazione per la metodologia di determinazione del campo stesso utilizzata.

6.4.5 Sezioni del campo di altezze

Si descrivono di seguito alcune sezioni del campo di altezze individuato. In questo caso, si fa riferimento ad una prova a fondo liscio, con battente di 40 cm.

In Figura 85 sono indicate le posizioni in pianta delle sezioni di misura indagate

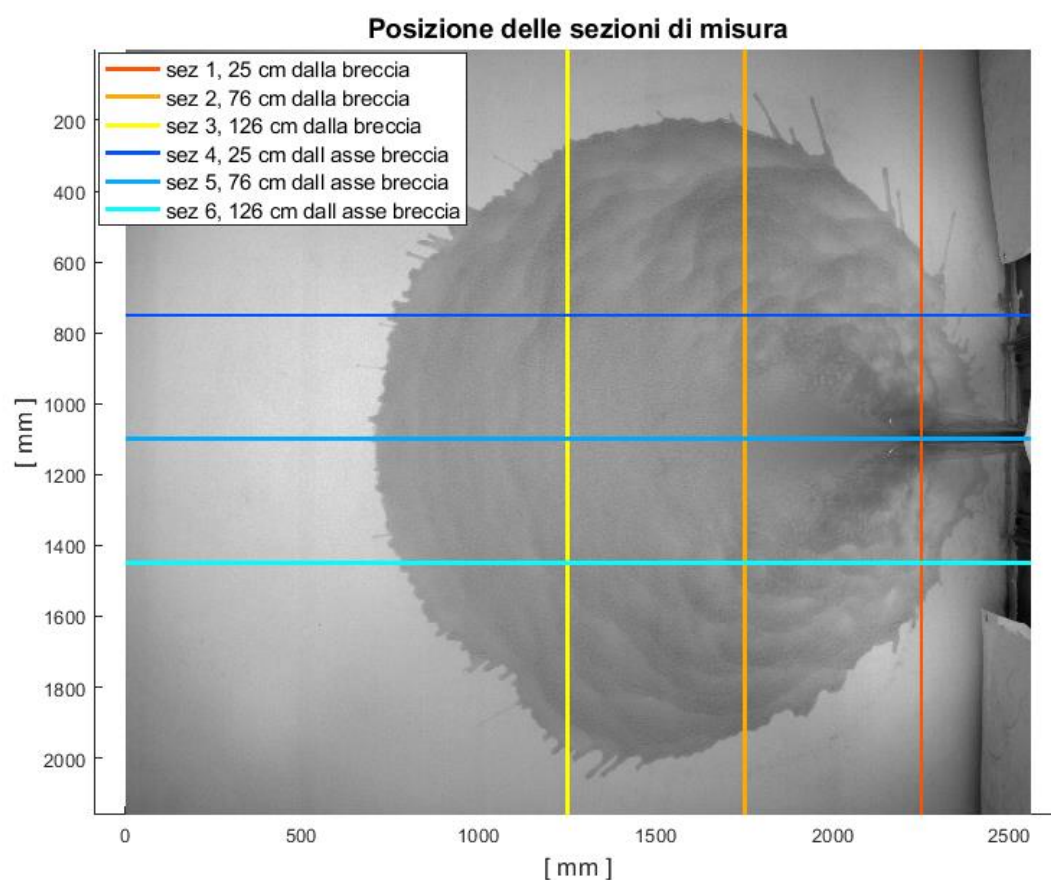


Figura 85 – Posizioni delle sezioni per cui vengono estratti i profili del campo di altezze. Dam break a fondo liscio, 40 cm

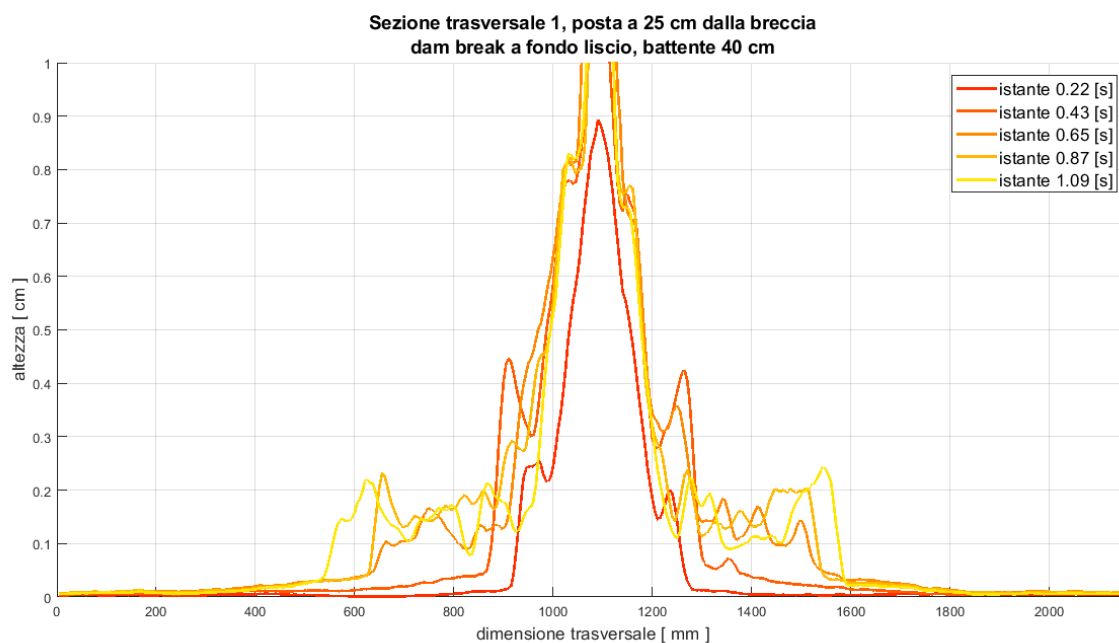


Figura 86 – Sezione trasversale 1, 25 cm dalla breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm

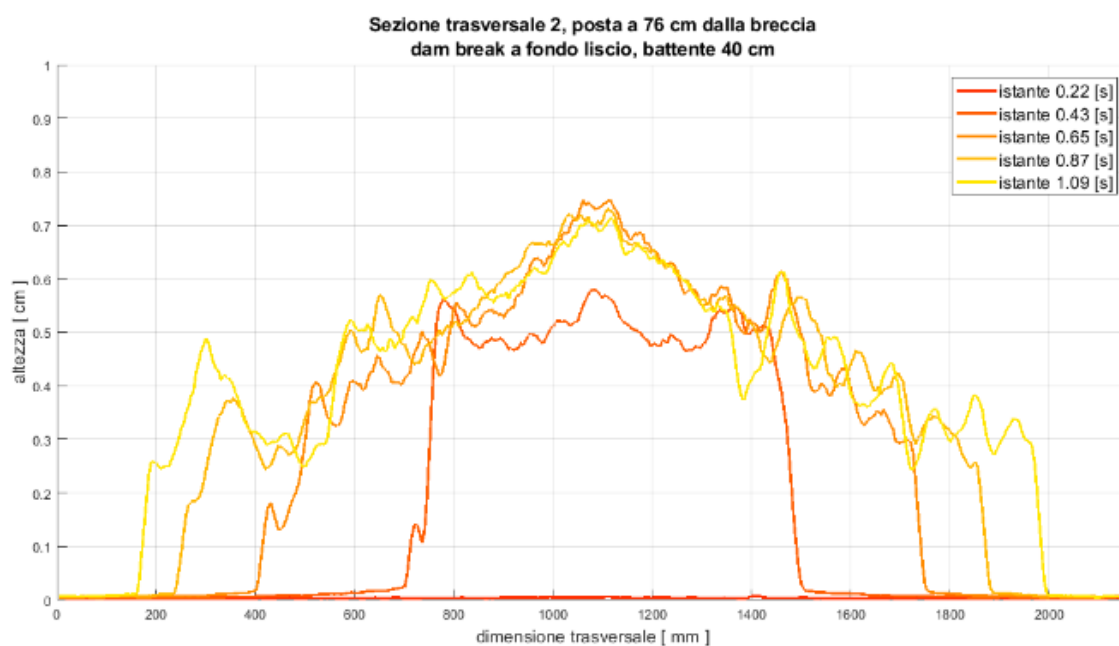


Figura 87 – Sezione trasversale 2, 76 cm dalla breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm

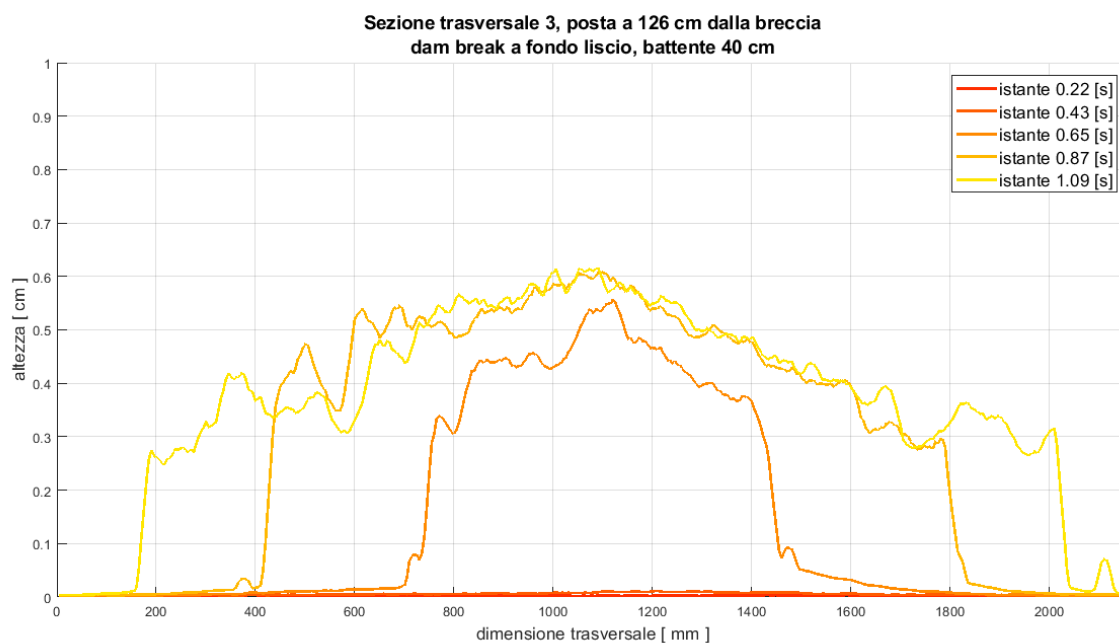


Figura 88 – Sezione trasversale 3, 126 cm dalla breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm

