

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

MONITORAGGIO DEL VOLUME DI SCAVO LOCALIZZATO MEDIANTE TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE A BASSO COSTO



Relatori

Prof. Costantino Manes

Prof. Davide Poggi

Prof. Andrea Maria Lingua

Candidato

Roberto Bert

Marzo 2017

*Alla mia famiglia,
per avermi reso la
persona che sono.*

Indice

Ringraziamenti	7
Elencosimboli	9
Abstract	13
Introduzione	15
1 Stato dell'arte	17
2 Fondamenti teorici	23
2.1 Concetti generali del fenomeno erosivo	24
2.1.1 Erosione generalizzata	24
2.1.2 Erosione per contrazione	26
2.1.3 Erosione localizzata	26
3 Set up sperimentale	35
3.1 Circuito idraulico	35
3.1.1 Caratteristiche del canale	35
3.1.2 Caratteristiche della pompa	36
3.1.3 Misuratore di portata	37
3.2 Caratteristiche delle camere	39
3.3 Determinazione della distanza focale	41
3.4 Rapporti geometrici	41
4 Validazione metodo e prova	45
4.1 Influenza del numero di camere sulla precisione e sulla qualità del DEM	45
4.2 Validazione volume	52
4.3 Condizioni del moto	53
4.4 Calcolo delle condizioni di incipiente movimentazione	54
4.5 Esecuzione della prova	56
5 Analisi dei risultati	59
6 Conclusioni	69
Bibliografia	71

Ringraziamenti

Desidero ringraziare in primis il mio relatore Costantino Manes per avermi guidato nello svolgimento del presente lavoro di tesi dimostrandosi persona ancor prima che professore, Davide Poggi per la sua disponibilità e umanità e Andrea Maria Lingua per avermi aiutato lì dove le mie conoscenze erano più limitate. Ringrazio calorosamente tutta la mia famiglia che negli anni mi ha sempre sostenuto nel mio percorso di crescita professionale e soprattutto personale, insegnandomi il valore delle cose e trasmettendomi i principi di correttezza e onestà. A Mamma, persona riservata e forte che con la sua rigosità e dolcezza mi ha reso una persona più diligente e attenta, a Papà che con la sua simpatia e giocosità ha contribuito a modellare il mio carattere solare e a Nonna che per la sua saggezza e semplicità resta per me un esempio di vita. Infine un ringraziamento speciale va alla mia ragazza Lolla che con il suo amore e il suo modo di essere ha portato in me un equilibrio che non avevo mai avuto e a tutti gli amici che nell'arco di questi 27 anni sono stati i migliori compagni di viaggio che potessi avere, donandomi ogni giorno felicità e spensieratezza. Il sorriso che mi contraddistingue e i traguardi raggiunti hanno molto di voi.

Elenco simboli

Lettere Romane

- A = dimensione della pila [m]
- Al = fattore di allineamento della pila
- B = larghezza della sezione indisturbata [m]
- b = larghezza della sezione ristretta [m]
- C_d = coefficiente di resistenza
- d = diametro del sedimento [m]
- d_m = diametro medio del sedimento [m] se non diversamente indicato
- d_x = diametro corrispondente a al x% del passante della curva granulometrica [m] se non diversamente indicato
- d_{50} = diametro corrispondente al 50% del passante della curva granulometrica [m] se non diversamente indicato
- Fr = numero di Froude
- Fr_A = numero di Froude del cilindro
- g = forza di gravità [m/s^2]
- h = altezza del tirante nella sezione indisturbata [m]
- h_o = altezza del tirante precedente all'erosione [m]
- h_r = altezza del tirante nella sezione ristretta [m]
- H = prevalenza della pompa [m]
- l = dimensione caratteristica dei vortici più piccoli [m]
- M = massa del fluido nel volume caratteristico [kg]
- P = energia associata ai vortici [$kg\ m/s^2$]
- Q = portata liquida [m^3/s]

- Q_{in} = volume in ingresso [m^3]
- Q_{out} = volume in uscita [m^3]
- Q_s = portata solida [m^3/s]
- q = portata liquida per unità di larghezza [m^2/s]
- q_s = portata solida per unità di larghezza [m^2/s]
- Re = numero di Reynolds
- S = dimensione caratteristica dei vortici più grandi [m]
- S_e = pendenza del corso d'acqua [%]
- Sh = fattore di forma della pila
- t = tempo [s] se no diversamente indicato
- u_l = velocità caratteristica dei vortici di dimensione l [m/s]
- u' = velocità turbolenta in direzione del moto [m/s]
- V = velocità della corrente [m/s]
- V_c = velocità critica dei sedimenti[m/s]
- V_1 = velocità media del flusso all'interno del canale[m/s]
- v = velocità caratteristica dei vortici di dimensione S [m/s]
- v' = velocità turbolenta in direzione perpendicolare al moto [m/s]
- W_u = potenza utile [W]
- W = potenza assorbita [W]
- y_c = profondità di erosione per contrazione [m]
- y_{ms} = profondità di erosione generalizzata [m]
- y_s = profondità di erosione localizzata [m]

Lettere Greche

- Δ_x = variazione nella direzione del moto [mm]
- Δ_y = variazione nella direzione perpendicolare al moto [mm]
- ϵ = dissipazione di energia cinetica turbolenta [m^2/s^3]
- ϵ_{re} = errore di rettifica [pixel] e riproiezione [pixel] o [mm] a seconda dei casi indicati
- η = rendimento della pompa
- μ = viscosità dinamica [$kg/(m*s)$]
- ρ = densità della fase liquida [kg/m^3]
- ρ_s = densità della fase solida [kg/m^3]
- σ_g = deviazione del materiale
- τ_c = tensione tangenziale critica in condizione di moto incipiente [N/m^2]
- τ_c = tensione tangenziale esercitata sul sedimento [N/m^2]

Abstract

La quantificazione dell'erosione localizzata è un aspetto fondamentale ai fini della progettazione e dello studio di vulnerabilità delle opere fondate in alveo. Allo stato attuale il problema, che risulta complesso a causa del numero elevato di parametri in gioco, viene studiato sulla base di esperimenti di laboratorio che conducono alla formulazione di relazioni empiriche. Poichè le attrezzature di laboratorio sono molto costose e le operazioni richiedono in alcuni casi l'interruzione delle misure, il presente lavoro di tesi vuole indagare la possibilità di ricorrere a una tecnologia a basso costo fondata sull'utilizzo di tecniche fotogrammetriche. Il monitoraggio nel tempo della massima profondità di scavo e del volume sono inoltre richieste per validare un nuovo modello [Manes C. et Brocchini M. ,2015] basato su un approccio teorico indipendente dai fattori di scala. Lo svolgimento delle trattazioni ha permesso di evidenziare che, con il solo utilizzo di due GoPro, è possibile determinare le misure richieste. Tuttavia per incrementare la precisione ottenuta è necessario aumentare il numero di camere pervenendo a una migliore calibrazione dei dispositivi. Per quanto riguarda la validazione della teoria sono invece necessarie ulteriori prove con diverse velocità del moto, geometria del sedimento e diametro della pila.

Introduzione

Lo studio del comportamento strutturale delle opere realizzate in alveo riveste un problema di importanza ormai comprovata al quale, data la complessità del fenomeno, non si è ancora in grado di dare una risposta completa e adeguata. L'elevata vulnerabilità delle pile, attribuibile all'esposizione diretta alla corrente, e l'innescò di moti vorticosi in prossimità delle fondazioni per l'alterazione del campo di moto sono alla base dei fenomeni erosivi la cui entità risulta crescente in ragione dell'aumento delle velocità e dell'energia associate al flusso. L'erosione localizzata risulta pertanto essere la causa principale di fallimento di ponti allorché si vengano a presentare profondità erosive tali da indurre una perdita di capacità portante che compromettendo il funzionamento strutturale porta al collasso.

A titolo di esempio si riportano alcuni tragici fatti occorsi rispettivamente nel 2001 nella località Portoghese di Castelo di Paiva in cui la caduta del ponte Hintze Ribeiro ha causato 60 vittime [Roca M et Whitehouse R, 2012], nel 2006 dove due decessi si sono verificati per il collasso del ponte Margarola in Spagna e nel 2015 quando un'alluvione ha indotto alla chiusura di 80 ponti, fortemente danneggiati o interamente spazzati via dalla corrente, nella regione inglese della Cumbria [Pitcher G, 2015].

Alcune evidenze scientifiche indicano che eventi alluvionali di maggiore intensità e frequenza siano da attendersi in risposta ai mutamenti climatici in atto [Andrew Tagg et Al. ,2016] con conseguenze significative anche dal punto di vista economico. Oltre al costo effettivo di ripristino o ricostruzione dell'opera danneggiata il maggiore esborso monetario deriverebbe da danni indiretti connessi alla chiusura di infrastrutture di importanza strategica dal punto di vista commerciale e di mobilità.

Crescente importanza assumono dunque le analisi di rischio riguardanti il fallimento dei ponti sui cui metodi di valutazione persistono però limitazioni e incertezze imputabili ai modelli utilizzati, all'alto numero delle variabili presenti e alla complessità del fenomeno stesso in cui si esplicano dipendenze tra i fattori coinvolti che spaziano dalle caratteristiche del flusso e del sedimento a quelle geometriche dell'opera stessa. Attualmente la previsione dell'entità dello scavo è affidata a formule di tipo empirico ottenute da esperimenti di laboratorio che per loro natura faticano a prevedere ciò che davvero succede in campo e che pertanto conducono generalmente a stime approssimate relative alla sola massima profondità di scavo in dipendenza alla tipologia di erosione.

Recentemente è stata sviluppata una relazione basata su radici teoriche connesse

alla turbolenza completamente sviluppata [Manes C et Brocchini M., 2015] che ricorre all'utilizzo di parametri adimensionali governanti il processo e che consente uno svincolamento dalla scala di sviluppo del problema. Sulla base dell'assunzione che la dimensione dell'impronta di scavo possa essere in prima approssimazione considerata equiparabile a quella del horseshoe vortex che lo ha generato, per un'ulteriore validazione della formula, sono necessarie misure di volume di scavo ricavabili da esperimenti in canaletta che al momento non sono disponibili.

Con il presente lavoro di tesi si vuole quindi andare a indagare il possibile utilizzo di una tecnologia a basso costo come alternativa ai metodi tradizionali per la misura delle configurazioni di un fondo mobile conseguenti al passaggio di una corrente a pelo libero in un canale di laboratorio. In particolare modo l'oggetto dello studio è la definizione del volume di scavo che si viene a creare al piede di una pila di forma circolare nella sua sezione di monte in relazione all'evolvere del fenomeno del trasporto nel tempo.

La tecnologia in questione prevede l'applicazione di tecniche di rilievo fotogrammetrico applicate a immagini acquisite tramite GoPro HERO5 Session e successiva elaborazione per mezzo di software. Si vuole quindi stabilire se tramite l'analisi dei fotogrammi catturati simultaneamente dai diversi apparecchi sia possibile pervenire a una valutazione attendibile dell'entità del fenomeno fisico e stimare il grado di accuratezza che ne deriva.

Un aspetto di peculiare importanza riguarda la possibilità di monitorare l'evoluzione della geometria del fondo a intervalli temporali stabiliti come percorso alternativo alla misurazione del sedimento movimentato a processo ultimato o alla profondità di equilibrio. Ne consegue quindi la capacità di determinare l'andamento della curva fenomenologica nel tempo. Quanto enunciato va visto come un lavoro volto a gettare le basi per possibili indagini future per diverse caratteristiche del moto, distribuzioni granulometriche e configurazioni della pila.

Gli step adottati per lo sviluppo della trattazione sono i seguenti:

- Setup scavo con misure fotogrammetriche
- Valutazione delle incertezze e affidabilità del metodo
- Test metodologico in canaletta attraverso un'esperimento di scavo

Capitolo 1

Stato dell'arte

L'utilizzo di modelli fisici in laboratorio consente di studiare le interazioni complesse che si verificano nei fenomeni reali in un ambiente controllato e osservare come tali sistemi evolvono nel tempo. Dal punto di vista morfodinamico, attraverso gli esperimenti, si può stabilire come il flusso liquido modifichi l'andamento topografico anche in relazione alla presenza di elementi antropici che originano un'alterazione delle condizioni di moto.

L'approccio classico per la determinazione della topografia prevede l'impiego di laser a raggio singolo o a fascio di luce montati su un carrello o l'utilizzo di una striscia laser. Tali tecnologie, peraltro molto costose, richiedono sovente di interrompere l'esperimento per passare alla fase di rilievo [A. Limar et Al., 2011]. Allo stesso modo anche misure di tipo ecometrico richiedono un'elevata spesa per le attrezzature. Con il presente lavoro di tesi si vuole stabilire se sia possibile attuare un monitoraggio del fondo tramite l'utilizzo di un'attrezzatura a basso costo come alternativa ai metodi tradizionali. Inoltre l'utilizzo delle GoPro consentirebbe di effettuare misure contestualmente all'esecuzione delle prove così da ottenere la relazione che lega tempo e cambiamento del livello per tutta la durata dell'esperimento. La crescente diffusione di questa tecnologia e la presenza di strumenti di elaborazione gratuiti hanno indotto alla valutazione delle potenzialità derivanti dalla loro applicazione in ambiti idraulici e in letteratura sono presenti studi simili che forniscono uno spunto per lo sviluppo della trattazione.

Un'prima applicazione deriva da problemi connessi allo studio topografico dei fondali che avviene mediante l'utilizzo di ecoscandagliatori ovvero di strumenti ecometrici ultracustici. L'interpretazione dell'impulso sonoro riflesso è complicata dal fatto che le direzioni del segnale possono essere influenzate dalla scabrezza del materiale. Essendo tale rugosità non isotropica, misure della stessa zona eseguite da posizioni differenti possono condurre a diversi risultati. Servono dunque delle tecniche di misura batimetriche che consentano un livello di dettaglio compatibile alle dimensioni del materiale che influenza il backscatter. A tal proposito l'utilizzo di due GoPro connesse tramite un sincronizzatore per l'acquisizione stereoscopica delle immagini consente di determinare la distribuzione granulometrica [E.Schmidt e Yuri Rzhhanov]. Tralasciando gli algoritmi utilizzati nella fase

di matching dei punti e di determinazione dei parametri di orientamento interni ed esterni particolare importanza è data ai risultati ottenuti. Gli autori hanno provveduto dapprima e eseguire delle prove in aria al fine di validare il metodo per passare successivamente a test in acqua. Le immagini sono state ritagliate per eliminare le zone periferiche affette da un maggiore grado di deformazione imputabile all'ottica grandangolare e convertite in scala di grigio per ottenere una migliore corrispondenza fra i punti comuni sulle immagini. Con quest'ultima operazione infatti si va a mitigare lo sfocamento dovuto alla dispersione della luce causata dalle molecole d'acqua e dalle particelle presenti nel flusso. Nel test riguardante la distribuzione granulometrica di fondo gli elementi di dimensione maggiore risultano ben rappresentati mentre quelli oscurati o non visibili dalle camere producono valori anomali. I risultati ottenuti consentono di dire che le immagini scattate da una distanza inferiore a un metro e con presa normale producono un'adeguata risoluzione e una densità uniforme della nuvola di punti. Poiché il procedimento fotogrammetrico risulta più complicato in acqua per gli effetti di rifrazione delle molecole e delle particelle le operazioni di matching risultano più complesse e la corrispondenza fra i singoli grani è possibile per immagini molto ravvicinate (20-30 cm) e in riferimento a una tessitura del materiale non troppo povera. In ambito del problema affrontato le misure micro-batimetriche del fondale marino sono state acquisite con una precisione in ampiezza inferiore al centimetro.

All'università di Auckland le GoPro Hero 3 sono state utilizzate per studiare l'influenza della velocità del flusso e della distanza camera-target sulla precisione del metodo. Inoltre con riferimento a un modello composto da oggetti emisferici compatibili con la forma delle particelle solide sono state fornite considerazioni riguardanti la creazione di un Digital Elevation Model (DEM). Per la calibrazione è stato utilizzato il metodo Tsai che si basa sull'utilizzo di due sole immagini contenenti un target a scacchiera non planare acquisite tramite una configurazione stereoscopica. E' stato così possibile ottenere una calibrazione in tempo reale. Questo aspetto è molto importante in ambito idraulico nel quale la variazione di parametri fisici come la temperatura dell'acqua o il cambio dell'indice di rifrazione conducono a una continua modificazione dei parametri per un'analisi in situ. Un aspetto particolarmente significativo riguarda le modifiche subite dalla geometria del sistema per effetto dell'angolo di rifrazione. Esso conduce a un aumento della distanza focale e una conseguente riduzione del Field of View (FOV) che diminuisce dai 122.6 gradi in aria ai 92 in acqua. Inoltre anche in questa analisi si sottolinea come, gli studi subacquei, non possano prescindere dal tenere in considerazione la non uniformità del flusso e l'attenuazione della luce con il crescere della profondità. Altri aspetti come una tessitura monotona e la forma irregolare delle particelle pongono una maggiore sfida nell'applicazione degli algoritmi e nella processazione dei dati. Il canale utilizzato lungo 19.6 m, largo 0.545 m e profondo 0.58 m è stato illuminato uniformemente con delle luci allo xeno per impedire effetti di flickering e l'evoluzione del fenomeno, con riferimento ad una configurazione di acque basse, è stata monitorata adottando la modalità video per migliorare sia la fase preliminare che quella di misura. Le

	S	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
V [m/s]	0	0.07	0.15	0.20	0.33	0.41	0.51	0.58

Tabella 1.1: Velocità del flusso. Dati Li W., Gee T. et Al.

videocamere sono state posizionate all'interno del fluido a sette diverse distanze dal target comprese fra i 17 a 25 cm ripetendo il processo per nove velocità di moto indicate nella Tabella 1.1.

Osservazioni a riguardo dei risultati ottenuti indicano che le qualità delle immagini viene ridotta dalla presenza di effetti di sfocamento connessi all'attenuazione luminosa e dalla dispersione cromatica in prossimità dei bordi. L'ambiente subacqueo influenza dunque la qualità dell'immagine e la selezione degli spigoli della scacchiera è fondamentale per assicurare il successo nella fase di calibrazione. L'accuratezza del processo viene valutata con riferimento a due diversi tipi di errore. L'errore di riproiezione in coordinate metriche che corrisponde alla distanza fra le coordinate misurate e quelle osservate e l'errore di rettifica in pixel che valuta l'allineamento delle immagini destra e sinistra rispetto ad un alla configurazione parallela frontale. I risultati della trattazione [Wei Li, Trevor Gee et Al.] sono riportati nella Figura 1.1 e indicano che:

- la velocità del flusso non influenza in modo sostanziale gli errori nel caso in cui sia la camera che il target siano ben vincolati. Solamente un errore nella determinazione degli spigoli causata da una variazione della qualità dell'immagine e dell'illuminazione implica un aumento dell'errore.
- la distanza fra camera e oggetto ha un grande influenza nei riguardi dell'errore di riproiezione nel caso in cui si verifichi una variazione del numero di spigoli utilizzati nel processo di calibrazione.
- i parametri di calibrazione sono relativamente costanti nel range di variazione della velocità indagato. All'aumento della distanza fra camera e obiettivo consegue una diminuzione meno accentuata degli errori di riproiezione e rettifica.

Per quanto concerne la ricostruzione del DEM gli autori hanno ottenuto che l'errore medio ottenibile per un modello in aria paria a 1.81 ± 1.576 mm viene ridotto a di 1.10 ± 1.06 mm grazie alla riduzione dell'angolo di FOV prima citata.

