

---

# POLITECNICO DI TORINO

## FACOLTÀ DI INGEGNERIA



CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL  
TERRITORIO

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

“TECNICHE FOTOGRAMMETRICHE A BASSO  
COSTO PER IL MONITORAGGIO DI SCAVI  
LOCALIZZATI IN CANALETTA”

RELATORE:  
Prof. Costantino Manes

CANDIDATO  
Anna Bove  
232864

CORRELATORI:  
Prof. Andrea Maria Lingua  
Roberto Bert

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

# Indice

<b>Indice delle figure.....</b>	<b>4</b>
<b>Indice delle tabelle .....</b>	<b>8</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>10</b>
<b>Introduzione .....</b>	<b>12</b>
<b>1. L'erosione alla base di strutture installate in alveo.....</b>	<b>16</b>
1.1 Concetti di base e definizioni .....	17
1.2 L'erosione generalizzata.....	18
1.3 L'erosione per contrazione .....	20
1.4 L'erosione localizzata.....	22
1.4.1 <i>Complessità del fenomeno e le formulazioni sperimentali .....</i>	<i>25</i>
1.4.2 <i>Il modello teorico predittivo della <math>y_{se}</math> per scavi di erosione in condizioni di clear water - Manes e Brocchini, 2015.....</i>	<i>29</i>
1.4.3 <i>I regimi evolutivi ed il crossover point per scavi di erosione in condizioni di clear water. ....</i>	<i>33</i>
<b>2. Le prove di erosione ed il setup sperimentale.....</b>	<b>38</b>
2.1 Il canale.....	38
2.2 I dispositivi di ripresa .....	39
2.3 La prova di erosione .....	42
2.3.1 <i>Le condizioni idrauliche ed il setup sperimentale.....</i>	<i>45</i>
2.3.1.1 Definizione del tirante idrico e delle dimensioni delle pile.....	45
2.3.1.2 Le condizioni di incipiente movimentazione.....	50
2.3.2 <i>Applicabilità del modello Manes e Brocchini, 2015.....</i>	<i>53</i>
<b>3. La metodologia fotogrammetrica di acquisizione dei dati sperimentali .....</b>	<b>56</b>
3.1 L'acquisizione della scena.....	57
3.2 L'elaborazione dei fotogrammi per l'ottenimento dei dati sperimentali .....	60

3.3	La validazione della tecnica fotogrammetrica.....	66
3.3.1	<i>Il confronto con i metodi tradizionali di acquisizione: le misure di profondità dello scavo di erosione.....</i>	<i>66</i>
3.3.2	<i>L'intrusività della metodologia fotogrammetrica.....</i>	<i>71</i>
3.3.3	<i>Ottimizzazione dei risultati in relazione al potenziamento dell'impianto di misura.....</i>	<i>75</i>
<b>4.</b>	<b>Validazione modello teorico Manes e Brocchini (2015) – MB15.....</b>	<b>81</b>
	<b>Conclusioni .....</b>	<b>87</b>
	<b>Allegati .....</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliografia.....</b>	<b>100</b>

## Indice delle figure

<i>Figura 1: Cause di danno primario subite dagli attraversamenti fluviali - Ballio et al.,1998. ....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2: Caratteristiche principali del campo di moto intorno ad una struttura cilindrica verticale inserita in alveo- Melville, 2008. ....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3: Variazione nel tempo della profondità di erosione localizzata alla base di installazioni in alveo, in assenza - linea tratteggiata - e in presenza- linea continua di trasporto solido di fondo di tipo generalizzato – Manes e Brocchini, 2015. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 4:Principali parametri coinvolti nel processo di erosione localizzata alla base di una pila cilindrica isolata. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 5:Variazione del volume eroso con la potenza terza della massima profondità di scavo localizzato alla base di una pila cilindrica di dimensione <math>a=76</math> mm – Rogers et al., 2019. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 6: Variazione del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta nel tempo, normalizzata sul tempo di crossover -tssd- Rogers et al., 2019. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7: Fotocamere GoPro Hero 5 Session impiegata per l'acquisizione dello scavo di erosione. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8: Telecomando Smart Remote per il comando a distanza delle fotocamere ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9: Curva granulometrica dei sedimenti costituenti il letto mobile erodibile. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 10: Posizionamento del target di calibrazione ed acquisizione in stazionari per la definizione del sistema di riferimento locale. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11: Posizionamento della pila sperimentale e avviamento della prova di erosione. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 12: Variazione della profondità di erosione con il tirante idrico, entrambi normalizzati sulla dimensione trasversale della pila- “The physics of local scour at bridge piers, Melville 2008” ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13:Variazione della profondità di erosione con la dimensione granulometrica dei sedimenti - “The physics of local scour at bridge piers, Melville 2008”. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 14: Relazione tra la portata <math>Q</math> e la velocità della corrente per il tirante idrico di 20 cm. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15: Abaco di Shields per il calcolo delle condizioni di incipiente movimentazione. ....</i>	<i>52</i>

<i>Figura 16: Le GoPro sono posizionate all'interno del flusso idrico in modo da garantire la completa immersione della focale con un affondamento limitato entro pochi centimetri dalla superficie libera.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 17: Acquisizione delle immagini.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 18: Target di calibrazione impiegato per il settaggio dei parametri di orientamento interni ed esterni delle fotocamere. Il riferimento planimetrico è definito sulla piastra metallica dalla coppia d'assi orizzontali x-y – in basso a sinistra – mentre il riferimento altimetrico è definito dai vertici dei cilindretti.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 19: Posizionamento esatto dei marker su un'immagine del target di calibrazione per l'ottimizzazione dei parametri di orientamento delle fotocamere. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 20: Misure di volume di scavo sul DEM .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 21: Estrapolazione della massima profondità dello scavo di erosione dalle curve di livello. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 22: Misura di profondità a ridosso della pila. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 23: Evoluzione nel tempo della massima profondità di scavo ricostruita da misurazioni dirette – in blu – ed estrapolate dai modelli digitali, restituiti dalla processazione di fotogrammi acquisiti da 6 GoPro- in rosso. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 24: Distribuzione degli errori relativi associati alle due serie di misure di profondità dello scavo di erosione in corrispondenza del lato monte della pila. ....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 25: Configurazione dello scavo di erosione relativo al tempo di fine prova, ricostruita attraverso il rilievo diretto del fondo di erosione.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 26: Ricostruzione dello scavo di erosione restituita dal software Agisoft Photoscan.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 27: Sovrapposizione della nuvola densa di punti, restituita dal software Photoscan - blu - al modello 3D ricostruito dal rilievo manuale dello scavo di erosione. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 28: Nastri graduati applicati alla pila, sul lato monte e al finaco, per l'esecuzione di letture di profondità di erosione a ridosso della pila.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 29: Evoluzione delle profondità di scavo, osservate direttamente sul lato monte della pila, in prove di erosione eseguite con e senza l'impianto di rilevamento e distribuzione degli errori restituiti dall'analisi comparativa delle due serie. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 30: Confronto delle misure di profondità - al fronte delle pila - ottenute dalla prova di erosione sviluppata con e senza l'impianto di prova .....</i>	<i>73</i>

<i>Figura 31: Evoluzione della profondità di scavo - al fianco delle pile - misurata in prove di erosione eseguite con e senza l'impianto di rilevamento – GoPro -e distribuzione degli errori relativi tra le misure ottenute nel tempo. ....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 32: Confronto delle misure di profondità - al fronte delle pile - ottenute dalla prova di erosione sviluppata con e senza l'impianto di prova .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 33: DEM restituito dall'elaborazione di soli 2 fotogrammi acquisiti al tempo di prova t=600 min. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 34: DEM restituito dall'elaborazione di soli 3 e 4 fotogrammi –rispettivamente a sinistra e destra- acquisiti al tempo di prova t=600 min. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 35: DEM restituito dall'elaborazione di soli 5 e 6 fotogrammi –rispettivamente a sinistra e destra- acquisiti al tempo di prova t=600 min. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 36: Evoluzione nel tempo di prova della profondità di scavo restituita dalla ricostruzione fotogrammetrica dello scavo di erosione, utilizzando 2,3,4,5 e 6 camere, e dalla lettura sull'asta graduata. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 37: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo “misurate” e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 2 GoPro. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 38: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo “misurate” e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 3 GoPro. ....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 39: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo “misurate” e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 4 GoPro. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 40: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo “misurate” e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 5 GoPro. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 41: Analisi statistica dell'errore di misura per la valutazione delle prestazioni del metodo fotogrammetrico, in relazione al numero di dispositivi di ripresa impiegati. ...</i>	<i>80</i>
<i>Figura 42: Andamento del tempo della potenza terza della massima profondità di scavo e del volume di erosione, entrambi normalizzati sui massimi, per pile di dimensione 5 cm e diversa geometria della sezione trasversale - quadrata e circolare.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 43: Andamento del tempo della potenza terza della massima profondità di scavo e del volume di erosione, entrambi normalizzati sui massimi, per pile di dimensione 9 cm e diversa geometria della sezione trasversale - quadrata e circolare.....</i>	<i>82</i>

*Figura 44: Variazione del volume di scavo con la potenza terza della massima profondità , ricostruite per tutte le prove di erosione. .... 83*

*Figura 45: Variazione del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta nel tempo, restituita per tutte le quattro prove di erosione. .... 84*

*Figura 46: Variazione del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta nelle ultime quattro ore di osservazione, per tutte le prove di erosione. .... 85*

## Indice delle tabelle

<i>Tabella 1: Geometria del canale impiegato per l'esecuzione delle prove di erosione. .</i>	<i>38</i>
<i>Tabella 2: Esiti delle verifiche eseguite per il tirante e le pile scelti per le prove di erosione.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 3: Condizioni di flusso.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabella 4: Condizioni di idrauliche della corrente. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 5: Condizioni di incipiente movimentazione per i sedimenti quarzo-arenosi di diametro <math>d_{50}=0.18</math> cm costituenti il fondo mobile erodibile.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabella 6: Applicabilità del modello teorico Manes e Brocchini, 2015 - MB15.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabella 7: Incertezza del modello di dipendenza lineare di Manes e Brocchini 2015...</i>	<i>85</i>
<i>Tabella 8: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 2 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabella 9: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 3 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 10: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 4 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>91</i>
<i>Tabella 11: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 5 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabella 12: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 6 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabella 13: Analisi statistica dell'errore relativo alle misure di profondità, restituite dal metodo fotogrametrico, in relazione al numero delle fotocamere impiegato in fase di acquisizione. ....</i>	<i>93</i>

<i>Tabella 14: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata frontale ottenute da prove di erosione sviluppate con e senza GoPro. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabella 15: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata laterale ottenute da prove di erosione sviluppate con e senza GoPro. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.....</i>	<i>95</i>
<i>Tabella 16: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta quadrata - <math>a = 5\text{ cm}</math> - restituite dal metodo fotogrammetrico. ....</i>	<i>96</i>
<i>Tabella 17: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta quadrata - <math>a = 9\text{ cm}</math> - restituite dal metodo fotogrammetrico. ....</i>	<i>97</i>
<i>Tabella 18: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta circolare - <math>a = 5\text{ cm}</math> - restituite dal metodo fotogrammetrico. ....</i>	<i>98</i>
<i>Tabella 19: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta circolare - <math>a = 9\text{ cm}</math> - restituite dal metodo fotogrammetrico. ....</i>	<i>99</i>

## **Abstract**

Il presente lavoro di tesi ha origine dall'intento di stabilire l'impiegabilità delle tecniche fotogrammetriche per l'acquisizione di misure di profondità e di volume degli scavi di erosione, generati dall'alterazione del regime di moto di una corrente idrica impattante su elementi verticali fondati su strati sedimentari, più o meno coesivi. La tecnica a basso costo adottata prevede una fase preliminare di acquisizione della scena, resa possibile dall'impiego di camere *waterproof* GoPro Hero5 Session, a cui segue una fase di elaborazione che, attraverso l'utilizzo del software Agisoft Photoscan Professional, consente la ricostruzione tridimensionale dello scavo di erosione, a partire dai fotogrammi acquisiti durante la prova. Attesa la sua potenzialità, se validata, la tecnica fotogrammetrica consentirebbe il superamento dei metodi di acquisizione tradizionali che, consistendo in letture dirette di profondità di scavo su aste graduate applicate direttamente alla pila, soffrono di un non trascurabile margine d'errore. Allo scopo è stata condotta una prova in canaletta in cui, assicurando l'assenza di trasporto solido di fondo e realizzando condizioni di flusso assolutamente turbolento, è stato riprodotto un modello fisico semplificato, ricorrendo all'impiego di una pila isolata cilindrica, installata sul fondo mobile dello stesso. La scena è stata acquisita nel tempo, secondo intervalli temporali preliminarmente stabiliti, e applicando le tecniche fotogrammetriche all'immagini si è provveduto alla ricostruzione tridimensionale del fondo del canale e da questo all'elaborazione del Digital Elevation Model – DEM – dal quale sono state ottenute le misure di volume e di profondità massima dello scavo.

La metodologia fotogrammetrica è stata oggetto di un'ampia attività di validazione tesa a testarne le sue prestazioni e verificarne l'impiegabilità.

Nel dettaglio, l'ampio lavoro di sperimentazione ha provveduto a:

- L'accertamento dell'affidabilità e la qualità degli output attraverso il confronto dei dati sperimentali restituiti dalle tecniche tradizionali;
- la valutazione dell'invasività del metodo, tesa a chiarire il grado di intrusività delle strumentazioni impiegate rispetto all'evoluzione del processo indagato;
- alla stima del margine di ottimizzazione delle misure conseguibile dal potenziamento del sistema di rilievo, tesa, in particolare, a verificare che l'accuratezza del dato sia migliorabile in relazione al numero delle fotocamere.

I risultati ottenuti hanno comprovato l' idoneità delle tecniche fotogrammetriche per la ricostruzione dello scavo di erosione e la loro impiegabilità per l' acquisizione di dati di profondità e i volume, questi altrimenti difficilmente ottenibili.

Inoltre, l' abbattimento degli errori, osservato all' aumentare del numero di dispositivi di ripresa impiegati, rivela una notevole versatilità della tecnica in ragione del miglioramento delle performance conseguibili dal potenziamento del sistema di ripresa. Infine, nonostante ai fini dell' acquisizione la meta è stata confermata la non intrusività della metodologia fotogrammetrica nei confronti che, assicurando un sufficiente battente d' acqua, la presenza costante del sistema di ripresa l' alloggiamento delle camere in corrispondenza del pelo libero della corrente non condiziona l' evoluzione del processo erosivo.

Infine, l' analisi comparativa delle misure di profondità ottenute in assenza/presenza del sistema di ripresa ha confermato la non intrusività del metodo nei confronti dello sviluppo dello scavo di erosione.

Combinando le potenzialità del rilievo fotogrammetrico e delle prove in canaletta, si è inoltre provveduto alla validazione del modello di dipendenza lineare del volume di erosione dalla potenza terza della massima profondità di scavo, recentemente proposto da Manes e Brocchini, 2015. Allo scopo sono state sviluppate quattro prove di erosione in cui, conservando le stesse condizioni di setup, è stata variata la sola geometria della pila di erosione. I risultati sperimentali – ottenuti con metodo fotogrammetrico – hanno confermato il legame di dipendenza lineare  $W_s \propto y_s^3$ , a meno di intercette non nulle, variabili in range piuttosto ampi.

La forte incertezza associata a queste suggerisce la necessità di un' indagine approfondita tesa a chiarirne la natura: qualora una maggiore disponibilità di informazioni dovesse confermare il risultato ottenuto, sarà necessario rivedere l' ipotesi alla base del modello teorico MB15 in modo da inglobare un termine noto che, allo stato attuale, non è previsto.

## Introduzione

Causa frequente di danneggiamento o di collasso degli attraversamenti fluviali è il fenomeno di *erosione localizzata*, ossia di asportazione dei sedimenti che si realizza alla base delle opere di sostegno degli impalcati collocate in alveo - pile e spalle .

La movimentazione dei sedimenti è conseguenza dei fenomeni turbolenti innescati, nella sezione governata dal ponte, dall'alterazione del campo di moto della corrente.

L'azione erosiva risultante determina l'avvallamento del letto nell'intorno della singola pila che, approfondendosi, può determinare lo scalzamento delle fondazioni e quindi, compromettendone la capacità portante, il collasso del ponte.

Gli elevati costi di riparazione e di ricostruzione degli attraversamenti danneggiati, nonché l'elevato costo di vite umane registrate in passato, hanno determinato una crescente sensibilizzazione della società civile e tecnica rispetto ai temi di *prevenzione del danneggiamento* e di *vulnerabilità idraulica dei ponti*. In quest'ottica, la comprensione approfondita del fenomeno di erosione localizzata e la possibilità di prevedere accuratamente la profondità massima di scavo si configurano come strumenti indispensabili.