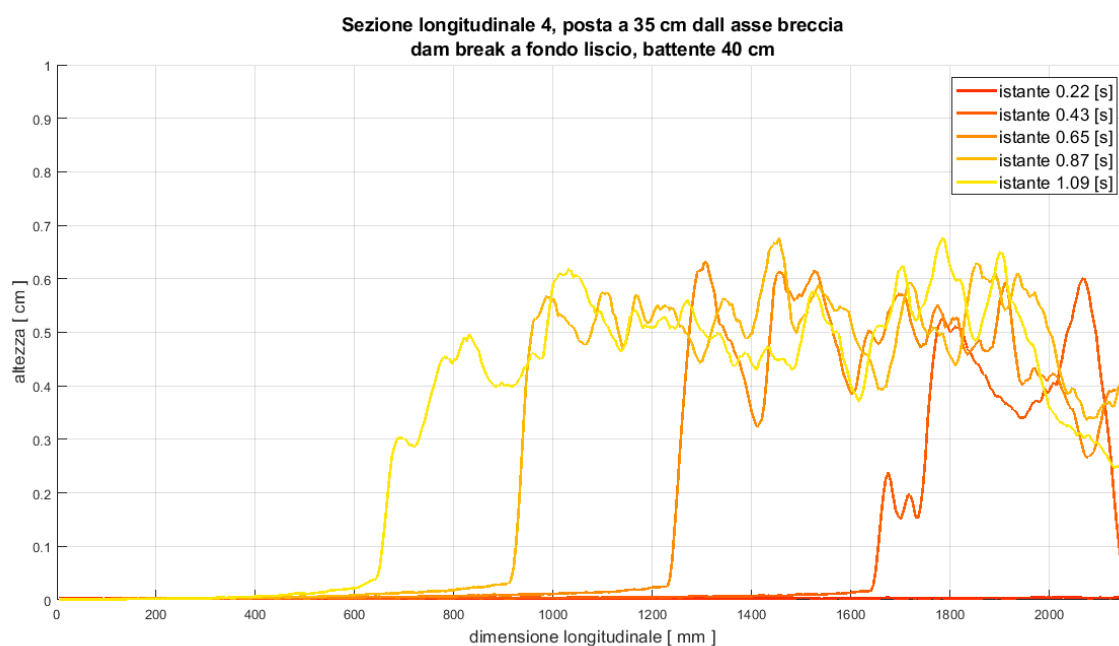


Figura 89 – Sezione longitudinale 4, 35 cm dall'asse breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm

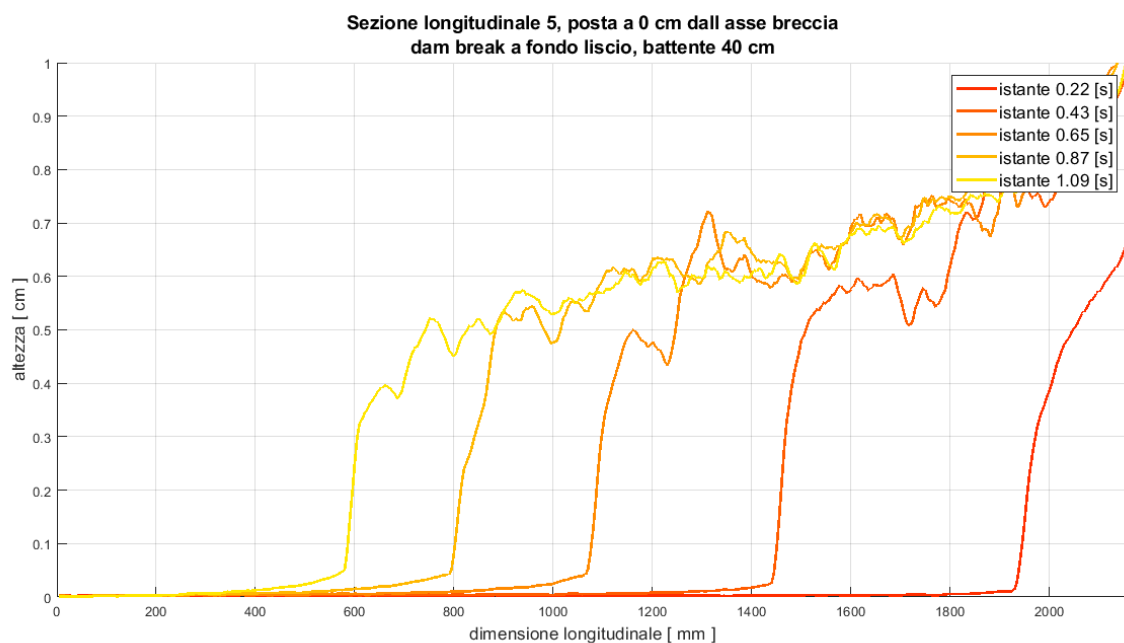


Figura 90 – Sezione longitudinale 5, 0 cm dall'asse breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm

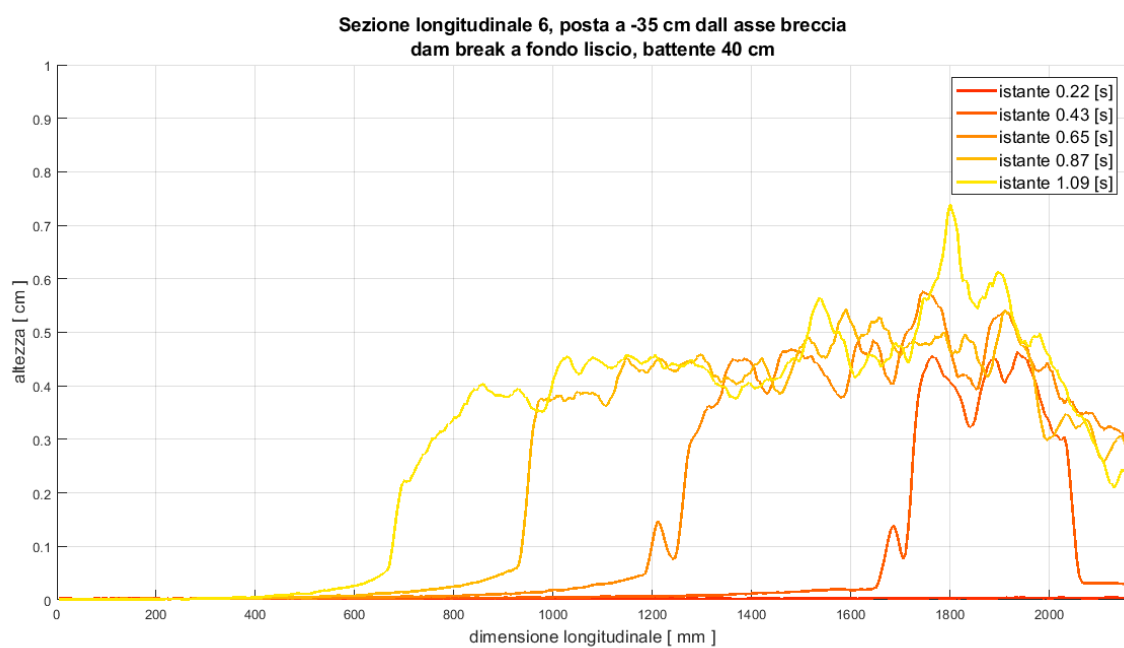


Figura 91 – Sezione longitudinale 6, -35 cm dall'asse breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm

7 Campo di velocità dall'equazione di continuità

Si utilizza l'equazione di continuità per effettuare una stima del campo di velocità entro l'onda basato su quello di altezze.

L'equazione di continuità si esprime come

$$\frac{dV}{dt} = Q_u - Q_i \quad (7-1)$$

Con:

- V volume presente entro la superficie di controllo, per cui dV/dt ne rappresenta la variazione nell'unità di tempo
- Q_u e Q_i rispettivamente portata uscente da e portata entrante in la superficie di controllo nell'unità di tempo

Essa può essere applicata previa definizione di un volume di controllo al quale applicare l'equazione. Nel nostro caso, ci si rifà ai dati già disponibili, in quanto si dispone di:

- Campi di altezze d'acqua, con dati presenti ogni 25 mm², per ogni istante temporale
- Una suddivisione del fronte in settori radialmente distribuiti, a loro volta suddivisi secondo gli archi di circonferenza descriventi le posizioni del fronte nel tempo

La suddivisione ben si presta a definire i volumi di controllo: essendo il moto diretto in maniera quasi-radiale ovunque (tanto più nei settori diretti più longitudinalmente che trasversalmente), si riesce ad identificare in maniera chiara il moto del fluido, definendo il passaggio di portata entrante ed uscente attraverso gli archi di circonferenza, mentre si può assumere che all'interfaccia laterale, tra un settore circolare e l'altro, lo scambio di portata sia di un ordine inferiore, quindi trascurabile.

Si noti, dalla Figura 92, che ogni arco descrive la posizione del fronte nel generico istante: ciò significa che ogni blocco identificato rappresenta, nell'istante di tempo uguale alla sua posizione rispetto all'origine del fascio, il punto in cui si trovava il fronte in quell'istante.

Per fare un esempio, il quinto blocco a partire dall'origine del fascio identifica la posizione del fronte al quinto istante.