Ulteriori informazioni sono disponibili in conseguenza ad un secondo lavoro ad opera dagli stessi autori [Wei Li, Trevor Gee et Al.]. Con riferimento all'impiego di GoPro Hero 2 e Hero 3 è trattata la problematica della rappresentazione di oggetti in ambito di applicazioni idrauliche facendo ricorso a misure stereoscopiche basate sulla tecnica Tsai. In accordo con l'elevato grado di distorsione delle lenti l'effetto è studiato con riferimento a tre diverse distanze camera-obiettivo, C, M e F corrispondenti alla copertura di una porzione di terreno rispettivamente pari a 1/3, 1/2 e all'intera area occupata dal target di calibrazione. Il modello emisferico usato per la restituzione ha geometria nota ed è formato da palline

TABLE II. REPROJECTION ERROR FOR THE LEFT CAMERA

	Left Reprojection Error (mm)																	
	H1		H2		H3		H4		H5		H6		H7		H8		H9	
	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std
S	0.88	0.33	1.20	0.27	1.10	0.30	1.10	0.35	1.20	0.18	1.10	0.20	1.20	0.24	1.20	0.28	1.60	0.42
F1	0.89	0.33	1.21	0.27	1.09	0.29	1.11	0.36	1.21	0.17	1.10	0.19	1.20	0.23	1.20	0.26	1.61	0.42
F2	0.89	0.33	1.20	0.26	1.10	0.31	1.10	0.35	1.20	0.18	1.09	0.20	1.21	0.24	1.21	0.29	1.60	0.41
F3	0.86	0.31	1.21	0.24	1.10	0.30	1.09	0.36	1.19	0.16	1.11	0.21	1.17	0.22	1.22	0.28	1.60	0.40
F4	0.89	0.33	1.21	0.27	1.09	0.29	1.10	0.35	1.17	0.15	1.12	0.21	1.20	0.24	1.20	0.26	1.62	0.42
F5	0.89	0.33	1.20	0.26	1.10	0.31	1.11	0.36	1.20	0.17	1.10	0.19	1.21	0.25	1.22	0.28	1.61	0.41
F6	0.88	0.33	1.21	0.24	1.10	0.30	1.10	0.35	1.20	0.18	1.10	0.20	1.19	0.24	1.20	0.28	1.63	0.43
F7	0.86	0.33	1.20	0.23	1.11	0.31	1.10	0.36	1.20	0.17	1.11	0.21	1.20	0.23	1.21	0.27	1.63	0.42

TABLE III. REPROJECTION ERROR FOR THE RIGHT CAMERA

	Right Reprojection Error (mm)																	
	H1		H2		H3		H4		H5		H6		H7		H8		H9	
	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std
S	0.95	0.51	1.20	0.28	1.30	0.30	1.20	0.36	1.20	0.39	0.99	0.27	1.20	0.26	1.20	0.28	1.00	0.21
F1	1.0	0.45	1.21	0.29	1.29	0.29	1.20	0.37	1.19	0.38	0.99	0.28	1.21	0.26	1.21	0.27	1.01	0.22
F2	1.1	0.45	1.20	0.26	1.31	0.30	1.20	0.36	1.20	0.39	1.00	0.27	1.20	0.25	1.20	0.28	1.01	0.21
F3	1.0	0.44	1.22	0.28	1.30	0.30	1.20	0.38	1.22	0.42	1.01	0.28	1.21	0.26	1.21	0.29	1.02	0.23
F4	1.1	0.45	1.20	0.29	1.31	0.32	1.20	0.36	1.20	0.40	1.02	0.29	1.20	0.24	1.20	0.28	1.01	0.21
F5	1.1	0.45	1.21	0.28	1.30	0.31	1.20	0.35	1.21	0.39	1.00	0.27	1.20	0.26	1.22	0.30	1.01	0.22
F6	1.1	0.45	1.19	0.27	1.32	0.30	1.20	0.36	1.20	0.40	1.02	0.27	1.21	0.26	1.23	0.31	1.02	0.23
F7	1.0	0.45	1.20	0.26	1.31	0.31	1.20	0.39	1.23	0.41	1.02	0.28	1.22	0.27	1.22	0.29	1.03	0.23

TABLE IV. RECTIFICATION ERROR FOR THE SETUP

	Rectification Error (pixel)																	
	H1		H2		H3		H4		H5		H6		H7		H8		H9	
	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std	Avg	Std
S	1.22	0.99	0.64	0.55	0.73	0.64	1.06	0.70	1.15	1.08	0.86	0.70	0.94	0.70	1.20	0.91	0.91	0.85
F1	1.26	1.05	0.66	0.57	0.74	0.65	1.08	0.72	1.16	1.08	0.88	0.72	0.95	0.72	1.21	0.92	0.93	0.85
F2	1.27	1.09	0.65	0.58	0.74	0.63	1.08	0.74	1.17	1.09	0.89	0.74	0.97	0.74	1.23	0.92	0.95	0.86
F3	1.29	1.09	0.67	0.58	0.76	0.65	1.09	0.74	1.19	1.10	0.91	0.76	0.97	0.74	1.23	0.93	0.97	0.87
F4	1.29	1.08	0.68	0.57	0.77	0.64	1.10	0.76	1.19	1.10	0.91	0.76	0.98	0.75	1.25	0.95	0.97	0.86
F5	1.29	1.09	0.69	0.59	0.77	0.65	1.10	0.75	1.21	1.11	0.92	0.77	0.99	0.77	1.28	0.97	0.98	0.86
F6	1.31	1.11	0.69	0.59	0.78	0.67	1.11	0.77	1.22	1.12	0.93	0.78	1.02	0.78	1.29	0.98	1.02	0.89
F7	1.30	1.11	0.69	0.60	0.80	0.69	1.13	0.77	1.22	1.12	0.92	0.78	1.02	0.78	1.28	0.98	1.05	0.92

Figura 1.1: Errori di riroiezione e rettifica. Dati Li W., Gee T. et Al.

di ping pong dal diametro di 40 mm la cui superficie è cosparsa di particelle di sabbia colorata per aumentare la possibilità di stereo matching (Figura 1.2).

Per quanto riguarda l'effetto della distanza oggetto-camera i risultati evidenziano che una diminuzione della stessa produce una maggiore accuratezza nella profondità soprattutto se si utilizza solamente la porzione centrale dell'immagine per la quale diminuisce fortemente la distorsione radiale. Inoltre l'utilizzo della sola porzione centrale consente di ridurre anche l'errore di rettifica e quello di riproiezione come si evince dalla Tabella 1.2 e dalla Tabella 1.3.

Allo stesso modo la depth map originata a partire da una riduzione della target area produce risultati affetti da minori livelli di disturbo e con minori errori di matching che consentono una più fedele riproduzione del modello emisferico

ϵ_{re} (pixel)		GoPro Hero 2	GoPro Hero 3
Whole	C	4.99±4.31	1.99±1.65
	M	2.78±2.10	1.09±0.83
	F	0.91±0.73	0.73±0.56
Whole	C	-	-
	M	1.12±0.84	0.52±0.42
	F	0.79±0.60	0.62±0.51

Tabella 1.2: Errori di rettifica. Dati Li W., Gee T. et Al.

ϵ_{re} (pixel)		GoPro Hero 2		GoPro Hero 3	
		Left	Right	Left	Right
Whole	C	29.10±54.45	22.21±48.37	20.39±49.41	21.7±51.60
	M	3.39±2.02	2.56±1.72	1.19±0.94	2.39±1.74
	F	1.25±0.69	0.91±0.73	0.73±0.59	1.15±0.87
Centre	C	-	-	-	-
	M	1.31±0.77	0.94±0.52	0.73±0.63	1.39±1.06
	F	1.36±0.71	0.90±0.64	0.68±0.57	1.20±0.62

Tabella 1.3: Errori di riproiezione. Dati Li W., Gee T. et Al.



Figura 1.2: Modello emisferico e restituzione. Li W., Gee T. et Al.

attraverso il DEM che risulta essere molto soddisfacente come si può vedere in Figura 1.2.

In definitiva si può asserire che, nel caso di utilizzo di GoPro ricorrendo al processo di calibrazione Tsai per applicazioni idrauliche nelle quali è necessario un monitoraggio in tempo reale, grandi errori di riproiezione e rettifica conducono a una scarsa precisione della depth map e del DTM che ne consegue. Viceversa utilizzando solamente gli angoli centrali del target di calibrazione si ha una riduzione degli errori e un sostanziale aumento della qualità della riproduzione del modello.

Sulla base dei risultati ottenuti dagli studi di ricerca riportati possiamo dire che l'evoluzione temporale del del volume di erosione può essere monitorata e indagata tramite il ricorso a procedure fotogrammetriche.

Capitolo 2

Fondamenti teorici

Le opere fluviali sono oggi oggetto di particolare attenzione al seguito del verificarsi di eventi alluvionali di entità tale da sottolineare un livello di vulnerabilità elevato rimarcato da un gran numero di crolli e danneggiamenti. Prescindendo da problemi di così elevata criticità inoltre una sottostima nella fase di progettazione degli attraversamenti può indurre modifiche sostanziali del comportamento del regime fluviale. Si evidenziano migrazioni del dell'alveo, riduzione delle portate defluenti con conseguente aumento del livello massimo del tirante idrico e formazione di invasi temporanei a monte dell'opera. Un'ostruzione delle luci del ponte per l'accumulo di sedimenti e presenza di detriti vegetali implica un aumento delle spinte sull'impalcato che nel caso di cedimento porta alla formazione di una portata di picco maggiore di quella strettamente connessa all'evento meteorico nel caso di alveo indisturbato. Analisi svolte dalla Federal Highway Administration ,aventi in oggetto ponti realizzati in periodi antecedenti il 1985 negli Stati Uniti, ha riconosciuto che l'effetto di scavo ad opera della corrente non è stato considerato in modo adeguato nella progettazione delle fondazioni dei manufatti. Allo stesso modo, in riferimento alla situazione italiana Ballio et AL., (1998) hanno svolto un indagine su un campione di 400 ponti soggetti a eventi alluvionali di diversa entità. Gli elementi strutturali danneggiati a seguito degli eventi sono riportati nel grafico di sinistra e sono riassumibili nelle seguenti classi principali: cedimento delle pile dei ponti o delle spalle per erosione alla base delle relative fondazioni (21%), lesione o distruzione dell'impalcato (19%) e crollo totale o parziale del rilevato di accesso (41%). Quest'ultimo valore che rappresenta la percentuale maggiore può essere spiegato sulla base della costruzione di tale elemento strutturale all'interno delle aree golenali. Per quanto riguarda il danneggiamento strutturale, con riferimento al grafico di destra, si nota come la maggior parte dei casi sia dovuta a fenomeni erosivi (26%) e spinta idrodinamica (28%) [Brath A.].

I risultati espliciti (Figura 2.1) invitano a porre la giusta enfasi nel riguardo della sicurezza idraulica di tali opere. A tale scopo si affrontano i temi riguardanti la dinamica dei fenomeni erosivi, con particolare riferimento alle pile che saranno oggetto del presente lavoro di tesi, evidenziando i modelli di previsione disponibili per una valutazione quantitativa delle profondità di scavo. Un ulteriore cenno viene rivolto alla formulazione di relazioni basate su fondamenti fisici e all'uti-

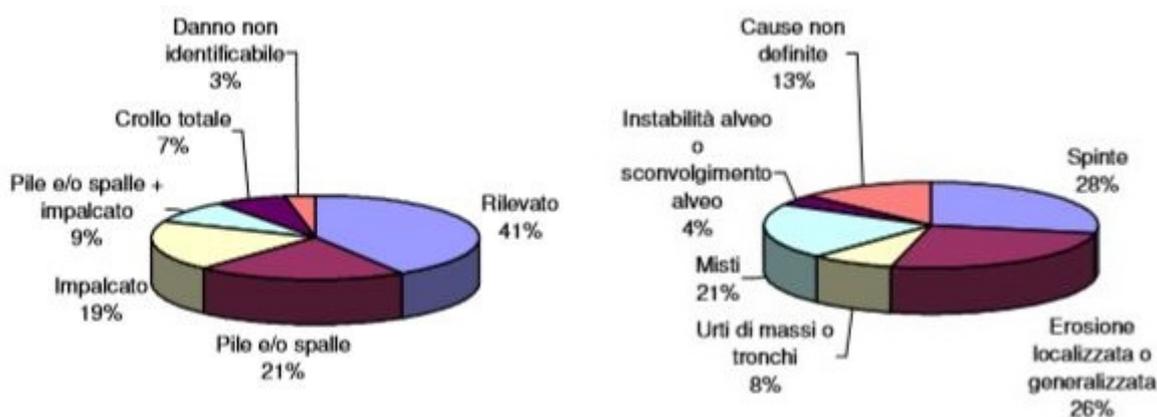


Figura 2.1: Elementi strutturali danneggiati (sx) e cause di danno (dx). Dati desunti da Ballio et Al. (1998).

lizzo dei modelli che risultano particolarmente importanti nel caso di analisi di geometrie complesse.

2.1 Concetti generali del fenomeno erosivo

L'erosione è la conseguenza dell'azione operata dalla corrente sul materiale solido componente l'alveo di un canale a fondo mobile. Il fenomeno risulta essere molto complesso per le sue caratteristiche di ciclicità in cui la massima profondità si verifica solitamente in concomitanza al passaggio del picco di piena a seguito del quale, lo scavo può essere parzialmente o totalmente occupato dal materiale solido. La stima del valore massimo di scavo in prossimità delle opere di fondazione, se determinato sulla base dei valori misurabili dopo l'evento, può dunque condurre a una sottostima dell'entità del fenomeno. Bisogna tuttavia precisare che le conoscenze relative a fenomeni causati da portate solide e liquide non stazionarie risultano frammentarie e che, data la variabilità del profilo legata a scale temporali sia di breve che di lunga durata, solitamente ci si accontenta in prima approssimazione di valutazioni relative agli stati finali di equilibrio. L'erosione può essere vista come la sovrapposizione di tre processi stimati in modo indipendente e i risultati ottenuti possono poi essere sommati. Più nello specifico si tratta di erosione generalizzata che occorre in modo indipendente dalla presenza dell'opera, erosione per contrazione dovuta alla diminuzione della sezione di deflusso della portata per la presenza dell'opera ed erosione localizzata dovuta all'alterazione del campo di moto in corrispondenza delle strutture realizzate all'interno dell'alveo.

2.1.1 Erosione generalizzata

Il fenomeno dell'erosione generalizzata o general scour si caratterizza con un abbassamento del fondo alveo indipendente dalla presenza dell'opera di attraversamento. La sua entità risulta necessaria per stabilire la quota di riferimento

da utilizzare per il calcolo dell'erosione localizzata indotta dall'alterazione delle traiettorie del flusso per la presenza del manufatto. Informazioni riguardanti la tendenza della diminuzione della quota del fondo possono essere desunte da osservazioni dirette, effettuate durante i periodi di magra, con riferimento alla posizione altimetrica di opere non interferenti con quella oggetto di studio. Per quanto riguarda il periodo temporale di riferimento la valutazione deve essere condotta sulla base di studi idraulici e idrologici ed in prima approssimazione si può asserire che esso deve essere di entità paragonabile alla vita utile della struttura stessa. Le possibili cause che conducono all'erosione generalizzata sono imputabili sia a fenomeni naturali come salti di meandri o cambiamenti climatici che a comportamenti umani legati ad azioni di canalizzazione del flusso, prelievo di materiale solido o azioni invasive sull'ambiente circostante. Allo stesso modo sono determinanti anche le caratteristiche della corrente stessa, quelle dei sedimenti e le caratteristiche geomorfologiche. Una prima analisi qualitativa del fenomeno può essere basata sulla bilancia di Lane (1950) che assume la proporzionalità fra il prodotto della pendenza per la portata liquida e quello fra la portata solida e la dimensione media del sedimento.

$$S_e * Q \propto Q_s * d_{50} \quad (2.1)$$

Sulla base di detta relazione si esplica una tendenza del corso a ricercare una configurazione di equilibrio successiva a un evento di natura antropica che ne ha alterato lo stato preesistente. Per esempio la costruzione di una diga può indurre una situazione di deposito di materiale all'interno dell'invaso che, in assenza di cambiamento della portata liquida, ha come conseguenza di equilibrio la diminuzione della pendenza del corso. Naturalmente questi processi richiedono tempi importanti per avvenire. Formulazioni per una valutazione quantitativa dell'erosione generalizzata sono presenti in letteratura con riferimento al diametro del materiale che compone l'alveo e alla portata defluente [Lacey, 1930] :

$$y_{ms} = 0.47 \left(\frac{Q}{f} \right)^{1/3} \quad (2.2)$$

con $f = 1.76 d_m^{0.5}$

Altri autori considerando invece come parametro indicativo la portata per unità di larghezza [Blench, 1969]:

$$y_{ms} = 1.20 \left(\frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/6}} \right) \text{ se } 0.06 < d_{50} < 2 \quad (2.3)$$

$$y_{ms} = 1.23 \left(\frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/12}} \right) \text{ se } d_{50} > 2 \quad (2.4)$$

dove in entrambe le formulazioni il valore del diametro del sedimento va inserito in mm. Ulteriori approcci fanno invece riferimento alla velocità e formulazioni particolari analizzano le massime profondità in corrispondenza del talweg, delle

curve o delle confluenze di due corsi d'acqua. E' comunque doveroso sottolineare come il valore calcolato sia da considerare come un valore indicativo dell'entità del processo.

2.1.2 Erosione per contrazione

Lo scavo di contrazione conduce a un'erosione di tipo localizzato conseguente alla diminuzione della sezione defluente del corso d'acqua per la presenza dell'opera di attraversamento. Tale restringimento induce un'accelerazione del flusso che, portando ad un aumento delle azioni all'interfaccia del materiale solido, provoca azioni di scavo dell'alveo. Le scale temporali con cui si caratterizza il fenomeno sono paragonabili alla durata degli eventi alluvionali. Esperimenti a riguardo sono stati condotti in laboratorio in presenza ed assenza di trasporto solido e hanno consentito di ottenere molteplici formulazioni empiriche basate sull'analisi delle osservazioni. Basandosi sull'equazione di Manning per il calcolo della resistenza al moto con riferimento agli alvei fluviali e sulla relazione di Du Boys per il calcolo del trasporto solido di fondo Straub (1934) ha formulato una equazione valida nelle condizioni di equilibrio:

$$\frac{h_r}{h} = \left(\frac{B}{b}\right)^{6/7} \left[\frac{\tau_c}{2\tau_m} + \sqrt{\left(\frac{\tau_c}{2\tau_m}\right)^2 + \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}\right) \frac{B}{b}} \right]^{-3/7} \quad (2.5)$$

nella quale h e h_r sono i livelli del tirante nella sezione indisturbata e ristretta, τ_c la tensione tangenziale media esercitata dalla corrente sul sedimento in condizioni di moto incipiente del materiale, τ_m è la medesima tensione ma con riferimento alla sezione indisturbata e B e b le larghezze del pelo libero nelle sezione indisturbata e ristretta. In condizione di moto incipiente corrispondente ad un'assenza di trasporto solido si ha un'uguaglianza delle τ che porta a una sostanziale semplificazione della formula (2.5) che diventa:

$$\frac{h_r}{h} = \left(\frac{B}{b}\right)^{6/7} \quad (2.6)$$

dalla quale una volta stimato il valore di h_r si può calcolare l'entità della profondità di erosione y_c come differenza della quota del fondo precedente all'erosione h_0 e quella seguente.

$$y_c = h_r - h_0 \quad (2.7)$$

Come per il caso dell'erosione generalizzata in letteratura sono presenti altre formulazioni [Gill, 1981; Lursen, 1958 - 1960 - 1962 - 1963] derivate da approcci sperimentali, la maggior parte delle quali, basate su relazioni di tipo esponenziale simili a quella citata.

2.1.3 Erosione localizzata

L'erosione localizzata è quella che maggiormente ci interessa poichè verrà tratta durante lo svolgimento della tesi con ricorso ad un approccio sperimentale ed

è imputabile a una variazione locale dello stato di moto. In ambito ingegneristico molti studi teorici e sperimentali sono stati svolti a riguardo in relazione al fatto che i risvolti applicativi sono molteplici. Per esempio la valutazione del massimo volume di scavo è necessaria nel dimensionamento delle fondazioni di turbine eoliche e piattaforme off-shore per le quali la realizzazione dei rip-rap, la cui estensione è strettamente connessa al volume di sedimento movimentato, influisce in modo non trascurabile sul costo complessivo dell'opera. Per quanto concerne gli attraversamenti fluviali, come visto precedentemente, l'erosione localizzata è una delle problematiche che più frequentemente provoca il crollo o il danneggiamento del manufatto. Dal punto di vista fisico la principale causa è la formazione di vortici comunemente detti a ferro di cavallo (Horseshoe Vortex) alla base delle pile.

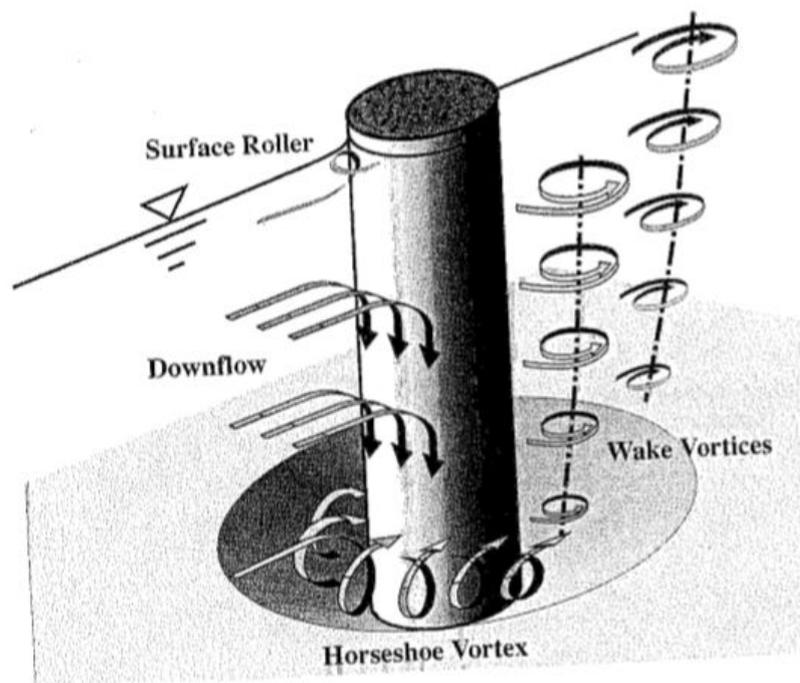


Figura 2.2: Fenomeni vorticosi in prossimità delle pile dei ponti

Come evidenziato nella Figura 2.2 la loro formazione è dovuta all'arresto della corrente in prossimità della superficie di monte della pila. Il gradiente delle pressioni lungo la verticale originato dall'annullamento della velocità di moto provoca un flusso in direzione della base della stessa e conduce alla formazione dei fenomeni vorticosi, che mediante azione di taglio, causano la rimozione del materiale. All'aumentare della profondità di scavo l'energia del vortice diminuisce e si perviene a una sostanziale configurazione di equilibrio dinamico. A valle dell'elemento strutturale invece si formano dei vortici ad asse verticale (Wake Vortex) che contribuiscono alla rimozione del materiale movimentato nella cavità, tuttavia la loro intensità diminuisce in modo marcato all'aumentare della distanza dall'elemento con conseguente deposizione del sedimento. Una terza tipologia di vortici (Surface Roller) si sviluppano in prossimità del pelo libero risultando quindi influenti solamente se il livello d'acqua è confrontabile con la dimensione

caratteristica del sedimento. La porzione di alveo a monte è dunque quella che risente in modo più marcato del fenomeno erosivo.