Tuttavia, l'elevato numero di variabili coinvolte e l'intrinseca complessità delle loro interazioni fenomenologiche hanno fatto sì che il fenomeno erosivo rimanesse un problema irrisolto, sebbene costituisca uno dei più attivi temi di sperimentazione in ambito ingegneristico.

Negli ultimi sessant'anni, un'ampia campagna sperimentale ha prodotto numerosi modelli predittivi della massima profondità di erosione per assegnati periodi di ritorno delle portate di piena.

Tali formulazioni sono state dedotte dall'interpretazione dei risultati sperimentali derivati da prove di laboratorio che, riproducendo un modello semplificato del sistema fisico, hanno permesso lo studio del fenomeno, in riferimento sia alla condizione di equilibrio sia alla sua evoluzione nel tempo.

Per una assegnata corrente a pelo libero, stazionaria ed uniforme, impattante su una struttura verticale, di geometria nota, fondata su uno stato sedimentario uniforme, la profondità dello scavo di erosione al generico tempo  $t$  può esprimersi attraverso una relazione generale del tipo:

$$y_s = f \left[ \begin{array}{l} \text{flusso di piena}(\rho, \nu, V, h, g); \\ \text{granulometria del fondo}(\rho_s, d_{50}, \sigma_g, V_c); \\ \text{geometria della pila} (a, S_h, A_l); \\ \text{tempo} (t) \end{array} \right]$$

In cui  $\rho$  e  $\nu$  sono, rispettivamente, la densità e la viscosità cinematica del fluido,  $V$  e  $h$  la velocità media e il tirante idrico della corrente indisturbata,  $g$  l'accelerazione di gravità;  $d_{50}$  e  $\sigma_g$  rappresentano rispettivamente la dimensione media e deviazione standard geometrica della distribuzione granulometrica dei sedimenti costituenti il fondo d'alveo,  $\rho_s$  è la densità dei sedimenti,  $V_c$  la velocità critica di incipiente movimentazione dei sedimenti;  $a$  è la larghezza della sezione retta della pila<sup>1</sup>,  $S_h$  e  $A_l$  sono i parametri di forma e di orientamento della pila;  $t$  è la variabile temporale.

Quella fornita è una formulazione generale, in cui i rapporti di dipendenza tra le variabili sono specifici delle caratteristiche idrauliche e geometriche del modello sperimentale da cui sono state derivate. Ovviamente, a causa della molteplicità delle configurazioni sperimentali da cui sono state dedotte, le soluzioni disponibili in letteratura difficilmente trovano reciproco accordo nei risultati<sup>2</sup>.

Inoltre, i problemi di scala di cui le formulazioni empiriche risentono, motivano una sostanziale perplessità circa la loro capacità di interpretare i dati di campo<sup>3</sup>.

In altre parole, sebbene le soluzioni disponibili in letteratura leghino i diversi parametri coinvolti nel processo erosivo, la loro natura empirica e l'assenza di una struttura teorica a loro supporto ne limitano l'attendibilità dei risultati che, per quanto detto, sono indispensabili per il corretto dimensionamento delle fondazioni e/o per un'attenta valutazione del rischio.

Dalla teoria fenomenologica della turbolenza, recentemente è stato derivato un modello per la previsione della profondità di scavo in condizioni di equilibrio [Manes C. et Brocchini M., 2015] che, collocandosi in un quadro esplicitamente dottrinale, risulterebbe

---

<sup>1</sup> Sezione ottenuta proiettando la pila sul piano verticale ortogonale al flusso idrico.

<sup>2</sup> Per tale ragione la profondità di erosione andrebbe determinata applicandole separatamente e, quindi, confrontandone i risultati in maniera critica.

<sup>3</sup> Recenti ricerche hanno dimostrato che le profondità di erosione localizzata, misurate alla scala di campo, possono essere significativamente inferiori rispetto a quelle predette dalle formule – Ettema et al. (1998), Sheppard et al. (2004), Ettema et al. (2006).

esente da problemi connessi alla scala di sviluppo del processo erosivo, permettendo, inoltre, di precisare gli effetti prodotti dai gruppi adimensionali coinvolti.

L'impianto teorico proposto è stato sviluppato a partire da ipotesi che, sulla base di presunti rapporti di scala tra l'*horseshoe vortex* e lo scavo di erosione, convergono in una dipendenza lineare del volume di scavo dalla potenza terza della massima profondità di erosione. Appare evidente che la validazione del modello necessita la disponibilità di misure di volume dello scavo che, allo stato attuale, sono ottenibili limitatamente al termine delle prove di erosione in canaletta, o comunque, ad equilibrio raggiunto.

In questo senso la possibilità di monitorare nel tempo l'evoluzione dello scavo di erosione, e quindi di ricostruirne la curva fenomenologica, assume una valenza significativa, non solo ai fini della validazione del modello teorico proposto dagli autori, ma soprattutto per la comprensione dei meccanismi che governano i fenomeni erosivi.

In questo contesto si inserisce l'attività sperimentale che ha dato seguito al presente elaborato.

Il lavoro di tesi qui presentato ha origine dall'intento di stabilire l'impiegabilità di una metodologia innovativa a basso costo che, applicando le tecniche tipiche del rilievo fotogrammetrico, permette di acquisire nel tempo misure di profondità e di volume di scavi di erosione generati alla base di pile prismatiche, comunemente impiegate in prove in canaletta.

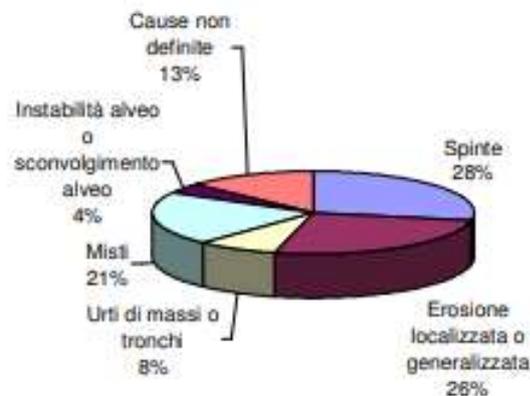
I patterns evolutivi dello scavo di erosione sono ricostruiti dalla sequenza dei modelli tridimensionali riproducenti le configurazioni assunte dal fondo durante le prove e restituiti dal software Agisoft PhotoScan Professional in seguito al processamento delle immagini acquisite da camere *waterproof* GoPro Hero5 Session, ad intervalli di tempo prestabiliti.

L'ampio lavoro di validazione ha permesso di accreditare la metodologia fotogrammetrica quale metodica valida ed implementabile, in prove in canaletta, per la misurazione della geometria dello scavo di erosione, durante la sua evoluzione nel tempo. Inoltre, i dati sperimentali ottenuti dal processamento dei fotogrammi, acquisiti in quattro distinte prove di erosione, sono stati funzionali alla validazione del modello teorico proposto da Manes e Brocchini, 2015. In dettaglio, realizzando le stesse condizioni di setup e variando soltanto la geometria delle pile impiegate, si è tentato di cogliere le analogie e le differenze nelle dinamiche evolutive del processo di erosione, innescato da strutture differenti per dimensione e forma della sezione trasversale.

Il presente elaborato è stato strutturato come segue: l'impianto teorico e lo stato dell'arte entro cui è stata sviluppata la sperimentazione sono ampiamente trattati nel capitolo 1, mentre nel successivo è fornita una descrizione delle strumentazioni impiegate per l'esecuzione delle prove in canaletta nonché le condizioni di setup della prova restituite dallo studio preliminare. Nel capitolo 3, oltre alla descrizione approfondita della metodologia fotogrammetrica impiegata, sono restituiti i risultati ottenuti dalla sua validazione. Gli esiti della validazione del modello teorico proposto da Manes e Brocchini, 2015, sviluppata in riferimento a quanto ottenuto da Rogers et al., 2019, sono restituiti nel capitolo 4. Le conclusioni, discusse nell'ultima sezione, forniscono una sintesi dei risultati ottenuti.

## 1. L'erosione alla base di strutture installate in alveo

L'erosione localizzata al piede di strutture rigide installate in alveo costituisce una tra le principali cause di danneggiamento o crollo degli attraversamenti fluviali. Un'indagine sullo stato di salute degli attraversamenti fluviali italiani, soggetti in passato ad eventi alluvionali, [Ballio et al., 1998] ha rivelato che nel 26 % dei casi, il danneggiamento degli attraversamenti compresi nel campione di indagine è il risultato dell'erosione – causa che è seconda solo all'azione della spinta idrodinamica della corrente. In *Figura 1* si riportano i risultati ottenuti dall'indagine.



*Figura 1: Cause di danno primario subite dagli attraversamenti fluviali - Ballio et al., 1998.*

Un'indagine precorritrice, realizzata dalla Federal Highway Administration, ha rivelato che l'erosione fluviale successiva ad un evento di piena è la causa principale del collasso degli attraversamenti fluviali negli Stati Uniti.

Nonostante l'incidenza e la gravosità delle potenziali conseguenze, l'elevato numero di variabili coinvolte e l'intrinseca complessità delle loro interazioni fenomenologiche rendono estremamente ardua la comprensione del processo, che, ancora oggi, rimane non del tutto chiarito.

A questo quadro già complicato si aggiunge la ciclicità del fenomeno determinata dall'alternarsi di fasi di approfondimento e fasi di ripascimento degli scavi di erosione, conseguenti agli eventi alluvionali.

Indipendentemente dalla forma dell'idrogramma di piena, la profondità massima di erosione è potenzialmente raggiunta al passaggio del picco di portata, mentre l'esaurimento dell'evento alluvionale è in genere accompagnato dal parziale o totale riempimento del volume di scavo. In questo senso, le osservazioni corrispondenti alla fase di esaurimento dell'evento non sono attendibili per la previsione della profondità massima di erosione, necessaria per la definizione della quota di progetto delle

fondazioni. Infatti, il loro impiego determinerebbe significative sottostime dell'entità del fenomeno e, di conseguenza, il sottodimensionamento dell'opera di fondazione con l'esito drammatico di instabilità strutturale.

### 1.1 Concetti di base e definizioni

Per erosione localizzata si intende il fenomeno fisico di asportazione di sedimenti dall'intorno di strutture che, installate in uno strato sedimentario erodibile, quale il fondo d'alveo, sono esposte all'azione di una corrente impattante. Nel dettaglio, la movimentazione dei sedimenti alla base di tali strutture è conseguenza dei fenomeni turbolenti generati, nella sezione governata dal ponte, dall'alterazione del campo di moto della corrente.

L'azione erosiva risultante si traduce in un progressivo avvallamento del fondo d'alveo nell'intorno dell'installazione che, approfondendosi progressivamente, può determinare lo scalzamento delle fondazioni e, compromettendone la capacità portante, il suo collasso. In realtà, relativamente agli attraversamenti fluviali, quando si intende definire la quota di fondazione delle pile e delle spalle, piuttosto che dimensionare soluzioni mitigatrici del fenomeno, è necessario tener presente che la profondità di erosione nell'intorno delle opere di sostegno degli impalcati è il risultato dei contributi resi da tre fenomeni erosivi non stazionari, derivanti dall'interazione tra la corrente idrica, il fondo d'alveo e l'installazione:

- L'erosione generalizzata, conseguente alle variazioni globali del profilo del corso d'acqua;
- L'erosione per contrazione, conseguente al restringimento della sezione di deflusso in corrispondenza dell'attraversamento;
- L'erosione localizzata, conseguente allo sbarramento al deflusso generato dalle strutture in alveo.

La forte variabilità temporale di ciascuno dei contributi introdotti deriva essenzialmente dal carattere non stazionario, rilevabile nel breve e lungo periodo, dei processi da cui sono generati. In questo senso, l'evoluzione nel tempo di ciascun livello di erosione non può considerarsi un elemento prescindibile nella comprensione fenomenologica dei processi implicati, il che motiva l'esigenza di disporre di modelli predittivi che permettano una loro descrizione più ampia, non limitata alle sole condizioni di equilibrio.

## 1.2 L'erosione generalizzata

Le fisiologiche variazioni del regime idrico fanno sì che il fondo d'alveo sia soggetto a cicliche variazioni altimetriche, espressioni dell'alternarsi di meccanismi di erosione e deposito sedimentario, propri della dinamica fluviale.

Mentre il meccanismo deposizionale, associato ad una diminuzione del deflusso idrico, produce un sollevamento del fondo d'alveo, l'asportazione del materiale sedimentario del letto, associato ad un aumento della portata fluviale, ne determina l'abbassamento. Quest'ultimo fenomeno è quello cui tipicamente si ci riferisce in termini di **erosione generalizzata** il cui accadimento, essendo associato a mutazioni globali del profilo fluviale, è del tutto svincolato dalla presenza in alveo di strutture di sostegno dell'attraversamento fluviale. In altre parole, l'erosione generalizzata contribuisce alla profondità di scavo alla base di installazioni in alveo, secondo meccanismi che prescindono dalla presenza delle installazioni stesse, essendo associato esclusivamente alle mutazioni geomorfologiche del sistema fluviale conseguenti alle variazioni del regime idrico.

La quantificazione dell'abbassamento generalizzato del fondo d'alveo è propedeutico alla determinazione della posizione altimetrica che questo assumerebbe in assenza dell'attraversamento, ossia in condizioni indisturbate. Dalla valutazione quantitativa di tale quota, si deriva un riferimento altimetrico rispetto al quale stimare l'entità di quei processi erosivi che, diversamente, sono riconducibili alla presenza dell'attraversamento<sup>4</sup>.

Definito, nell'intorno dell'attraversamento fluviale, un tratto di corpo idrico di estensione adeguata, la posizione altimetrica indisturbata del fondo sarà dedotta dalle osservazioni idrologiche ed idrauliche, di breve e lungo periodo<sup>5</sup>, associate al tratto considerato. In questo modo si tiene conto del carattere non stazionario del l'erosione generalizzata, responsabile della variazione nel tempo della quota del fondo d'alveo. Va precisato che le osservazioni dirette in condizioni di magra rivelano la tendenza al sollevamento o all'affossamento dell'alveo, rivelandosi estremamente utili per la stima

---

<sup>5</sup> Il carattere non stazionario dell'erosione generalizzata fa sì che la quota di fondo d'alveo vari nel tempo. Ciò impone la necessità di estendere le osservazioni idrologiche ed idrauliche di breve e lungo periodo, relative al tratto di fiume definito a cavallo dell'attraversamento.

dell'abbassamento generalizzato del letto. È prassi comune riferire tale posizione altimetrica alla posizione di opere stabili che non interferiscono con l'attraversamento fluviale.

### 1.3 L'erosione per contrazione

In conseguenza alla realizzazione di un attraversamento fluviale, si registra, a ridosso dello stesso, un'accelerazione locale della corrente idrica, che si accompagna ad azioni differenziate sul fondo d'alveo. L'installazione, occupando parte del letto con le sue fondazioni, impone un restringimento della sezione idrica caratteristica e, conseguentemente, un aumento della velocità di flusso nell'intorno dell'attraversamento stesso. La conseguente intensificazione delle azioni di trascinamento si traduce in un aumento della capacità di trasporto della corrente e, pertanto, nell'insorgenza di fenomeni erosivi a ridosso della sezione contratta<sup>6</sup>.

L'esistenza, o meno, di un trasporto solido di fondo, a monte dell'attraversamento, influenza significativamente le modalità evolutive del processo erosivo, come pure l'estensione dell'intorno del ponte in cui sono rilevabili gli effetti provocati dal restringimento.

Nel dettaglio, in assenza di trasporto solido - *clear water scour* – la zona di influenza del fenomeno è circoscritta al solo tratto contratto, estendendosi, nel caso contrario - *live bed scour*-, sia a monte che a valle dell'attraversamento.

Per ciascuna situazione, le esperienze di laboratorio, come pure l'interpretazione delle osservazioni di campo, hanno permesso l'ottenimento di numerose formulazioni utili alla quantificazione della profondità di erosione da contrazione.

Nel ventaglio delle formulazioni empiriche disponibili in letteratura, rientra la relazione di *Straub* [1934], ottenuta, in riferimento alla condizione di equilibrio, dalla combinazione dell'equazione di Manning, per il calcolo della resistenza al moto negli alvei fluviali, e dell'equazione di Du Boys per la stima del trasporto solido.

Questa si esprime nella forma:

$$\frac{h_r}{h_m} = \left(\frac{b_m}{b_r}\right)^{6/7} \left[ \frac{\tau_c}{2\tau_m} + \left( \left(\frac{\tau_c}{2\tau_m}\right)^2 + \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_m}\right) \cdot \frac{b_m}{b_r} \right) \right]^{-6/7}$$

In cui i pedici  $r$  e  $m$  sono relativi, rispettivamente, alla sezione ristretta e quella indisturbata. In particolare,  $h_r$  e  $h_m$  sono i tiranti idrici relativi alla sezione ristretta e

---

<sup>6</sup> Poiché gli impatti conseguenti al restringimento della sezione idrica – imposto dalla presenza in alveo delle opere di sostegno dell'impalcato- interessano l'intorno della sezione governata dal ponte, evidentemente l'erosione per contrazione è da considerarsi come una particolare forma di erosione localizzata.

indisturbata dell'alveo,  $b_r$  e  $b_m$  sono le larghezze del pelo libero nelle stesse sezioni, ed infine  $\tau_c$  e  $\tau_m$  sono gli sforzi tangenziali che la corrente esercita sul fondo d'alveo in condizioni di incipiente movimentazione e in condizioni indisturbate.