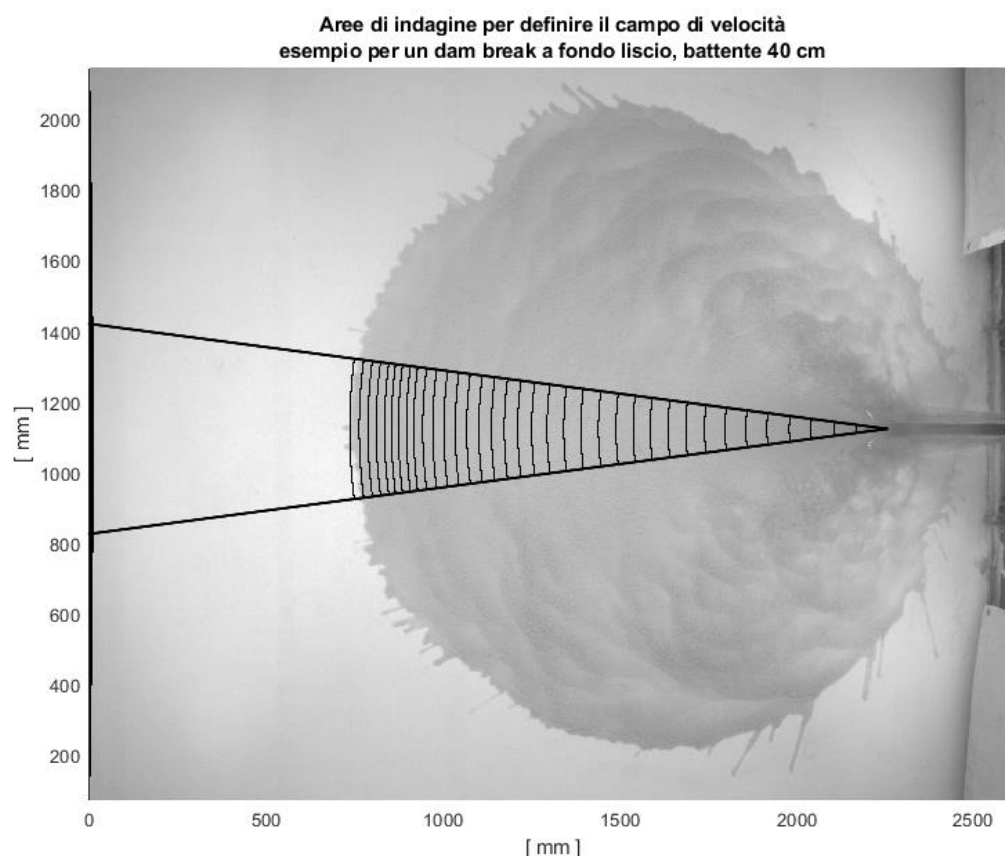


Figura 92 – Aree di indagine per la determinazione del campo di moto. Le aree sono specifiche per ogni dam break

Una descrizione del campo di altezze così raffinata invece (si ricorda, una matrice di 432x512 punti in uno spazio di 2160x2560 mm²) permette di poter definire, in ogni blocco creato dalla suddivisione descritta, la variazione di volume in ogni istante.

L'equazione andrà applicata ad ogni blocco. Le grandezze che vi concorrono implicano che occorreranno dati tra due istanti consecutivi (per avere la variazione del volume) e una tra le due portate andrà ricercata da un settore adiacente, al fine di poter risolvere l'equazione per il generico blocco. In caso contrario, ci sarebbero troppe incognite.

Ciò implica che il calcolo è iterativo: i risultati verranno ottenuti risolvendo un blocco alla volta, andando da valle verso monte. Il p-esimo blocco puntato sul fronte all'istante t (e ricordiamo che vale $p = t$) è l'unico per il quale una delle due portate è definita: quella uscente, pari a 0. Oltre il fronte, ovviamente, non c'è acqua.

Risolto quindi, nella t-esima immagine, il blocco sul fronte, si può utilizzare l'informazione della portata entrante in esso, trattandola come quella uscente del blocco immediatamente a monte: così facendo, lo si risolve, e si ottiene la sua portata entrante, che sarà pari a quella uscente del blocco ancora più a monte, e così via, fino a definire le portate per ogni blocco.

Dovendo la suddivisione in blocchi soddisfare l'ipotesi iniziale, ossia di portata nulla effluente per il primo blocco, per ogni istante in cui verrà effettuato lo studio, e dovendo inoltre garantire la stessa suddivisione in ogni istante non solo per questo motivo ma anche per garantire congruenza nel calcolo dei volumi, risulta non solo utile ma necessario utilizzare la suddivisione in settori circolari e archi di circonferenze.

In particolare, nessun altro vettore che definisca gli archi di circonferenza può essere utilizzato se non quello relativo alle posizioni dei fronti.

7.1 Calcolo e risultati

Sono stati utilizzati i dati dei campi di altezze, valutati su un numero di istanti generalmente inferiore rispetto a quelli dei fronti (in virtù del notevole peso computazionale dell'operazione), e sono stati utilizzati i dati delle posizioni dei fronti.

I dati sono stati riscaldati (adeguando le posizioni dei fronti al resize con fattore 5 effettuato per i campi di altezze).

Si è effettuato il calcolo sul solo settore più rappresentativo, ossia quello centrale (numero 6), posto in corrispondenza dell'asse breccia.

È stato possibile effettuare il calcolo solo sugli esperimenti per i quali è stato ottenuto il campo di altezze, perciò:

- Le cinque prove della categoria a fondo liscio, battente di 40 cm
- due delle sei prove a fondo liscio, battente di 30 cm
- una prova a fondo scabro, con maglia 5x5 e angolo 45° (battente 30 cm)

Si presentano nelle pagine successive i risultati per tre prove rappresentative, una per ciascuna delle categorie.

Vengono prodotti due diagrammi per ogni esperienza. Il primo, "Andamento delle velocità nel generico istante lungo il settore centrale" mostra la distribuzione delle velocità lungo il settore, fotografata in ogni istante. L'andamento risulta essere iperbolico, mostrando una decisa caduta del modulo man mano che il fronte si allarga.

Il secondo, "Andamento delle velocità nel tempo sul generico punto" mostra invece l'evolvere del modulo della velocità indagando uno specifico punto sull'asse del settore.

Si nota come gli andamenti, al progredire del tempo, descrivano una crescita parabolica, che raggiunge un picco per poi ridiscendere ed attestarsi su una retta che tende ad un valore asintotico, naturalmente differente per ogni posizione. Trattando punti via via più lontani dall'origine del fascio (e quindi della breccia) si osserva come l'andamento dell'evoluzione temporale si appiattisca, mostrando una curvatura sempre più debole e tendente subito al valore costante asintotico (al netto del balzo istantaneo dovuto all'arrivo dell'onda).

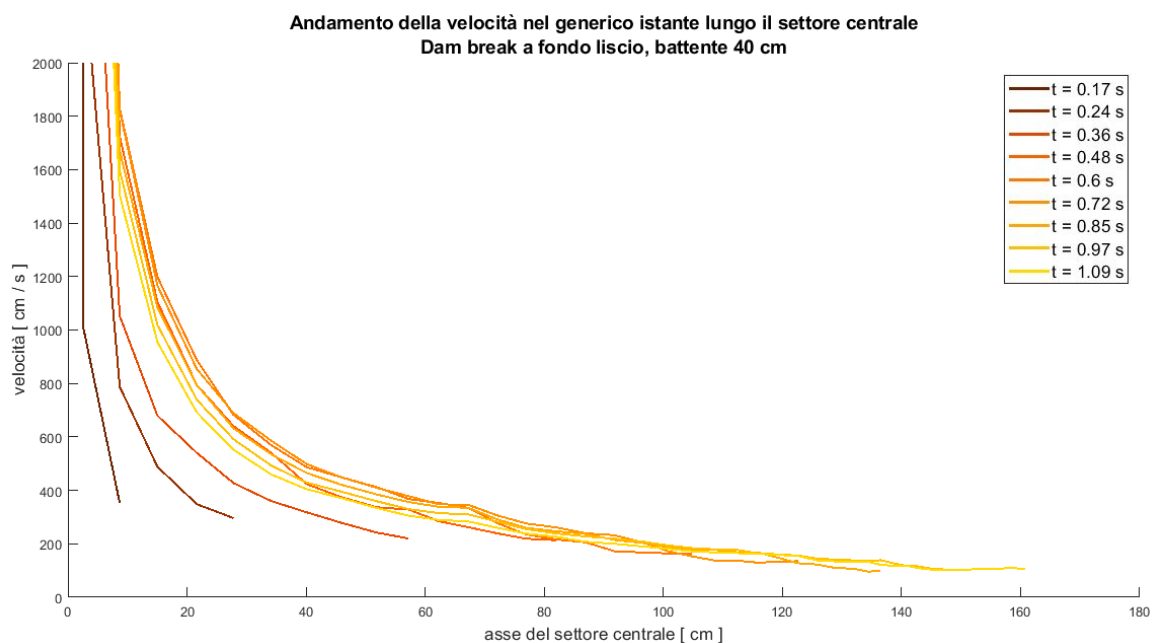


Figura 93 – Andamento del campo di velocità nel generico istante lungo il settore centrale, fondo liscio, 40 cm

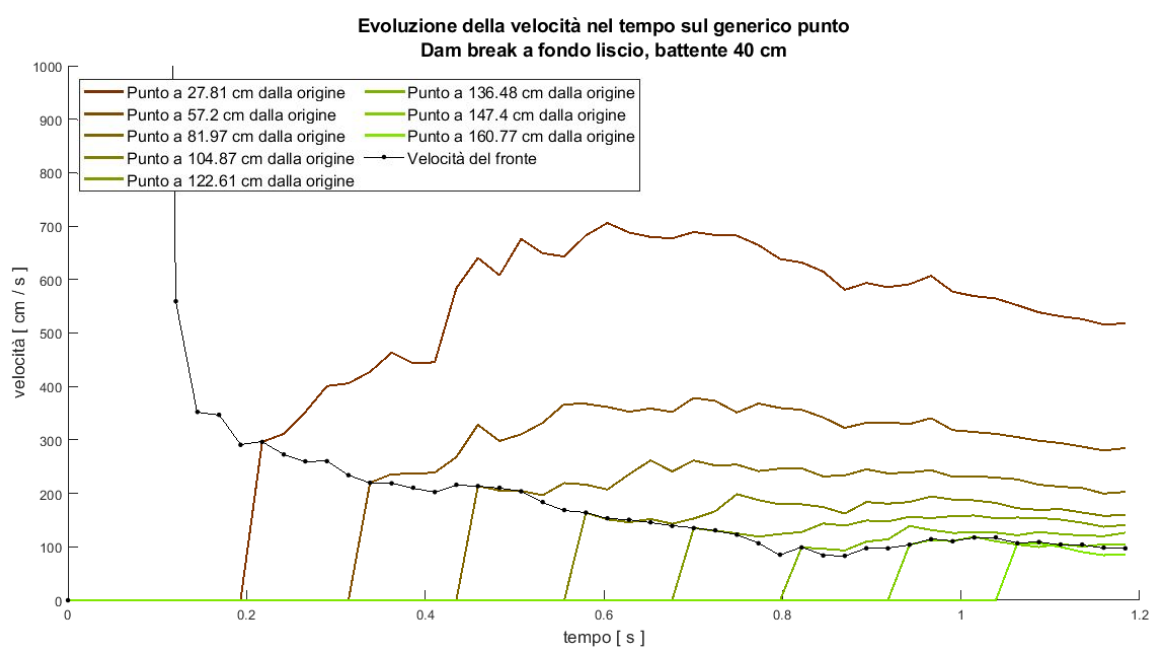


Figura 94 – Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, fondo liscio, 40 cm