L'entità "finale" dello scavo e la sua evoluzione temporale dipendono inoltre dalle condizioni del flusso (Figura 2.3) e più in particolare dall'assenza (clear-water scour) o dalla presenza (live-bed scour) di trasporto solido.

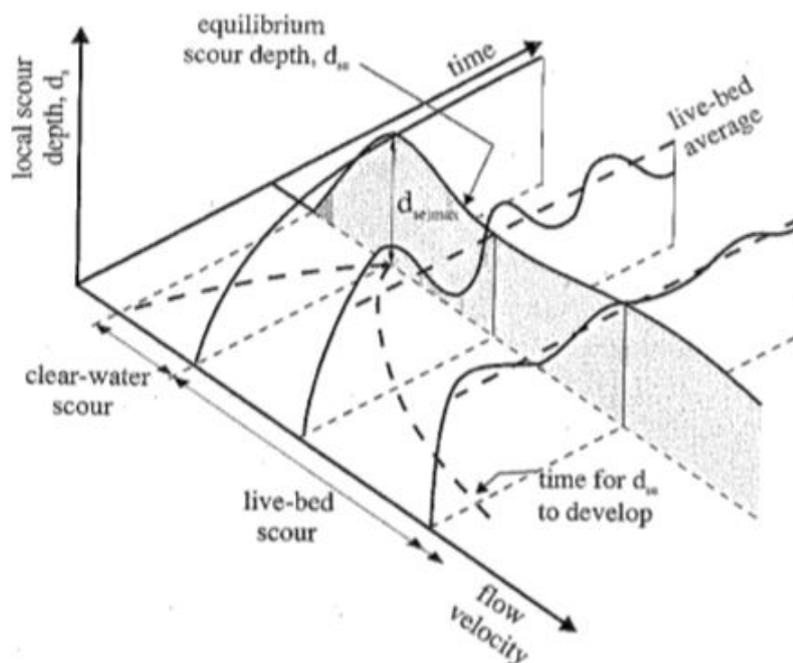


Figura 2.3: Fenomeni vorticosi in prossimità delle pile dei ponti

- **clear-water scour:** Il raggiungimento delle condizioni di l'equilibrio avviene quando le tensioni tangenziali imposte dal vortice a ferro di cavallo equilibrano quelle proprie di scalfamento del materiale che compone il fondo del canale. Tuttavia tale condizione è espressa da diversi autori con riferimento a vari aspetti concettuali. Qualcuno ipotizza che esso venga raggiunto dopo un certo tempo stabilito in modo arbitrario mentre altri ritengono che sia necessario far riferimento ad una configurazione di tempo infinito. Partendo dalle stesse condizioni la differenza di assunzione conduce a una variabilità dei risultati all'incirca pari al 10-20%.
- **live bed Scour:** Il raggiungimento delle condizioni di equilibrio avviene quando la quantità di materiale in ingresso dello scavo eguaglia quella uscente. A differenza del caso precedente il trasporto solido determina una situazione di oscillazione del livello attorno alla configurazione di equilibrio in relazione alla formazione e alla scomparsa delle forme di fondo. La massima profondità raggiunta può essere dedotta con una maggiorazione pari al 10% di tale valore.

In entrambi i casi la massima profondità è valutabile come differenza fra il livello del fondo del fiume riferito all'assenza di erosione localizzata e la quota più depressa della zona di scavo. Essa risulta essere maggiore in assenza di trasporto solido ad opera dalla corrente mentre all'aumentare della velocità del flusso e dunque con il crescere del volume movimentato il processo risulta più rapido e si esplica una minore oscillazione dei livelli.

I principali fattori che influenzano l'entità del processo sono le proprietà del fluido, la velocità della corrente e il tirante idrico, le dimensioni geometriche della pila e più in particolare il suo sviluppo nella direzione perpendicolare al moto, la forma, l'angolo con cui la corrente agisce su di essa e le caratteristiche di geometria e dimensione del sedimento.

$$y_s = f(\rho, \mu, V, h, g, d_{50}, \rho_s, V_c, A, \sigma_g, Sh, Al, t) \quad (2.8)$$

Attraverso l'applicazione del teorema II supponendo costanti ρ , ρ_s e μ si ottiene la seguente relazione che lega la profondità di scavo rapportata alla larghezza della pila ad una serie di rapporti adimensionali e

$$\frac{y_s}{A} = f\left(\frac{V}{V_c}, \frac{h}{A}, \frac{A}{d_{50}}, \frac{Vt}{A}, \frac{V}{\sqrt{gB}}, \sigma_g, Sh, Al\right) \quad (2.9)$$

In cui A è la dimensione della pila, Sh è un fattore di forma, Al considera il suo allineamento in funzione del flusso e σ_g , ovvero la deviazione del materiale, considera la propensione alla formazione di processi di Armour. Particolarmente significativa risulta l'analisi delle condizioni del flusso in relazione ai valori che legano V/V_c (Velocità media del flusso e Velocità critica con sedimento uniforme) con il rapporto y_s/A (diametro sedimento e larghezza pila) (Figura 2.4).

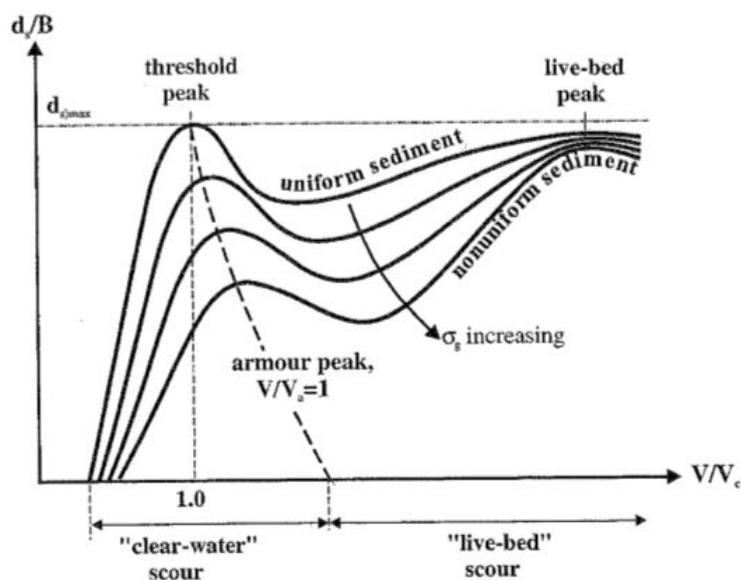


Figura 2.4: Influenza dei rapporti adimensionali sulle caratteristiche del moto con d_s equivalente a y_s ed A equivalente a B

Dunque al variare del rapporto fra le velocità si ha una transizione passando da un comportamento di "clear-water" scour ($V/V_c < 1$) a "live-bad" scour ($V/V_c > 1$). Come precedentemente introdotto il valore massimo competente alla prima tipologia di flusso risulta maggiore e la presenza di un sedimento uniforme determina una maggiore profondità di equilibrio. Per quanto concerne i rapporti A/d_{50} e h/A si può invece dire che sussistono delle soglie di valori oltre le quali tali parametri non influenzano più il rapporto y_s/A . Un ulteriore parametro da considerare è la presenza di detriti trasportati. Quest'ultimo fattore può indurre a un aumento della zona di influenza dei vortici amplificando la porzione di alveo soggetta a erosione.

Le formulazioni da adottare per il calcolo della profondità localizzata con particolare riferimento alla condizione di equilibrio sono molteplici e fanno solitamente riferimento ad un materiale privo di coesione. Una delle più utilizzate è quella di Melville (1997):

$$y_s = K_{yB} * K_I * K_d * K_s * K_\theta * k_G * K_t \quad (2.10)$$

in cui i valori di K_i sono dei fattori che tengono conto rispettivamente di:

- K_{yB} influenza dimensioni pila
- K_I influenza intensità flusso
- K_d influenza dimensioni sedimento
- K_s influenza forma pila e fondazioni
- K_θ influenza allineamento
- K_G influenza geometria del canale
- K_t influenza tempo

Va tuttavia detto che la quasi totalità delle formule presenti in letteratura deriva da approcci di tipo empirico basate su analisi dimensionali di dati ottenuti allo scopo di identificare gruppi non dimensionali che governano il problema. Essendo tali relazioni basate su esperimenti di laboratorio, che risentono in modo marcato dei fattori di scala, dalla loro applicazione si ottengono spesso risultati discordanti. Una valutazione cautelativa deve quindi essere fondata sull'applicazione di diverse metodologie e da un successivo confronto critico dei valori ottenuti.

Un nuovo approccio per la determinazione della massima profondità di scavo in condizione di equilibrio è stata di recente ottenuta basandosi sulla teoria della turbolenza completamente sviluppata [Manes C et Brocchini M, 2015]. Tale approccio, indipendente dalla scala, chiarisce gli effetti legati ai vari gruppi adimensionali in riferimento ad una pila di tipo circolare immersa nel flusso che rappresenta la forma più comune di elemento di fondazione dei ponti.

- **clear-water scour:** In questa condizione di moto il rapporto fra la velocità indisturbata all'interno del canale V_1 e quella critica dei sedimenti V_c ricade all'interno del range $0.5 \leq V_1/V_c \leq 1$. Come visto in precedenza l'erosione alla base della struttura indotta dal vortice a ferro di cavallo prosegue fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio. La massima profondità di

erosione risulta situata nella porzione di monte dello scavo in prossimità della base della pila e in tale punto la pendenza locale è nulla. Allo stesso modo la tensione tangenziale critica τ_c in riferimento allo stesso punto risulta indipendente dalla pendenza così che all'interno del buco si può evidenziare un regime di moto turbolento completamente sviluppato [Manes C. Brocchini M., 2015] e le condizioni di equilibrio possono essere espresse tramite l'equazione di Shield.

$$\tau \leq \tau_c \sim (\rho_s - \rho)gd \quad (2.11)$$

L'obbiettivo dagli autori è quello di ricercare una formula che conduca alla massima profondità di erosione solamente attraverso la misurazione delle proprietà del flusso, della dimensione dei sedimenti e della geometria della pila. Con riferimento a lavori svolti in precedenza [Gioia et Bombardelli, 2005 - Bombardelli Gioia, 2006] è stato seguito un approccio basato sull'utilizzo della turbolenza completamente sviluppata per formulare una relazione valida per τ . La teoria di riferimento è quella di Kolmogorov (1991) sull'interazione fra i vortici a piccola e grande scala e attraverso i suoi paradigmi Manes e Brocchini hanno ottenuto la seguente relazione:

$$u_l \sim v \left(\frac{l}{S} \right)^{1/3} \quad (2.12)$$

nella quale u_l è la velocità caratteristica dei vortici di dimensione l mentre v e S sono la velocità e la scala caratteristica dei vortici più grandi. Poiché le azioni di taglio sul fondo possono essere espresse tramite la relazione di Reynolds $\tau = \rho \overline{u'v'}$ con ricorso a metodologie che esulano dalla trattazione la formulazione di τ è la seguente:

$$\tau \sim \rho v^2 \left(\frac{d}{S} \right)^{1/3} \quad (2.13)$$

Assumendo che la dimensione dei vortici che si formano all'interno del volume di scavo sia approssimabile con la profondità dello stesso all'equilibrio (y_s) si può asserire che S e y_s siano circa equivalenti. Il calcolo di τ necessita una formula per la valutazione di v che può essere ottenuta con riferimento a principi di natura energetica. Inoltre Manes et Brocchini hanno determinato che ϵ può essere determinata con riferimento all'energia associata ai vortici di grande scala divisa per la massa del fluido contenuto nel suo volume caratteristico. Attraverso queste due assunzioni hanno ricavato la relazione seguente:

$$\epsilon = \frac{P}{M} \sim \frac{C_d A V_1^3}{S^2} \sim \frac{v^3}{S} \quad (2.14)$$

in cui C_d è un coefficiente di resistenza, A è il diametro del cilindro e $A * S^2$ è l'area dello stesso esposta al fenomeno di scavo.

A partire da essa si deduce che:

$$v \sim V_1 \left(\frac{C_d A}{S} \right)^{1/3} \quad (2.15)$$

combinando le relazioni (2.13) e (2.15) si ottiene la relazione di τ :

$$\tau \sim \rho V_1^2 \left(\frac{C_d A}{S} \right)^{2/3} \left(\frac{d}{S} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

Quando il processo di erosione raggiunge l'equilibrio il sedimento cessa di muoversi e le tensioni tangenziali eguagliano quelle di moto incipiente $\tau \approx \tau_c$. La relazione definitiva ottenuta dagli autori diventa:

$$\frac{y_s g}{V_1^2} \sim \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) (C_d)^{2/3} \left(\frac{A}{d} \right)^{2/3} \quad (2.17)$$

L'equazione mostra come all'equilibrio la profondità di erosione normalizzata con la misura piezometrica del flusso indisturbato dipende dal peso specifico del sedimento, da un coefficiente di resistenza e dal rapporto fra il diametro del cilindro e quello del sedimento. Inoltre C_d dipende da A/B , y_s/B e Fr [Manes C et. Brocchini M., 2015].

- **live-bed scour:** In questa condizione di moto, l'equilibrio viene raggiunto quando c'è un'uguaglianza fra il flusso di materiale solido in ingresso al volume di scavo Q_{in} e quello in uscita Q_{out} (Melville 1984). Tale relazione non può essere usata per derivare una formulazione di y_s data la difficoltà nel predire l'entità di Q_{out} . La prima assunzione è che Q_{in} sia sostanzialmente legato al solo trasporto solido di fondo poichè la maggior parte dei sedimenti che entrano nel volume di scavo sono prossimi alla base dell'alveo. Dalla letteratura si evince che il trasporto di fondo per unità di larghezza del canale viene espresso tramite una formula di potenza di tipo:

$$q_s = \alpha (\tau * - \tau * c)^n \quad (2.18)$$

in cui $\tau *$ è la tensione di Shield e agli altri valori sono costanti. Poichè le tensioni tangenziali in un flusso indisturbato possono essere espresse tramite un coefficiente di attrito, q_s può essere stimata anche in funzione di $(V_1/V_c)^2$ con V_c velocità critica del sedimento. Le ipotesi alla base della derivazione per le tensioni tangenziali utilizzate per il caso di clear-water scour sono applicabili al caso di live-bed condition. All'equilibrio S_e può essere definita come:

$$S_e = \frac{y_s g}{V_1^2} / \left[\left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) (C_d)^{2/3} \left(\frac{a}{d} \right)^{2/3} \right] \quad (2.19)$$

che rappresenta il rapporto fra la tensione tangenziale critica e quella riferita al punto di massimo scavo inserendo nella (2.19) la (2.16) calcolata per

$S = y_s$. S_e è dunque l'inverso della tensione di Shield e all'equilibrio dipende da q_s e dunque da Q_{in} . Poichè q_s è sostanzialmente relazionata a V_1/V_c di può assumere che nelle condizioni di live-bed scour la massima profondità di scavo possa essere ottenuta tramite la relazione [Manes C. et Brocchini M., 2015]:

$$S_e = \Phi \left\{ \frac{V_1}{V_c} \right\} \quad (2.20)$$

in cui il valore di Φ deve essere ricercato in modo sperimentale.

Entrambe le relazioni ottenute sono state validate dagli stessi con riferimento a dati sperimentali reperibili da studi precedenti dimostrando una buona aderenza all'interno dei range di applicabilità.

Studi precedenti [Ettema, Melville et. Barkdoll 1998; Ettema et al. 2011] con riferimento al caso di pile di forma circolare, sedimento di diametro uniforme e condizioni di moto stazionarie ha consentito di ottenere un set di parametri adimensionali tramite l'applicazione del teorema II.

$$\frac{y_s}{A} = \Phi_1 \left\{ \frac{A}{B}; \frac{h}{A}; Fr_A; \frac{A}{d}; \frac{V_1}{V_c}; Re; \frac{\rho_s}{\rho} \right\} \quad (2.21)$$

nella quale il rapporto V_1/V_c è stato incluso poichè consente la suddivisione delle condizione di moto. Per quanto riguarda il caso di clear-water si divide l'equazione (2.17) per per la dimensione caratteristica della pila ottenendo:

$$\frac{y_s}{A} \sim (Fr_A)^2 \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) (C_d)^{2/3} \left(\frac{A}{d} \right)^{2/3} \quad (2.22)$$

e facendo altrettanto per il caso di live-bed:

$$\frac{y_s}{A} \sim \left\{ \frac{V_1}{V_c} \right\} (Fr_A)^2 \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) (C_d)^{2/3} \left(\frac{A}{d} \right)^{2/3} \quad (2.23)$$

In definitiva con questo modus operandi Manes C. e Brocchini M. hanno dimostrato che le equazioni da loro prodotte contengono i gruppi adimensionali sopra riportati. Alcuni di essi compaiono in maniera esplicita all'interno delle formulazioni, A/B e h/A sono contenute all'interno di C_d che risulta dipendere anche da Re e Fr . In particolare Re e A/d determinano la modalità di trasferimento del momento meccanico all'interfaccia con il sedimento e influenzano la profondità di equilibrio.

Seppur ci si stia muovendo in una direzione in cui le formule basate su principi fisici, che richiedono comunque dati di tipo sperimentale per essere validate, potranno consentire di superare i problemi di scala permangono incertezze legate alla difficoltà di interpretare in modo adeguato dati di campo. Tali incertezze sono dovute alla difficoltà di caratterizzare i sedimenti d'alveo ulteriormente complicate dal fenomeno del corazzamento. Tale fenomeno è conseguente alla diversa mobilità dei sedimenti in funzione al loro diametro. Con il prolungato effetto

dell'azione erosiva della corrente si evidenzia un impoverimento della percentuale di materiale fine nello strato superiore del corso d'acqua che, con il passare del tempo risulta costituito da materiale più grossolano che fronteggia l'azione della corrente. Nella scelta degli indicatori relativi alla granulometria andare a fare riferimento al solo strato superficiale dell'alveo potrebbe portare a una sottovallutazione del livello di vulnerabilità dell'escavazione delle fondazioni. Infatti il verificarsi di eventi di maggiore intensità che comportano azioni tali da asportare lo strato corazzato determinerebbe la messa a nudo di una porzione di alveo maggiormente dilavabile con effetti erosivi più pronunciati.

Inoltre nel caso di configurazioni strutturali particolarmente complesse, le relazioni empiriche ricavate con riferimento a situazioni standard per una rappresentazione più generale, possono condurre a risultati anche largamente approssimativi. In presenza di talune geometrie o di pile in successione interferenti con la corrente, si possono infatti originare dei fenomeni di scavo di entità anche significativamente maggiore di quello della pila isolata che devono essere considerati nella fase progettuale. In dette situazioni il ricorso alla modellistica fisica in scala ridotta è necessario per riprodurre le singolarità del campo di moto.

Capitolo 3

Set up sperimentale

Questo capitolo è dedicato alla disamina delle attrezzature utilizzate nello svolgimento del presente lavoro di tesi e alle operazioni preliminari propedeutiche alle fasi sperimentali. Il primo tema è trattato mediante l'analisi del circuito idraulico e delle camere utilizzate per l'acquisizione delle immagini che verranno utilizzare durante la fase di elaborazioni dati. Il secondo invece consiste nella determinazione della minima distanza alla quale posizione le GoPro rispetto al fondo del canale per ottenere una corretta messa a fuoco e una riduzione degli effetti di distorsione delle immagini.

3.1 Circuito idraulico

Il circuito idraulico utilizzato è composto dai canali realizzati sotto la pavimentazione necessari ad alimentare le apparecchiature, dal canale utilizzato per lo svolgimento delle fasi sperimentali e dai suoi elementi accessori ovvero pompa di alimentazione e misuratore di portata.

3.1.1 Caratteristiche del canale

Il canale utilizzato per le operazioni di taratura del modello, validazione del metodo e monitoraggio dell'erosione locale alla base di una pila circolare attraverso tecniche fotogrammetriche è situato all'interno del laboratorio di idraulica "Giorgio Bidone" del Politecnico di Torino. La scelta è stata dettata dalla necessità di un ambiente di lavoro che avesse geometrie tali da consentire l'applicazione del metodo proposto. In particolare le dimensioni della sezione richiedono un'altezza sufficiente a creare il tirante idrico stabilito per l'esecuzione delle prove e fissare le camere e una larghezza funzione dell'estensione planimetrica dell'impronta di erosione che deve essere contenuta all'interno dell'area di inquadratura delle camere. Fra le possibili attrezzature di laboratorio il canale i cui rapporti rispettavano i criteri sopra elencati è quello della Figura 3.1 [Disegno di Peruzzi C.] le cui caratteristiche sono quelle riportate in Tabella 3.1.1.