Qualora, in corrispondenza del restringimento, siano raggiunte le condizioni di incipiente movimentazione, ossia  $\tau_c = \tau_m$ , l'equazione di Straub si riscrive nella forma semplificata:

$$\frac{h_r}{h_m} = \left(\frac{b_m}{b_r}\right)^{6/7}$$

Che, rispetto alla condizione di equilibrio, permette la determinazione del tirante idrico della sezione contratta, essendo  $h_m$  misurabile in maniera diretta.

In conclusione, la profondità dello scavo di contrazione,  $e_c$ , sarà ottenuta come la variazione di altezza d'acqua che si osserva, alla sezione contratta, tra il tempo  $t_0$ , di innesco del fenomeno erosivo, ed il tempo  $t_c$  di ripristino delle condizioni di equilibrio, ossia:

$$e_c = h_r - h_0$$

In cui con  $h_0$  si è indicato il tirante idrico della sezione contratta al tempo  $t_0$ , ossia prima dell'innesco del fenomeno erosivo.

Infine, si fa osservare che l'entità dell'erosione per contrazione è influenzata notevolmente dalle caratteristiche geometriche dell'alveo in prossimità dell'attraversamento: assorbendo la potenzialità erosiva della corrente idrica in arrivo, la presenza di golene, ad esempio, permette di mitigarne gli effetti attraverso un indebolimento del trasporto solido di fondo nella sezione contratta.

#### 1.4 L'erosione localizzata

Con *local scour*, o erosione localizzata, si intende il fenomeno di asportazione dei materiali costituenti il fondo d'alveo provocato dalla presenza degli elementi verticali rigidi che compongono l'impalcato dell'attraversamento fluviale, ossia pile e spalle.

La presenza di tali manufatti determina una alterazione del regime di moto della corrente associato ad un addensamento delle linee di flusso a monte delle strutture, che si risolve in un sistema di vortici, ad asse verticale ed orizzontale, responsabili diretti dell'erosione nell'intorno delle stesse.

Responsabile principale erosione localizzata alla base delle installazioni in alveo sono i vortici a ferro di cavallo- *horseshoe vortex*, generati in seguito all'impatto della corrente sulla pila stessa.

Per meglio descrivere il fenomeno si consideri una pila isolata inserita in un canale a fondo mobile nel quale scorre una corrente idrica stazionaria. Avvicinandosi all'elemento verticale, la corrente idrica subisce una progressiva decelerazione fino ad arrestarsi in corrispondenza della stessa. L'annullamento istantaneo della velocità della corrente provoca un gradiente delle pressioni di ristagno lungo la verticale della struttura e, di conseguenza, la deviazione ascendente e discendente della corrente. Una parte del flusso idrico impattante devia verso la base della struttura, dove sono innescati i fenomeni turbolenti che danno origine al vortice a ferro di cavallo.

L'*horseshoe vortex* possiede un'energia tale da provocare un aumento degli sforzi tangenziali nell'intorno della base della struttura e, se superata la condizione di incipiente movimentazione, l'asportazione dei sedimenti, con conseguente formazione dello scavo di erosione.

L'energia dei vortici a ferro di cavallo è progressivamente dissipata con l'approfondimento dello scavo di erosione per cui il sistema evolve verso una configurazione finale di equilibrio che permarrà fintanto che saranno mantenute fisse le condizioni al contorno.

Come già anticipato, in seguito all'impatto sulla superficie di monte della pila, una parte del flusso idrico è deviato verso l'alto. Risalendo lungo la struttura, il flusso ascendente raggiunge la superficie libera dove hanno origine vortici superficiali, ad asse orizzontale- *surface roller*. Sviluppandosi in corrispondenza del pelo libero, tali elementi turbolenti sono generalmente ininfluenti sul processo erosivo, ad eccezione dei casi in cui il tirante idrico della corrente sia confrontabile con la dimensione della pila. In questi casi, i vortici

di superficie interagiscono con gli *horseshoe vortex* provocandone la dissipazione energetica – in misura tanto maggiore quanto minore è il tirante idrico - con conseguente riduzione della capacità erosiva<sup>7</sup>.

Sebbene il fenomeno erosivo interessi in maniera più intensa la porzione d'alveo immediatamente a monte della pila, dove sono attinte le massime profondità di scavo, l'influenza del fenomeno si estende anche alla porzione di valle. In questa zona l'erosione del fondo è il risultato di vortici ad asse verticale, *wake vortices*, generati dalla convergenza, immediatamente a valle dell'ostacolo, delle traiettorie del flusso deviato. Dotati di una scarsa capacità di trasporto, in genere, i *wake vortex* contribuiscono in maniera marginale all'approfondimento dello scavo di erosione: il materiale da questi trasportato è spesso depositato immediatamente a valle della pila a causa del progressivo indebolimento cui vanno incontro allontanandosi dalla pila stessa.

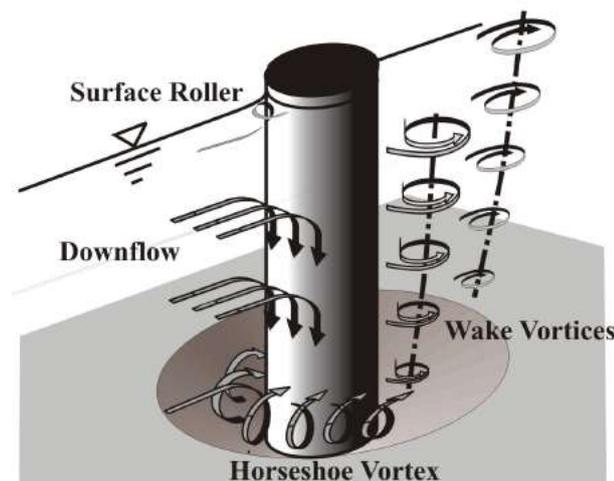


Figura 2: Caratteristiche principali del campo di moto intorno ad una struttura cilindrica verticale inserita in alveo- Melville, 2008.

L'erosione localizzata alla base delle pile/ spalle dei ponti può sviluppare pattern evolutivi differenti a seconda del verificarsi di particolari condizioni di moto associate all'esistenza di un trasporto solido di fondo di tipo generalizzato, cui si ci riferisce in termini di *clear water scour* e *live bed scour*.

---

<sup>7</sup> Numerose esperienze sperimentali hanno dimostrato che, a parità di ingombro della pila, l'influenza dei vortici di superficie si intensifica progressivamente in conseguenza alla graduale riduzione del tirante idrico. Al diminuire dell'altezza d'acqua, i vortici a ferro di cavallo risentono sempre più della formazione dei surface rollers che, avendo direzione di rotazione opposta, riducono la capacità di trasporto dei primi, con conseguente diminuzione della massima profondità dello scavo di erosione.

Si parla di *clear water scour* quando le condizioni di flusso della corrente idrica sono tali da non innescare il trasporto di fondo: la velocità di deflusso è al più pari a quella di incipiente movimentazione dei sedimenti d'alveo -  $V \leq V_c$  - e, di conseguenza, non c'è ripascimento dello scavo di erosione da monte. Viceversa, l'erosione si sviluppa in condizioni di *live bed* quando la corrente idrica provvede a rifornire di sedimenti lo scavo di erosione: velocità media indisturbata di flusso è maggiore di quella critica di scalzamento dei sedimenti-  $V > V_c$ - per cui esiste un trasporto solido di fondo di tipo generalizzato che si esprime nel susseguirsi di forme di fondo e nel parziale ripascimento dello scavo.

Come già anticipato, erosione localizzata alla base di strutture installate in alveo, ha un carattere fortemente non stazionario: la realizzazione di tali elementi strutturali da origine ad una perturbazione del regime di flusso che, esplicandosi in moti fortemente turbolenti, evolve nel tempo fino al raggiungimento di una configurazione finale di equilibrio. Ovviamente, la stabilizzazione del processo erosivo è attinta in maniera differente a seconda delle condizioni di trasporto solido di fondo esistenti a monte dell'attraversamento - *clear water o live bed condition*.

In condizioni di acque chiare – *clear water condition* – l'equilibrio è raggiunto allorché lo sforzo tangenziale alla base dello scavo di erosione attinge il valore critico di incipiente movimentazione dei sedimenti costituenti il fondo d'alveo.

Viceversa, in presenza di trasporto solido – *live bed condition* – non si raggiunge una condizione di equilibrio in senso stretto: dopo un'iniziale fase di rapida crescita, la profondità di erosione oscilla intorno alla configurazione di equilibrio, a causa del susseguirsi delle forme di fondo, che danno luogo ad un alternanza di fasi di parziale riempimento e parziale svuotamento dello scavo.

In altre parole mentre in assenza di trasporto solido di fondo l'equilibrio è raggiunto solo quanto gli sforzi tangenziali prodotti del vortice a ferro di cavallo, indebolendosi progressivamente, uguagliano quelli propri di scalzamento del materiale costituente il fondo, in condizioni di letto vivo l'equilibrio è dettato dal bilancio tra la portata solida in ingresso allo scavo - effetto del trasporto solido di monte- e quella in uscita -effetto dell'azione del vortice turbolento.

In entrambi i casi, la profondità di erosione di equilibrio, ossia il valore di profondità attinto al raggiungimento della condizione di equilibrio, è convenzionalmente definita come la distanza verticale tra il letto indisturbato ed il punto più depresso dello scavo.

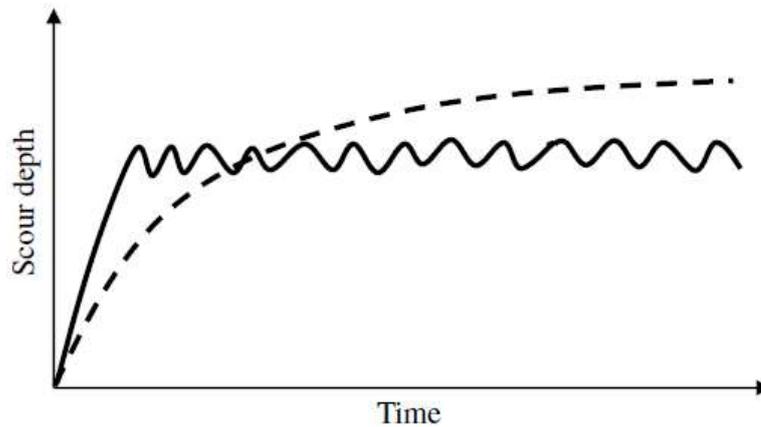


Figura 3: Variazione nel tempo della profondità di erosione localizzata alla base di installazioni in alveo, in assenza - linea tratteggiata - e in presenza- linea continua di trasporto solido di fondo di tipo generalizzato – Manes e Brocchini, 2015.

Come è chiaramente mostrato in figura, sebbene in condizioni di letto vivo la condizione di equilibrio sia raggiunta più velocemente, la corrispondente profondità di erosione risulta essere inferiore a quella attingibile in condizioni di *clear water*, nelle quali l'approfondimento dello scavo necessita scale temporali più ampie.

In merito ai tempi necessari alla stabilizzazione del processo erosivo in condizioni di *clear water*, il mondo scientifico si è espresso in maniera piuttosto differente: secondo alcuni autori la condizione di equilibrio è raggiunta solo asintoticamente dopo un tempo infinito, mentre secondo altri sono necessari tempi lunghi e finiti. La definizione della scala dei tempi ha ricadute sostanziali sulla definizione della profondità di equilibrio, per la quale, infatti, si osservano scarti dell'ordine del 10-20% - Lança et al.,2013.

#### 1.4.1 *Complessità del fenomeno e le formulazioni sperimentali*

L'interazione tra il campo di flusso e il fondo d'alveo intorno alla pila di un ponte è generalmente espresso mediante parametri adimensionali che ben descrivono i meccanismi che innescano il trasporto solido di fondo.

In generale, per una generica opera realizzata in alveo, il processo erosivo risulta dall'interazione di tre gruppi di parametri indipendenti, relativi alle caratteristiche idrauliche della corrente, alle caratteristiche geometriche della pila e alle caratteristiche granulometriche dei materiali costituenti il fondo d'alveo.

Per una assegnata corrente a pelo libero, stazionaria ed uniforme, impattante su una struttura verticale, di geometria nota, fondata su uno stato sedimentario uniforme, la

profondità dello scavo di erosione  $y_s$  al generico tempo  $t$  può esprimersi attraverso una relazione generale del tipo:

$$y_s = f \left[ \begin{array}{l} \text{flusso di piena}(\rho, \nu, V, h, g); \\ \text{granulometria del fondo}(\rho_s, d_{50}, \sigma_g, V_c); \\ \text{geometria della pila} (a, S_h, A_l); \\ \text{tempo} (t) \end{array} \right]$$

In cui  $\rho$  e  $\nu$  sono, rispettivamente, la densità e la viscosità cinematica del fluido,  $V$  e  $h$  la velocità media e il tirante idrico della corrente indisturbata,  $g$  l'accelerazione di gravità;  $d_{50}$  e  $\sigma_g$  rappresentano rispettivamente la dimensione media e deviazione standard geometrica della distribuzione granulometrica dei sedimenti costituenti il fondo d'alveo,  $\rho_s$  è la densità dei sedimenti,  $V_c$  la velocità critica di incipiente movimentazione dei sedimenti;  $a$  è la larghezza della sezione retta della pila<sup>8</sup>,  $S_h$  e  $A_l$  sono i parametri di forma e di orientamento della pila;  $t$  è la variabile temporale.

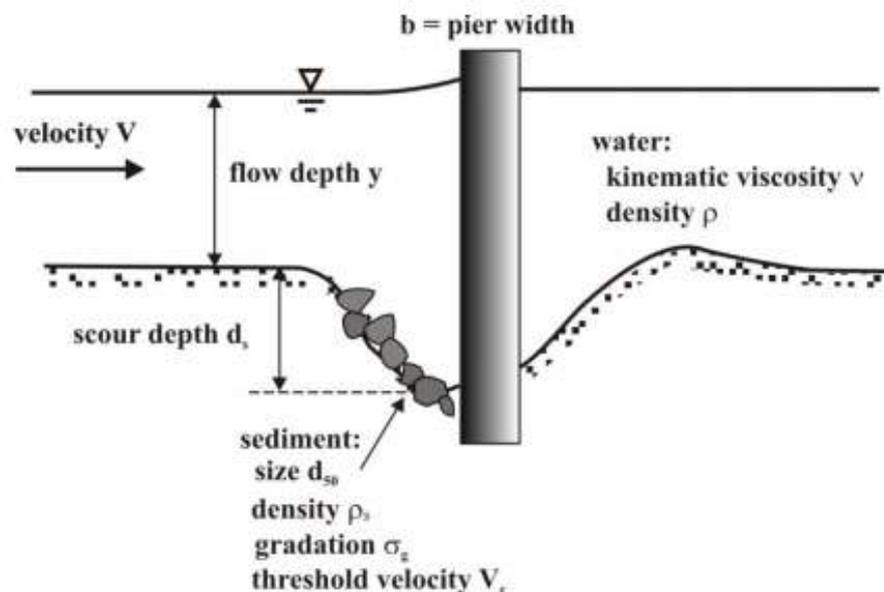


Figura 4: Principali parametri coinvolti nel processo di erosione localizzata alla base di una pila cilindrica isolata.

Assumendo costante la densità relativa dei sedimenti, normalizzando sulla dimensione della pila l'equazione può essere riscritta nella forma semplificata:

---

<sup>8</sup> Sezione ottenuta proiettando la pila sul piano verticale ortogonale al flusso idrico.

$$\frac{z_s}{b} = f \left[ \begin{array}{l} \text{flusso di piena} \left( \frac{Vb}{v}, \frac{V}{V_c}, \frac{y}{b}, \frac{V^2}{\sqrt{gb}} \right); \\ \text{granulometria del fondo} \left( \frac{b}{d_{50}}, \sigma_g \right); \\ \text{geometria della pila} (S_h, A_l); \\ \text{tempo} \left( \frac{Vt}{b} \right) \end{array} \right]$$

In cui i parametri ottenuti sono rispettivamente<sup>9</sup>:

- $V/V_c$  intensità della corrente, che considera la natura delle condizioni di moto esistenti a monte della pila - clear water o live bed condition;
- $Va/v$  numero di Reynolds, associato alla frequenza delle strutture turbolente - che tiene conto del regime di moto della corrente idrica;
- $y/a$  profondità normalizzata della corrente, che tiene conto del grado di interazione tra il vortice a ferro di cavallo e il surface roller;
- $V^2/ga$  numero di Eulero, associato alla vorticità delle strutture turbolente;
- $a/d_{50}$  associato alla granulometria media del materiale eroso;
- $\sigma_g$  non-uniformità granulometrica del materiale eroso;
- $S_h, A_l$  parametri geometrici della pila, associati alla sua geometria e allineamento rispetto alla corrente;
- $Vt/a$  velocità di erosione, associata alla scala temporale di sviluppo del processo erosivo.