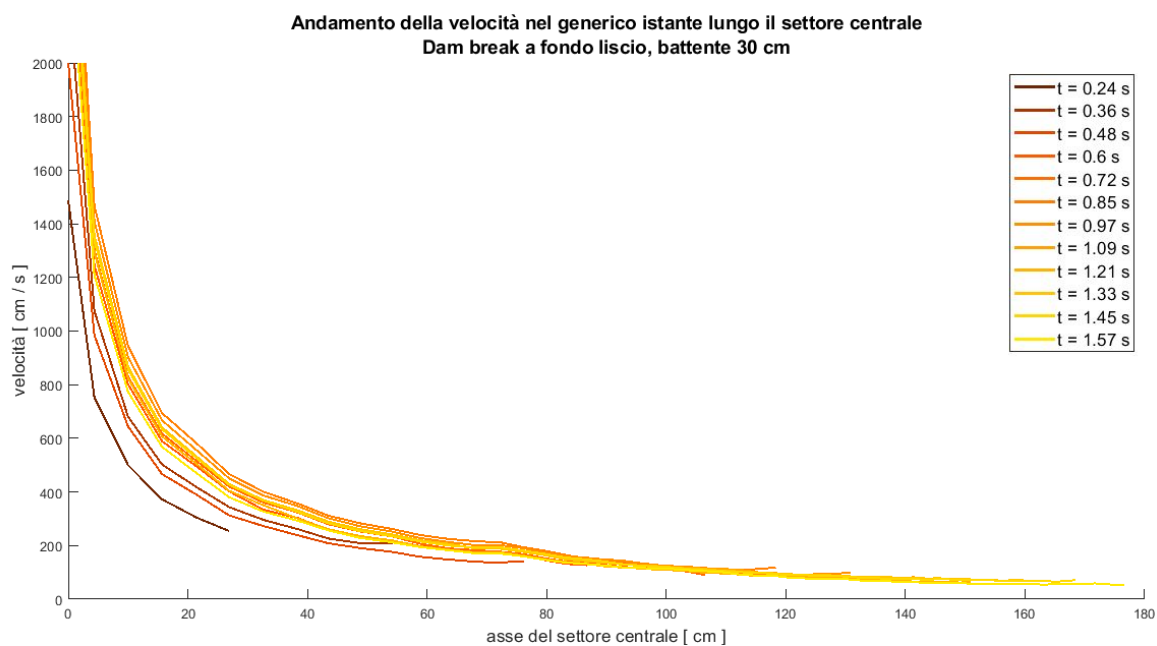


Figura 95 – Andamento del campo di velocità nel generico istante lungo il settore centrale, fondo liscio, 30 cm

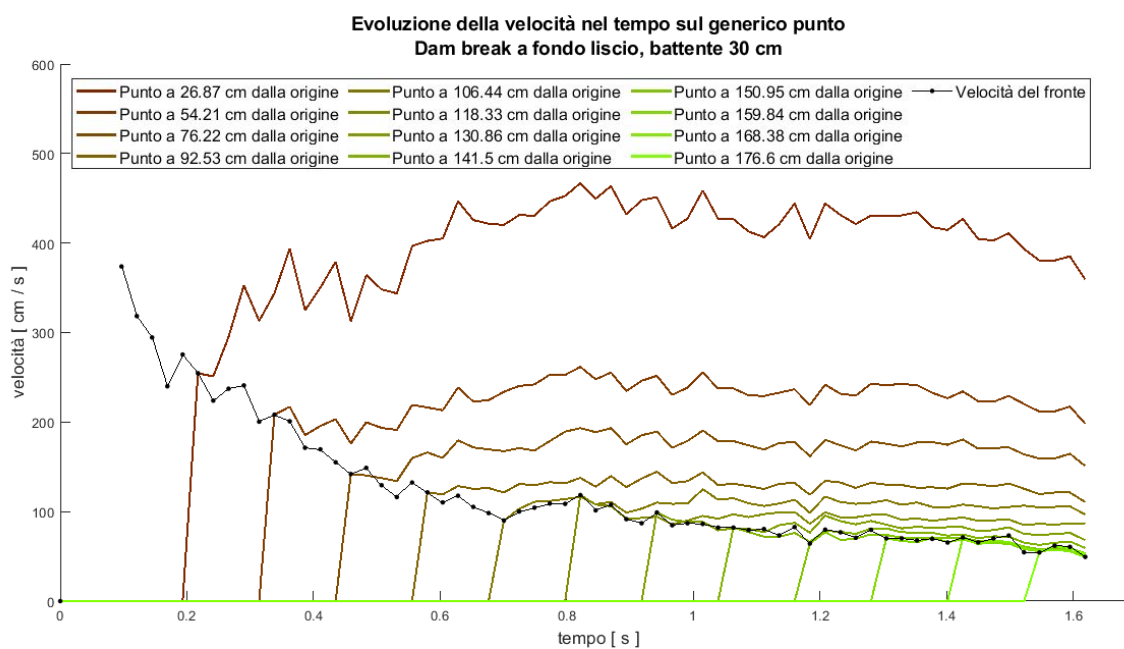


Figura 96 – Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, fondo liscio, 30 cm

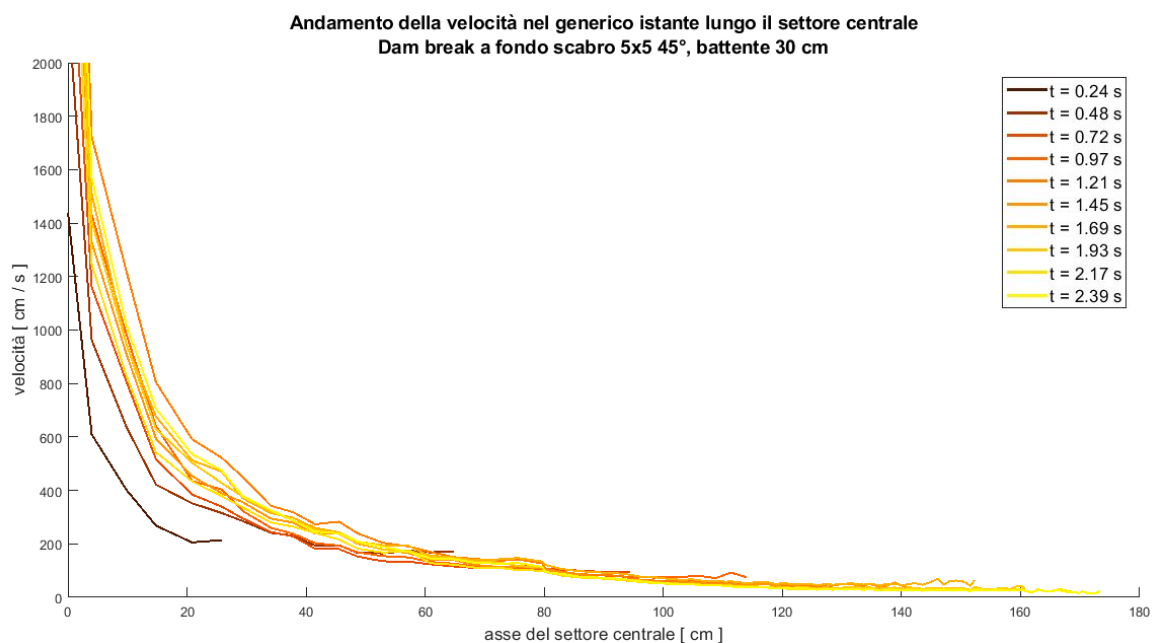


Figura 97 – Andamento del campo di velocità nel generico istante lungo il settore centrale, fondo scabro, 30 cm

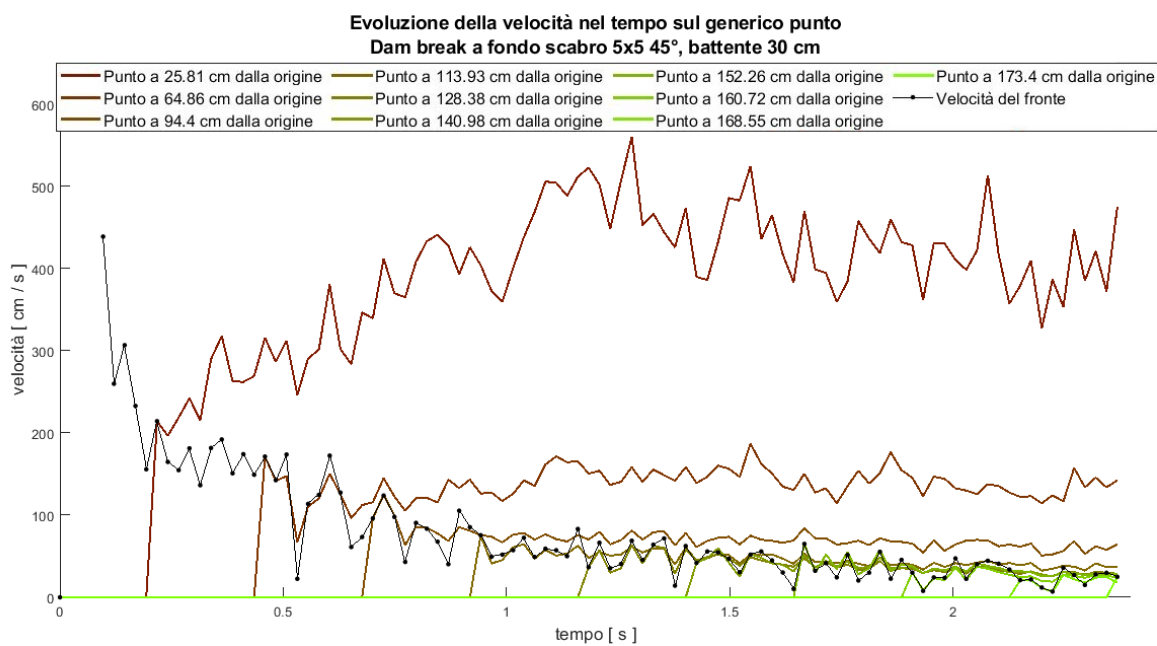


Figura 98 - Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, fondo scabro, 30 cm

Risulta interessante effettuare un confronto tra le varie categorie disponibili, descrivendo solo alcuni punti specifici. Prima di fare il confronto, si ricorda che occorre traslare i risultati in modo da avere tutti i dati riferiti ad una stessa origine.