Sul fondo sono state sistemate delle lastre di cemento dallo spessore di 10 cm necessarie allo svolgimento di un altro studio. Poichè ai fini della presente

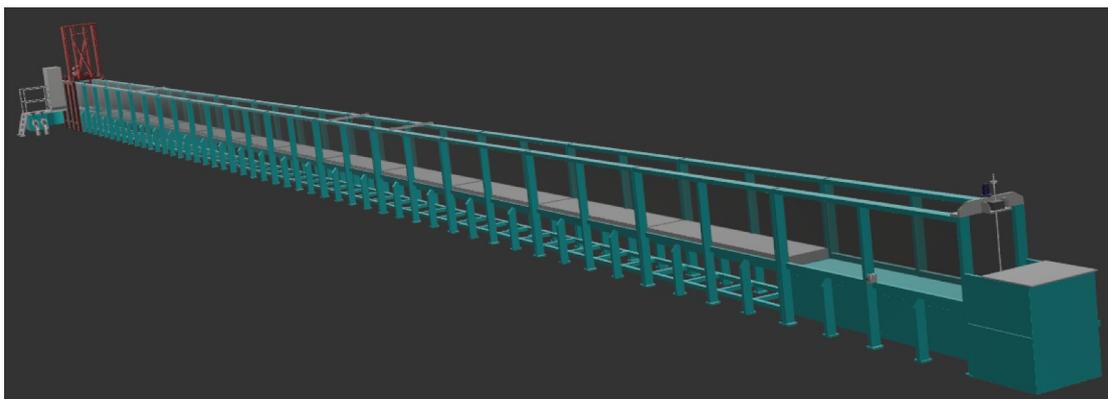


Figura 3.1: Rappresentazione 3D del canale di laboratorio. Disegno di Peruzzi C.

Lunghezza [m]	$\simeq 50$
Larghezza [m]	0.61
Altezza [m]	0.95
Pendenza [%]	0

Tabella 3.1: Caratteristiche del canale adoperato

ricerca è sufficiente una porzione circoscritta la zona utilizzata è stata ottenuta rimuovendo il penultimo elemento e colmando il volume creatosi pari a $0.122 m^3$ con materiale setacciato avente granulometria uniforme $d = 0.7 \text{ mm}$. Il canale in materiale metallico ha le pareti costituite da lastre in vetro sormontate da rotaie dentate lungo le quali muove un carrello contenente gli strumenti di misura azionabile mediante un motore elettrico. Un battitore posizionato nella zona di monte consente la formazione di un moto ondoso con frequenza e lunghezza d'onda variabile e una paratoia regolabile nella zona di valle determina il livello del pelo libero in funzione della portata erogata dalla pompa.

3.1.2 Caratteristiche della pompa

L'alimentazione del canale avviene per mezzo di una pompa FLYGT BIBO 2125.181 le cui specifiche tecniche fornite dal produttore in termini di curva caratteristica, rendimento e potenza assorbita sono le seguenti:

- **curva caratteristica $H(Q)$:** la curva caratteristica è tracciata per punti (con riferimento ad un numero di giri costante pari a 2900 giri/minuto) e riporta la prevalenza H (in ordinata) in funzione della portata Q (in ascissa). All'aumentare della portata si verifica una diminuzione della prevalenza più o meno significativa a seconda della tipologia dell'elemento. Nel grafico di Figura 3.2 il modello installato è identificato dalla curva 1 il cui andamento quasi rettilineo descrive una pompa a girante assiale indicata per portate elevate e prevalenze di qualche metro.

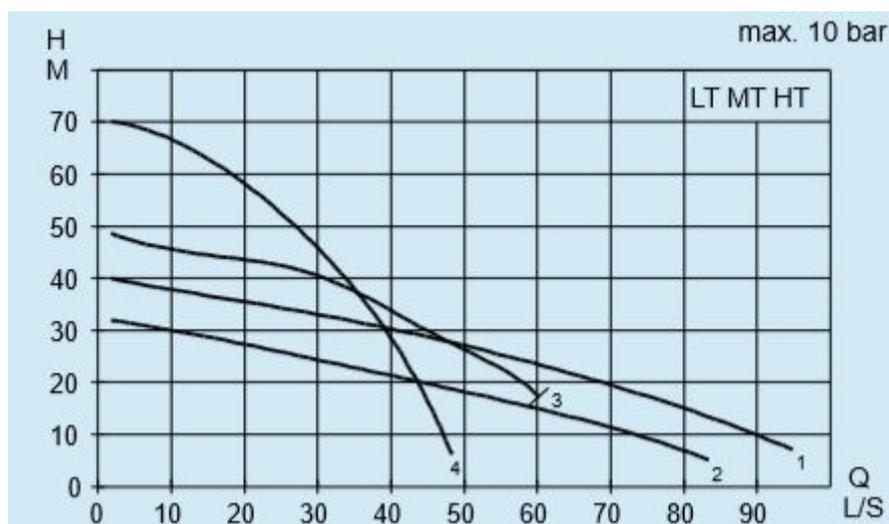


Figura 3.2: Curva caratteristica della pompa

- **rendimento $\eta(Q)$** : si identifica con la lettera η ed è il rapporto fra la potenza utile W_u e quella assorbita W .

$$\eta = \frac{W_u}{W} \quad (3.1)$$

La curva dei rendimenti ha un andamento dapprima ascendente e poi discendente e nel punto di massimo, che nel nostro caso vale 89%, si ottiene il funzionamento ottimale.

- **potenza assorbita $W(Q)$** : è ottenuta moltiplicando fra loro la portata (Q), la prevalenza (H) e la densità del fluido (ρ).

$$W = Q * \rho * H \quad (3.2)$$

e per il modello in questione la relazione che si ottiene è quella rappresentata dalla linea 1 in Figura 3.3.

Nel caso specifico l'impianto di alimentazione delle attrezzature di laboratorio è composto da un sistema di canali al di sotto della pavimentazione che consente uno sfruttamento dell'intero range di funzionamento della pompa in questione. In particolare la differenza di quota che deve essere vita risulta minore di 7 m e permette di erogare la massima portata pari a circa 95 l/s. Viceversa un recente lavoro di bypass consente di raggiungere valori prossimi allo zero operando uno strozzamento del flusso senza indurre sollecitazioni eccessive sulle condotte.

3.1.3 Misuratore di portata

La misura della portata avviene tramite un flussimetro elettromagnetico composto da un sensore, posizionato all'interno della tubazione, e da un convertitore.

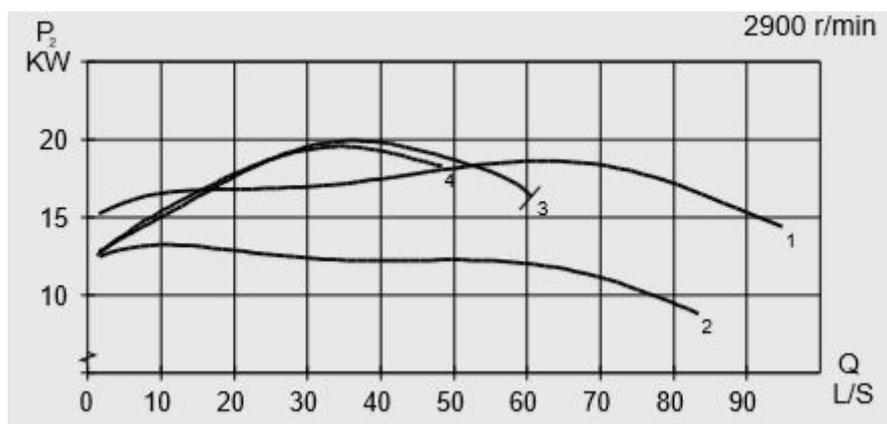


Figura 3.3: Curva della potenza assorbita

Tale tipologia di strumento consente una lettura bidirezionale del flusso garantendo stabilità delle misure, non richiede manutenzione e può essere installata su qualsiasi tubazione di diametro compreso fra DN-40 e DN-1000. In particolare il modello di convertitore adottato è l' MC 608A i cui intervalli di funzionamento relativi alle diverse unità di misura delle grandezze fisiche correlate sono riportati in Tabella 3.1.3. Per quanto riguarda il range di portata misurabile il fondo scala impostato di default corrisponde a un volume che genera una velocità di 10 l/s. Sulla base di tale valore si possono determinare i massimi registrabili e le tolleranze di picco. La precisione di misura con riferimento a una temperatura dell'acqua di 20 C e una pressione di 1 bar è pari a $\pm 0.2 \% \pm 2\text{mm/s}$ e corrisponde alla curva di Figura 3.4 da cui si evince che la precisione cresce all'aumentare del flusso per assestarsi a un valore prossimo allo 0.2 %.

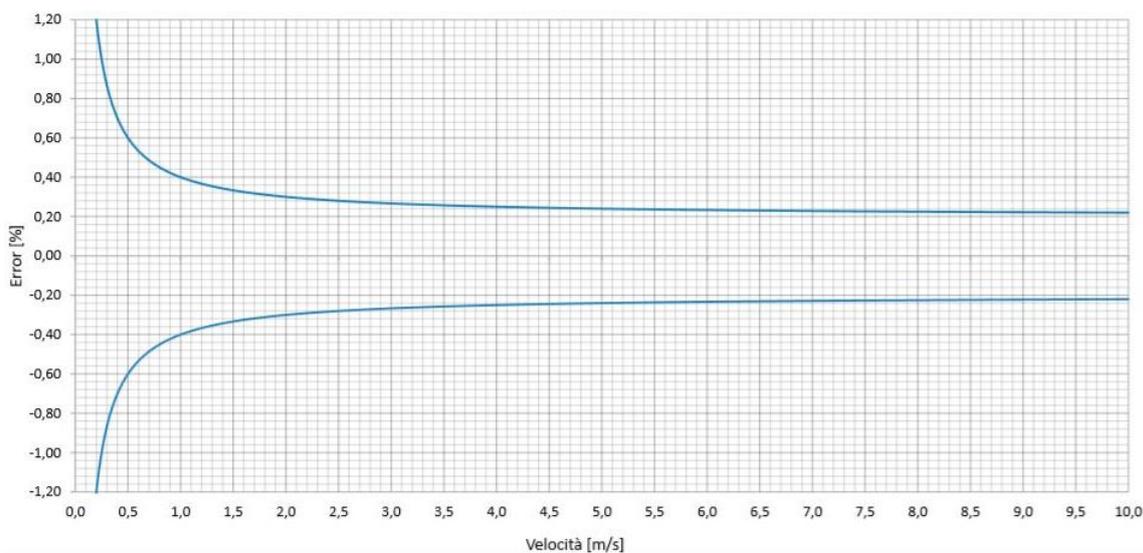


Figura 3.4: Precisione di misura in relazione alla velocità del flusso

Range di temperatura [C]	-20 +60
Range di frequenza [Hz]	50/60
Range potenziale elettrico [V]	100/240

Tabella 3.2: Range funzionamento convertitore MC 608 A

3.2 Caratteristiche delle camere

Le scelte delle camere per l'acquisizione delle immagini è stata basata su criteri dimensionali e di utilizzo. La procedura sperimentale richiede di dover immergere l'ottica dello strumento all'interno della corrente per evitare problemi legati all'insorgere dell'angolo di rifrazione all'interfaccia liquido-aria che avrebbe generato una distorsione delle immagini. Inoltre immagini acquisite da una posizione esterna al flusso presenterebbero un significativo effetto di riflessione e non risulterebbe possibile provvedere a un'elaborazione delle stesse per la scarsa nitidezza del fondo e della presenza di disturbi superficiali. Viceversa l'inserimento di un oggetto all'interno del flusso crea un'alterazione locale delle condizioni di moto per la variazione delle traiettorie delle particelle rispetto al caso di flusso indisturbato che è funzione della grandezza e della geometria dell'oggetto. Se il volume caratterizzato da tale disturbo è sufficientemente esteso da andare a sovrapporsi alla zona in cui si verifica lo scavo localizzato si ha un'influenza sui risultati sperimentali. Le GoPro Hero 5 session (Figura ??) per le loro dimensioni ridotte e la loro impermeabilità fino a 10 m senza l'aggiunta di un ulteriore case si configurano come la scelta ottimale. Il costo risulta estremamente ridotto se comparato con quello delle tradizionali attrezzature di laboratorio e vi è la possibilità di implementare il sistema variando il numero degli strumenti in funzione delle esigenze. Le specifiche tecniche reperite sul sito della casa produttrice sono riportate in Allegato. Poiché durante le prove sperimentali il processo di raggiungimento dell'equilibrio richiede tempi anche relativamente lunghi non risulta possibile utilizzare la "modalità video" per un monitoraggio completo dell'esperimento. In questo caso infatti la batteria non garantirebbe la durata necessaria e sarebbe richiesta una connessione ad una fonte di alimentazione esterna che non risulta possibile per la particolare configurazione sperimentale. A tal proposito i dati saranno ottenuti ricorrendo alla modalità foto con settaggio "Lineare - 10 MP" e gli intervalli temporali saranno definiti con andamento logaritmico. Nella fase iniziale in cui l'evoluzione del fenomeno risulta più rapida si adotteranno spaziature brevi che cresceranno di pari passo con l'incedere dello scavo. Nelle fasi sperimentali inoltre sarà necessario una contemporaneità degli scatti delle diverse GoPro. Questo sarà attuabile utilizzando l'apposito telecomando "Smart remote" (Figura ??) in grado di connettere simultaneamente 50 dispositivi e di mantenere il segnale fino a una distanza aerea di 180 m.



Figura 3.5: GoPro Hero5 Session (dx) e Smart Remote per il controllo simultaneo delle camere (sx)



(a).



(b).



(c).



(d).

Figura 3.6: Determinazione della distanza focale: (a). Target per la valutazione della messa a fuoco, (b). Posizionamento della camera per un livello del tirante idrico pari di 20 cm, (c). Immagine acquisita ad una distanza di 12 cm, (d). Immagine acquisita ad una distanza di 20 cm.

3.3 Determinazione della distanza focale

In questa fase, dopo aver livellato il materiale ottenendo una condizione di planarità, si è ricorso all'utilizzo di un target per indagare la distanza a cui posizionare le fotocamere per ottenere una corretta messa a fuoco dell'immagine. Il modello a scacchiera di lato 28 mm è stato stampato su un supporto cartaceo, plastificato e fissato a una piastra metallica che è stata posizionata sul fondo del canale. Tramite l'utilizzo di alcuni fili si è poi provveduto alla creazione di un ulteriore grigliato di lato 15 cm per delimitare un'area da usare come indicazione di massima per valutare l'ampiezza dell'inquadratura e gli effetti di deformazione connessi all'obbiettivo grandangolare.

Successivamente il canale è stato riempito progressivamente facendo variare il livello d'acqua da 12 a 20 cm con un Δ_y unitario. Per ogni altezza del tirante idrico indagata fra il minimo e i 19 cm si è acquisita un'immagine mantenendo l'asse di posizionamento della GoPro coincidente con la semilunghezza del quadrato rosso (Figura 3.3 (a).) e per il massimo valore pari a 20 cm si è provveduto ad operare un'ulteriore spostamento lungo la direzione del moto con passo $\Delta_x = 1$ cm sia in direzione di monte che in quella di valle per ottenere una maggiore distanza di presa dall'oggetto di riferimento (Figura 3.3 (b).)

Dall'analisi delle immagini si verifica che una distanza di 12 cm consente una corretta messa a fuoco della sola porzione centrale del fotogramma che in prossimità dei bordi risulta sfocato e presenta elevati effetti di distorsione (Figura 3.3 (c).). Al crescere del livello si associa un'attenuazione di entrambi i fenomeni, in particolare lo sfocamento persiste anche per la massima altezza indagata con riferimento alla sola porzione di immagine più prossima alla parete e le distorsioni risultano attenuate (Figura 3.3 (d).). Questo suggerisce che nelle fasi successive la minima distanza relativa fra il fondo del canale e fotocamera che andremo ad adottare sarà pari a 20 cm e, se consentito dalla zona di interesse da inquadrare, si andrà a ritagliare la porzione centrale delle immagini. Inoltre da uno zoom in corrispondenza del passaggio fra i quadrati di diverso colore si evidenzia un effetto di spostamento dei toni radiometrici del blu. Questo effetto si ripete anche per immagini scattate in aria ed è quindi associabile a un difetto dello strumento. Non essendo inoltre possibile, per detta altezza, contenere all'interno dell'immagine l'intera larghezza del canale sarà necessario disporre tutte le camere vincolate alla stessa parete, o nel caso di necessità di simmetria durante gli esperimenti, sistemarle sopra il flusso tramite un supporto.

3.4 Rapporti geometrici

Da un approccio teorico del problema emerge che il processo di erosione localizzata è influenzato dalle caratteristiche geometriche del problema analizzato, dall'altezza dell'acqua all'interno del canale e dalle dimensioni del sedimento che ne costituisce il fondo. Tali grandezze, opportunamente combinate, consentono di effettuare alcune valutazioni riguardanti l'evoluzione del fenomeno:

1. Se il rapporto fra la larghezza del canale B e il tirante idrico h è maggiore di 5 il flusso non risente degli effetti delle pareti e la sezione sarà sotto questo aspetto equiparabile a una sezione rettangolare infinitamente larga. Essendo la larghezza del canale fissa e pari a 61 cm si ricava che il livello dell'acqua nel rispetto di quanto detto non deve eccedere i 12 cm.

$$\frac{B}{h} > 5 \quad (\text{con } B = 61\text{cm} \implies h \simeq 12\text{cm}) \quad (3.3)$$

2. Se il rapporto fra la larghezza del canale B e il diametro della pila A è maggiore di 6 il fenomeno erosivo non risente degli effetti di bordo. Essendo la larghezza del canale fissa e pari a 61 cm il diametro della pila nel rispetto di quanto detto non deve essere superiore a 10 cm.

$$\frac{B}{A} > 6 \quad (\text{con } B = 61\text{cm} \implies A \simeq 10\text{cm}) \quad (3.4)$$

3. Fissando il livello nel canale a 12 cm il rispetto del rapporto tirante h su diametro della pila A implica che quest'ultima non dovrà avere diametro maggiore di 8 cm.

$$\frac{h}{A} > 1.25 \div 1.5 \quad (\text{con } h = 12\text{cm} \implies A = 8\text{cm}) \quad (3.5)$$

Il motivo di tale limitazione risiede nel fatto che per valori del rapporto maggiori la massima profondità di erosione all'equilibrio y_s sarà proporzionale alla sola dimensione della pila (Figura 3.7).

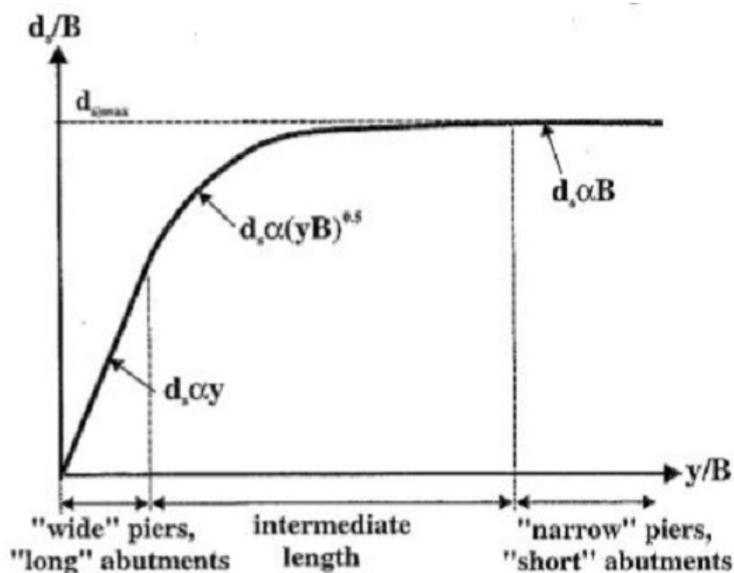


Figura 3.7: Influenza del rapporto tirante/diametro della pila sulla massima profondità di scavo. (y =tirante idrico, B =larghezza della pila, d_s =massima profondità di scavo).

4. Con l'ipotesi preliminare di adottare una pila di diametro A pari a 7 cm, essendo il sedimento di diametro uniforme $d = 0.7$ mm (il d coincide con il

d_{50}), bisogna verificare che il rapporto fra le due grandezze sia maggiore di 50.

$$\frac{A}{d_{50}} > 50 \text{ (con } A = 7\text{cm e } d = 0.7\text{mm} \implies \frac{A}{d_{50}} = 100) \quad (3.6)$$

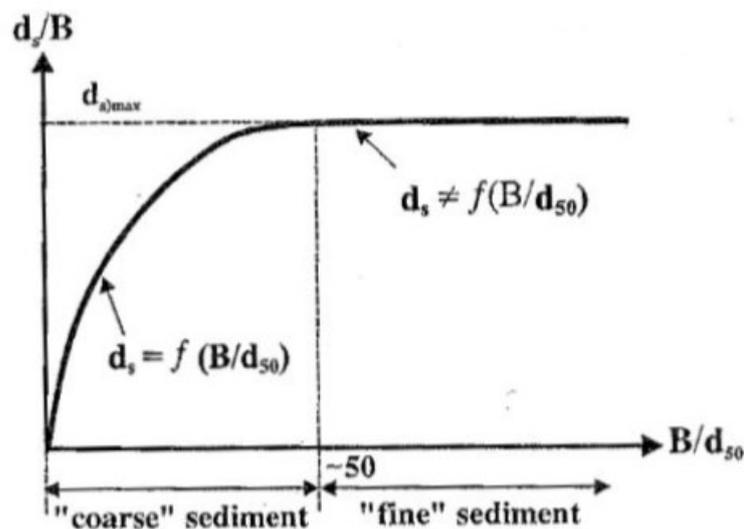


Figura 3.8: Influenza del rapporto diametro della pila/ d_{50} sulla massima profondità di scavo. (B =larghezza della pila, d_s =massima profondità di scavo).