Quella fornita è una formulazione generale della profondità massima di erosione al generico tempo  $t$ , in cui i rapporti di dipendenza tra le variabili sono specifici delle caratteristiche idrauliche e geometriche del modello sperimentale da cui sono state dedotte.

---

<sup>9</sup> Le modalità con cui i parametri introdotti influenzano l'evoluzione della profondità di scavo è ben documentata in numerosi articoli scientifici – per alcuni di questi si veda la bibliografia.

Negli ultimi sessant'anni, un'ampia campagna sperimentale ha prodotto numerose formulazioni per il calcolo della profondità di *clear water scour* localizzata alla base di pile<sup>10</sup> installate in strati sedimentari privi di coesione. I modelli predittivi sono state dedotti dall'interpretazione dei risultati sperimentali derivati da prove di laboratorio che, riproducendo un modello semplificato del sistema fisico, hanno permesso lo studio del fenomeno.

Tra le soluzioni empiriche disponibili in letteratura, si menziona la relazione di Melville, 1997, a titolo di esempio:

$$y_s = K_a \cdot K_I \cdot K_{d_{50}} \cdot K_{S_l} \cdot K_{A_l} \cdot K_G \cdot K_t$$

In cui i fattori moltiplicativi  $K_i$  tengono conto, rispettivamente, di :

- $K_a$  dimensione della pila;
- $K_I$  intensità di flusso;
- $K_{d_{50}}$  dimensione media del materiale eroso;
- $K_{S_l}$  geometria della pila;
- $K_{A_l}$  allineamento della pila, rispetto alla corrente impattante;
- $K_G$  geometria del canale;
- $K_t$  influenza del tempo.

Sebbene si ravvisi un impianto generale comune alle formulazioni disponibili in letteratura, i rapporti di dipendenza tra le variabili sono specifici delle caratteristiche idrauliche e geometriche del modello sperimentale da cui sono state derivate.

Ovviamente, a causa della molteplicità delle configurazioni sperimentali da cui sono state dedotte, le soluzioni disponibili in letteratura difficilmente trovano reciproco accordo nei risultati, aspetto che si traduce nell'impossibilità di affidarsi ad un'unica soluzione per la previsione della profondità di erosione. Per tale ragione, la valutazione della geometria dello scavo andrebbe sviluppata con un approccio cautelativo che preveda la applicazione congiunta di diverse modelli ed il successivo confronto critico dei risultati- *Brath A. & Montanari A.*

---

<sup>10</sup> La sperimentazione ha riguardato prevalentemente i processi erosivi che si sviluppano in condizioni di *clear water* interessando strati erodibili non coesivi. La ragione di ciò è legata alla maggiore gravosità di tali situazioni rispetto ai casi di letto vivo piuttosto che di fondo corazzato che, viceversa, ai quali sono associate conseguenze meno gravose.

Inoltre i problemi di scala di cui le formulazioni empiriche risentono, motivano una sostanziale perplessità circa la loro capacità di interpretare i dati di campo<sup>11</sup>.

In altre parole, sebbene leghino i diversi parametri coinvolti nel processo erosivo, la natura empirica delle soluzioni disponibili in letteratura e l'assenza di una struttura teorica a loro supporto ne limitano l'attendibilità dei risultati che, per quanto detto, sono indispensabili per il corretto dimensionamento delle fondazioni e/o per un'attenta valutazione del rischio.

Nel tentativo di superare tali criticità, recentemente è stato derivato un modello teorico per la previsione della profondità di equilibrio in scavi localizzati alla base di pile cilindriche isolate<sup>12</sup> - Manes e Brocchini,2015.

Collocandosi in un quadro esplicitamente dottrinale – derivante dalla teoria fenomenologica della turbolenza-, il modello proposto dagli autori non soltanto risulterebbe esente da problemi connessi alla scala di sviluppo del processo erosivo ma permetterebbe anche di precisare gli effetti prodotti dai gruppi adimensionali coinvolti.

La soluzione teorica proposta dagli autori per la previsione del *clear water scour* è approfondita nel paragrafo successivo. Esulando dai fini di questa trattazione, per approfondimenti inerenti il modello sviluppato per la condizione di *live bed* si rimanda alla lettura dell'articolo "*Local scour around structures and the phenomenology of turbulence*", Manes e Brocchini,2015.

#### **1.4.2 Il modello teorico predittivo della $y_{se}$ per scavi di erosione in condizioni di clear water - Manes e Brocchini,2015**

Nel caso in cui il rapporto tra la velocità media indisturbata della corrente idrica e la velocità critica di scaldamento dei sedimenti costituenti il letto ricadesse entro l'intervallo

$$V/V_c \in [0.5; 1]$$

la condizione di moto risultante è definita di *clear water*, ossia assenza di trasporto solido di fondo di tipo generalizzato.

---

<sup>11</sup> Recenti ricerche hanno dimostrato che le profondità di erosione localizzata, misurate alla scala di campo, possono essere significativamente inferiori rispetto a quelle predette dalle formule – Ettema et al. (1998), Sheppard et al. (2004), Ettema et al. (2006).

<sup>12</sup> La pila isolata costituisce il modello più semplice di struttura utile alla riproduzione, in scala ridotta, del fenomeno di erosione localizzata ai fini di indagini sperimentali tese a chiarirne le modalità evolutive.

In tali condizioni, l'equilibrio è raggiunto quanto gli sforzi tangenziali prodotti del vortice a ferro di cavallo, indebolendosi progressivamente, uguagliano quelli propri di scalzamento del materiale costituente il fondo.

Risultando nulla la pendenza locale dello scavo in corrispondenza del punto di massima profondità - che generalmente ricade nella porzione di monte dello scavo – evidentemente in tale punto la tensione tangenziale critica dei sedimenti sarà indipendente dalla pendenza locale dello scavo. Pertanto, assumendo che all'interno dello scavo si realizzi un regime di moto turbolento completamente sviluppato, la condizione di equilibrio, in assenza di trasporto solido di fondo, può essere scritta nella forma:

$$\tau \leq \tau_c \sim (\rho_s - \rho)gd_{50}$$

Dove si è indicato con  $\tau$  lo sforzo tangenziale nel punto di massima profondità dello scavo,  $\tau_c$  tensione tangenziale critica di scalzamento dei sedimenti,  $\rho_s$  e  $\rho$  le densità dei sedimenti e del fluido, rispettivamente,  $d_{50}$  dimensione media dei sedimenti e  $g$  l'accelerazione di gravità.

Adottando un approccio basato sulla fenomenologia della turbolenza completamente sviluppata [Bombardelli & Gioia, 2005, e Gioia & Bombardelli, 2006], e ricorrendo alle leggi di Kolmogorov (1991) di interazione tra i vortici di piccola e grande scala, Manes e Brocchini hanno derivato la seguente relazione:

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

Secondo cui il rapporto tra la velocità caratteristica dei vortici di dimensione  $l$ , ossia  $u_l$ , e quella caratteristica dei vortici di più grandi dimensioni - $S$  - che si generano entro il volume di scavo, ossia  $V$ , è si scala con la radice terza del rapporto della loro dimensioni, rispettivamente  $l$  e  $S$ .

Richiamando il concetto di scala caratteristica di Kolmogorov, definita come la dimensione dei vortici turbolenti a partire dalla quale è innescato il fenomeno di cascata dell'energia turbolenta,  $\eta$ , e supponendo che i sedimenti, costituenti il fondo alveo, abbiano dimensione  $d$  compresa nell'intervallo inerziale<sup>13</sup>,  $\eta \ll d \ll S$ , allora, in

---

<sup>13</sup> Per intervallo inerziale si intende l'intervallo di scale nel quale sono assenti sia la produzione che la dissipazione di energia cinetica turbolenta, ma, viceversa, è presente solo il trasferimento di energia dovuto alle interazioni non lineari. Tale range è definito da due scale limite che sono la dimensione  $S$  dei vortici più grandi e la scala  $\eta$  caratteristica di Kolmogorov.

condizioni di moto assolutamente turbolento le azioni di taglio agenti sulla superficie dello scavo saranno determinate dal solo sforzo di Reynolds<sup>14</sup>, ossia:

$$\tau \sim \rho u_d V$$

dove  $u_d \sim V \left(\frac{d}{S}\right)^{1/3}$  è la velocità caratteristica dei vortici di dimensione pari a quella dei sedimenti, ossia  $d$ .

Di conseguenza, sostituendo nell'equazione precedente, lo sforzo di taglio agente nel punto di massima profondità dello scavo di erosione è funzione della velocità caratteristica  $V$ , a mezzo della:

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

Per poter pervenire ad una formulazione compiuta dello sforzo tangenziale nel punto di massima profondità dello scavo di erosione è necessario che siano precisati i termini di velocità e dimensione dei vortici turbolenti di ampia scala –  $S$  e  $V$ :

Sulla base di principi energetici, il tasso con cui è prodotta/dissipata l'energia cinetica turbolenta può essere definito come la potenza associata ai vortici di più grandi dimensioni per unità di massa d'acqua contenuta nel loro volume caratteristico. Esprimendo la potenza  $P$  dei vortici turbolenti di grandi dimensioni come il lavoro compiuto dalla forza di Drag agente sulla porzione del cilindro effettivamente esposta alla corrente, la loro massa  $M$  attraverso  $M \sim \rho S^3$ , e richiamando, dalla teoria della turbolenza di Kolmogorov, la relazione  $\varepsilon \sim \frac{V^3}{S}$ , gli autori sono pervenuti alla seguente:

$$\varepsilon = \frac{P}{M} \sim \frac{a C_d (V')^3}{S^2} \sim \frac{V^3}{S}$$

In cui,  $V'$  è la velocità di media profondità della corrente idrica,  $C_d$  è coefficiente di Drag,  $a$  il diametro del cilindro. Ricavata da tale catena di uguaglianze la velocità  $V$  della

---

<sup>14</sup> In condizioni di moto assolutamente turbolento, trascurando le componenti viscosse, le azioni di taglio agenti sulla superficie dello scavo sono risultano dal solo sforzo di Reynolds, ossia:

$$\tau = \rho \overline{u'w'}$$

In cui  $\overline{u'}$  e  $\overline{w'}$  sono le fluttuazioni medie delle componenti, parallela e normale, della velocità.

corrente,  $V \sim V' \left( \frac{aC_d}{S} \right)^{1/3}$  gli autori hanno ottenuto una formulazione per lo sforzo tangenziale agente nel punto di massima profondità dello scavo di erosione, ossia:

$$\tau \sim \rho (V')^2 \left( \frac{aC_d}{S} \right)^{2/3} \left( \frac{d}{S} \right)^{1/3}$$

Assumendo che i vortici che si formano all'interno del volume di scavo *–horseshoe vortex–* abbiano dimensioni confrontabili con profondità di scavo, allora in condizioni di equilibrio, risultando questi del tutto contenuti nello scavo di erosione, la massima profondità di scavo  $y_s$  sarà approssimabile all'estremo superiore del range inerziale, ossia la dimensione dei vortici più grandi,  $S$ :

$$S \sim y_s$$

Ma allora, poiché in condizioni di *clear water* l'equilibrio è attinto quando è verificata l'uguaglianza  $\tau \sim \tau_c$ , sulla base delle ipotesi formulate la profondità massima di erosione in condizioni di equilibrio sarà esprimibile attraverso:

$$S \sim y_s \sim \left( \frac{V'}{g} \right)^2 \left( \frac{aC_d}{d} \right)^{2/3} \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right)$$

O alternativamente :

$$\frac{y_s g}{(V')^2} \sim \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) (C_d)^{2/3} \left( \frac{a}{d} \right)^{2/3}$$

Si fa osservare che il modello teorico qui presentato è valido per scavi di erosione che si sviluppano in assenza di trasporto solido di fondo, per effetto di correnti assolutamente turbolente, in presenza di materiali solidi sedimentari di dimensioni comprese entro la scala inerziale di Kolmogorov. In modo particolare la validità di questo è limitata a diametri dei sedimenti compresi entro il range inerziale di Kolmogorov, ossia:

$$\eta \ll d \ll S$$

Questo intervallo, infatti, assicurerebbe che all'interno dello scavo si realizzi un regime di flusso assolutamente turbolento.

Che definisce esattamente le condizioni di validità del modello Manes e Brocchini, 2015.

Sulla base degli stessi principi energetici che hanno permesso la definizione della velocità caratteristica dell'horseshoe vortex –  $\varepsilon = \frac{P}{M}$  – la scala di Kolmogorov,  $\eta \sim \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}}$  – Kolmogorov, 1991 – può esprimersi nella forma  $\eta \sim \left(\frac{\nu^3 S}{C_d V'^3}\right)^{\frac{1}{4}}$ . Ricordando che in condizioni di equilibrio vale la relazione,  $S \sim y_s \sim a$ , la condizione di applicabilità del modello Manes e Brocchini 2015 si riscrive nella forma:

$$\left(\frac{\nu^3 a}{C_d V'^3}\right)^{\frac{1}{4}} \ll d_{50} \ll a$$

Pertanto, la massima profondità di scavo in condizioni di equilibrio potrà essere stimata attraverso il modello teorico qui presentato qualora il processo erosivo si sviluppi in condizioni di clear water, in presenza di materiali solidi sedimentari di dimensioni comprese entro il range di validità restituito sopra.

### ***1.4.3 I regimi evolutivi ed il crossover point per scavi di erosione in condizioni di clear water.***

A partire dalla teoria fenomenologica della turbolenza, adottando alcune ipotesi semplificative relative alla topologia dell'horseshoe vortex e ai rapporti tra questo e la geometria dello scavo di erosione, Manes e Brocchini hanno sviluppato un modello teorico per la stima della profondità massima di scavo in condizioni di equilibrio, alla luce del quale le dinamiche evolutive dello scavo di erosione rifletterebbero l'evoluzione nel tempo del vortice a ferro di cavallo. Ammettendo che la dimensione caratteristica dell'horseshoe vortex si scali con la massima profondità dello scavo di erosione e che il volume del vortice stesso si scali con la potenza terza della sua dimensione caratteristica, ossia:

$$\begin{cases} S \sim y_s^3 \\ V_{HS} \sim S^3 \end{cases}$$

Allora il volume del vortice a ferro di cavallo si scala esso stesso con la potenza terza della massima profondità di erosione,

$$V_{HS} \sim y_s^3$$

Inoltre, poiché dopo un breve tempo, il vortice a ferro di cavallo è del tutto contenuto nel volume di erosione - Dargahi,1990, Unger & Hager, 2007 – evidentemente, il volume dello scavo di erosione può essere usato per quantificare il volume dello stesso horseshoe vortex – Rogers et al., 2019.

In altre parole, monitorare l’evoluzione dello scavo di erosione permetterebbe di chiarire le dinamiche evolutive del vortice a ferro di cavallo.

Tali premesse si risolvono in un’ipotesi innovativa secondo cui esiste un legame lineare tra la potenza terza della massima profondità di scavo ed il volume eroso, esprimibile nella forma:

$$W \sim y_s^3$$

Dipendenza che supporta l’intero modello teorico proposto da Manes e Brocchini, 2015.

Dal recente lavoro sperimentale<sup>15</sup> di Rogers et al., 2019, è emerso che la dipendenza del volume di erosione dalla potenza terza della massima profondità di scavo si esplica attraverso tre differenti regimi, associati a altrettante fasi evolutive del vortice a ferro di cavallo.

Il primo regime è rilevato nei primi istanti di formazione dello scavo ed è sostanzialmente associato alla generazione e al completo sviluppo del vortice a ferro di cavallo. In questa fase l’erosione ha avvio in corrispondenza dei fianchi della pila per poi allargarsi alla regione di monte della pila, definendo l’impronta “circolare” dello scavo.

A questo segue un secondo regime, anch’esso lineare ma caratterizzato da una minore pendenza: l’horseshoe vortex si sviluppa stabilmente e lo scavo di erosione evolve assumendo una caratteristica geometria tronco conica inversa. Questa fase di crescita lineare si esaurisce dopo un lungo periodo di tempo, culminando in un terzo regime caratterizzato da una “stabilizzazione” del volume di erosione, non corrisposta da un’altrettanta stabilizzazione della massima profondità di scavo.

Tra il secondo ed il terzo regime gli autori hanno riscontrato la presenza di un punto di inflessione del modello lineare che testimonia un cambiamento nella fisica dell’evoluzione dell’erosione localizzata in assenza di trasporto solido di fondo.