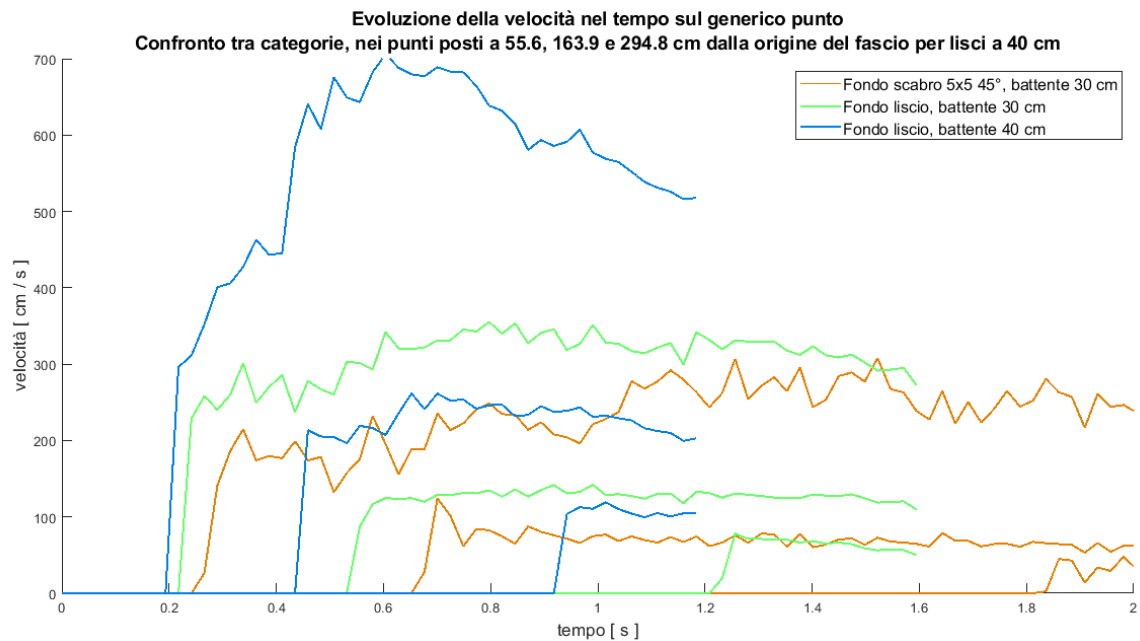


Figura 99 – Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, confronto tra categorie

8 Stima spaziale della vulnerabilità

Come ultimo passo, si può fornire una stima della vulnerabilità, così come definita nell'approccio del grado di esposizione dell'area di interesse E.

Ricordiamo che la vulnerabilità, espressa come prodotto tra le grandezze fondamentali velocità del flusso e battente d'acqua, viene incasellata entro una scala di pericolosità, nello spirito di quanto proposto originariamente da Clausen e Clark [3] in 1.1.

Nel nostro caso, si utilizza la seguente scala:

- V100, distruzione totale (ossia perdita del 100% del valore), con $v_y > 7 \text{ m}^2/\text{s}$
- V70, distruzione significativa (perdita del 70% del valore), con $v_y > 3 \text{ m}^2/\text{s}$
- V30, distruzione parziale (perdita del 30% del valore), con $v_y > 1 \text{ m}^2/\text{s}$

Per valori inferiori a $1 \text{ m}^2/\text{s}$ si può assumere che il danno sia limitato unicamente ai beni suscettibili al contatto con l'acqua.

Disponendo di una definizione spaziale densa del campo di altezze (un dato ogni 5 mm) e di una definizione altrettanto elevata del campo di velocità (un dato ogni 10 – 20 mm, variabili a seconda della velocità stessa del fronte), si può ottenere una prima stima del parametro di vulnerabilità, andando quindi a colpire l'obiettivo ultimo dell'intero progetto di cui questa tesi rappresenta una piccola frazione: definire il rischio a valle degli invasi di piccole e medie dimensioni.

Viene proposto in questa sede il calcolo per il solo settore centrale, che del resto risulta essere sicuramente quello latore di maggiori velocità.

8.1 Calcolo e risultati

La tecnica di calcolo è semplice. Poiché l'espressione della vulnerabilità si basa sulla definizione delle aree di interesse, occorre determinare innanzitutto le aree suddette.

Trattandosi, il nostro, di uno studio basato su una categoria di invasi, non si hanno informazioni particolari sulla composizione del territorio a valle. Non si dispone cioè di una suddivisione predefinita del territorio in aree di interesse, in quanto, ovviamente, dato variabile per ogni invaso studiato.

Allora, si decide di utilizzare una suddivisione arbitraria, basata sugli stessi blocchi che definiscono le posizioni del fronte entro un settore, utilizzati per il calcolo del campo di velocità (Figura 92).

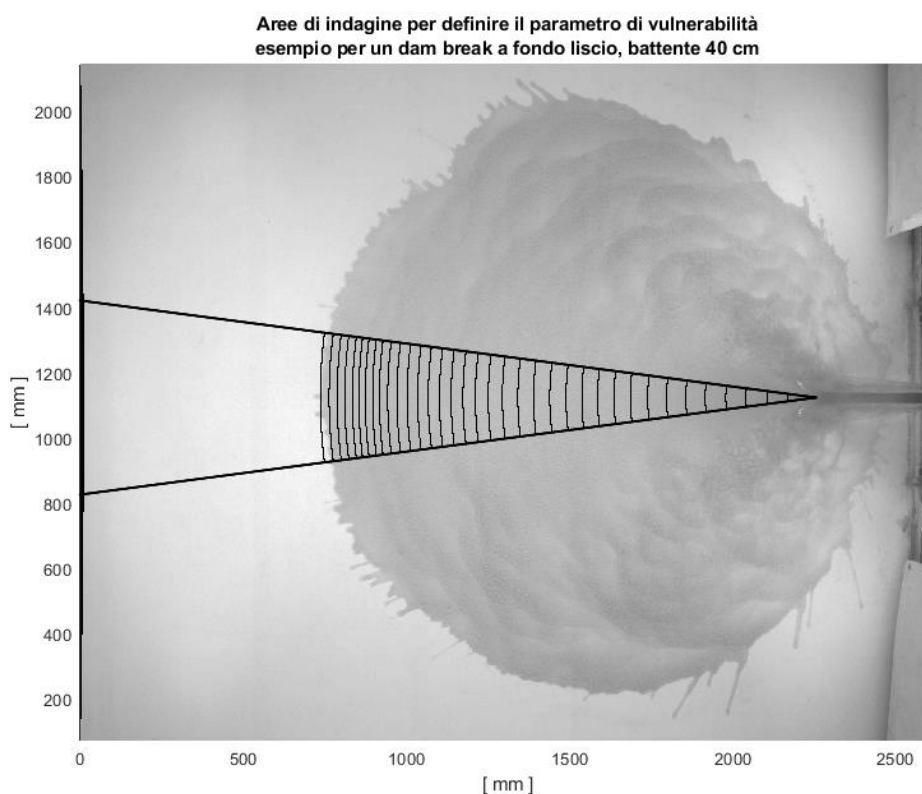


Figura 100 - Aree di indagine per la determinazione della distribuzione della vulnerabilità. Le aree sono specifiche per ogni dam break

In tal senso, si otterrà un valore di vulnerabilità proprio per ogni blocco, funzione del valore che le grandezze in gioco assumono in quella particolare posizione.

Definite le aree, il resto è banale: i valori di velocità, disponibili alle interfacce tra un blocco e l'altro, vengono semplicemente interpolati nelle posizioni centrali di ogni blocco, mentre per il valore di altezze si prende il valor medio di tutti i dati che ricadono entro l'area di interesse.

Il risultato così ottenuto è tuttavia riferito alla scala del modello.

Rifacendosi alle relazioni individuate in 3.3.3 e di seguito riportate, è possibile estrarre il valore di vulnerabilità riferito al sistema reale. Il passaggio è descritto in tabella a titolo esemplificativo per un singolo istante (passo 20, per brevità).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{scala geometrica } \lambda = \frac{\text{dimensione modello}}{\text{dimensione originale}} = \frac{1}{20} \\ \text{scala delle velocità } \lambda_u = \lambda^{\frac{1}{2}} = 0.224 \\ \text{scala dei tempi } \lambda_t = \lambda^{\frac{1}{2}} \\ \text{scala delle scabrezze } \lambda_n = \lambda^{\frac{1}{6}} \\ \text{scala di Reynolds } \lambda_{Re} = \lambda^{\frac{3}{2}} \\ \text{scala delle portate } \lambda_Q = \lambda^{\frac{5}{2}} \end{array} \right.$$

Per cui per il calcolo della vulnerabilità V nel sistema reale si ha:

$$V_o = u_o \cdot y_o = u_m \cdot \lambda^{-\frac{1}{2}} \cdot y_m \cdot \lambda^{-1} = u_m \cdot y_m \cdot 89.44 \quad \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