Il motivo di tale limitazione risiede nel fatto che per valori del rapporto maggiori si è in presenza di un sedimento per il quale la massima profondità di erosione all'equilibrio y_s non dipende più dal rapporto precedentemente introdotto (Figura 3.8).

Essendo già a conoscenza del diametro adottato per quel che concerne pila e sedimento la seconda e la quarta condizione sono verificate. Quello che sarà necessario verificare con l'avanzare delle fasi sperimentali è il tirante idrico che effettivamente sarà necessario utilizzare per ottenere un'area di inquadramento sufficiente a monitorare l'intero fenomeno erosivo durante tutto il suo sviluppo. Sulla base di quanto visto si può comunque asserire che all'aumentare del livello la terza condizione risulta sempre più soddisfatta mentre la prima perde di validità e per $h > 12$ cm si ha che durante la prova saranno presenti le influenze dovute agli strati limite indotti dalla parete. Poiché il tirante idrico ha chiaramente influenza sulle condizioni del moto quest'ultime sono analizzate nel capitolo successivo.

Capitolo 4

Validazione metodo e prova

Questo capitolo è dedicato alle modalità e ai procedimenti adottati in fase di taratura e validazione del metodo. Nella prima fase si indaga la precisione ottenibile in funzione del numero di camere utilizzate e la qualità del Digital Elevation Model (DEM) che ne consegue, e sulla base del numero di camere a disposizione, si provvede al calcolo di un volume di scavo confrontando i risultati ottenuti dall'elaborazione dei fotogrammi con il valore relativo a una geometria nota. Nella seconda fase, si descrivono le caratteristiche della corrente di moto uniforme relative alla configurazione adottata per lo svolgimento di una prova in canaletta.

4.1 Influenza del numero di camere sulla precisione e sulla qualità del DEM

Sulla base dell'assunzione che due camere sono il minimo necessario per poter effettuare una ricostruzione mediante tecniche fotogrammetriche, l'obiettivo prefissato è quello di stabilire come varia la precisione di misura e la qualità di un Digital Elevation Model in funzione del numero di dispositivi. Il riferimento ad una condizione del fondo statica consente di acquisire le immagini prescindendo da una situazione di contemporaneità così che risulta possibile utilizzare una sola camera posizionata secondo delle configurazioni prestabilite.

In particolare si sono indagate 5 diverse casistiche identificate dalle lettere alfabetiche e corrispondenti a 2, 3, 4, 5 e 11 camere (Figura 4.1). L'altezza di presa pari a 20 cm è identica per ogni scatto e corrisponde alla quota del pelo libero mentre le distanze rispettive sul piano orizzontale espresse in cm si evincono dalla figura. Durante l'acquisizione si è fatta ruotare la camera, vincolata al vetro del canale tramite l'apposito supporto a ventosa, solo rispetto a un asse verticale per consentire una migliore inquadratura del target di calibrazione. Quest'ultimo è costituito da una piastra metallica (15cm x 15cm) su cui sono posizionati dei cilindretti graduati di diversa altezza (Figura 4.2). Essi consentono grazie alla loro informazione non uniforme in direzione z di poter effettuare una riproduzione del fondo più precisa di quella ottenibile mediante l'utilizzo di un target classico di tipo bidimensionale.

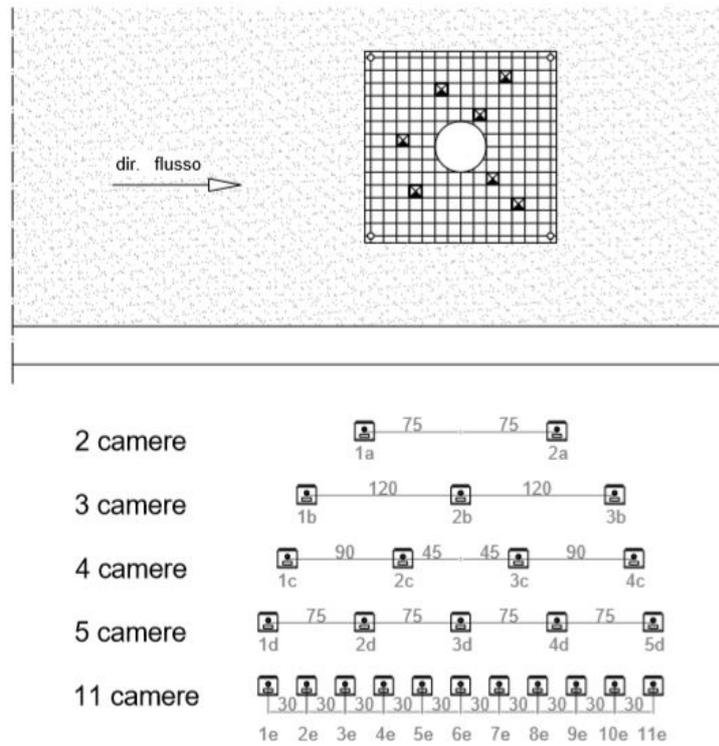


Figura 4.1: Configurazioni di acquisizione in campo statico nel caso di utilizzo di 2, 3, 4, 5 e 11 camere per la determinazione dell'influenza del numero di immagini sulla precisione dei risultati.

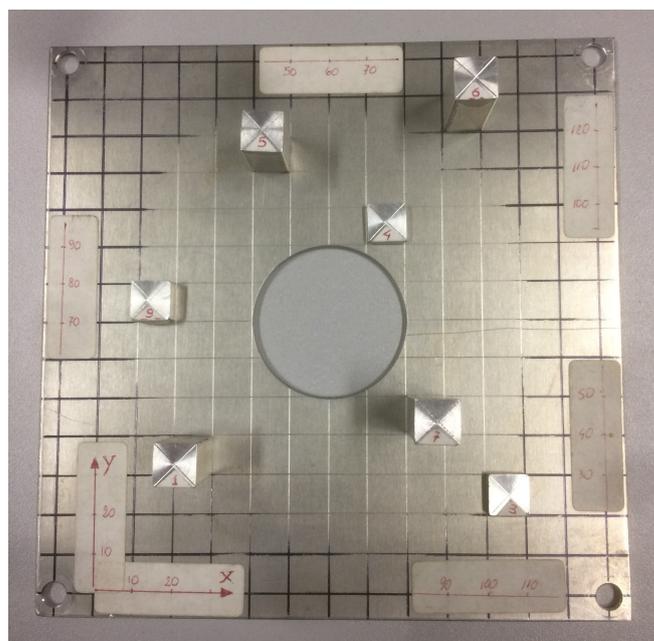


Figura 4.2: Target di calibrazione metallico con cilindretti graduati.

numero cilindro	1	3	4	5	6	7	9	v1	v2	v3	v4
numero punto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x [mm]	25	105	75	45	95	85	15	0	120	0	120
y [mm]	35	25	95	115	125	45	75	0	0	140	140
z [mm]	20	2.7	2.8	20	25	30.1	5	0	0	0	0

Tabella 4.1: Coordinate spaziali dei punti noti in cm.

Per l'elaborazione delle immagini si è utilizzato il software professionale Agisoft PhotoScan Professional tramite le seguenti operazioni:

- Caricamento delle immagini: le immagini vengono caricate attraverso l'apposito comando "Add Photos" all'interno del Workspace e sono la base sul quale il software provvede alle elaborazioni grafiche.
- Allineamento delle immagini: con il comando "Align Photos" si ottiene la posizione e l'orientamento di ogni camera nello spazio e si perviene alla nuvola sparsa di punti. L'accuratezza dell'allineamento utilizzata è quella massima possibile "Highest". Il software lavora sulle immagini mantenendone la dimensione originale garantendo una maggiore precisione a discapito di un tempo computazionale più elevato nel matching dei punti.
- Identificazione di punti noti sulle immagini: le coordinate geometriche di alcuni punti noti della piastra metallica e dei cilindretti sono caricati tramite un file di testo su PhotoScan. Essi fanno riferimento alla posizione del centro dei cilindri e degli spigoli del target e sono riportati nella Tabella 4.1.

Agendo singolarmente sulle varie immagini si posizionano i marker in corrispondenza delle coordinate appena riportate. Essi vengono utilizzati dal software per la fase successiva.

- Ottimizzazione dell'allineamento: i parametri di orientamento interno ed esterno calcolati durante la fase di allineamento sono ottenuti dai soli dati riguardanti le immagini e possono dunque essere affetti da errori. La precisione dei parametri dipende da molti fattori quali la sovrapposizione delle immagini limitrofe e la forma delle superfici degli oggetti. Gli errori che ne derivano conducono a deformazioni non lineari nel modello finale che non vengono rimosse durante la georeferenziazione tramite una trasformazione lineare a 7 parametri (3 per la rotazione tre per la traslazione e uno per la scala) [Manuale Agisoft PhotoScan]. Tali deformazioni vengono rimosse tramite il processo di ottimizzazione basato sui marker posizionati prima. Durante questa fase di PhotoScan migliora la precisione delle coordinate e i parametri della camera minimizzando la somma fra gli errori di riproiezione e quelli di allineamento dei punti noti.
- Costruzione della nuvola densa di punti: la costruzione della nuvola densa di punti è la prima operazione per l'elaborazione del modello 3D. Photoscan sulla base delle posizioni delle camere calcola le informazioni complete e

necessarie di ogni fotocamera per combinarle in un'unica nuvola di punti densa. Come per la fase di allineamento è possibile selezionare la qualità del processo. Qualità elevate vengono utilizzate per ottenere soluzioni più dettagliate con una geometria più accurata a discapito di un maggior tempo computazionale. Un'ulteriore impostazione consente di settare la modalità di calcolo delle mappe di profondità tenendo presente che immagini di scarsa qualità, poco dettagliate o la presenza di rumore possono condurre a valori anomali. Per risolvere valori errati il programma ricorre a diversi algoritmi in funzione delle diverse esigenze. Se la geometria da ricostruire è complessa e ha numerosi dettagli di piccole dimensioni in primo piano l'impostazione consigliata è quella di una profondità di filtro delicata, viceversa se la zona da ricostruire non contiene piccoli dettagli, sarà ragionevole scegliere un filtro aggressivo per risolvere i valori anomali. Ulteriori possibilità sono la selezione ad un filtro moderato che genera risultati compresi fra i precedenti e una disattivazione dell'opzione che produce una nuvola densa che potrebbe presentare molto rumore.

- **Costruzione del DEM (digital elevation model):** Photoscan permette di generare e visualizzare un modello digitale di elevazione (DEM). Esso può essere rasterizzato a partire dalla nuvola di punti densa precedentemente ottenuta o in alternativa da una nuvola sparsa o una da una mesh. La prima modalità è quella che consente di ottenere i risultati più accurati anche in previsione di effettuare successivamente misure di distanze, aree, volumi o generare delle sezioni di una parte della scena. Il DEM può essere generato con riferimento ad un rettangolo di selezione adottando diverse modalità di interpolazione. Se quest'ultima viene disabilitata i risultati della ricostruzione saranno precisi poichè saranno riprodotte solamente le aree corrispondenti ai punti della nuvola densa. Viceversa se la modalità di interpolazione è abilitata (scelta consigliata dal programma) PhotoScan calcolerà il DEM su tutte le aree della scena visibili almeno su un'immagine. Una terza voce selezionabile è la modalità estrapola tramite la quale si perviene a un modello senza fori.

Le operazioni sono state eseguite settando le medesime impostazioni per ognuno dei cinque casi. Così facendo si evita l'influenza della qualità dell'elaborazione sui risultati e si possono ottenere dei valori da confrontare funzione del solo numero di camere. In particolare la fase di allineamento dei fotogrammi è stata eseguita nella modalità Highest, la nuvola di punti è stata ricavata in qualità Ultra High con filtro aggressivo e per l'ottenimento del DEM si è ricorso alle impostazioni consigliate dal programma.

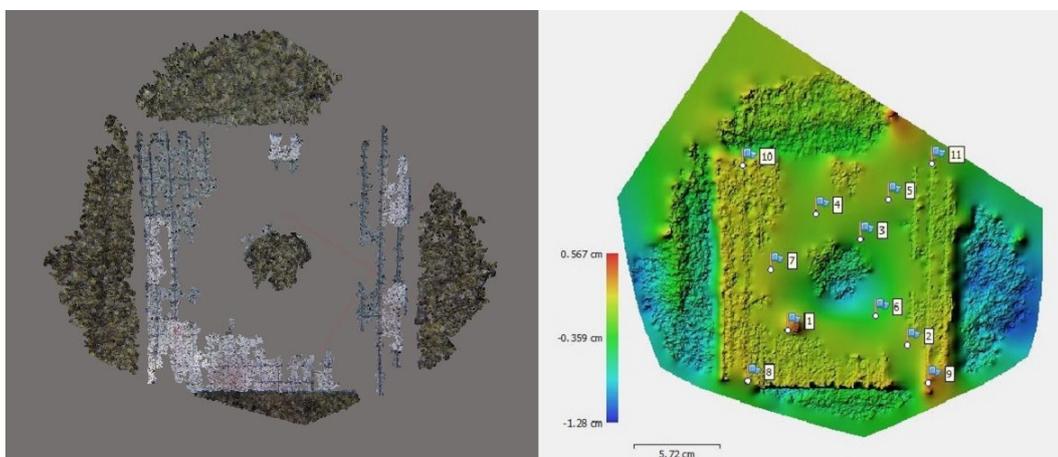
I risultanti ottenuti dalle fasi di elaborazione (Tabella 4.1) evidenziano che l'utilizzo di tre camere consente di dimezzare l'errore lungo x (direzione del flusso) e ridurre di quattro volte quello in direzione y (direzione ortogonale al flusso). Con 4 camere si perviene a un aumento della precisione anche delle coordinate altimetriche e con 5 gli errori lungo i tre assi assumono valori che risultano poco variabili anche all'aumentare del numero di dispositivi.

numero camere	X err [mm]	Y err [mm]	Z err [mm]	Errore [mm]	Errore [pixel]	DEM [mm/pixel]
2	1.27	2.49	1.24	3.06	1.68	0.0867
3	0.54	0.64	0.98	1.3	1.39	0.0901
4	0.55	0.40	0.34	0.75	1.55	0.0879
5	0.37	0.28	0.27	0.54	2.09	0.087
11	0.36	0.35	0.24	0.56	1.92	0.0869

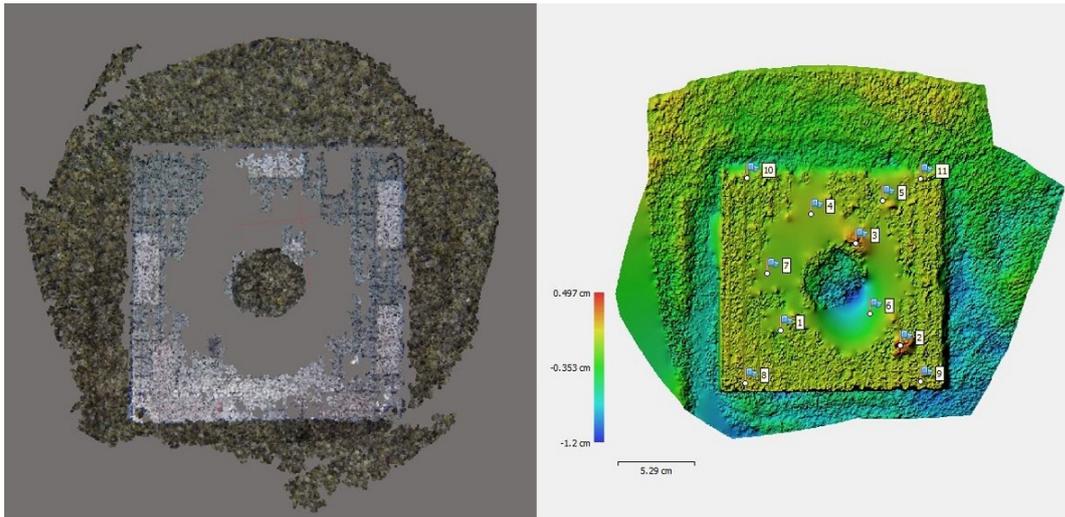
Tabella 4.2: Errori attesi in funzione del numero di camere.

Per quanto riguarda la qualità della nuvola densa di punti e del DEM (da Figura 4.1 a Figura 4.1), al crescere del numero di camere utilizzato, si riscontra un aumento dell'estensione del modello e un incremento nella precisione di riproduzione. Inoltre si presenta un restringimento dell'intervallo altimetrico soprattutto nelle zone più distanti dal punto di presa per un'attenuazione dei fenomeni di distorsione associati all'aumento della robustezza del metodo. Anche in questo caso i miglioramenti più significativi si hanno nell'intervallo fra 2 e 5 GoPro, tuttavia va evidenziata la difficoltà nella ricostruzione dei cilindretti graduati dovuta alla loro limitata impronta e all'uniformità della superficie del materiale.

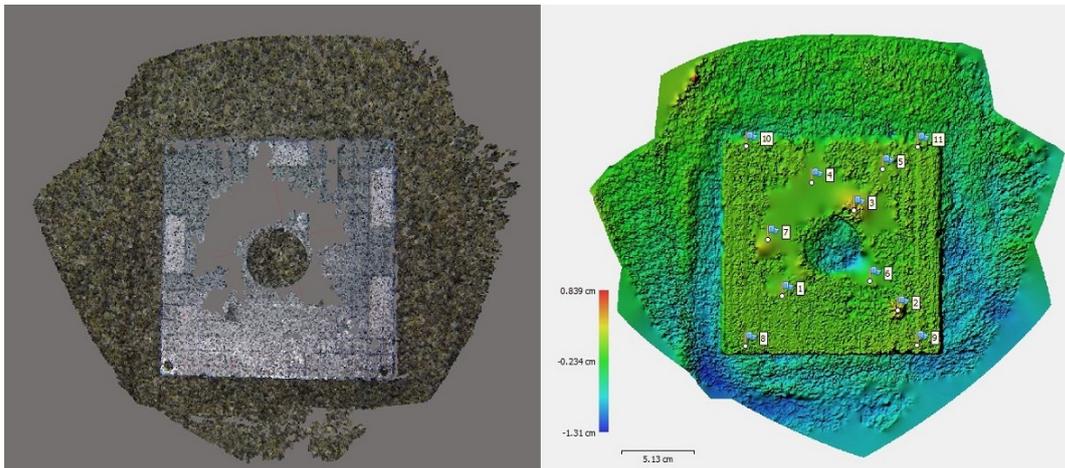
Un'ulteriore informazione a riguardo della precisione delle misure può pervenire da una sezione dei vari DEM. Essa viene ottenuta adottando una direzione parallela al bordo del canale e una comparazione fra il caso di due e di cinque camere è riportato nella Figura 4.1. In entrambi i grafici si nota come sia presente un forte effetto di disturbo nella riproduzione che cresce all'aumentare del livello di dettaglio della nuvola di punti. Nel caso di quattro camere si riscontra una maggiore planarità della superficie metallica mentre il sedimento circostante, che non era comunque stato livellato prima dell'acquisizione delle immagini, risulta mal riprodotto. Infine si evidenzia un'anomalia nella differenza di quota fra il fondo del canale e il piano di calibrazione rispetto al caso reale.



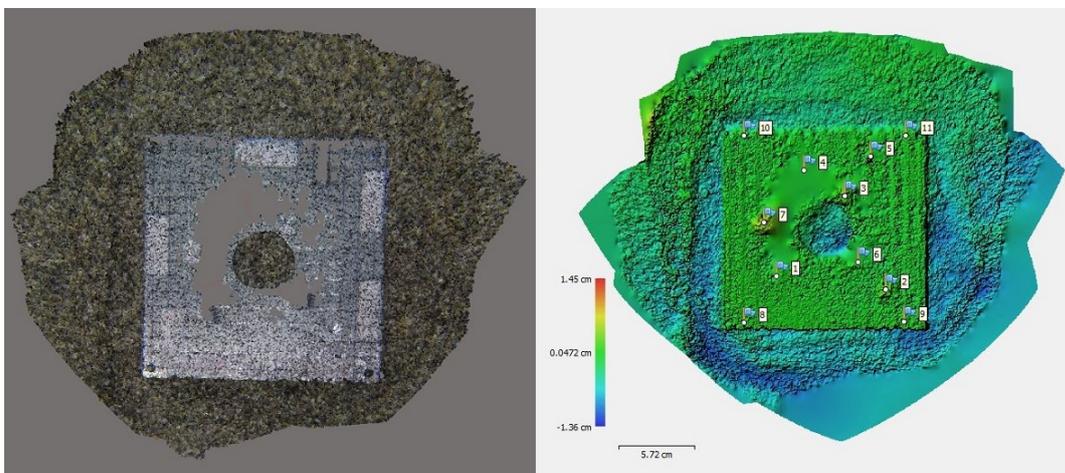
(a).