---

<sup>15</sup> Da questo momento si farà riferimento a questo in termini di RMT19.

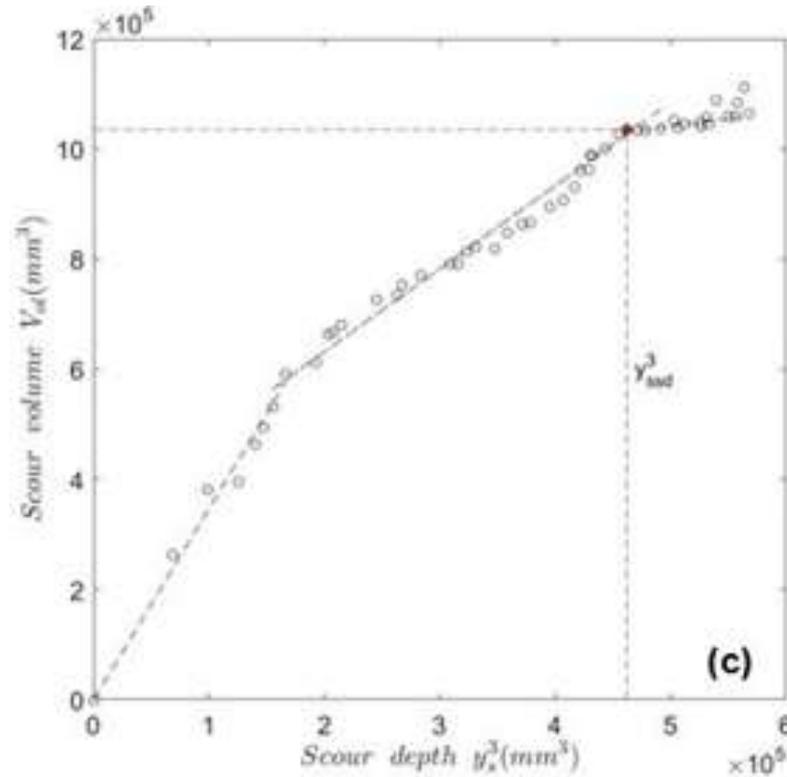


Figura 5: Variazione del volume eroso con la potenza terza della massima profondità di scavo localizzato alla base di una pila cilindrica di dimensione  $a=76 \text{ mm}$  – Rogers et al., 2019.

La transizione dal secondo al terzo regime è stata giustificata dagli autori ricorrendo alla teoria fenomenologica della turbolenza, in accordo con l'approccio seguito da Manes e Brocchini, 2015.

Come è stato anticipato, l'energia cinetica turbolenta prodotta/dissipata per unità di massa del vortice a ferro di cavallo può esprimersi nella forma :

$$\varepsilon = \frac{P}{M} \sim \frac{\frac{1}{2} \rho a C_d S (V')^3}{\rho W}$$

In cui,  $V'$  è la velocità di media profondità della corrente idrica,  $C_d$  è coefficiente di Drag e il prodotto  $aS$  è l'ingombro trasversale della pila esposta alla corrente.

Poiché in condizioni di equilibrio la dimensione caratteristica dell'*horseshoe vortex* si scala con la profondità di scavo, la relazione precedente si riscrive nella forma:

$$\varepsilon = \frac{P}{M} \sim \frac{a C_d (V')^3 y_s}{2 W}$$

Per cui il tasso con cui l'energia cinetica turbolenta è prodotta si scala con il rapporto della massima profondità di scavo sul corrispondente volume eroso.

Plottando il tasso di produzione di energia cinetica turbolenta in funzione del tempo, normalizzato sul un tempo in cui il crossover si manifesta -  $t_{ssd}$  - è emerso che l'inflessione di fatto anticipa una fase di stabilizzazione del potere erosivo dell'*horseshoe vortex*. Infatti, prima del punto di crossover -  $t/t_{ssd} < 1$  - la produzione di energia cinetica turbolenta è prodotta con un tasso strettamente decrescente, in accordo con il progressivo indebolimento del vortice a ferro di cavallo. Questo andamento è mantenuto fino al tempo  $t_{ssd}$  di crossover, a partire dal quale le curve assumono un profilo sostanzialmente orizzontale. In questo senso, dopo il punto di crossover la produzione di energia cinetica turbolenta sembra raggiungere un plateau -  $t/t_{ssd} > 1$ .

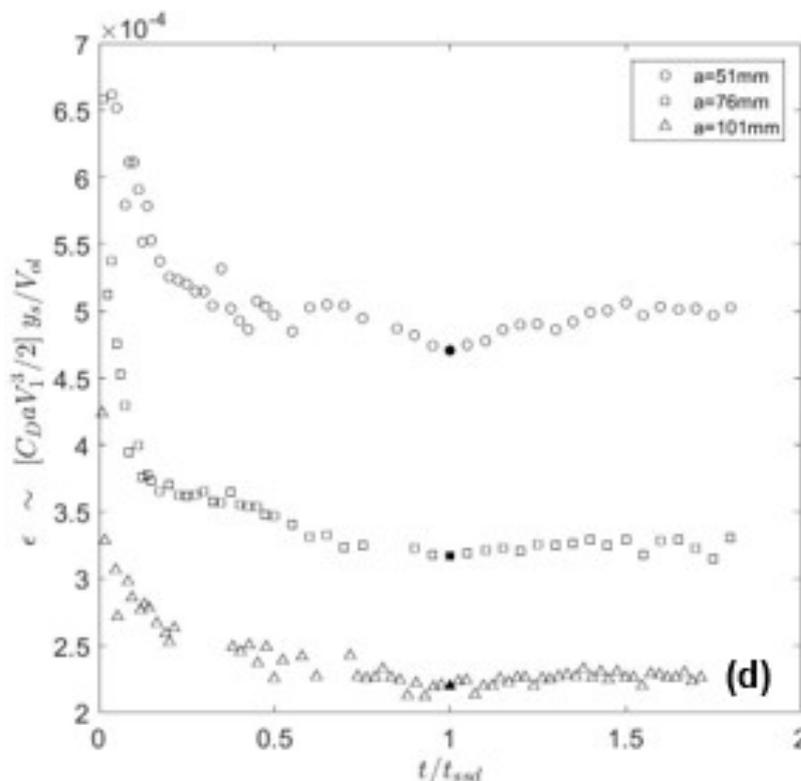


Figura 6: Variazione del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta nel tempo, normalizzata sul tempo di crossover - $t_{ssd}$ - Rogers et al., 2019.

Pertanto, il punto di crossover individua il tempo al quale il potere erosivo dell'*horseshoe vortex* risulta stabilizzato.

Inoltre, quando è raggiunta questa condizione si osserva un consolidamento del volume di sedimenti eroso, non accompagnato dalla stabilizzazione delle massime profondità di scavo. Questo significa che il terzo regime, individuato dal punto di crossover, individua una condizione per la quale l'approfondimento dello scavo non è corrisposto dall'aumento del volume dello stesso. Ciò accade in conseguenza della stabilizzazione

del potere erosivo del *horseshoe vortex* che è ancora sufficiente a determinare l'approfondimento dello scavo, nella zona di monte della pila, ma non ad allontanare definitivamente i sedimenti rimossi. Ai fianchi della pila, infatti, l'energia del vortice è insufficiente a mantenerli in sospensione per cui questi depositano all'interno dello scavo di erosione, colmandolo parzialmente. In questo senso, la sovrapposizione degli effetti prodotti dai fenomeni di erosione, a monte della pila, e di deposizione ai lati determina la stabilizzazione del volume e il costante aumento della profondità massima di erosione.

## 2. Le prove di erosione ed il setup sperimentale

### 2.1 Il canale

Gli esperimenti qui discussi sono stati condotti presso il laboratorio di idraulica “Giorgio Bidone” del dipartimento di ingegneria ambientale del Politecnico di Torino.

Le prove di erosione sono state sviluppate in un canale a sezione rettangolare, le cui dimensioni sono riportate in Tabella 1.

*Tabella 1: Geometria del canale impiegato per l'esecuzione delle prove di erosione.*

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

In particolare, la geometria del canale si è rivelata particolarmente adatta a consentire un'adeguata disposizione planimetrica delle camere e la realizzazione di condizioni idrauliche ottimali per lo sviluppo del volume di erosione.

Il canale è realizzato interamente in materiale metallico ad eccezione delle pareti laterali che, diversamente, sono realizzate in vetro, condizione che si è rivelata particolarmente utile per l'osservazione diretta processo indagato.

Per tutta la sua lunghezza, il fondo del canale è rivestito da lastre in cemento di dimensioni planimetriche  $2\text{ m} \times 0.61\text{ m}$  e uno spessore di  $0.10\text{ m}$ . La prova ha interessato una porzione limitata del canale, ottenuta in seguito alla rimozione della penultima lastra di valle. Sedimenti quarzo-arenosi, aventi dimensione granulometrica media di  $1.7\text{ mm}$ , sono stati impiegati per riempire il volume liberato e realizzare uno strato erodibile pressoché omogeneo<sup>16</sup>.

Al fine di pervenire ad una sua caratterizzazione fisica e granulometrica, preliminarmente setacciato<sup>17</sup>, il materiale di riempimento è stato sottoposto a tre indipendenti operazioni di campionamento e vagliatura. Queste hanno permesso la ricostruzione della curva

---

<sup>16</sup> Conservare la pavimentazione a monte dell'ambiente di prova assicura che le misure di erosione localizzata non siano alterate dalla degradazione generale del letto di monte, che evidentemente è mantenuto fisso.

<sup>17</sup> L'operazione di setacciatura ha permesso la rimozione di componenti indesiderate – per natura e dimensioni – e l'ottenimento di un materiale di riempimento uniforme dal punto di vista granulometrico.

granulometrica e la determinazione del diametro medio dei sedimenti – diametro caratteristico  $d_{50}$ .

Circa 2 m a valle dell'ambiente di prova è posizionata una paratoia, la cui regolazione permette di realizzare le condizioni di flusso derivanti dai calcoli preliminari, e quindi fissare il tirante idrico della corrente al livello corrispondente alla portata erogata dalla pompa.

Un sistema di canali, installati al di sotto della pavimentazione, permette il collettamento e il ricircolo dei volumi d'acqua stramazanti. Tra le sezioni di monte e valle del canale si attesta una prevalenza totale inferiore a 7 m: una pompa FLYGT BIBO 2125.81 permette di vincere il gradiente esistente assicurando, contestualmente, una portata massima erogabile di circa 95 l/s.

Inoltre, il circuito idraulico che alimenta il canale è dotato di un by-pass che permette di gestire la variabilità delle portate da alimentare al canale, adattandole alle necessità sperimentali.

Un flussimetro elettromagnetico è impiegato per la lettura della portata alimentata al canale. Questo, costituito da un sensore, inserito in condotta di alimentazione, e da un convertitore, permette una lettura bidirezionale del flusso, assicurando la stabilità delle misure.

## 2.2 I dispositivi di ripresa

Recente e innovativo è l'impiego di dispositivi *consumer-grade*, come le fotocamere della linea GoPro, in rilievi fotogrammetrici in acqua: la semplicità di utilizzo e le ottime



Figura 7: Fotocamere GoPro Hero 5 Session impiegata per l'acquisizione dello scavo di erosione.

prestazioni ne hanno determinato l'ampia diffusione mentre i loro ridotti prezzi di mercato ne hanno che determinato la competitività e, conseguentemente l'ottimo rapporto qualità/prezzo.

Nell'ambito del presente lavoro sperimentale, l'acquisizione dello scavo di erosione è stata affidata a sei fotocamere *waterproof* GoPro Hero 5 Session, attivate contemporaneamente attraverso il telecomando Smart Remote ad intervalli di tempo definiti preliminarmente su scala logaritmica.

A parità di performance, la scelta della serie Hero 5 Session è stata indirizzata principalmente dal piccolo ingombro di questi modelli e dalla loro capacità impermeabile fino a 10 m.

I dispositivi sono posizionati all'interno del flusso idrico in modo da garantire la completa immersione della focale, evitando così fenomeni di riflessione e rifrazione ottica e, di conseguenza, l'ottenimento di immagini distorte. Allo stesso tempo, per ragioni legate alla potenziale invasività della metodologia, l'affondamento delle camere è limitato entro pochi centimetri dalla superficie libera, minimizzando così il grado di interazione con le componenti turbolente del flusso, responsabili dell'erosione, e garantendo la non intrusività del sistema di acquisizione nei confronti del processo indagato.

I tempi di acquisizione sono stati definiti su una scala logaritmica estesa all'intera durata della prova – 10 ore. Dati i lunghi tempi sperimentali, per il monitoraggio completo dello scavo di erosione è stato necessario settare le camere in modalità foto - “Lineare – 10MP” – che, richiedendo un minore consumo energetico rispetto alla modalità video, permette di terminare la prova con camere ancora parzialmente cariche.

L'acquisizione sincrona della scena ad intervalli regolari di tempo potrebbe ottenersi attraverso un opportuno settaggio del timer interno alle fotocamere. In realtà, non potendo regolare il timer interno, a causa della distribuzione logaritmica dei tempi di acquisizione, la sincronizzazione degli scatti è stata conseguita attraverso l'impiego del telecomando Smart Remote. Attraverso un controllo a distanza di tutte le loro funzioni, questo dispositivo permette di attivare contemporaneamente le fotocamere a cui è abbinato garantendo la contemporaneità degli scatti indispensabile alla corretta ricostruzione del volume di scavo. L'enorme potenziale del GoPro Smart Remote è assicurato dalla sua capacità di mantenere il segnale Wi-Fi fino ad una distanza aerea di 180m e di controllare fino a 50 fotocamere contemporaneamente.



*Figura 8: Telecomando Smart Remote per il comando a distanza delle fotocamere .*

Per il posizionamento delle GoPro è stato impiegato un supporto fisso in legno, costituito da due traverse verticali tra le quali è interposto un telaio principale a “V”, al quale sono

agganciate direttamente le fotocamere. Il telaio è a sua volta assicurato alle pareti del canale da due morsetti, applicati agli elementi verticali. La struttura sebbene rudimentale si presta alle esigenze di prova essendo regolabile la sua posizione rispetto al flusso. Il profilo a “V” del telaio principale, al quale sono applicate le fotocamere, risponde alla necessità di abbracciare la pila e, quindi, coprire interamente l’area entro la quale si esaurisce il processo erosivo, garantendo un’acquisizione ottimale della scena.

Quattro lampade a LED, montate sulle pareti del canale e disposte simmetricamente rispetto ad esso, assicurano, per l’intera durata della prova, livelli di illuminazione consoni all’ottenimento di immagini adeguatamente luminose.

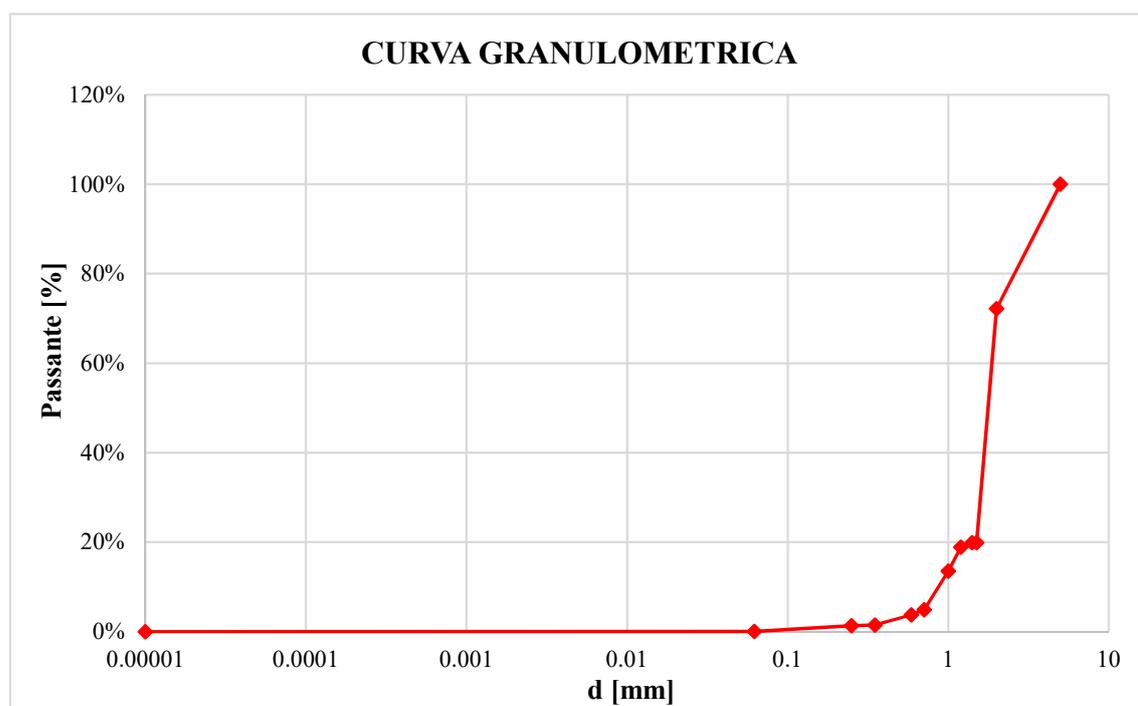
### 2.3 La prova di erosione

La sperimentazione che ha dato seguito al presente elaborato ha inteso indagare le dinamiche evolutive dei fenomeni erosivi innescati alla base di pile isolate di diversa geometria e dimensione.