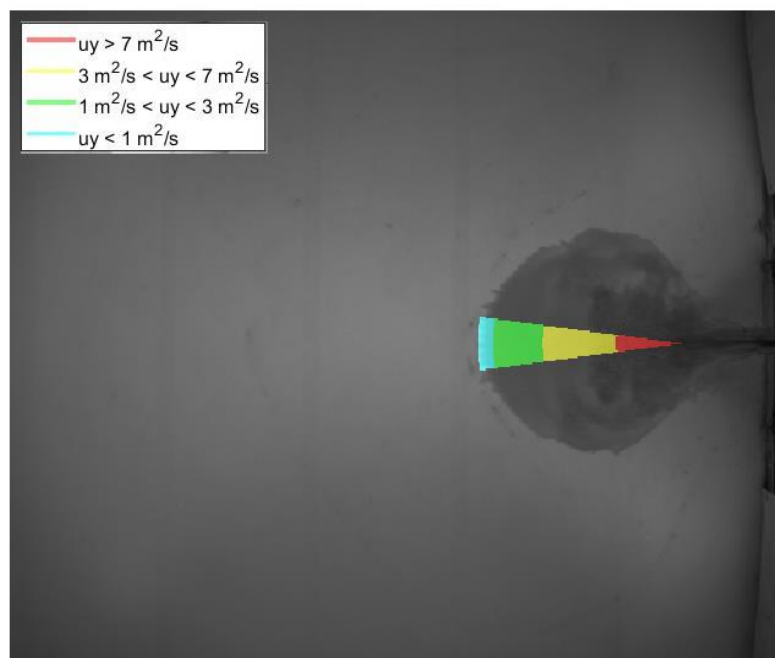
Esempio per un dam break a fondo liscio, 40 cm: settore 6 (centrale), 20-esimo istante						
Posizione nel modello	Velocità media nel modello	Altezza media nel modello	Posizione nel sistema reale	Velocità media nel sistema reale	Altezza media nel sistema reale	Vulnerabilità nel sistema reale
[cm]	[cm/s]	[cm]	[m]	[m/s]	[m]	[m ² /s]
0	NaN	NaN	0.0	NaN	NaN	NaN
0	NaN	NaN	0.0	NaN	NaN	NaN
0	NaN	NaN	0.0	NaN	NaN	NaN
0	236239.3	NaN	0.0	NaN	NaN	NaN
0.1	120784.59	1.153	0.0	5401.7	0.23	1245.62
2.6	3527.12	0.998	0.5	157.7	0.20	31.48
8.7	1414.76	0.907	1.7	63.3	0.18	11.48
15.0	950.03	0.814	3.0	42.5	0.16	6.92
21.6	717.73	0.783	4.3	32.1	0.16	5.03
27.8	590.49	0.748	5.6	26.4	0.15	3.95
34.1	481.96	0.718	6.8	21.6	0.14	3.10
40.1	398.58	0.752	8.0	17.8	0.15	2.68
46.0	355.20	0.727	9.2	15.9	0.15	2.31
51.9	332.54	0.639	10.4	14.9	0.13	1.90
57.2	306.68	0.521	11.4	13.7	0.10	1.43
62.2	273.42	0.526	12.4	12.2	0.11	1.29
67.3	250.43	0.512	13.5	11.2	0.10	1.15
72.1	229.01	0.52	14.4	10.2	0.10	1.07
77.0	216.32	0.518	15.4	9.7	0.10	1.00
82.0	106.80	0.31	16.4	4.8	0.06	0.30

Tabella 7 – esempio di calcolo per la vulnerabilità nel sistema reale per il 20-esimo istante di un dam break a fondo liscio, battente di 40 cm. Settore 6 (centrale).

I valori Nan nei primi istanti stanno ad indicare quegli istanti in cui l'onda non ha ancora raggiunto l'origine del fascio radiale.

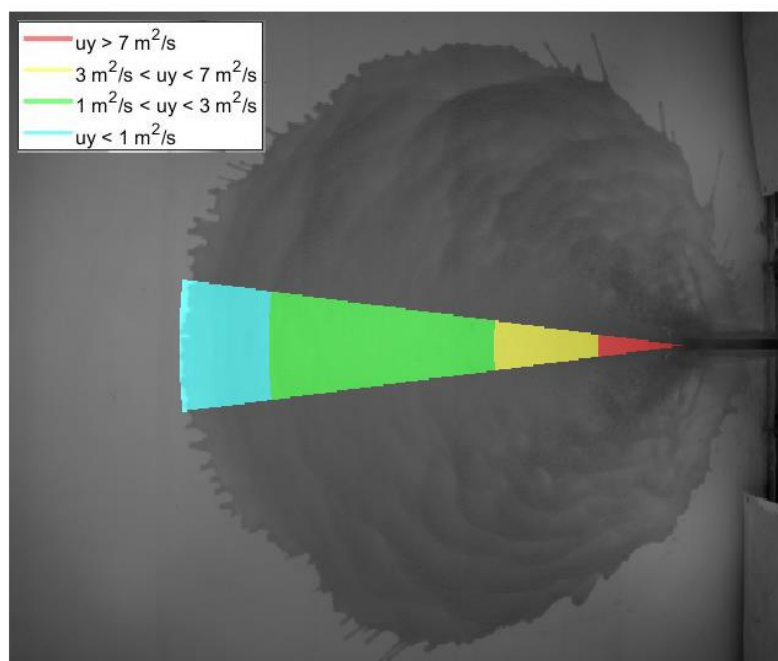
Si notino gli elevatissimi valori di velocità nei settori più arretrati: si tratta chiaramente di un errore di calcolo, dovuto all'eccessivo restringimento del blocco di indagine.

Dai risultati così ottenuti, disponibili istante per istante, è possibile ottenere una mappatura della vulnerabilità secondo il criterio annunciato in apertura di capitolo.



Stima della vulnerabilità delle zone a valle per un dam break a fondo liscio, 40 cm
Istante n° 16, $t = 0.387 \text{ s}$

Figura 101 – Stima della vulnerabilità delle zone a valle per un dam break a fondo liscio, 40 cm, secondo la classificazione di Clausen e Clark



Stima della vulnerabilità delle zone a valle per un dam break a fondo liscio, 40 cm
Istante n° 46, $t = 1.111 \text{ s}$

Figura 102 - Stima della vulnerabilità delle zone a valle per un dam break a fondo liscio, 40 cm, secondo la classificazione di Clausen e Clark

9 Conclusioni e sviluppi futuri

Lungo il percorso di questo lavoro di tesi sono stati raggiunti risultati interessanti. Il modello fisico costruito nel laboratorio di Idraulica ha dato prova di poter fornire risultati affidabili, senza variabilità dovute a circostanze diverse dalla casualità intrinseca negli esperimenti stessi.

Ne è stata comprovata la validità, tramite la determinazione dei numeri di Reynolds e Weber, che sono risultati sufficientemente alti, affinché si potesse escludere un'eccessiva impronta delle forze viscosive o delle tensioni superficiali. Il modello, ricordiamo, come la maggior parte di quelli open-channel, è a Froude costante.

Lo studio delle diverse configurazioni di scabrezza e di battenti d'acqua ha permesso di comprendere un fenomeno, quello del dam-break tridimensionale, ancora non perfettamente noto e descritto. I dati ottenuti, soprattutto relativi alla forma ed ai tempi di avanzamento del fronte, costituiscono materiale prezioso per la taratura e/o validazione dei software numerici.

Cionondimeno, lo studio stesso delle onde, seppur limitato ad una casistica ancora troppo idealizzata (dalla forma della breccia alla condizione di piano perfettamente piano ed orizzontale, per citare le maggiori) ha permesso di iniziare a comprendere i fenomeni che si instaurano per questo particolare tipo di moto vario.

La variabilità del comportamento tra le direzioni longitudinale e trasversale, prima di tutto, e le notevoli velocità acquisite dal flusso nei cosiddetti "corridoi preferenziali", indice di un trasferimento energetico in senso trasversale, oltre che naturalmente longitudinale.

Lo studio della presenza di vegetazione, responsabile di quanto sopra, offre risultati interessanti circa la resistenza al moto globale, ed in ultimo al grado di mitigazione del rischio che essa offre.

La determinazione dei valori assoluti di queste grandezze, tempi di arrivo, distanze percorse e velocità rappresentano un primo passo ed un importante database cui confrontare i dati delle prossime sperimentazioni.

Il fenomeno di instabilità del fronte, costituito dai fingers, può sicuramente essere oggetto di ulteriori approfondimenti. Il fenomeno debolmente impulsivo dell'onda, come l'evoluzione stessa delle onde che si osservano sulla superficie libera, sono tutti argomenti utili ad essere indagati in futuro.

Oltre allo studio del fronte, grande rilevanza ha avuto lo studio del campo di altezze tramite tecniche di imaging. La determinazione della relazione che intercorre tra la profondità d'acqua e l'intensità luminosa registrata dal sensore della fotocamera ha rappresentato un notevole punto di arrivo, che ha permesso di ottenere una stima della distribuzione spaziale (e temporale) dei battenti diffusa, anziché puntuale, come spesso accade.

Studi futuri potranno delineare nuove curve di taratura per le ulteriori prossime condizioni, come l'inclinazione del piano di valle, o portare avanti uno studio basato sulla distribuzione delle altezze, in questa tesi solo determinate e commentate a livello qualitativo.

Infine, lo studio del campo di velocità sulla base dell'evoluzione del fronte e del campo di altezze costituisce un'utile punto d'arrivo dello studio, in quanto al suo ottenimento concorrono la gran parte delle conoscenze fino a questo punto acquisite.

Al netto del lavoro svolto, e della stima dei parametri di vulnerabilità ottenuti, si può affermare che la tematica dei piccoli e medi invasi, introdotta dal progetto RESBA, rappresenta un argomento di importanza elevata. Se il rischio in senso assoluto che costituisce un solo piccolo invaso è naturalmente di diversi ordini inferiore rispetto a quello di una grande diga, la grande numerosità dei primi, unitamente a tecnologie costruttive e/o monitoraggi non adeguati, possono rappresentare un fattore di rischio totale molto più elevato, in termini di territorio e beni interessati.

Risulta quindi di notevole importanza proseguire nell'intento del progetto, ossia quello di ottenere una valutazione speditiva del rischio per questa tipologia di invasi, di modo da poter disporre di dati e conoscenze che indichino le corrette linee di intervento.

Con riferimento al modello fisico presente nel laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino, gli sviluppi futuri comprendono, visto il buon grado di precisione dell'analisi raggiunto, di sostituire alcuni elementi chiave, come la forma della breccia o l'inclinazione del piano di valle (o del serbatoio di monte) per raggiungere via via configurazioni sempre più realistiche.