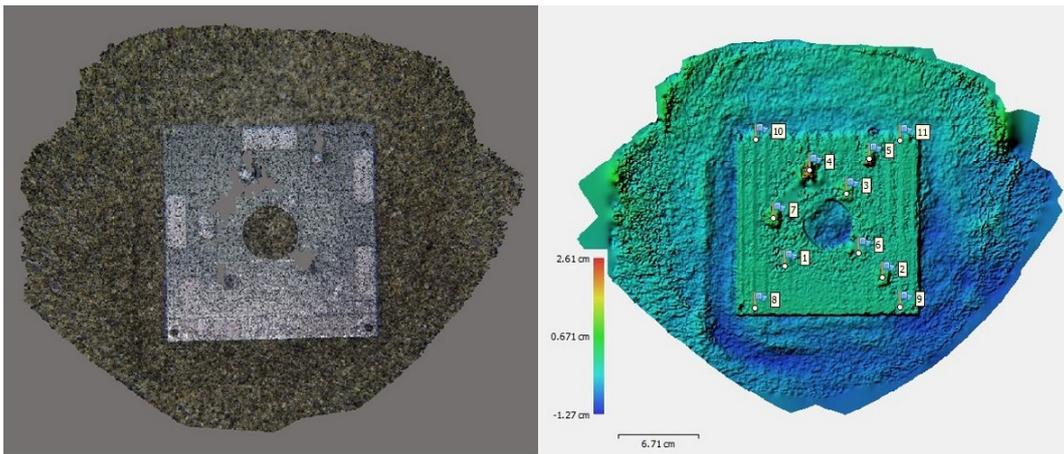
(b).



(c).

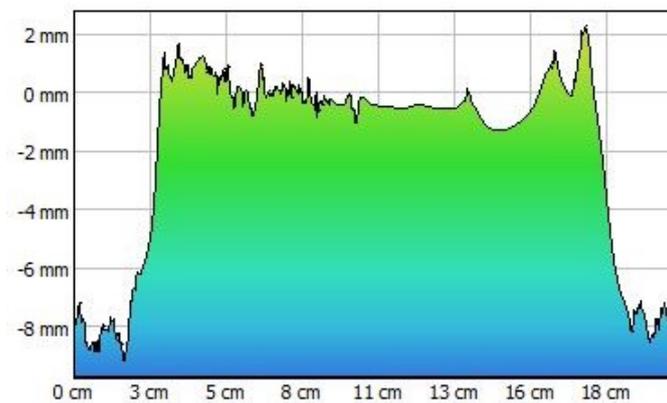


(d).

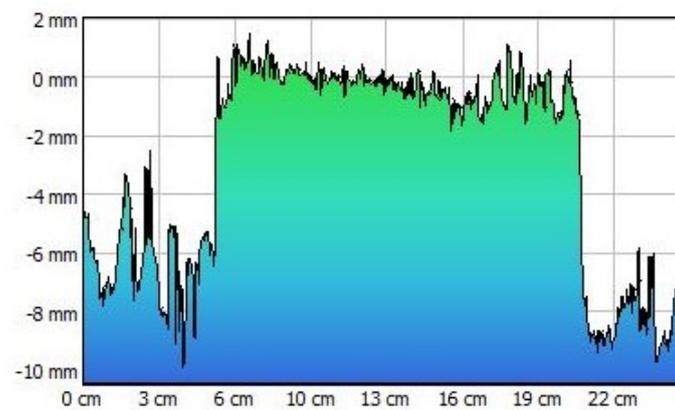


(e).

Figura 4.3: Dense cloud di qualità Ultra Hight con filtro aggressivo, derivata dai punti omologhi in seguito al calcolo delle posizioni spaziali delle camere, e DEM rasterizzati a partire dalla nuvola densa al variare del numero di immagini: (a). 2 immagini, (b). 3 immagini, (c). 4 immagini, (d). 5 immagini, (e). 11 immagini



(a).



(b).

Figura 4.4: Sezione DEM in corrispondenza del target: (a). 2 immagini, (b). 5 immagini.

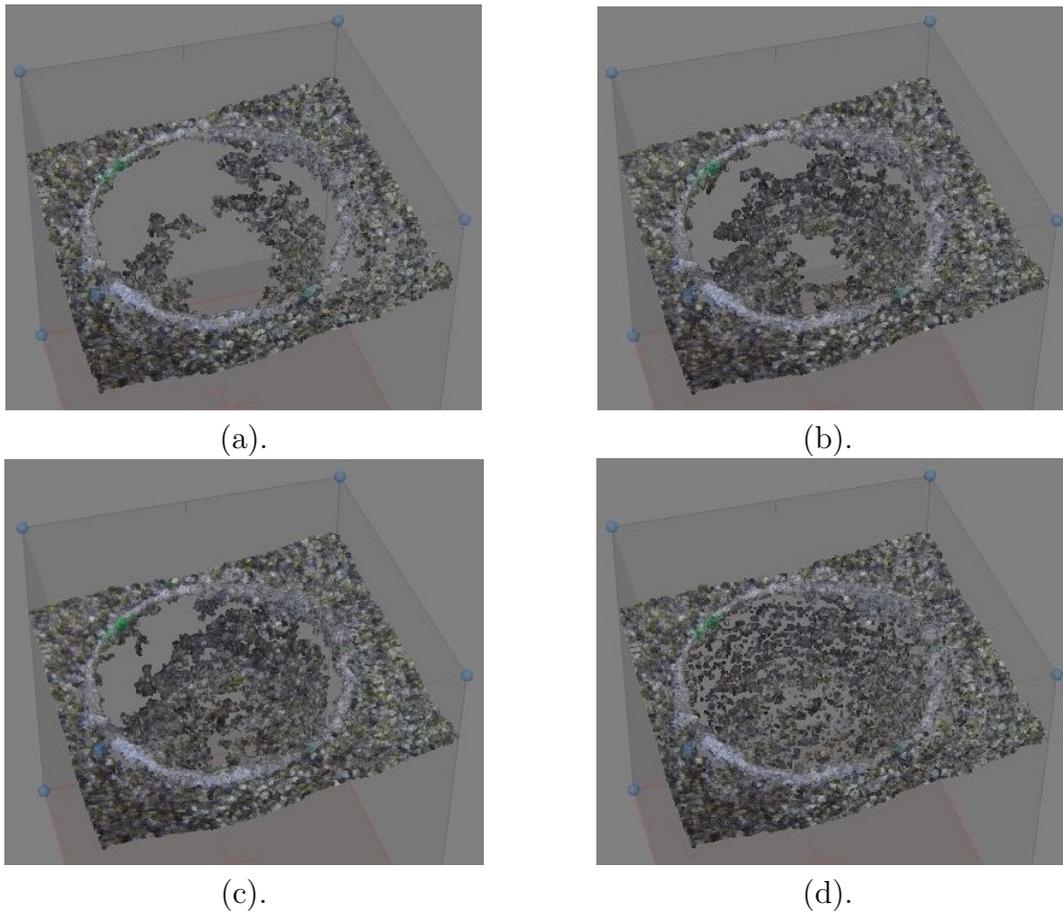


Figura 4.5: Dense cloud del volume di scavo noto con diverse qualità di filtro: (a). delicato, (b). moderato, (c). aggressivo, (d). disabilitato.

4.2 Validazione volume

L'obiettivo prefissato è valutare la precisione di calcolo di un volume di scavo partendo dalle immagini. In particolare il valore ricavato tramite l'utilizzo del software viene confrontato con quello relativo a una geometria nota. Poichè il materiale presenta caratteristiche di incoerenza che non consentono una modellazione del fondo, l'ottenimento di un profilo prestabilito necessita l'inserimento nel letto del canale di una semisfera rivestita con sedimento delle medesime caratteristiche. Per quanto riguarda la fase di acquisizione, le immagini contenenti il target di calibrazione e lo scavo sono state acquisite mediante l'utilizzo delle due camere a disposizione, disposte secondo la configurazione a. indagata al punto precedente.

Inserendo i primi due fotogrammi all'interno di PhotoScan e seguendo le fasi illustrate al punto precedente, si sono ottenuti parametri di orientamento interno delle camere e la loro posizione spaziale identificata delle coordinate e dagli angoli di rotazione intorno agli assi coordinati.

I valori di X , Y , Z , $pitch$, $roll$ e yaw sono stati utilizzati successivamente come dato di input per l'elaborazione delle immagini contenenti lo scavo. A partire dai punti ricavati dalla fase di matching si è ricostruita la nuvola densa in qualità

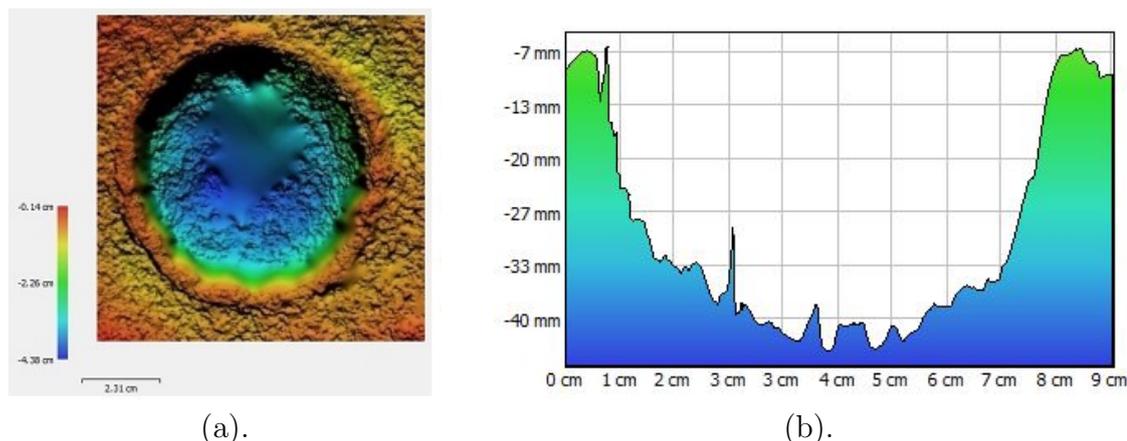


Figura 4.6: Validazione del volume della semisfera: (a). DEM , (b). sezione

Ultra hight facendo variare il filtro utilizzato dal programma (Figura 4.5). Nel passaggio dal filtro delicato a quello aggressivo si evidenzia un aumento del numero di punti e nel caso di disattivazione dello stesso si riscontra un aumento di uniformità nella riproduzione. Per tale motivo con riferimento a quest'ultima configurazione si procede alla generazione del DEM. Tramite l'utilizzo di un tools del programma si seziona lo scavo e circoscrivendo un'area che lo contiene si perviene al calcolo dell'area contenuta impostando un piano di riferimento in corrispondenza del bordo della semisfera (- 7 mm). Dalla sezione si evidenzia nuovamente la presenza di un disturbo nella riproduzione delle immagini e il calcolo del volume di scavo conduce a un errore di circa il 10%.

4.3 Condizioni del moto

Come visto nella fase introduttiva una velocità del flusso variabile fra gli 0 e i 0,58 m/s non influenza in modo sostanziale gli errori [Wei L., Trevor G. et AL.]. Si stabilisce dunque di adottare durante la fase sperimentale una velocità ricadente all'interno di questo intervallo che consenta allo stesso tempo di ricreare le condizioni di clear-water scour. Tramite delle prove in canaletta si è determinato che il posizionamento delle camere a 20 cm dal fondo non consente di inquadrare in modo completo il volume di scavo che si realizza nella porzione di monte della pila per lunghi periodi. Si rende dunque necessario incrementare il livello del tirante per aumentare la zona di presa dei dispositivi e consentire di catturare al centro dei fotogrammi l'evoluzione del fenomeno erosivo evitando quelle porzioni di bordo affette da maggiori errori di distorsione. Il valore viene fissato in 42 cm ed è quindi possibile definire la relazione che lega velocità e portata.

La relazione portata - velocità media della corrente può essere determinata in modo approssimativo trasformando i valori in ingresso alla sezione del canale da l/s a m^3/s e dividendoli per l'area ottenendo la relazione lineare di Figura 4.7.

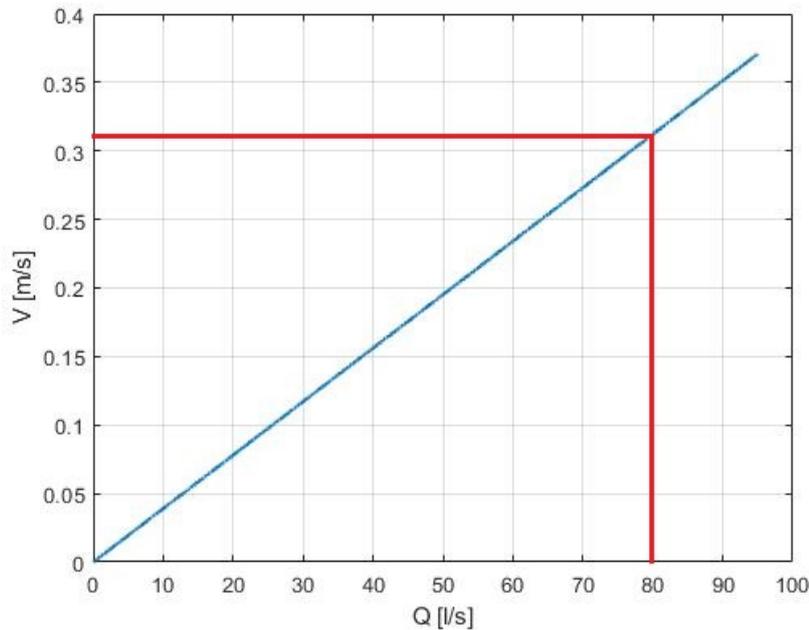


Figura 4.7: Relazione fra portate in l/s e velocità in m/s per un tirante di 42 cm.

4.4 Calcolo delle condizioni di incipiente movimentazione

La condizione di clear-water scour, ovvero di assenza di trasporto solido si verifica in un intervallo del rapporto fra la velocità del moto e quella critica compresa fra 0.5 e 1. Al di sotto di tale range non si verifica erosione localizzata in corrispondenza della pila e al di sopra si ha movimento delle particelle sul fondo del canale. Si provvede dunque dapprima al calcolo di U_{cr} utilizzando la relazione di Hancu (1971):

$$V_c = (1 \div 1.2) \sqrt{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.2} \quad (4.1)$$

Adottando un coefficiente moltiplicativo pari al valore medio si ottiene che V_c vale 0.421 m/s. Partendo da esso si ricava la velocità da adottare durante la prova sulla base della quale si determinano le tensioni all'interfaccia del sedimento. Ipotizzando un rapporto fra le velocità pari a 0.75 si ottiene $V = 0.312$ m/s a cui corrisponde una portata di 80 l/s. Non potendo fare l'ipotesi di sezione infinitamente larga che consente di approssimare il raggio idraulico con l'altezza del tirante idrico per il calcolo di Re si fa riferimento al valore ottenuto come rapporto fra l'area e il perimetro bagnato. Le caratteristiche del flusso, determinate attraverso il calcolo dei numeri adimensionali di Re e Fr , indicano la presenza di una corrente lenta ($Fr < 1$) con moto turbolento completamente sviluppato ($Re > 2000$). Le relazioni utilizzate sono le seguenti:

$$R = \frac{A}{p} = 0.175 [m] \quad (4.2)$$

$$Re = \frac{uR}{\nu} = 54600 \quad (4.3)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} = 0.153 \quad (4.4)$$

in cui u è la velocità del flusso, h il livello del tirante idrico e ν la viscosità cinematica che per l'acqua vale 10^{-6} . Note le proprietà del sedimento si possono calcolare la scabrezza ϵ , il coefficiente di resistenza C_d e la velocità di attrito U_* . In prima istanza per il calcolo di C_d si ipotizza un regime turbolento di fondo completamente scabro che sarà da verificare attraverso il calcolo del numero di Reynolds sedimentologico Re_*

$$\epsilon = 2.5 d_{50} = 1.75 * 10^{-3} [m] \quad (4.5)$$

$$C_d = -5.75 \log_{10} \left(\frac{\epsilon}{13.3 f R} \right) = 17.83 \quad (4.6)$$

$$U_* = \frac{U}{C_d} = 0.0175 [m/s] \quad (4.7)$$

$$Re_* = \frac{U_* \epsilon}{\nu} = 30.62 < 70 \quad (4.8)$$

in cui f è un fattore di forma che nel nostro caso, essendo prossimi alla situazione di $B \simeq 2y$ vale 0.95 [Marchi E., Rubatta A., 1981]. Non essendo verificata l'ipotesi prima proposta è necessario ricalcolare C_d facendo riferimento ad una formulazione valida nella zona di transizione fra la condizione di fondo liscio e quella di fondo scabro che tiene in conto l'effetto del numero di Reynolds. In questo caso l'applicazione della relazione necessita di un ciclo iterativo fino a convergenza.

$$C_d = -5.75 \log_{10} \left(\frac{C_d}{Re_* f} + \frac{\epsilon}{13.3 R f} \right) = 16.977 \quad (4.9)$$

Si ricalcola nuovamente la velocità di attrito pari a 0.0183 [m/s] attraverso la quale è possibile calcolare la tensione tangenziale τ e il numero di Shields τ_* :

$$\tau = \rho u_*^2 = 0.334 [N/m^2] \quad (4.10)$$

$$\tau_* = \frac{\tau}{d_{50} * (\gamma_s - \gamma)} = 0.0294 \quad (4.11)$$

Questo valore di Shields deve essere confrontato con quello di incipiente movimentazione che corrisponde alle condizione di innesco del trasporto solido di fondo. Più precisamente esso si ottiene individuando il valore di Shields corrispondente al nuovo Reynolds sedimentologico, ovvero 32.02, sul diagramma in Figura. 4.8.

Dal confronto

$$\tau_{*c} > \tau_* \implies 0.036 > 0.0294 \quad (4.12)$$

Si può dunque evidenziare l'assenza di trasporto solido e alla medesima conclusione si giunge anche da una valutazione visiva in canaletta per la geometria e le velocità sopra indicate.

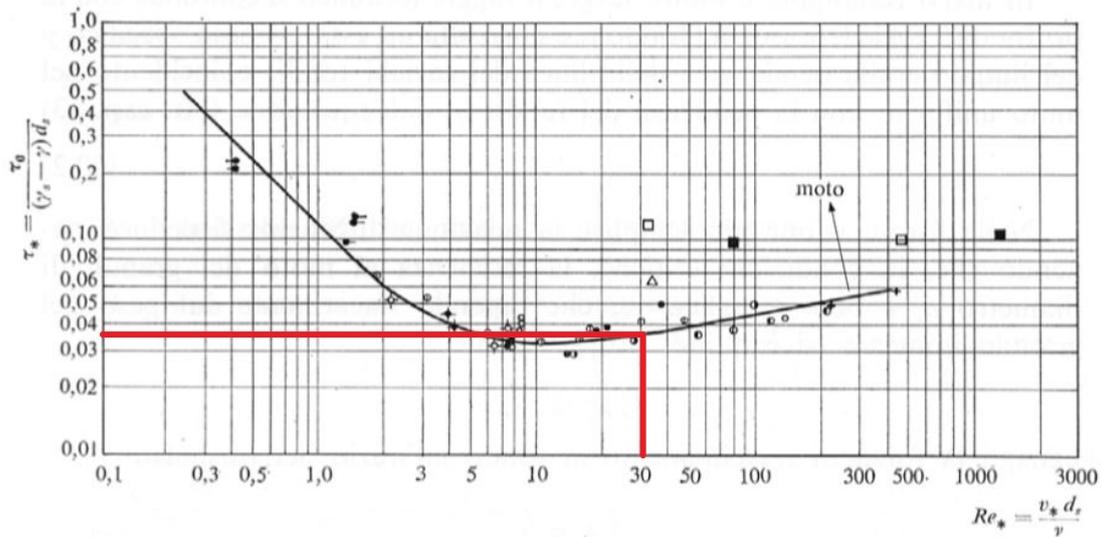


Figura 4.8: Diagramma di Shield. [Marchi E., Rubatta A., 1981]

4.5 Esecuzione della prova

Per l'esecuzione della prova, come visto nelle sezioni precedenti si è adottato un tirante idrico pari a 42 cm e una velocità di 0.312 m a cui corrisponde una portata in ingresso di 80 l/s. La pila circolare utilizzata ha diametro pari a 70 mm e sulla sua superficie è stato applicato un metro per valutare in modo visivo la massima profondità di scavo nel tempo. Le camere sono state vincolate a una traversina in modo da poterle posizionare al di sopra del flusso immergendo l'ottica all'interno della corrente e successivamente sono state orientate per determinare la configurazione ottimale di inquadramento del fondo del canale (Figura ??). Poiché da prove preliminari si è verificato che la scarsa illuminazione dell'ambiente determinava un lungo tempo di scatto sono state disposte da ambo i lati 6 luci led da 90mA. Così facendo si è passati da un tempo di acquisizione di 1/12 a 1/125 di secondo ottenendo una sensibile riduzione degli effetti di trascinamento delle particelle in moto all'interno dei fotogrammi. Dopo aver livellato il fondo, composto da sedimento uniforme di 0.7 mm e aver settato l'altezza della paratoia di valle per fissare il livello, sono state acquisite le immagini del target di calibrazione, utilizzate per determinare i parametri di orientamento delle camere. Tali valori sono necessari come input per l'elaborazione delle immagini relative agli istanti di prova successivi. Gli intervalli di acquisizione adottati riportati sono più ravvicinati nella fase iniziale in cui si ha una rapida evoluzione del fenomeno e diminuiscono al tendere alle condizioni di equilibrio. Dopo aver rimosso il target, nella medesima posizione è stato inserito il pilastro. L'inserimento nelle condizioni di moto stabilite è stato reso possibile dal tipo di sedimento adottato che non ha originato uno spostamento del materiale contestuale alla posa. In alternativa sarebbe stato possibile provvedere al suo posizionamento in condizioni statiche e regolare la paratoia e la portata in una fase successiva. Tale procedimento, comunque laborioso per il posizionamento degli organi di portata e regolazione,



(a).