L'impiego di tecniche fotogrammetriche consente di ricostruire la curva fenomenologica dei processi osservati, restituita in funzione dei parametri geometrici di profondità massima e di volume dello scavo, ottenuti dall'elaborazione delle immagini acquisite in fase di prova.

Ai fini sperimentali, le pile isolate sono state simulate da quattro strutture prismatiche con sezioni rette di due diverse geometrie: due circolari, di diametro 5 cm e 9 cm., e due a sezione retta quadrata, di lato 5 cm e 9 cm. Il materiale utilizzato per la riproduzione del letto erodibile è costituito da sedimenti sciolti quarzo-arenosi -  $\rho_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$  - di dimensioni pressoché grossolane. Tre preliminari analisi granulometriche, eseguite su tre distinti campioni del materiale, hanno restituito un diametro medio delle sabbie di circa 1.8 mm.

In *Figura 9* si riporta la curva granulometrica del materiale sciolto utilizzato per la riproduzione del fondo erodibile.



*Figura 9: Curva granulometrica dei sedimenti costituenti il letto mobile erodibile.*

Per assicurare la replicabilità delle prove di erosione e garantire la confrontabilità dei dati di profondità e volume acquisiti, è stata adottata una procedura standardizzata per la preparazione dell'ambiente di prova.

Per ciascuna prova di erosione, la messa a punto del set-up sperimentale si è articolata nelle seguenti fasi operative:

- Sedimenti quarzo-arenosi sono impiegati per la realizzazione di uno strato sedimentario erodibile, di spessore pari a 10 cm. Questi sono riversati sul fondo del canale fino al completo riempimento del volume liberato in seguito alla rimozione della lastra in cemento<sup>18</sup>.
- Colmato il gap, lo strato granulare è livellato mediante una lastra di acciaio, in modo da ottenere una condizione di planarità, necessaria alla misurazione della profondità di scavo.
- Agendo sulla valvola di monte e, contemporaneamente sulla paratoia di valle, si provvede al riempimento del canale fino all'ottenimento del tirante idrico di calcolo. Ciò è conseguito impiegando basse velocità di flusso, onde evitare il trascinamento dei sedimenti posti sul fondo.
- In condizioni stazionarie, a tirante idrico e portata stabilizzati, un target metallico è posto al centro dello strato di erosione. Il supporto in legno è posizionato sul flusso e le camere, ad esso agganciate, vengono orientate in modo che la piastra metallica ricada al centro dell'area ripresa. L'ampiezza dell'inquadramento, così come l'immersione della focale, è controllata a distanza attraverso un'apposita app. Quindi utilizzando lo Smart Remote, le GoPro sono attivate e la scena catturata. Le immagini acquisite saranno elaborate successivamente per la determinazione dei parametri interni ed esterni delle camere.

---

<sup>18</sup> La rimozione della penultima lastra in cemento rende disponibile un volume di dimensioni 2 m x 0.61 m x 0.10 m che, riempito con materiale granulare di dimensioni medie pari a 0.18 cm, permette la realizzazione dello strato erodibile.



*Figura 10: Posizionamento del target di calibrazione ed acquisizione in stazionari per la definizione del sistema di riferimento locale.*

Questa operazione è fondamentale ai fini delle elaborazioni poiché mira alla definizione di un datum planimetrico rispetto al quale riferire la posizione dei punti della scena ripresa. Il datum viene fatto coincidere con il letto di erosione e ad esso sarà attribuito la quota zero: la profondità di erosione sarà definita come distanza verticale tra il letto piano, sul quale è fissata l'origine del riferimento, e il piano orizzontale passante per il generico punto dello scavo di erosione di cui si intende valutare la posizione

altimetrica. In altre parole il target è impiegato per la definizione di una superficie di riferimento, a quota zero rispetto alla quale definire la posizione altimetrica di qualsiasi punto/ oggetto presente sulla scena.

- Mantenendo il supporto e le camere in posizione fissa, il target è rimosso per consentire la messa a punto del set-up sperimentale. Le condizioni di portata e di tirante idrico di prova sono realizzate regolando contemporaneamente la valvola di monte e la paratoia di valle.
- Realizzate le condizioni idrauliche di calcolo, si procede al posizionamento della pila di prova. Questa è collocata al centro del letto mobile, laddove era stato precedentemente collocato il target e infissa per 0.10 m all'interno dello strato sedimentario. Il tempo zero, al quale il cronometro è avviato, è fissato a partire dall'istante in cui è introdotta la pila.
- Le immagini dello scavo di erosione sono catturate ad istanti di tempo stabiliti secondo una scala di tipo logaritmica: le acquisizioni sono più frequenti



*Figura 11: Posizionamento della pila sperimentale e avviamento della prova di erosione.*

nella fase iniziale del processo, quando si registra una rapida evoluzione dello scavo, divenendo progressivamente più sporadiche man mano che il sistema tende alla condizione di equilibrio.

- Ciascun test è sviluppato per 10 ore, durante le quali si provvede, attraverso l'utilizzo dello Smart Remote, all'acquisizione della scena. Queste sono poi processate ai fini della ricostruzione tridimensionale dello scavo di erosione e delle misurazioni di profondità e di volume, ottenute per ciascun istante di acquisizione.

Le condizioni al contorno sono monitorate per l'intera durata della prova: un'asta graduata, applicata alla parete esterna del canale, ed un flussimetro elettromagnetico – *paragrafo 2.1* - permettono, rispettivamente, il controllo in continuo del tirante idrico e della portata volumetrica alimentata al canale.

### ***2.3.1 Le condizioni idrauliche ed il setup sperimentale***

Ai fini della pianificazione delle prove di erosione, è stato necessario valutare come le condizioni di setup sperimentale influenzino l'evoluzione dello scavo di erosione e quindi i risultati sperimentali. In particolare, imponendo il rispetto di talune condizioni, di seguito chiarite, si è pervenuti alla messa a punto del setup sperimentale, che ha riguardato la determinazione del tirante idrico da adottare e di un ventaglio di possibili diametri delle pile sperimentali.

#### ***2.3.1.1 Definizione del tirante idrico e delle dimensioni delle pile***

Come è noto, il processo di erosione localizzata è influenzato principalmente dalla dimensione della pila, valutata nella direzione trasversale al flusso, dalla profondità della corrente e dalla dimensione granulometrica dei sedimenti costituenti il letto. Al fine di pervenire alla definizione del tirante idrico e alla determinazione degli ingombri delle pile da adottare, si è fatto riferimento ad alcuni rapporti geometrici definiti a partire da tali grandezze e al modo in cui questi intervengono nell'evoluzione del fenomeno erosivo. In particolare, la pianificazione del setup è stata sviluppata in modo da soddisfare, per quanto possibile, le seguenti esigenze sperimentali:

1. Perché possano ritenersi trascurabili degli effetti indotti sul flusso dagli strati limite alle pareti è necessario che la sezione idrica possa essere equiparabile a una sezione rettangolare infinitamente larga. Pertanto nota la geometria del canale, in

particolare la sua larghezza  $B = 61 \text{ cm}$ , il tirante idrico di setup dovrà essere tale da verificare:

$$\frac{B}{h} > 5$$

2. Affinché il fenomeno erosivo indagato non risenta degli effetti di bordo, è necessario che le pile impiegate determinino, singolarmente, un modesto restringimento della sezione idrica della corrente. Pertanto, nota la geometria del canale, in particolare la sua larghezza  $B=61 \text{ cm}$ , l'ingombro trasversale della pila – diametro o lato della sezione retta,  $a$  – dovrà determinarsi in modo da soddisfare la disequazione:

$$\frac{B}{a} > 6$$

3. Per ciascun caso sperimentale, affinché la massima profondità di erosione sia indipendente dal tirante idrico della corrente e, quindi, proporzionale alla sola dimensione della pila, è necessario garantire condizioni di *narrow piers*- *Figura 12*. In questo senso, la profondità del flusso, normalizzata sull'ingombro della struttura, dovrà abbia valori tipici delle correnti profonde, tali, quindi da soddisfare la seguente disequazione:

$$\frac{h}{a} > 1.4$$

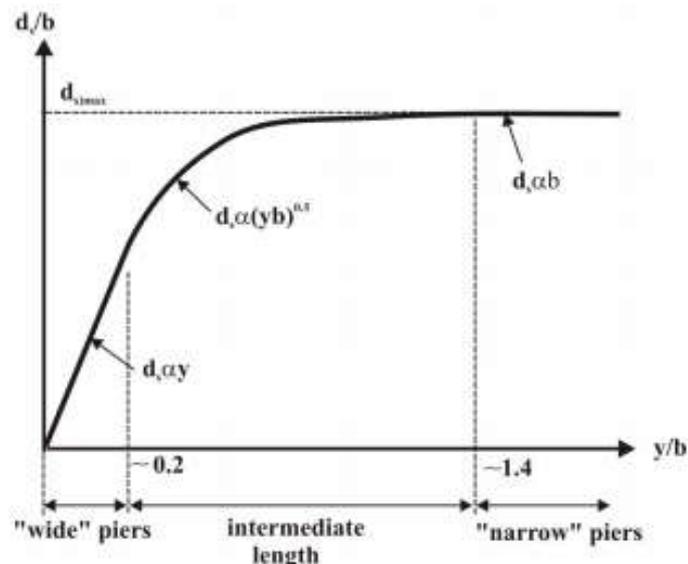


Figura 12: Variazione della profondità di erosione con il tirante idrico, entrambi normalizzati sulla dimensione trasversale della pila- "The physics of local scour at bridge piers, Melville 2008".

4. Perché il fenomeno erosivo non risenta della dimensione granulometrica dei sedimenti d'alveo è necessario che le pile abbiano dimensioni trasversali tali da garantire il rispetto della condizione:

$$\frac{a}{d_{50}} > 50$$

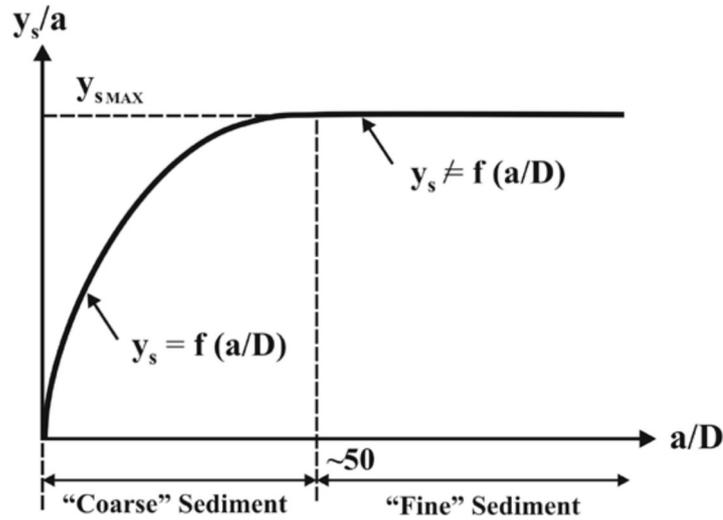


Figura 13: Variazione della profondità di erosione con la dimensione granulometrica dei sedimenti - "The physics of local scour at bridge piers, Melville 2008".

Nota la geometria del canale di prova – larghezza  $B = 0.61 \text{ cm}$ - e ricostruita la curva granulometrica dei sedimenti –  $d_{50} = 1.8 \text{ mm}$  - imponendo il rispetto delle condizioni sopra riportate, si è pervenuti alla definizione di un range di variazione del tirante idrico e, quindi, di un ventaglio di possibili diametri delle pile utilizzabili ai fini sperimentali.

I risultati ottenuti sono di seguito riportati:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{B}{h} > 5 \quad \longleftrightarrow \quad B=61 \text{ cm} \quad h \leq 12 \text{ cm} \\ \frac{B}{a} > 6 \quad \longleftrightarrow \quad B=61 \text{ cm} \quad a \leq 10 \text{ cm} \\ \frac{h}{a} > 1.4 \quad \longleftrightarrow \quad h \cong 12 \text{ cm} \quad a \geq 9 \text{ cm} \\ \frac{a}{d_{50}} > 50 \quad \longleftrightarrow \quad d_{50} \cong 1.8 \text{ mm} \quad a \leq 9 \text{ cm} \end{array} \right.$$

Nel rispetto di quanto ottenuto, ai fini sperimentali sono state impiegate pile aventi dimensioni trasversali pari a 5 cm e 9 cm, per ciascuna delle quali sono state adottate due differenti geometrie della sezione retta, circolare e quadrata.

Più complessa è stata la definizione del tirante idrico, che è risultato dal compromesso tra due diverse esigenze: da un lato quella di limitare gli effetti indotti sul flusso dagli strati limite alle pareti, dall'altro quella di ottenere un'area di inquadramento sufficiente a monitorare l'intero fenomeno erosivo.

Mentre il soddisfacimento della prima, come precedentemente ottenuto, richiede tiranti piuttosto piccoli –  $h \leq 12 \text{ cm}$  -, la copertura dell'intera area di scavo è conseguibile aumentando la quota di ripresa, quindi l'altezza d'acqua -  $h \geq 12 \text{ cm}$  .

Il tirante idrico è stato determinato per tentativi attraverso l'esecuzione di prove di erosione eseguite con differenti profondità di flusso. In ciascuna di queste è stata adottata una pila di dimensioni pari a 9 cm – la massima prevista- e al termine, è stata valuta l'ampiezza dell'area di ripresa, rispetto all'impronta finale dello scavo di erosione.

In base ai risultati ottenuti si è scelto in tirante idrico pari a 20 cm che, sebbene non verifichi la condizione  $B/h > 5$ , è da intendersi come la più piccola altezza d'acqua a garantire un'area di ripresa compatibile con l'impronta finale dello scavo.

Di seguito sono riportati gli esiti delle verifiche eseguite per il tirante e le gli ingombri delle pile scelti per le prove di erosione.

Tabella 2: Esiti delle verifiche eseguite per il tirante e le pile scelti per le prove di erosione.

$B$	$a$	$h$	$d_{50}$	$B/h > 5$	$B/a > 6$	$h/a > 1.4$	$a/d_{50} > 50$
[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[-]	[-]	[-]
61	5	20	0.18	Non verificato	Verificato	Verificato	Non verificato
61	9	20	0.18	Non verificato	Verificato	Verificato	Verificato

Indipendentemente dalla geometria delle sezioni rette, per ciascuna delle pile previste, si ritiene soddisfatta la seconda e la terza condizione, per cui durante le prove il flusso idrico non risentirà degli effetti di bordo generati dal restringimento e, essendo realizzate condizione di *narrow pier*, lo scavo di erosione si svilupperà indipendentemente dal tirante, dipendendo solo dalla larghezza del canale.

Diversamente i sedimenti costituenti il fondo del canale sono da ritenersi grossolani- *coarse sediments*- rispetto alle strutture sottili e, viceversa, fini rispetto alle pile più grosse. Pertanto, a parità di sedimento impiegato, si ci aspetterà un'evoluzione dello scavo di erosione condizionato dal rapporto  $a/d_{50}$  per le pile di dimensione pari a 5cm, e, viceversa, indipendente da tale rapporto per quella di diametro 9 cm.

In fine, per il tirante di 20 cm imposto dalle esigenze operative, la prima condizione non risulta mai verificata: in ciascuna prova di erosione, il flusso sarà influenzato dagli strati limitati alle pareti del canale. Ciò è inevitabile data le dimensioni dell'ambiente di prova.

### 2.3.1.2 Le condizioni di incipiente movimentazione

Come precedentemente detto, da prove in canaletta si è riscontrato che il posizionamento delle camere a 12 cm dal fondo non consente l'inquadramento completo dell'impronta di scavo restituita sul lungo periodo. Per aumentare l'area ripresa dalle camere è stato necessario incrementare il tirante idrico al valore di 20 cm.