10 Bibliografia

- [1] D. Poggi, S. Grimaldi, E. Perucca, F. Miotto, M. Pozzallo e A. Cagninei, «Definizione di una metodologia speditiva per il calcolo del coefficiente di rischio globale per gli sbarramenti di competenza regionale, contratto di ricerca,» Regione Piemonte, 2009.
- [2] S. Cordero, D. Poggi e S. Grimaldi, «Modellazione numerica della propagazione di onde di dam-break, caso studio: gli sbarramenti in terra,» Politecnico di Torino, 2013.
- [3] L. Clausen e P. B. Clark, «The development of criteria for predicting dambreak flood damages using modeling of historical dam failures,» in *International Conference on River Flood Hydraulics (edited di W. R. White)*, 1990.
- [4] F. Aureli, A. Maranzoni, P. Mignosa e C. Ziveri, «Dam-break flows: acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling,» DICATeA, university of Parma, Parma, Italy, 2008.
- [5] F. Aureli, S. Dazzi, A. Maranzoni e P. Mignosa, «A combined clour-infrared imaging technique for measuring water surface over non-horizontal bottom,» DICATeA, University of Parma, Parma, Italy, 2014.
- [6] L. A. LaRocque, J. imran e M. Hanif Chaudry, «Experimental and numerical investigations of two-dimensional dam-break flows,» *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. vol 139, no 6, 1 giugno 2013.
- [7] Elkholy, LaRocque, Chaudry e Imran, «Experimental investigations of partial-breach dam-break flows,» 2016.
- [8] S. Cochard e C. Ancey, 2008.
- [9] P. Guerra, D. Poggi e S. Cordero, «Progettazione e verifica di un light box per lo studio sperimentale di onde di dam-break,» 2018.
- [10] P. Costa, D. Poggi e A. Cagninei, «Metodi per la valutazione del rischio a valle delle dighe regionali: confronto tra i metodi in uso e metodi semplificati,» Politecnico di Torino.
- [11] Andor, «Andor Zyla 5.5 and 4.2_PLUS specifications,» Oxford Instruments.
- [12] Andor, «Rolling and Global Shutter,» Oxford instruments, [Online]. Available: <https://www.oxinst.com/learning/view/article/rolling-and-global-shutter>. [Consultato il giorno 20 12 2018].
- [13] V. T. Chow, *Open-Channel Hydraulics*, University of Illinois: McGraw-Hill, 1988.
- [14] MATLAB, «MATLAB release R2018b Documentation,» 2018.
- [15] Z. Zhang, «A flexible new technique for Camera Calibration,» in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, pp. Vol 22, number 11, 1330-1334.
- [16] A. Geiger, F. Moosmann, O. Car e B. Schuster, «Automatic Camera and Range Sensor Calibration using a Single Shot,» in *International Conference on Robotics and Automation (CRA)*, St. Paul, USA, 2012.
- [17] J. S. Lim, «Two-Dimensionale Signal and Image Processing,» NJ, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990, pp. 478-488.
- [18] R. James, «Algorithms for Image Processing and Computer Vision,» New York, John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 23-29.

- [19] P. Soille, in *Morphological Image Analysis; Principles and Applications*, Springer-Verlag, 1999, pp. 173-174.
- [20] A. D'Oria, D. Poggi e S. Cordero, «Studio sperimentale di onde di collasso su superfici non confinate», Politecnico di Torino, Torino, 2019.
- [21] P. Bouguer, «Essai d'optique sur la gradation de la lumière», Parigi, Claude Jombert, 1729, pp. 16-22.
- [22] J. H. Lambert, *Photometria*, o, On the measure and gradations of light, colors and shade, Augsburg, Germania: Eberhardt Klett, 1760.
- [23] Beer, «Determination of the absorption of red light in colored liquids», in *Annalen der physik und Chemie*, 1852, pp. 78-88.
- [24] J. D. Ingle e S. R. Crouch, *Spectrochemical Analysis*, New Jersey: Prentice Hall, 1988.
- [25] P. L. Bhatnagar, E. P. Gross e M. Krook, «A model for Collision Processes in Gases - Small Amplitude Processes in Charged and Neutral One-Component Systems», 1954.
- [26] IUPAC, «Beer-Lambert Law», in *Compendium of Chemical Terminology*, 2nd ed. (the "Gold Book"), 1997 - 2006.
- [27] A. Mehta, Limitations and Deviations of Beer-Lambert Law.
- [28] T. G. Mayerhofer, H. Mutschke e J. Popp, Employing Theories Far beyond Their Limits - The Case of the (Bouguer-)Beer-Lambert Law, *ChemPhysChem*, 2016.
- [29] T. G. Mayerhofer e J. Popp, Beer's Law - why absorbance depends (almost) linearly on concentration, *ChemPhysChem*, 2018.
- [30] F. Aureli, A. Maranzoni, P. Mignosa e C. Ziveri, «An image processing technique for measuring free surface», University of Parma, DICATeA, Parma, 2010.
- [31] R. E. Horton, «Weir Experiments, Coefficients and Formulas», Department of the Interior - United States geological survey, Washington, 1907.
- [32] E. Marchi e A. Rubatta, «Moti irrotazionali», in *Meccanica dei Fluidi - principi e applicazioni idrauliche*, Torino, UTET, 1981, pp. 243-246.

11 Riferimenti

11.1 Indice delle figure

Figura 1 – Rappresentazione del significato dei vari termini che concorrono alla definizione del rischio. Immagine tratta dal lavoro di Cordero, S., “Modellazione numerica della propagazione di onde di dam-break, caso studio: gli sbarramenti in terra” (tesi di laurea magistrale, 2013) [2]	3
Figura 2 – Descrizione del set-up sperimentale per Aureli, Maranzoni, Mignosa, Ziveri.	9
Figura 3 – Geometria dei raggi nei principi della misurazione e set-up sperimentale utilizzato da Aureli e al.	11
Figura 4 – Descrizione schematica del set-up utilizzato alla University of South Carolina	12
Figura 5 – Rappresentazione schematica del set up utilizzato da Elkholy e al.	13
Figura 6 - Superficie libera a 1 s e 52 s	14
Figura 7 – Profilo della profondità del flusso di un’onda (linea continua) e posizione del fronte in funzione del tempo per un fluido viscoelastico.....	15
Figura 8 - Ubicazione del prototipo all’interno del laboratorio idraulica e modelli idraulici. L’area occupata dal prototipo è campita in rosso, il perimetro evidenziato in rosso comprende l’ingombro delle strumentazioni afferenti.	18
Figura 9 - Uno schema del modello fisico: a sinistra una vista dall’alto e a destra la sezione AA indicata in pianta.	18
Figura 10 - Andor Zyla 5.5 sCMOS e obiettivo Sigma utilizzati per lo studio di dam-break 3D20	
Figura 11 – Dimostrazione semplificate delle modalità Rolling e Shutter. Immagine di cortesia dal sito della Oxford Instruments, sezione dedicata a Rolling e Global shutter, Learning Center. Autore Andor.....	22
Figura 12 – Immagine di cortesia dalla tesi di Costa, P. Set up della camera Zyla 5.5.....	23
Figura 13 - Nikon DSLR D810 e obiettivo Nikkor utilizzata per lo studio di dam-break 3D.....	24
Figura 14 – Lo spettrometro Spectromaster-C700 utilizzato nelle misurazioni. Immagine di cortesia dal sito Sekonic.....	25
Figura 15 – Scheda tecnica delle sonde Balluff mod 07/035 utilizzate per le misure. Immagine di cortesia dal manuale Balluff – Ultrasonic Sensors.....	27
Figura 16 – Esempio di macroscabrezze applicate sui pannelli in vetro sintetico, poste in loco prima dell’esperimento. In particolare, si tratta della configurazione 10x10 cm con angolo di 45° rispetto all’asse della breccia.....	28
Figura 17 - Descrizione in pianta dell’installazione	29
Figura 18 – Descrizione delle 4 fasi di messa in sicurezza	31
Figura 19 – I quattro regimi del flusso per canali a pelo libero.....	34
Figura 20 – Alcune delle acquisizioni della camera per effettuare la calibrazione. Si osservi come alcune (circa il 20% del totale) siano state effettuate ponendo la scacchiera fuori dal piano focale, incidente ad esso.....	45
Figura 21 – Schermata del tool Camera Calibrator: in evidenza gli errori di riproiezione, in alto a destra.....	46
Figura 22 – Verifica della calibrazione tramite proiezione della scacchiera virtuale (dato di verità) e i punti individuati dalla camera e trattati con i parametri di calibrazione	48
Figura 23 - Frame esemplificativo di come si presenta l’immagine, dopo l’applicazione di maschere (in zona destra, nei pressi della breccia), normalizzazione e della soglia a 0.05. Con una soglia così bassa, non tutti i punti esterni al piano collassano al valore 0, ma è invece presente molto rumore (valori compresi tra 0.05 e 0.2).	55
Figura 24 – Immagine binaria non ancora trattata con filtri, prova con fondo liscio a battente 30 cm.....	56
Figura 25 – La stessa immagine binaria trattata con i filtri descritti. L’uniformità delle regioni è pressoché totale.....	57
Figura 26 – Fronte d’onda descritto come vettore di coordinate xy, qui in nero.....	58
Figura 27 – Effetti dei diversi valori delle soglie per la determinazione del fronte d’onda.....	59

Figura 28 -Evoluzione temporale del fronte d'onda con passo costante (5) su 20 istanti, in coordinate metriche	60
Figura 29 – Particolare di un finger: l'individuazione della posizione del fronte è affetta da un errore minimo dovuto alla qualità dell'immagine	61
Figura 30 – Fascio radiale di semirette puntato sul punto di impatto della vena. In background, una prova con fondo liscio, con battente di 30 cm.....	62
Figura 31 – Descrizione degli archi di circonferenza con raggio pari alla distanza radiale media calcolata per ogni settore nel generico istante (qui istante n° 59, esperienza con fondo liscio, battente 30 cm)	64
Figura 32 – Individuazione empirica del punto di impatto della vena e quindi dell'origine del fascio radiale di semirette. Si fa riferimento al 20° istante, per convenzione, in quanto si è osservato essere uno dei primi istanti in cui la vena rimane stabile, dopo l'apertura della breccia	65
Figura 33 – Evoluzione del fronte con passo temporale costante: si osserva la direzione radiale intrapresa dall'onda rispetto al punto di impatto della vena.....	66
Figura 34 – Andamento nel tempo del valor medio delle distanze cumulate del fronte d'onda, per un dam break a fondo liscio con battente di 30 cm.....	70
Figura 35 - Andamento nel tempo delle velocità del fronte d'onda, per un dam break a fondo liscio con battente di 30 cm. La curva è ottenuta tramite media mobile su 7 punti	72
Figura 36 – Confronto tra distanze cumulate (rispetto al punto d'origine del fascio), settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo liscio	73
Figura 37 - Confronto tra velocità del fronte d'onda, settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo liscio. I valori, ottenuti da media mobile a 7 punti, sono inoltre mediati tra settori simmetrici per miglior lettura	74
Figura 38 – Sovrapposizione delle 5 prove disponibili per la categoria fondo liscio, 40 cm. Sono indicati i tempi t e gli istanti i (corrispondenti al numero del frame indagato) di ogni realizzazione indagata	75
Figura 39 – Andamento delle curve tempo – distanza cumulata per la categoria di dam break a fondo liscio, battente di 40 cm. Le prove disponibili sono 5, ciascuna indicata con lo stesso colore di Figura 38.	78
Figura 40 - Differenze tra i fasci radiali per ogni categoria di dam break a fondo liscio. Sono stati omessi quelli a fondo scabro per sola semplicità di visualizzazione. Sono sovrapposti 3 istanti per ogni onda, descritti con passo 3, e riferiti tutti agli stessi istanti (40, 43, 46): si notino le differenze di posizionamento tra le tre categorie.	81
Figura 41 – sovrapposizione in 3 istanti (10, 25 e 80, corrispondenti a 0.24, 0.6 e 1.93 [s]) delle tre categorie di dam break a fondo liscio indagate.....	82
Figura 42 – Confronto tra le categorie a fondo liscio (20, 30, 40 cm). Sono indicati il valor medio e l'involuppo delle distanze cumulate medie di tutte le prove disponibili per ogni categoria. La distanza è intesa sempre rispetto all'origine del fascio radiale.....	85
Figura 43 - Confronto tra le categorie a fondo liscio (20, 30, 40 cm). E' indicato il valor medio per la velocità del fronte di tutte le prove disponibili per ogni categoria.....	88
Figura 44 – Confronto tra le categorie a fondo liscio (20, 30, 40 cm), per le distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale della categoria a 30 cm. Le distanze assolute tendono ad uno stesso valore limite, che risulta essere il bordo del fotogramma opposto alla breccia. In evidenza gli istanti di arrivo per ogni categoria	88
Figura 45 – Le quattro configurazioni di macroscabrezze applicate	90
Figura 46 – Immagine normalizzata di un esperimento a fondo scabro 5x5 0°: è descritto l'istante 59.	91
Figura 47 – Immagine binaria non ancora trattata con filtri di un esperimento a fondo scabro 5x5 0°: è descritto l'istante 59.....	92
Figura 48 - Immagine binaria trattata con filtri di un esperimento a fondo scabro 5x5 0°	93
Figura 49 – Fronte d'onda individuato (in nero) su un esperimento a fondo scabro 5x5 0°....	93
Figura 50 - Fascio radiale di semirette puntato sul punto di impatto della vena. In background, una prova con fondo scabro 5x5 0°, con battente di 30 cm	94