(b).



(c).



(d).

Figura 4.9: Immagini relative alla configurazione sperimentale: (a). Particolare dello scavo , (b). Posizionamento delle GoPro, (c). Vista laterale dello scavo e posizionamento luci led, (d). Vista laterale con inserimento camere nel flusso

avrebbe prodotto una fase iniziale transitoria. I risultati relativi alla prova della durata di 7 ore sono riportati nel capitolo successivo.

Capitolo 5

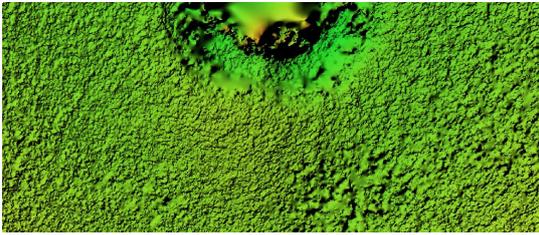
Analisi dei risultati

Questo capitolo contiene l'analisi dei risultati ricavati dalla prova di erosione in canaletta in merito alla precisione ottenuta e le considerazioni relative all'andamento del volume e della massima profondità di scavo nel tempo.

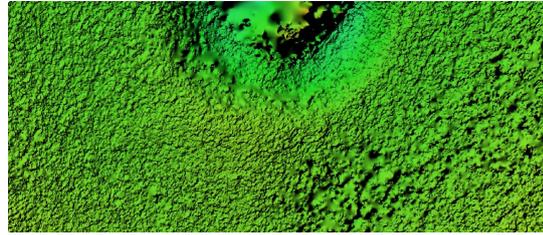
Poichè l'attrezzatura a nostra disposizione risulta limitata a due camere, non si è potuto monitorare l'evoluzione dell'intero fenomeno. Come detto nei capitoli precedenti infatti, la ricostruzione fotogrammetrica, necessita che ogni punto per essere riprodotto venga riconosciuto nella fase di matching su almeno due fotogrammi. L'inserimento della pila invece, origina delle zone buie nelle quali alcuni punti vengono acquisiti da una sola immagine. Si crea dunque una sorta di cono d'ombra che comprende una porzione a lato e quella a valle del cilindro, in cui il volume di scavo e la successiva deposizione del sedimento non possono essere monitorati. Tuttavia in fase preliminare, ai fini di una valutazione di fattibilità del metodo e di una prima validazione qualitativa della relazione teorica di Manes e Brocchini ci è sufficiente determinare l'entità dell'erosione della porzione di monte della pila.

L'evoluzione temporale con riferimento agli intervalli monitorati è riportata dalla Figura 5.1. Nella prima fase si può notare come il processo è molto rapido e nel giro di qualche minuto si perviene alla formazione di una linea di discontinuità che separa una zona adiacente alla pila da una più esterna. Da una prima valutazione visiva delle traiettorie di moto assunte dalle particelle, questo comportamento può essere spiegato come la somma di due processi. Il primo a ridosso dell'elemento, dovuto al vortice a ferro di cavallo originato dal moto discendente conseguente all'annullamento della velocità del fluido in corrispondenza della parte di monte della pila. L'asportazione delle particelle è dunque imputabile alle forze di attrito all'interfaccia, avviene su un'area di impronta circa costante e con profondità crescente nel tempo. Il secondo nella porzione più esterna invece, dovuto all'effetto di trascinamento dei grani lungo le pareti dello scavo. Il sedimento tende a disporsi con un angolo di riposo dipendente delle caratteristiche del materiale e l'ampiezza della superficie di fondo occupata da detto processo cresce nel tempo in funzione della profondità dello scavo "principale".

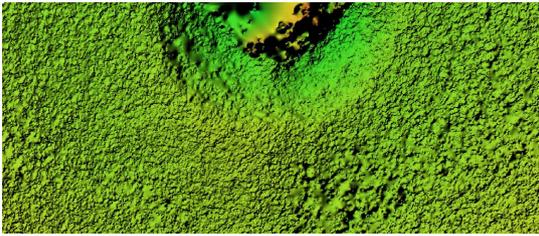
Avvicinandoci alla fine dell'esperimento si tende alle condizioni di equilibrio



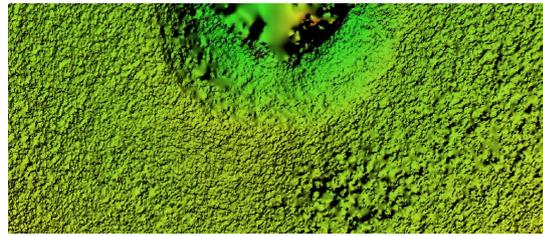
(a).



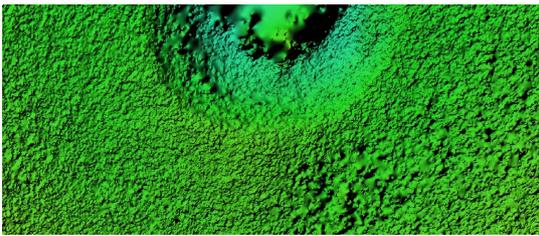
(b).



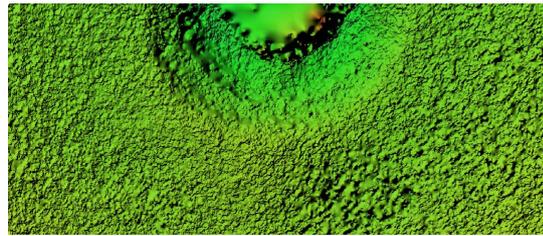
(c).



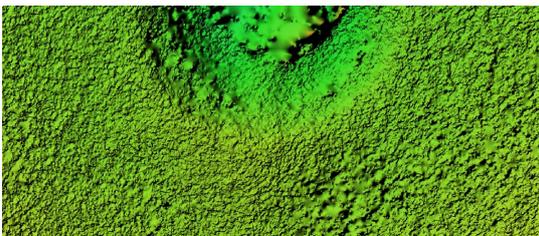
(d).



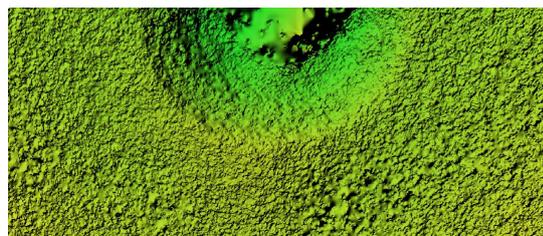
(e).



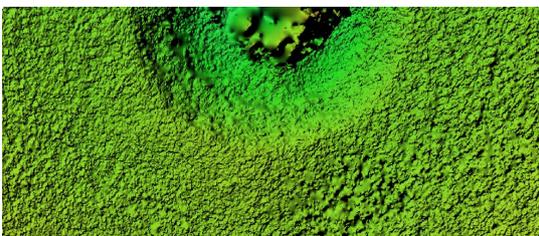
(f).



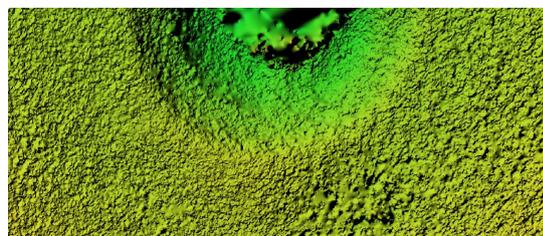
(g).



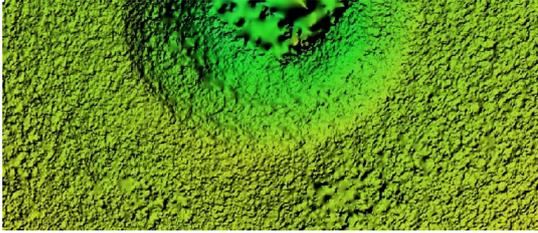
(h).



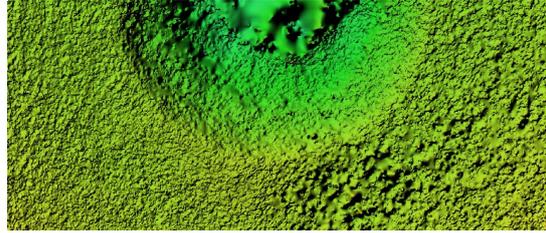
(i).



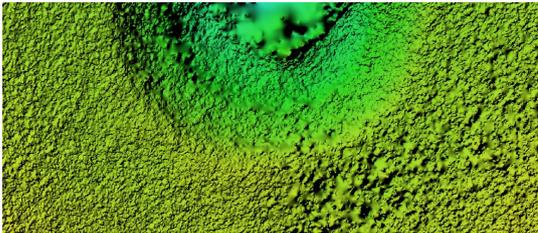
(j).



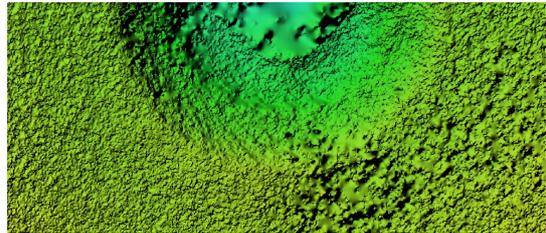
(k).



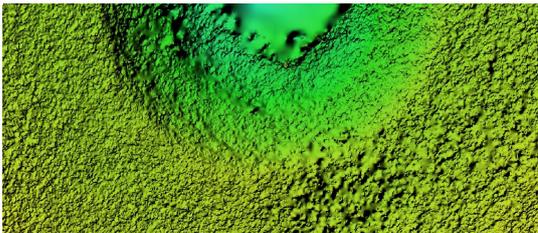
(l).



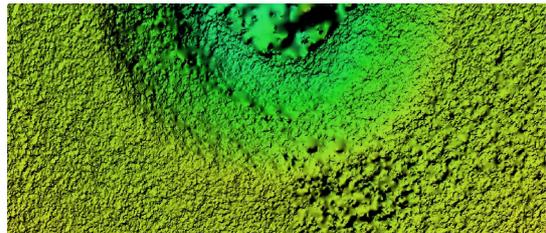
(m).



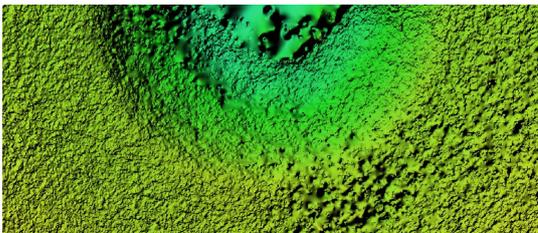
(n).



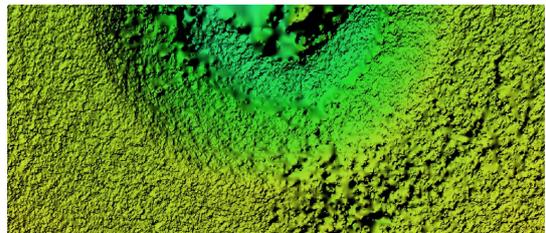
(o).



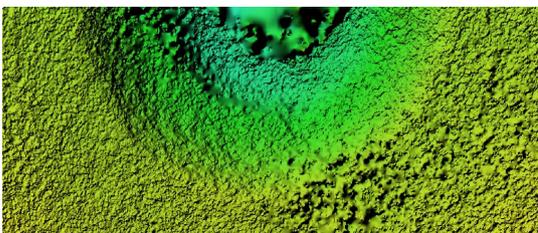
(p).



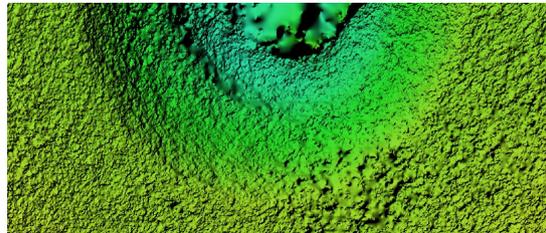
(q).



(r).



(s).



(t).

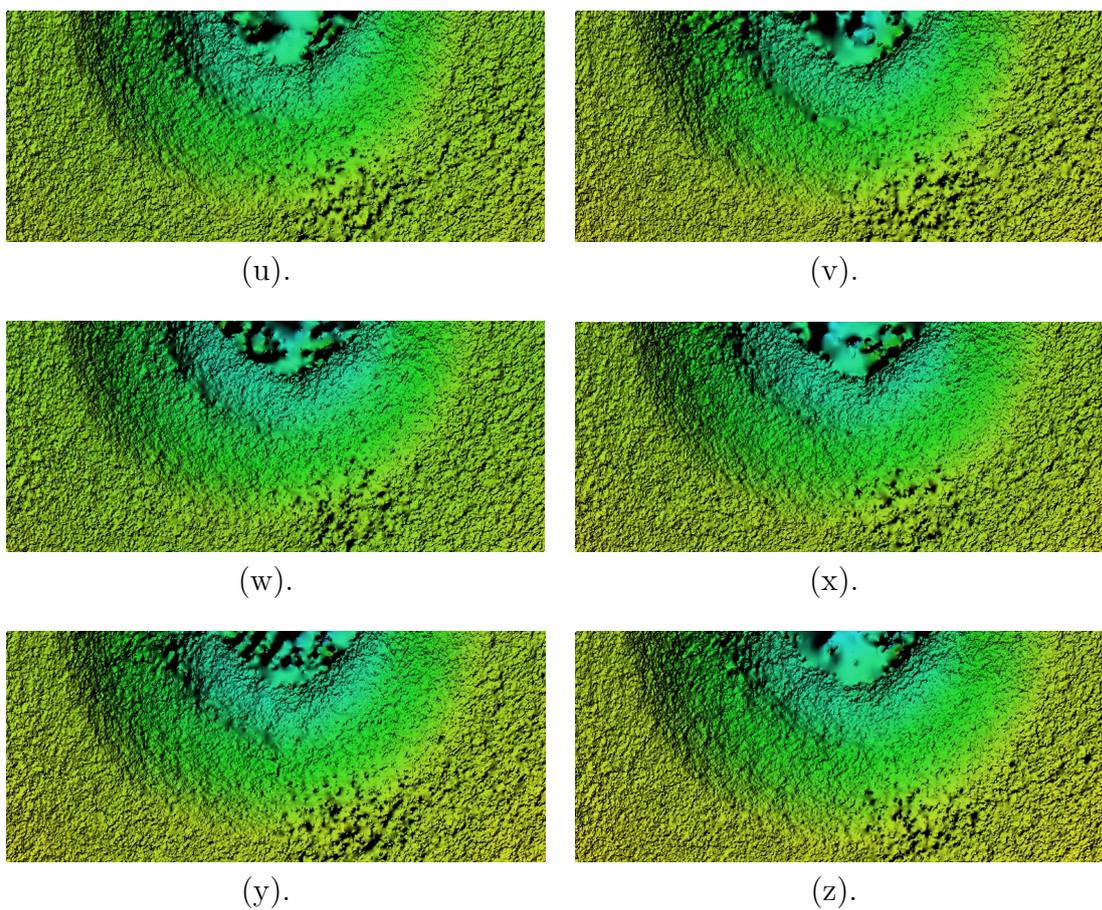


Figura 5.1: Evoluzione del fenomeno di erosione localizzato in prossimità di una pila circolare con riferimento alla sola porzione di monte per diversi istanti temporali: (a) 20 secondi, (b) 40 secondi, (c) 80 secondi, (d) 2 minuti, (e) 3 minuti, (f) 4 minuti, (g) 5 minuti, (h) 7 minuti, (i) 10 minuti, (j) 15 minuti, (k) 20 minuti, (l) 30 minuti, (m) 45 minuti, (n) 1 ora, (o) 1 ora e 15 minuti (p) 1 ora e 30 minuti, (q) 1 ora e 45 minuti, (r) 2 ore, (s) 2 ore e 30 minuti, (t) 3 ore, (u) 3 ore e 30 minuti, (v) 4 ore, (w) 4 ore e 30 minuti, (x) 5 ore, (y) 6 ore e (z) 7 ore.

e l'evoluzione del fenomeno risulta più contenuta. La presenza della linea di singolarità dello scavo può essere visualizzata anche tramite il ricorso a una sezione del DEM (Figura 5.2) eseguita in prossimità dell'asse della pila e parallela alle pareti del canale.

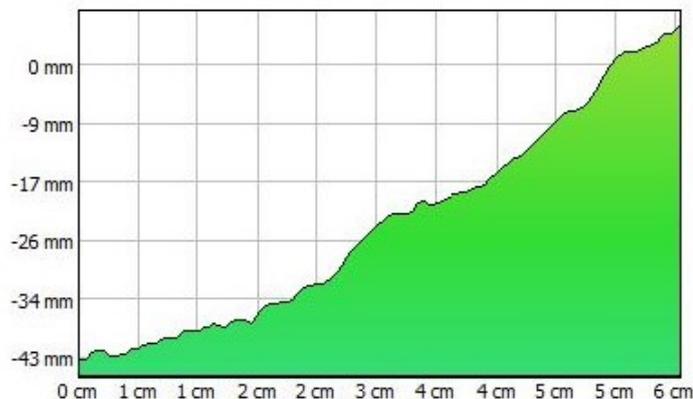


Figura 5.2: Esempio di sezione della porzione di monte dello scavo per $t = 1$ ora. La sezione è presa a partire dal piede della pila con una direzione parallela alle pareti del canale.

Poichè per una valutazione del fenomeno siamo interessati all'evolvere della profondità di scavo nel tempo, tale sezione deve essere ottenuta per ogni intervallo di misura. A riprova dei valori deducibili dalla processazione dei fotogrammi, si è provveduto alla lettura ottica dei valori in concomitanza degli scatti ricorrendo ad un metro posizionato sulla pila ed ottenendo dunque una precisione millimetrica.

Per quanto riguarda invece il calcolo del volume si è definita un area di misura che segue il semiperimetro circolare e contiene la porzione di scavo di interesse. Successivamente fissando un piano di riferimento con quota zero, coincidente con quella del fondo del canale agli istanti precedenti alla prova, il programma ricava in automatico il valore in m^3 della quantità di sedimento rimosso (Figura 5.3).

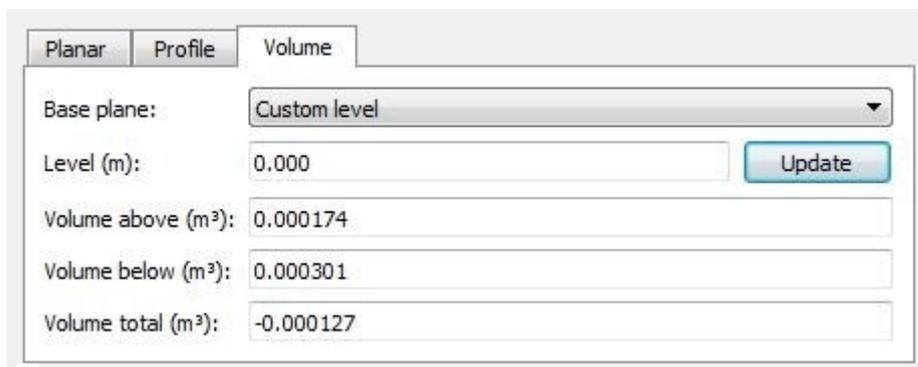


Figura 5.3: Calcolo del volume di scavo nella sezione di monte per $t = 1$ ora.

I valori ottenuti sono riportati nella Tabella 5 e in forma grafica nella Figura 5.4. Il grafico (a). conferma un accrescimento del volume di scavo più pronunciato nella fase iniziale e a riprova della validità dei valori ottenuti si possono

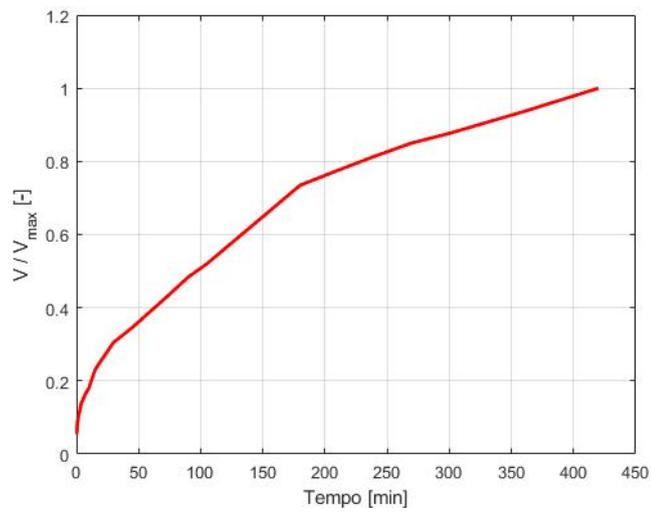
Tempo [min]	Vol dem [mm ³]	y mis [mm]	y dem [mm]	y dem [mm ³]	y dem - y mis [cm]	y dem / y mis. [-]
0.33	42	0.8	0.8	0.51	0	1
0.71	65	0.9	1.2	1.73	0.3	1.33
1.28	73	1	1.4	2.74	0.4	1.4
2	84	1.2	1.55	3.72	0.35	1.30
3	95	1.3	1.8	5.83	0.5	1.38
4	108	1.4	2.1	9.26	0.7	1.5
5	113	1.5	2.2	10.65	0.7	1.47
7	125	1.6	2.3	12.17	0.7	1.44
10	139	1.7	2.4	13.82	0.7	1.41
15	177	1.8	2.85	23.15	1.05	1.58
20	197	1.9	3.2	32.77	1.3	1.68
30	235	2.1	3.4	39.30	1.3	1.62
45	266	2.4	3.8	54.87	1.4	1.58
60	301	2.6	4.3	79.51	1.7	1.65
75	336	2.8	4.5	91.12	1.7	1.61
90	372	3	4.8	110.60	1.8	1.6
105	400	3.2	5.27	146.36	2.07	1.65
120	433	3.3	5.58	173.74	2.28	1.69
150	499	3.5	5.92	207.47	2.42	1.69
180	565	3.7	6.1	226.98	2.4	1.65
210	596	3.9	6.3	250.05	2.4	1.62
240	626	4	6.5	274.62	2.5	1.62
270	654	4.1	6.6	287.50	2.5	1.61
300	674	4.2	6.6	287.50	2.4	1.57
360	720	4.3	6.7	300.76	2.4	1.56
420	769	4.4	6.8	314.43	2.4	1.55

Tabella 5.1: Risultati prova sperimentale con tirante 42 cm, portata 80 l/s e pila circolare di diametro 70 mm.