Poiché l'indagine sperimentale ha riguardato l'evoluzione del fenomeno erosivo in condizioni di *clear water*<sup>19</sup>, la velocità della corrente idrica è stata determinata a partire dalla stima della velocità critica di scalzamento dei sedimenti costituenti il fondo d'alveo, ottenuta attraverso:

$$V_c = (1 \div 1.2) \sqrt{g \frac{\rho_s - \rho}{\rho} d_{50} \cdot \left(\frac{h}{d_{50}}\right)^{0.2}}$$

In cui  $h$  è il tirante idrico della corrente,  $\rho_s$  e  $\rho$  sono, rispettivamente, la densità dei sedimenti e del fluido,  $d_{50}$  è la dimensione media dei sedimenti e  $g$  l'accelerazione di gravità. Adottando un fattore moltiplicativo intermedio – pari a 1.1 – è stata ottenuta una velocità critica  $V_c = 0.48 \text{ m/s}$ , dalla quale imponendo un rapporto  $V/V_c = 0.6$ , è stata ricavata una velocità media della corrente idrica di  $V = 0.29 \text{ m/s}$ .

Questo valore è stato funzionale a definire la portata idrica e a caratterizzare le condizioni di flusso realizzate all'interno del canale. Il volume d'acqua erogato nell'unità di tempo è stato derivato dal diagramma velocità-portata, *Figura 14* ricostruito per la sezione idrica realizzata – rettangolare di dimensioni  $B \times h$ .

---

<sup>19</sup> La condizione di *clear water* si realizza per valori della velocità media della corrente compresi tra  $[0.5 V_c; V_c]$ , dove  $V_c$  è la velocità critica di scalzamento dei sedimenti. Per velocità di flusso  $V < 0.5 V_c$  non si ha erosione generalizzata mentre per  $V > V_c$  il fenomeno si realizza in presenza di una diffusa e generalizzata movimentazione dei sedimenti costituenti il fondo d'alveo – condizioni di *live bed*.

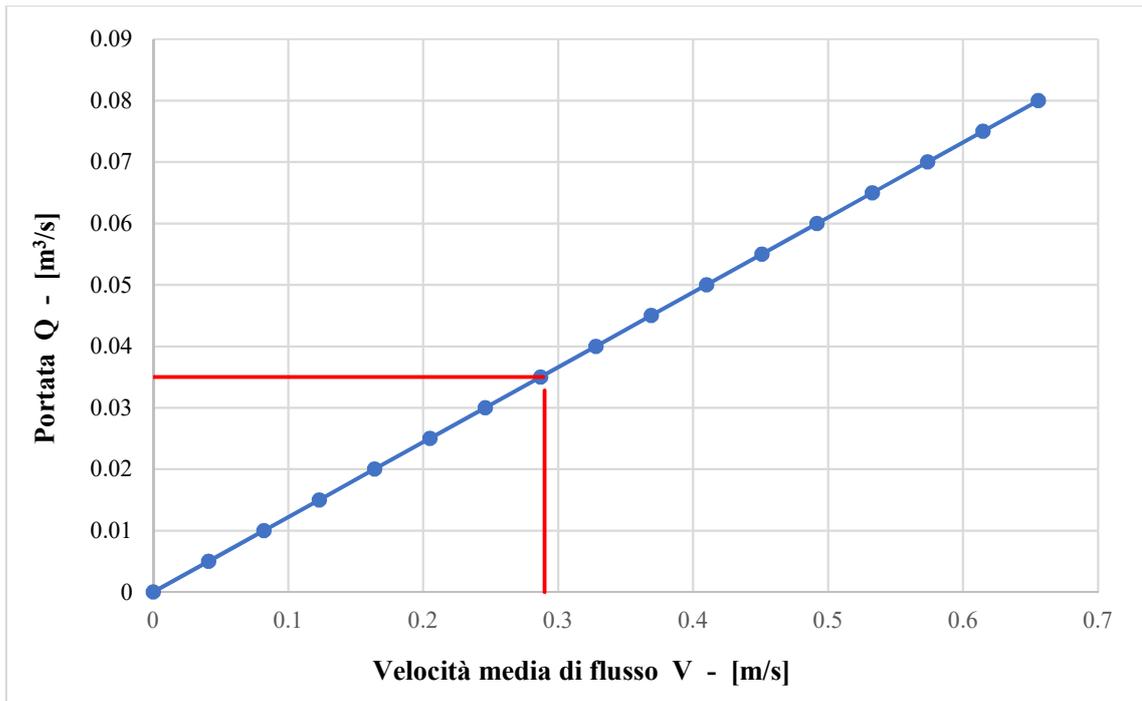


Figura 14: Relazione tra la portata  $Q$  e la velocità della corrente per il tirante idrico di 20 cm.

Le condizioni di moto della corrente sono state valutate attraverso i numeri di Reynolds e di Froud. In tabella si riportano i risultati ottenuti.

Tabella 3: Condizioni di flusso

$Q$	$F_r$	$R_e$
[l/s]	[-]	[-]
35.1	34736	0.205

Chiaramente, adottando una velocità di flusso pari a  $0.6 V_c$ , si realizzano condizioni di moto assolutamente turbolento-  $R_e > 2000$  - in corrente lenta -  $F_r > 0.1$  .

Date le caratteristiche della corrente e note le proprietà granulometriche dei sedimenti costituenti il letto erodibile del canale di prova, le condizioni di incipiente movimentazione sono state valutate verificando il soddisfacimento della condizione:

$$\tau_c^* < \tau^*$$

In cui  $\tau_c^*$  e  $\tau^*$  sono, rispettivamente, le tensioni tangenziali agenti sui sedimenti “reali” e di incipiente movimentazione, ossia i numeri di Shields di calcolo e di soglia.

Quantificato il coefficiente di scabrezza del sedimento erodibile,  $\xi$  , ipotizzando preliminarmente un regime turbolento del flusso su fondo completamente scabro, e

procedendo iterativamente - verificando la validità di tale ipotesi attraverso il calcolo del Reynolds sedimentologico - si è pervenuti alla quantificazione del coefficiente di resistenza  $C_d$  e della velocità di attrito  $U^*$ .

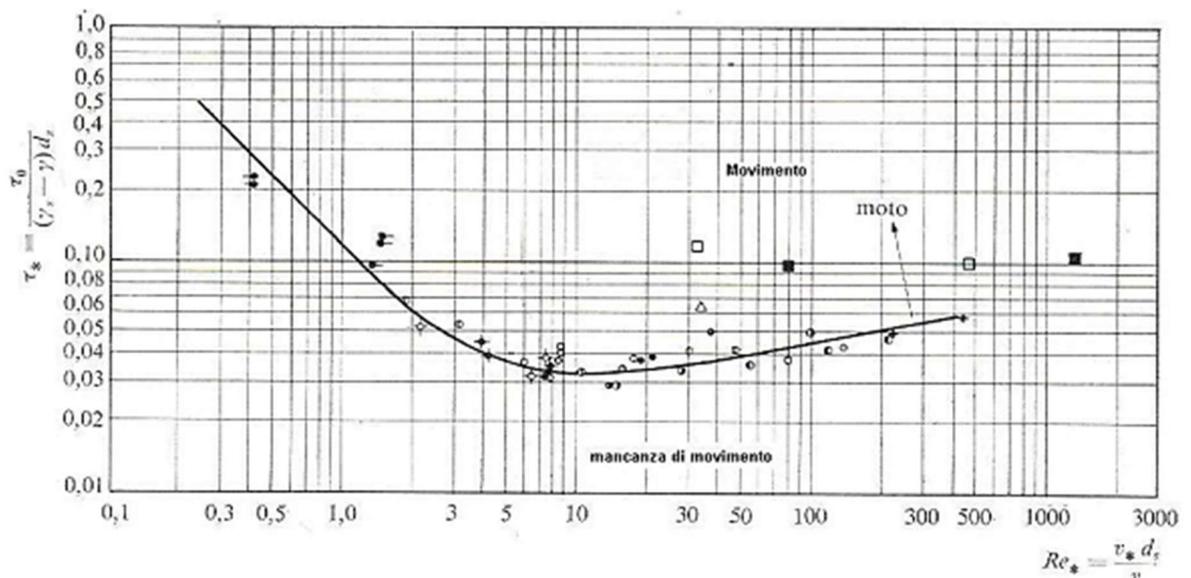
Si fa notare che, per le condizioni di flusso e per la natura granulometrica dei sedimenti, non sono realizzabili condizioni di “fondo completamente scabro”: i risultati sono stati ottenuti per una zona di transizione tra la condizione di fondo completamente liscio e di fondo completamente scabro – *Tabella 5*.

Stimato il coefficiente di resistenza  $C_d$  e la velocità di attrito  $U^*$ , si è provveduto alla stima della tensione tangenziale agente sui sedimenti e del corrispondente numero di Shields, attraverso :

$$\tau = \rho U^{*2}$$

$$\tau^* = \frac{\tau}{d_{50}(\gamma_s - \gamma)}$$

Confrontando il valore di Shields restituito dal calcolo con l’analogo di incipiente movimentazione, si perviene alla valutazione delle condizioni di trasporto solido: determinato il numero di Reynolds sedimentologico, il numero di Shields corrispondente alla condizione di innesco del trasporto solido di fondo è estrapolato direttamente dall’abaco riportato in *Figura 15*.



*Figura 15: Abaco di Shields per il calcolo delle condizioni di incipiente movimentazione.*

Per ciascuna prova sperimentale è stata verificata l'assenza di trasporto solido di fondo. Le *Tablelle 4 e 5* restituiscono sinteticamente i risultati ottenuti dai calcoli sopra introdotti.

*Tabella 4: Condizioni di idrauliche della corrente.*

ID pila	$V/V_c$	$V$	$Q$	$R_e$	Regime di moto	$F_r$	Profili di corrente
	[-]	[m/s]	[l/s]	[-]		[-]	
Circ. a=5cm	0.6	0.29	35.08	34736.14	Assolutamente turbolento	0.21	Lenta
Circ. a=9cm	0.6	0.29	35.08	34736.14	Assolutamente turbolento	0.21	Lenta
Quad. a=5cm	0.6	0.29	35.08	34736.14	Assolutamente turbolento	0.21	Lenta
Quad. a=9cm	0.6	0.29	35.08	34736.14	Assolutamente turbolento	0.21	Lenta

*Tabella 5: Condizioni di incipiente movimentazione per i sedimenti quarzo-arenosi di diametro  $d_{50}=0.18$  cm costituenti il fondo mobile erodibile.*

ID pila	$\xi$	$C_d$	$U^*$	$R_e^*$	Regime di moto	$\tau$	$\tau^*$	$\tau_c^*$	Trasporto di fondo
	[m]	[-]	[m/s]	[-]		[N/mq]	[N/mq]	[N/mq]	
Circ. a=5cm	$4.4 \cdot 10^{-3}$	16.6	0.02	30.7	Transizione	0.301	0.010	0.32	Assente
Circ. a=9cm	$4.4 \cdot 10^{-3}$	16.6	0.02	30.7	Transizione	0.301	0.010	0.32	Assente
Quad. a=5cm	$4.4 \cdot 10^{-3}$	16.6	0.02	30.7	Transizione	0.301	0.010	0.32	Assente
Quad. a=9cm	$4.4 \cdot 10^{-3}$	16.6	0.02	30.7	Transizione	0.301	0.010	0.32	Assente

### 2.3.2 Applicabilità del modello Manes e Brocchini, 2015

Come già accennato, uno degli obiettivi del presente lavoro è la validazione del modello teorico<sup>20</sup> proposto da Manes e Brocchini, 2015, per la previsione della profondità di equilibrio in scavi di erosione localizzati alla base di pile cilindriche, relativamente alle condizioni di *clear water*. Allo scopo si è reso necessario innanzitutto verificare che il setup sperimentale messo a punto soddisfacesse le condizioni di validità del metodo testato.

Come anticipato nel paragrafo 1.4.2 e 1.4.3, il modello teorico MB15 è valido per scavi di erosione che si sviluppano in assenza di trasporto solido di fondo, per effetto di correnti assolutamente turbolente, in presenza di materiali solidi sedimentari di dimensioni

<sup>20</sup> Da qui in avanti sarà richiamato come MB15.

comprese entro la scala inerziale di Kolmogorov. In altri termini, il modello è da ritenersi valido per le correnti che, all'interno dello scavo di erosione, sviluppano un regime di flusso assolutamente turbolento – Manes e Brocchini, 2015. Affinché possa realizzarsi Un tale regime di moto, secondo gli autori

Secondo gli autori, affinché possa realizzarsi un tale regime di flusso, è necessario che il diametro dei sedimenti sia compreso entro il range inerziale di Kolmogorov<sup>21</sup>, ossia:

$$\eta \ll d_{50} \ll S$$

Qualora questa condizione fosse verificata, potranno ritenersi trascurabili gli effetti indotti dalle forze viscoso sullo sviluppo dello scavo di erosione<sup>22</sup>.

A partire da questo assunto, attraverso ipotesi semplificative basate su principi di tipo energetici, gli autori sono pervenuti ad una scrittura della condizione di applicabilità del modello teorico del tipo:

$$\left( \frac{v^3 a}{C_d V'^3} \right)^3 \ll d_{50} \ll a$$

Rispetto a questo risultato è stata verificata l'applicabilità del modello MB15 ai fini dell'interpretazione delle prove di erosione sviluppate. Gli esiti sono riportati in *Tabella 6*.

*Tabella 6: Applicabilità del modello teorico Manes e Brocchini, 2015 - MB15.*

ID pile	$a$	$d_{50}$	$\eta$	$a/\eta$	$d_{50}/\eta$	Esito verifica
	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	
circ a=5cm	0.05	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-5}$	$8.9 \cdot 10^2$	31.41	MB15 applicabile
circ a=9cm	0.09	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^3$	31.92	MB15 applicabile
quad a=5cm	0.05	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^3$	55.29	MB15 applicabile
quad a=9cm	0.09	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^3$	47.73	MB15 applicabile

<sup>21</sup> Si ricorda che in tale relazione  $\eta$  è la scala di Kolmogorov, ossia la lunghezza di scala a partire dalla quale gli effetti viscosi iniziano ad influenzare il fenomeno di cascata di energia,  $S$  è la dimensio dei vortici di grandi dimensioni mentre  $d_{50}$  è il diametro medio dei sedimenti.

<sup>22</sup> In realtà, la verifica di trascurabilità degli effetti viscosi è stata condotta sulla base del criterio  $d_{50}/\eta \gg 5$  – Rogers et al., 2019.

In conclusione, ciascuna prova soddisfa i requisiti di applicabilità del metodo teorico MB15, il che, ai fini del suo accreditamento, conferisce valore di prova ai dati sperimentali ottenuti avvalorando gli esiti conseguiti dalla validazione - *Capitolo 4*.

### **3. La metodologia fotogrammetrica di acquisizione dei dati sperimentali**

Uno dei principali obiettivi del presente lavoro ha riguardato la validazione di una metodologia innovativa a basso costo che, in maniera poco invasiva, permette di acquisire nel tempo misure di profondità e di volume, utili a ricostruire i patterns evolutivi degli scavi di erosione in prove in canaletta. Applicando le tecniche tipiche del rilievo fotogrammetrico, la metodologia impiegata permette di ricostruire l'evoluzione del processo erosivo attraverso la ricostruzione della sequenza delle configurazioni assunte dal fondo, da ciascuna delle quali sono acquisite informazioni geometriche utili alla caratterizzazione dello scavo di erosione- profondità e volume.

Il rilievo fotogrammetrico dello scavo di erosione è sviluppato attraverso una prima fase operativa di acquisizione fotografica, resa possibile dall'utilizzo di camere *waterproof*, alla quale segue una fase di processamento delle immagini, affidata ad un software dedicato che, manipolando i fotogrammi acquisiti in precisi istanti di tempo, restituisce un modello digitale della scena utile alla misurazione del volume e della profondità di erosione.

Evidentemente la metodologia fotogrammetrica non permette un controllo in tempo reale dei dati geometrici acquisiti: le misurazioni sono ottenute solo a seguito del processamento dei fotogrammi, i cui tempi operativi possono essere molto variabili a seconda delle potenzialità del software e delle macchine impiegate.

Ciascuna fase è ampiamente descritta nei successivi paragrafi.

### 3.1 L'acquisizione della scena

Innescato il processo erosivo, lo scavo generato è rilevato nel tempo da camere *waterproof* GoPro Hero 5 Session, attivate contemporaneamente ad intervalli di tempo preliminarmente stabiliti.

La scena è acquisita dall'alto da sei differenti punti di cattura, interni al flusso e stabiliti in modo da coprire la porzione di fondo entro cui si sviluppa lo scavo di erosione. Le camere sono vincolate ad un supporto fisso, realizzato in legno e assicurato alle parete del canale da appositi morsetti, costituito da due traverse verticali tra le quali è interposto un telaio principale a “V”<sup>23</sup>.

Ai fini dell'acquisizione della scena, posizionati i dispositivi di ripresa e mantenendo il telaio principale in assetto perfettamente orizzontale, il supporto è calato all'interno del canale, fino a completa immersione dell'ottica delle camere e, quindi, assicurato alle pareti dello stesso da appositi morsetti.

La qualità degli output è fortemente sensibile alle condizioni di settaggio della fase di acquisizione, in particolare al posizionamento delle camere rispetto all'area di scavo e alle condizioni di luminosità della scena.