Figura 51 - Evoluzione temporale del fronte d'onda con passo costante (5) su 20 istanti, in coordinate metriche, per una prova a fondo scabro 5x5 0°, battente 30 cm.....	95
Figura 52 - Andamento nel tempo del valor medio delle distanze cumulate del fronte d'onda, per un dam break a fondo scabro 5x5 0°, con battente di 30 cm.....	97
Figura 53 - Andamento nel tempo delle velocità del fronte d'onda, per un dam break a fondo scabro 5x5 0°, con battente di 30 cm. La curva è ottenuta tramite media mobile su 7 punti	100
Figura 54 - Confronto tra distanze cumulate (rispetto al punto d'origine del fascio), settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo scabro	101
Figura 55 - Confronto tra velocità del fronte d'onda, settore per settore, per uno stesso dam break della categoria a fondo scabro. I valori, ottenuti da media mobile a 7 punti, sono inoltre mediati tra settori simmetrici per miglior lettura	101
Figura 56 - sovrapposizione in 3 istanti (10, 25 e 80, corrispondenti a 0.24, 0.6 e 1.93 [s]) delle quattro categorie di dam break a fondo scabro indagate	102
Figura 57 - Confronto tra le categorie a fondo scabro. Sono indicati il valor medio e l'involuppo delle distanze cumulate medie di tutte le prove disponibili per ogni categoria. La distanza è intesa sempre rispetto all'origine del fascio radiale.	105
Figura 58 - Configurazione di scabrezze 5x5 0°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore.....	106
Figura 59 - Configurazione di scabrezze 5x5 45°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore.....	106
Figura 60 - Configurazione di scabrezze 10x10 0°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore.....	107
Figura 61 - Configurazione di scabrezze 10x10 45°. La densità di ostacoli varia in funzione del settore.....	107
Figura 62 - Confronto tra le categorie a fondo scabro. E' indicato il valor medio per la velocità del fronte di tutte le prove disponibili per ogni categoria.....	110
Figura 63 - Confronto tra le categorie a fondo scabro, per le distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale della categoria liscia a 30 cm. Le distanze assolute tendono ad uno stesso valore limite, che risulta essere il bordo del fotogramma opposto alla breccia. In evidenza gli istanti di arrivo per ogni categoria	110
Figura 64 - sovrapposizione in 3 istanti (10, 25 e 80, corrispondenti a 0.24, 0.6 e 1.93 [s]) delle cinque categorie di dam break a battente di 30 cm indagate.....	111
Figura 65 - Confronto tra le categorie a battente 30cm. Sono indicati il valor medio e l'involuppo delle distanze cumulate medie di tutte le prove disponibili per ogni categoria. La distanza è intesa sempre rispetto all'origine del fascio radiale.	114
Figura 66 - Confronto tra le categorie a battente 30 cm. E' indicato il valor medio per la velocità del fronte di tutte le prove disponibili per ogni categoria.....	116
Figura 67 - Confronto tra le categorie a battente 30 cm, per le distanze cumulate rispetto all'origine del fascio radiale della categoria liscia a 30 cm. Le distanze assolute tendono ad uno stesso valore limite, che risulta essere il bordo del fotogramma opposto alla breccia. In evidenza gli istanti di arrivo per ogni categoria	117
Figura 68 - Tronco di cono stampato in 3D equipaggiato sullo spettrometro Sekonic al fine di simulare l'angolo solido della fotocamera Andor Zyla	124
Figura 69 - Confronto tra spettri acquisti, nelle medesime condizioni di fondo asciutto (come testimoniato dalle immagini, accanto, ottenute da Zyla), dallo spettrometro senza e poi con il cono. Si presti attenzione alla scala delle ordinate, nel caso senza cono si parla di W/m ² nm, con il cono si hanno mW/m ² nm. La differenza è di due ordini di grandezza.....	125
Figura 70 - Fotografie acquisite da Zyla, acqua normale, pelo libero increspato e fermo (liscio) per un battente di 4.95 cm	126
Figura 71 - Confronto tra gli spettri ottenuti dalle misure, su acqua normale con pelo libero increspato e fermo (liscio), per 6 differenti altezze d'acqua	126
Figura 72 - Sovrapposizione degli spettri elettromagnetici per le prove eseguite sul piano di valle, pelo libero fermo, con tronco di cono.....	128

Figura 73 - Sovrapposizione degli spettri elettromagnetici per le prove eseguite nella vasca di vetro, pelo libero fermo.....	130
Figura 74 - Andamento della costante k in funzione della lunghezza d'onda.....	131
Figura 75 - Andamento della costante k in funzione della lunghezza d'onda, per il primo cm d'acqua	132
Figura 76 - Andamento della costante k' rispetto all'altezza h , per le prove in vasca di vetro	133
Figura 77 - Andamento della costante k' rispetto all'altezza h , per tutte le tipologie di prove disponibili	135
Figura 78 - Andamento della costante k' rispetto all'altezza h , per tutte le tipologie di prove disponibili, dopo aver applicato un coefficiente correttivo scalare costante	135
Figura 79 - Andamento della curva di conversione Intensità-altezze, e dei dati sperimentali collegati.....	136
Figura 80 - Traiettorie effluenti da fori praticati in un serbatoio secondo la teoria di Torricelli	140
Figura 81 - Inviluppo delle traiettorie indipendenti Torricelliane, e frame di un video ritraente la vista laterale della vena. Su di essa, in verde, l'identificazione del profilo da essa descritto	142
Figura 82 - Vista dall'alto della vena effluente in un dam break a fondo liscio, 40 cm	142
Figura 83 - Schema in pianta dell'efflusso attraverso una fenditura di larghezza d	143
Figura 84 - Confronto tra i volumi cumulati per le tre categorie a fondo liscio.....	144
Figura 85 - Posizioni delle sezioni per cui vengono estratti i profili del campo di altezze. Dam break a fondo liscio, 40 cm.....	145
Figura 86 - Sezione trasversale 1, 25 cm dalla breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm.....	146
Figura 87 - Sezione trasversale 2, 76 cm dalla breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm.....	146
Figura 88 - Sezione trasversale 3, 126 cm dalla breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm	147
Figura 89 - Sezione longitudinale 4, 35 cm dall'asse breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm	147
Figura 90 - Sezione longitudinale 5, 0 cm dall'asse breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm	148
Figura 91 - Sezione longitudinale 6, -35 cm dall'asse breccia, dam break a fondo liscio, 40 cm	148
Figura 92 - Aree di indagine per la determinazione del campo di moto. Le aree sono specifiche per ogni dam break.....	150
Figura 93 - Andamento del campo di velocità nel generico istante lungo il settore centrale, fondo liscio, 40 cm.....	152
Figura 94 - Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, fondo liscio, 40 cm	152
Figura 95 - Andamento del campo di velocità nel generico istante lungo il settore centrale, fondo liscio, 30 cm.....	153
Figura 96 - Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, fondo liscio, 30 cm	153
Figura 97 - Andamento del campo di velocità nel generico istante lungo il settore centrale, fondo scabro, 30 cm.....	154
Figura 98 - Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, fondo scabro, 30 cm.....	154
Figura 99 - Andamento del campo di velocità sul generico punto nel tempo, confronto tra categorie	155
Figura 100 - Aree di indagine per la determinazione della distribuzione della vulnerabilità. Le aree sono specifiche per ogni dam break	157
Figura 101 - Stima della vulnerabilità delle zone a valle per un dam break a fondo liscio, 40 cm, secondo la classificazione di Clausen e Clark.....	159
Figura 102 - Stima della vulnerabilità delle zone a valle per un dam break a fondo liscio, 40 cm, secondo la classificazione di Clausen e Clark.....	159

11.2 Indice delle tabelle

Tabella 1 – Rapporti di scala per le categorie di invasi studiate	38
Tabella 2 – Elenco delle prove condotte. In totale, si dispone di 24 esperienze.	41
Tabella 3 – differenze di posizionamento dell'origine del fascio radiale per le varie categorie di esperimento	66
Tabella 4 – Tempi di arrivo alla stessa distanza (1120 mm) per le curve di un dam break a fondo liscio, 40 cm.....	78
Tabella 5 – Andamento degli scarti rispetto al valor medio della distanza cumulata per un dam break a fondo liscio, 40 cm.....	79
Tabella 6 – Differenze di posizionamento dell'origine del fascio radiale per le varie categorie di esperimento	80
Tabella 7 – esempio di calcolo per la vulnerabilità nel sistema reale per il 20-esimo istante di un dam break a fondo liscio, battente di 40 cm. Settore 6 (centrale).	158