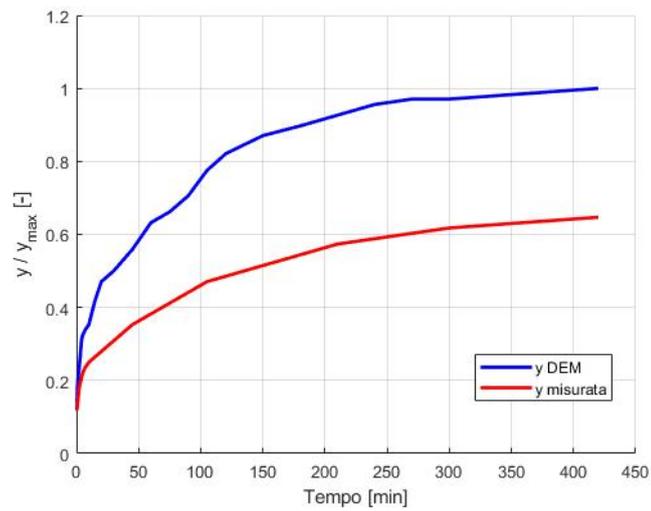
confrontare le massime profondità di scavo misurate e ricavate (grafico (b)). Le curve delle sue serie, pur avendo lo stesso andamento, presentano una forbice molto marcata che evidenzia un errore nel processo di calcolo. Con riferimento a quanto ottenuto si provvede comunque a plottare l'andamento della massima profondità di scavo al cubo in ascissa e il volume in ordinata. Le due quantità, sulla base dello studio di Manes C. e Brocchini M. (2015), dovrebbero disporsi con andamento rettilineo che nel nostro caso risulta approssimato con un discreto margine di errore (grafico (e)).

Tuttavia, essendo pochi i dati sperimentali disponibili per validare quanto postulato dagli autori, ed essendo in possesso di dati effetti da errori, non risulta possibile allo stato attuale confermare o smentire quanto da loro dedotto per via teorica.

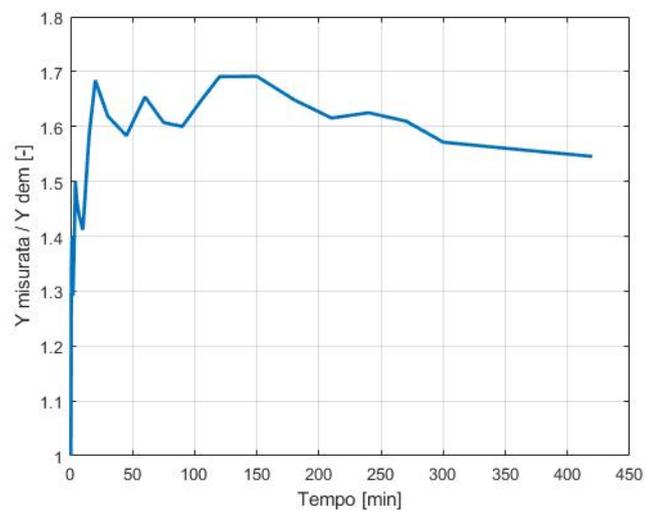
Viceversa risulta necessario indagare le motivazioni che sono alla base della



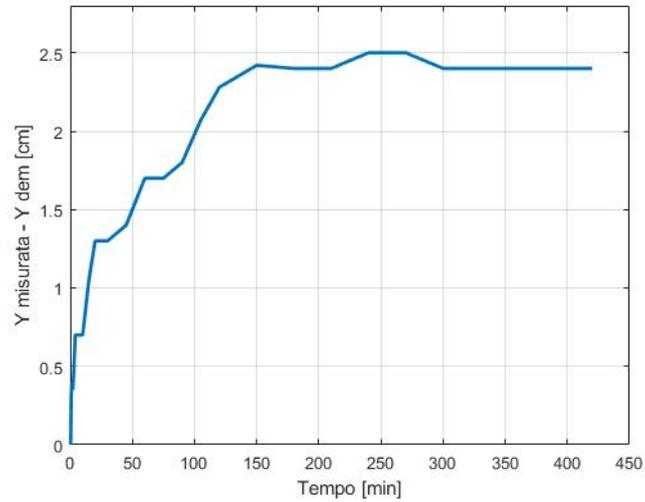
(a).



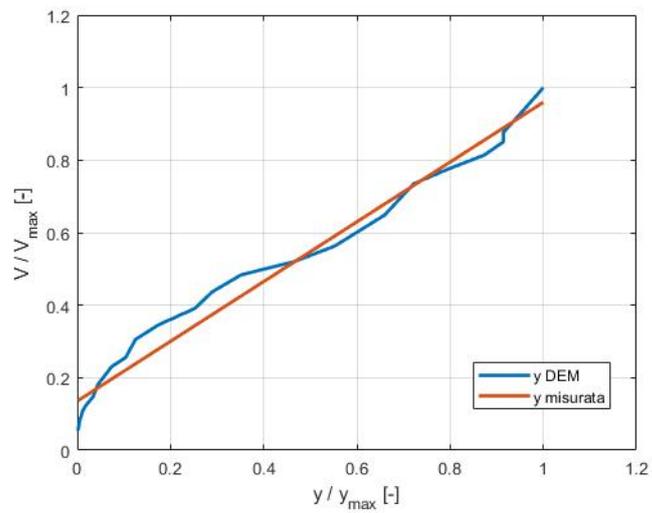
(b).



(c).



(d).



(e).

Figura 5.4: Rappresentazione dei risultati della prova: (a). Evoluzione del volume di scavo nel tempo in forma adimensionale, (b). Andamento nel tempo della massima profondità di scavo ricavata dall'analisi dei dati e letta durante lo svolgimento della prova espressa in forma adimensionale, (c). Differenza fra la massima profondità di scavo ricavata dall'analisi dei dati e quella letta durante lo svolgimento della prova, (d). Rapporto fra la massima profondità di scavo ricavata dall'analisi dei dati e quella letta durante lo svolgimento della prova, (e). Rappresentazione della relazione fra il volume e la profondità massima al cubo in forma adimensionale.

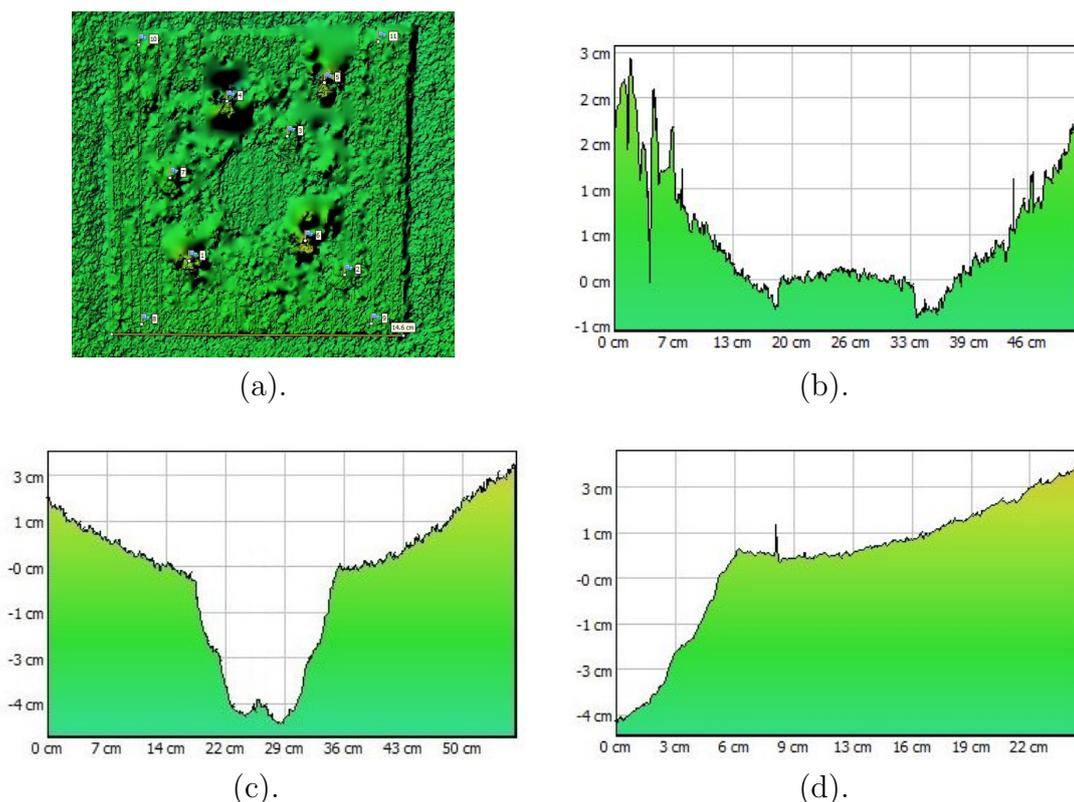


Figura 5.5: Effetti di distorsione sulla riproduzione del modello conseguenti all'errata calibrazione delle camere: (a). Distorsioni piane, (b). Sezione trasversale al moto in corrispondenza del target di calibrazione, (c). Sezione trasversale al moto in corrispondenza dello scavo per $t = 1$ ora, (d). Sezione longitudinale al moto in corrispondenza della base della pila per $t = 1$ ora.

discrepanza delle misure e in prima istanza si provvede a calcolare le differenze e i rapporti fra i dati di quota in nostro possesso (grafici (c). e (d).). Con esclusione del tratto iniziale, si ottiene un andamento quasi costante che rispecchia un errore sistematico. Maggiori informazioni a riprova di quanto detto si ottengono effettuando delle misure planimetriche sul modello e sezionando il DEM (Figura 5.5).

Dalle prime immagini si nota che nel piano si verificano delle distorsioni nella riproduzione del target di calibrazione. Nella direzione trasversale al moto, quello che nella realtà è un quadrato di 15 cm, viene accorciato di due millimetri nel lato più vicino alle camere e allungato nel lato opposto. Le maggiori anomalie riguardano invece le misure altimetriche come visibile nelle restanti immagini (c). (d). ed (e). Si ha infatti che il fondo della canaletta di prova che nella realtà ha un andamento orizzontale viene modellizzato con degli errori che nella parte più periferica raggiungono valori che superano i 3 cm.

Per quanto riguarda l'analisi dei parametri di calibrazione un confronto speditivo dei valori può essere condotto sulla base della distanza focale. Il valore calcolato nella prova di erosione viene rapportato a quello ricavato nella fase di indagine del numero di camere, assumendo che quest'ultimo, calcolato a partire da 11 fotogrammi sia molto prossimo a quello reale. Per una singola immagine si ha

che la differenza dei due valori in pixel vale:

$$\Delta f_{pixel} = f_{11\text{ immagini}} - f_{2\text{ immagini}} = 2298.3 - 2235.03 = 63.27 \quad (5.1)$$

ed essendo la dimensione di un pixel 0.0016744 mm si ricava una differenza di $\simeq 0.106$ mm e una distanza focale di 3.74 mm. Assumendo che per un livello del tirante idrico di 42 cm la distanza fra il fondo della zona di scavo e la fotocamera sia dell'ordine di 45 cm, l'errore di riproiezione di un punto può essere ottenuto con una semplice proporzione:

$$f_{mm} : \Delta f_{mm} = \text{distanza di presa}_{mm} : \text{errore}_{mm} \quad (5.2)$$

così che:

$$\text{errore}_{mm} = \frac{0.106 * 450}{3.74} \simeq 12.8mm \quad (5.3)$$

Considerando che i parametri della camera sono strettamente correlati, quanto riportato, ci consente di dire che l'errore nelle misure è dovuto a un effetto di scala conseguente a un'errata calibrazione dello strumento per quanto riguarda distanza focale e curve di distorsione.

Ne consegue che l'aggiunta di ulteriori camere, con una maggiore robustezza e ridondanza del sistema, consente un aumento dell'accuratezza del metodo. Facendo nuovamente riferimento a una condizione statica e ad un tirante pari a quello adottato nella fase sperimentale, si è ricostruito il fondo con l'utilizzo di 4 immagini. Le due fotografie supplementari sono state ottenute sistemando gli strumenti vincolati alle due pareti del canale. Si ottiene come atteso una maggiore planarità del letto (Figura 5.6) mentre gli effetti di rumore del segnale devono essere trattati tramite la coregistrazione delle bande cromatiche o utilizzandone solo una. In quest'ultimo caso si verifica comunque un restringimento del campo della informazioni a disposizioni del programma nelle fasi di matching dei punti.

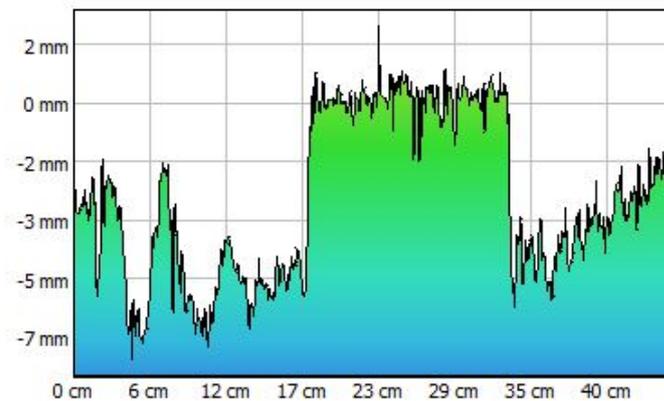


Figura 5.6: Sezione in direzione trasversale al canale per $h = 42$ cm e 4 immagini

Capitolo 6

Conclusioni

Vengono discusse in seguito le conclusioni riguardanti la proposta di monitorare l'evoluzione temporale di uno scavo localizzato, in prossimità di una pila di sezione circolare, mediante un sistema a basso costo e l'impiego di tecniche fotogrammetriche. La scelta di utilizzare le GoPro Hero5 Session per le loro caratteristiche di impermeabilità e la loro dimensione contenuta, che limita l'influenza nei riguardi della caratteristiche del moto, determina un sistema estremamente flessibile in funzione del numero di dispositivi.

Una prima informazione riguardante la precisione del metodo è stata ricavata con riferimento a condizioni statiche. In tale fase un numero variabile di immagini del target di calibrazione sono state acquisite secondo diverse configurazioni adottando un tirante idrico di 20 cm. Come risultato si è ottenuto che la precisione aumenta in modo molto significativo passando da due a tre camere e ulteriori miglioramenti si ottengono al crescere della quantità di strumenti. In seconda istanza, basandosi sull'utilizzo di due camere a disposizione, si è voluta valutare la precisione di calcolo di un volume noto. Il valore relativo ad una semisfera inserita all'interno del fondo del canale è stato raffrontato con quello derivante dall'elaborazione delle immagini. A causa della forte pendenza delle pareti alcune zone non sono catturate e la loro ricostruzione risulta approssimativa determinando un errore dell'ordine del 10%. Infine, dalla prova di 7 ore eseguita aumentando il tirante idrico a 42 cm per poter contenere all'interno della porzione centrale delle immagini l'evoluzione del fenomeno e adottando una velocità di 0.312 m/s corrisponde ad una condizione di clear water scour, si è ricavato che la profondità dello scavo e di conseguenza il volume sono ottenuti con grandi errori. In questa fase, data l'impossibilità di ricorrere ad un modifica delle impostazioni delle camere, una maggiore velocità di acquisizione delle immagini per evitare fenomeni di trascinarsi delle particelle negli scatti, ha richiesto l'utilizzo di luci led. Così facendo si è potuto ottenere un buona densità della nuvola di punti ad esclusione delle zone buie causate dalla presenza della pila. La non aderenza fra le serie di dati ricavati e quelli reali, in merito alla massima profondità di scavo per i vari istanti temporali, viene dunque spiegata tramite un'errata calibrazione degli strumenti. Più nel dettaglio si verifica un errore sistematico di scala nelle misure legato ai valori ricavati per quanto concerne distanza focale e andamento

della curva di distorsione. L'impiego di 4 fotogrammi, con la sola possibilità di ricostruire il fondo per la necessità di muovere le GoPro, ha poi dimostrato un netto miglioramento del modello in merito alle deformazioni. Quanto detto è dovuto alla possibilità di disporre di un numero maggiore di immagini durante la fase di matching dei punti omologhi e una maggiore robustezza del sistema che comporta una migliore precisione dei parametri di calibrazione. Il rumore del segnale presente nelle immagini ottenute va invece corretto mediante una coregistrazione delle bande cromatiche.

In definitiva possiamo dire che l'applicazione preliminare ha dimostrato la possibilità di perseguire lo scopo prefissato. Nonostante le precisioni ottenute non siano soddisfacenti il metodo si rivela promettente se applicato contestualmente ad un potenziamento del sistema di rilievo. Applicazioni future potranno dunque consentire di valutare nuovamente la precisione ottenibile e permettere lo studio del comportamento al variare del sedimento, della geometria della pila e delle caratteristiche del flusso.

Bibliografia

- Roca M et Whitehouse R. (2012). Scour risk assessments at river crossings, ICSE6, Paris.
- Pitcher G. (2015). Storm Desmond: bridges damaged. *New Civil Engineer*, 7 December.
- Tagg A. et Al. (2016). EDP Sciences.
- Manes C. et Brocchini M. (2015). CoLocal scour around structures and the phenomenology of turbulence.
- Limare A., Tal M. et Al. (2011). Optical method for measuring bed topography and flow depth in an experimental flume.
- Schmidt E. e Rzhhanov Y. Measurement of Micro-bathymetry with a GO-PRO Underwater Stereo Camera Pair.
- Li W., Gee T. et Al. Evaluating using GoPro cameras and Tsai's calibration for video-based submerged river-bed reconstruction.
- Li W., Gee T. et Al. Tsai's calibration applied for close-range hydraulic engineering research.
- Marchi E. et Rubatta A. (1981). *Meccanica dei fluidi, principi e applicazioni idrauliche*.
- Brath A., *La sicurezza idraulica degli attraversamenti fluviali*.
- *Manuale pompa FLYGT BIBO 2125.181*.
- *Scheda tecnica Convertitore MC608*.

Allegati

Modalità

Night Photo	Si
Photo Burst	Si
Looping Video	Si
Time Lapse Video	Si
Time Lapse Foto	Si
Night Lapse Foto	Si

Caratteristiche Aggiuntive

Riduzione rumore vento	Si - Processato con 2 microfoni
Controllo Vocale	Si
Stabilizzazione Video	Si
Audio Stereo	-
Geolocalizzazione GPS	-
Cattura foto in WDR	-
Cattura foto in WDR	Wi-Fi + Bluetooth
Protune	si
Auto Low Light	Si
HiLight Tag	Si
Ricarica veloce	Si (con Supercharger venduto separatamente)
Controllo Esposizione	-
RAW Video	-
RAW Audio	-

Camera Hardware

Chip GP1	No
Waterproof Design 10 m	Si
Display LCD Touch	-
Porta HDMI	-
Porta USB	USB-C
Microfoni	2
LED	2
Batteria	Batteria al litio ricaricabile da 1000 mAh

Tabella 6.1: Caratteristiche tecniche GoPro Hero5 Session (2/2)

Specifiche video

4K	30, 25 fps - FOV Ampio
4K 4:3	-
2.7K	48 fps - FOV Medio 30, 25, 24 fps - FOV SuperView, Ampio, Medio, Lineare
2.7K 4:3	30, 25 fps - FOV Ampio
1440p	60, 50, 48, 30, 25, 24 fps - FOV Ampio
1080p	90 fps - FOV Ampio 60, 50 fps - FOV SuperView, Ampio, Lineare 30, 25, 24 fps - FOV SuperView, Ampio, Medio, Lineare, Stretto
960p	100, 60, 50, 30, 25 fps - FOV Ampio
720p	120 fps - FOV Ampio 60, 50, 30, 25 fps - FOV SuperView, Ampio, Medio
WVGA	-
Formato File	MP4 (h.264)
Bit Rate	60Mb/s

Specifiche foto

Sensore	10 MP
Multi Scatto	30/1, 30/2, 30/3, 30/6,
Foto/ secondo	10/1, 10/2, 5/1, 3/1
Time-Lapse (s)	0.5, 1, 2, 5, 10, 30, 60
Scatto Continuo Foto	Si

Dimensioni del sensore

4.54mm x 3.42mm - (0.179in x 0.135in)

Risoluzione immagine

3648 x 2736 pixel

Dimensioni camera

38 x 38 x 36 mm

Peso camera

74 grammi

Tabella 6.2: Caratteristiche tecniche GoPro Hero5 Session (1/2)