L'illuminazione della scena influenza fortemente la qualità degli output: quanto più luminose sono le immagini acquisite tanto maggiore sarà la risoluzione del modello tridimensionale dello scavo, ottenuto dall'elaborazione dei fotogrammi, e, di conseguenza, tanto maggiore sarà la precisione del dato sperimentale estrapolato.

Al fine di realizzare condizioni di illuminazione adeguate per l'intera durata della prova, si è fatto ricorso a quattro lampade a LED le quali, simmetricamente, sono state agganciate alle pareti esterne del canale.

---

<sup>23</sup> Il profilo a “V” del telaio principale risponde alla necessità di abbracciare la pila e, quindi, coprire interamente l'area entro la quale si esaurisce il processo erosivo, garantendo un'acquisizione ottimale della scena.



*Figura 16: Le GoPro sono posizionate all'interno del flusso idrico in modo da garantire la completa immersione della focale con un affondamento limitato entro pochi centimetri dalla superficie libera.*

Per quanto attiene il posizionamento dei dispositivi di ripresa, garantire la completa immersione della focale delle camere è fondamentale per la qualità delle elaborazioni. Solo il rispetto di tale condizione assicura l'acquisizione di immagini nitide e non distorte. Infatti, qualora le camere fossero collocate al di sopra del flusso - in posizione esterna ad esso - le traiettorie dei raggi ottici verrebbero ripetutamente deviate per effetto di fenomeni di riflessione e rifrazione ottica, con il risultato di una forte distorsione dell'immagine acquisita.

Allo stesso tempo, la presenza delle camere in acqua potrebbe falsare l'evoluzione naturale del processo erosivo, a causa della formazione in superficie di scie dovute alla separazione e conseguente deviazione dei filetti fluidi intorno ai dispositivi. Si comprende come ciò possa compromettere la naturale evoluzione del processo, in misura tanto più gravosa quanto maggiore è l'affondamento delle camere, a parità di ingombro planimetrico delle stesse.

Pertanto, il corretto posizionamento delle camere all'interno del flusso idrico dovrà essere di compromesso tra la necessità di garantire la non-intrusività dei dispositivi - minimizzandone l'affondamento - e quella di evitare fenomeni di riflessione e rifrazione dei raggi ottici. Posizionare le camere in assetto di parziale immersione permetterebbe il soddisfacimento di entrambe le condizioni.

Questo aspetto, inoltre, ha influenzato in maniera importante la scelta delle camere da impiegare, indirizzandola verso le *action cam* GoPro Hero 5 Session. Assicurando elevate prestazioni di ripresa, combinate al piccolo ingombro, oltre che alla capacità

impermeabile fino a 10 m, le GoPro Hero 5 Session si sono rivelate ottimali ai fini dell'acquisizione, stando all'ottimo rapporto qualità/prezzo.

Un altro aspetto di criticità che è stato affrontato nella fase di sperimentazione ha riguardato la contemporaneità degli scatti. Poiché il fenomeno erosivo è fortemente dipendente dal tempo, gli assetti del fondo evolvono rapidamente, in particolar modo nelle fasi iniziali del processo. Evidentemente, la contemporaneità degli scatti è indispensabile per la corretta ricostruzione dello scavo di erosione. In questo senso il telecomando impermeabile *Smart Remote* si è rivelato indispensabile: attraverso un controllo a distanza di tutte le loro funzioni, questo dispositivo permette di attivare contemporaneamente le fotocamere a cui è abbinato assicurando l'indispensabile simultaneità degli scatti. L'enorme potenziale del GoPro *Smart Remote* è assicurato dalla sua capacità di mantenere il segnale Wi-Fi fino ad una distanza aerea di 180m e di controllare fino a 50 dispositivi contemporaneamente.



Figura 17: Acquisizione delle immagini.

Come già affermato, il processo di erosione è fortemente non stazionario, evolvendo nel tempo fino a raggiungimento di una configurazione di equilibrio che, soprattutto in condizioni di *clear water*, richiede tempi molto lunghi.

Ai fini della comprensione del fenomeno, ciascuna prova in canaletta è stata sviluppata per un tempo complessivo di dieci ore. I tempi di acquisizione sono stati stabiliti preliminarmente secondo una scala logaritmica estesa all'intera durata della prova.

Dati i lunghi tempi sperimentali, per il monitoraggio completo dello scavo di erosione è stato necessario settare le camere in modalità foto - "Lineare - 10MP" - che, richiedendo un minore consumo energetico rispetto alla modalità video, permette di terminare la prova con camere ancora parzialmente cariche.

### 3.2 L'elaborazione dei fotogrammi per l'ottenimento dei dati sperimentali

Alla fase preliminare di rilevamento della scena segue una fase di processamento dei fotogrammi, che permette l'ottenimento delle misure di volume e di profondità attraverso la ricostruzione di modelli tridimensionali dello scavo di erosione. L'elaborazione delle immagini è interamente affidata al software Agisoft Photoscan Professional che, impiegando una tecnica nota come *Structure for Motion*, permette la creazione di modelli 3D a partire da immagini bidimensionali.

Dotato di un'interfaccia utente estremamente semplificata, dal matching dei fotogrammi, il programma provvede non solo alla riproduzione del modello 3D, e della relativa *texture*, ma anche alla restituzione di DEM che si prestano molto bene a misurazioni di profondità e di volume.

La potenzialità del programma è insita nella sua capacità di riprodurre un oggetto tridimensionale a partire da un numero ridotto di foto: è sufficiente che l'oggetto sia visibile su almeno due fotogrammi per assicurarne la riproducibilità, indipendentemente dal punto di ripresa scelto.

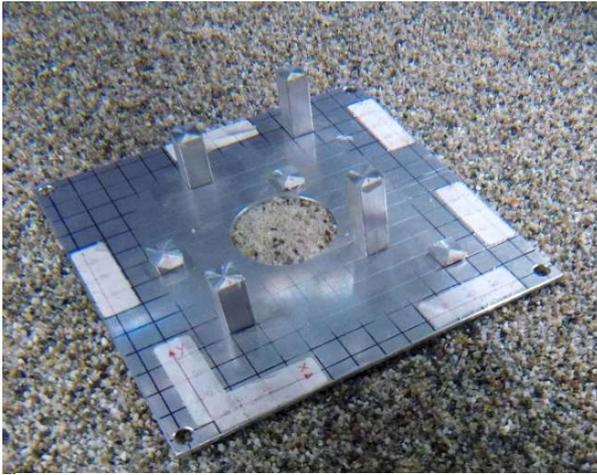
La procedura di elaborazione, cui è stato sottoposto ciascun set di immagini, si articola in quattro fasi principali, di seguito descritte.

#### 3.2.a *Allineamento delle immagini e determinazione dei parametri interni ed esterni delle fotocamere*

Attraverso il comando *Add Photos* del Workspace, sono selezionate e caricate in ambiente Photoscan le immagini da impiegare per la ricostruzione del modello tridimensionale.

Predisposto l'ambiente di lavoro, attraverso il comando di allineamento delle immagini - *Align Photos* del Workspace - Photoscan determina la posizione di ciascuna fotocamera e l'orientamento spaziale di ciascuna foto, provvedendo alla restituzione di una nuvola sparsa di punti. Al fine di ottenere stime più accurate circa la posizione spaziale delle fotocamere, l'allineamento è stato eseguito con settaggio ad alta precisione che, sebbene a discapito di un maggiore tempo di processamento rispetto alle altre modalità, lavora sul formato originale delle immagini, non apportando alcun ridimensionamento. Il software permette di limitare il numero di punti chiave e di punti d'appoggio della nuvola sparsa restituita in questa fase: per ciascuna elaborazione sono stati definiti limiti massimi di 40.000 e 4.000 punti rispettivamente.

In realtà questa operazione ha riguardato le sole riprese in stazionario, relative al target



*Figura 18: Target di calibrazione impiegato per il settaggio dei parametri di orientamento interni ed esterni delle fotocamere. Il riferimento planimetrico è definito sulla piastra metallica dalla coppia d'assi orizzontali x-y – in basso a sinistra – mentre il riferimento altimetrico è definito dai vertici dei cilindretti.*

di calibrazione impiegato per la definizione del datum locale rispetto al quale sono sviluppate le successive elaborazioni fotogrammetriche – *Figura 18*. Infatti, per tutte le altre acquisizioni, questa operazione è sostituita dall'importazione diretta dei parametri interni ed esterni, già ottimizzati, di orientamento delle camere<sup>24</sup>.

Le coordinate dei vertici della piastra metallica e degli elementi prismatici sono note e tutte riferite allo stesso sistema di riferimento locale, definito sul target. Importando in Photoscan le coordinate note dei punti di controllo - spigoli del target e dei centri dei cilindretti – sono automaticamente generati dei marker che, posizionati manualmente su ciascuna immagine del target, permettono di ottimizzare i parametri delle camere e quindi l'allineamento delle immagini stesse -*Figura 19*.

Acquisiti i marker dall'importazione del file testo con le relative coordinate ed indicata la loro posizione su ciascuna foto, si procede all'ottimizzazione dell'allineamento delle camere attraverso l'apposito comando della barra degli strumenti – *Optimize Cameras*. Il tool permette di eseguire un ulteriore controllo dei parametri – interni ed esterni – delle camere e quindi di minimizzare gli errori di referenziazione.<sup>25</sup>

I parametri ottimizzati di orientamento delle fotocamere saranno esportati in un file testo che, importato a sua volta nei nuovi progetti, permetterà di lavorare sempre con lo stesso

---

<sup>24</sup> Concettualmente la calibrazione delle fotocamere è finalizzata a ricostruire in ambiente digitale un sistema di riferimento locale esatto che possa essere impiegato per la referenziazione di tutti i modelli 3D, ottenuti successivamente, dall'elaborazione delle immagini dello scavo, catturate durante la prova di erosione vera e propria.

<sup>25</sup> Attraverso il settaggio e l'ottimizzazione dei parametri, interni ed esterni, delle fotocamere, lo stesso sistema di riferimento locale definito sul target di calibrazione è importato, o meglio ricostruito, in ambiente digitale.

sistema di riferimento, assicurando la confrontabilità dei modelli 3D ricostruiti e delle misure da questi estrapolate.

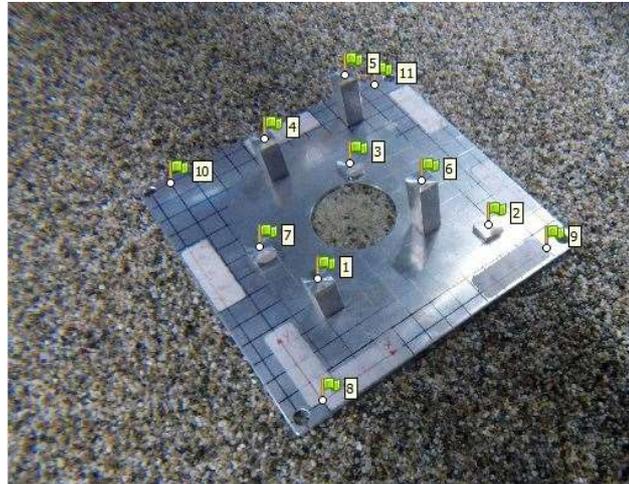


Figura 19: Posizionamento esatto dei marker su un'immagine del target di calibrazione per l'ottimizzazione dei parametri di orientamento delle fotocamere.

### 3.2.b Generare una nube di punti densa dai dati della fotocamera

Importati i parametri di orientamento delle camere, opportunamente ottimizzati, si procede alla riproduzione tridimensionale della scena acquisita attraverso la generazione della nuvola densa di punti. Attraverso un algoritmo specifico PhotoScan estrapola le informazioni complete di ciascuna fotocamera a partire dai parametri di orientamento delle stesse e le combina in un'unica nuvola di punti, che potrà essere poi ulteriormente manipolata.

L'operazione è ugualmente automatizzata: attivando il comando *Build Dense Cloud* del Workspace è visualizzata una mascherina che permette di specificare la qualità di ricostruzione desiderata e la modalità di filtro di profondità con cui il software dovrà calcolare le mappe di profondità.

Nell'ambito di lavoro qui presentato, le nuvole dense sono state costruite in modalità *Ultra High* mentre le mappe di profondità calcolate attivando la modalità di *filtro di profondità delicata*, in accordo con la natura delle immagini processate. Dopo un certo tempo di processamento delle immagini preliminarmente caricate, il modello 3D della scena catturata è restituito a video attraverso una *cloud* costituita da milioni di punti rilevati.

Si ribadisce che la Dense Cloud è ricostruita sulla base del datum locale ottenuto importando i parametri di orientamento delle fotocamere ottimizzati nella fase iniziale di calibrazione che, si ricorda, ha riguardato le sole immagini del target di prova acquisite in condizioni di flusso stazionario.

### 3.2.c Costruire il modello digitale di elevazione - DEM

A partire dalla nuvola densa, o sparsa, di punti o dalla mesh opportunamente texturizzata, Photoscan permette di generare un modello digitale di elevazione – DEM – e di visualizzarlo a video come un modello di superficie a griglia, con regolari valori di altezza. La riproduzione del modello, rasterizzato secondo le modalità specificate a schermo dall'utente, è attivata attraverso il comando *Build DEM* del Workspace.

Nell'ambito del lavoro qui presentato, i DEM sono stati rasterizzati a partire dalla nuvola densa di punti, abilitando la modalità di interpolazione. Si ribadisce che il modello digitale è ricostruito sulla base del datum locale ottenuto dall'importazione dei parametri di orientamento delle fotocamere.

### 3.2.d Acquisizione delle misure sul modello DEM

I modelli digitali di elevazione elaborati da Photoscan si prestano a misurazioni di vario tipo, quali misure di distanza, aree e volumi e alla generazione di sezioni verticali del modello. Le misure sono gestite con forme, in particolare linee, polilinee e poligoni.

Tracciati direttamente sul DEM, i poligoni sono impiegati per misurazioni di aree e di volumi, mentre linee e polilinee per le misure di lunghezza e per la realizzazione di sezioni trasversali del modello.

Ai fini della presente sperimentazione, le misure di volume sono state ottenute a partire dalla delimitazione dell'area di misura, coincidente con la porzione di scavo a monte della pila, definita a partire dal suo semiperimetro.

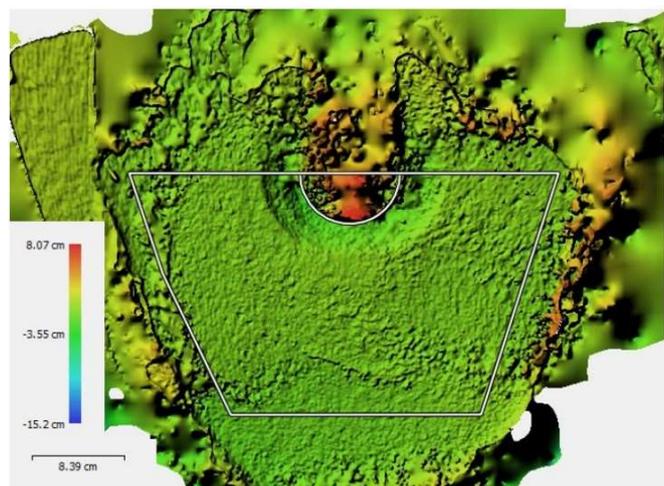
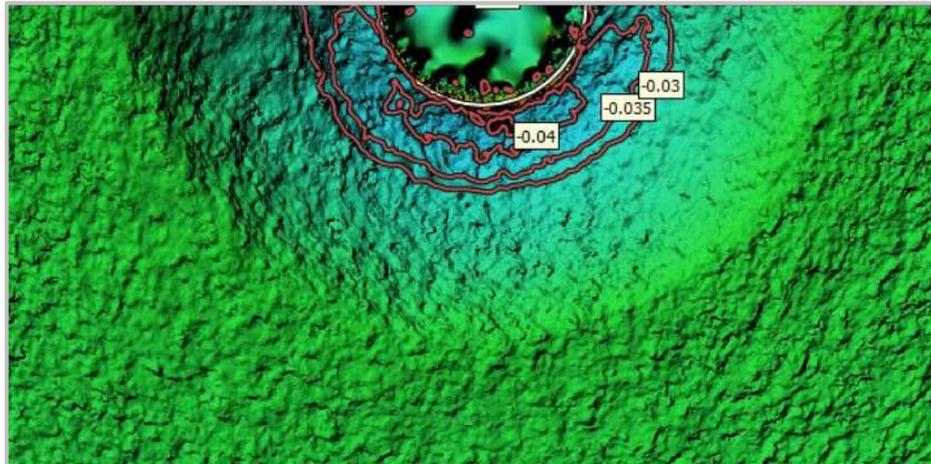


Figura 20: Misure di volume di scavo sul DEM

Selezionando il poligono di delimitazione, attraverso l'opzione "misura" del menù di scelta rapida, il dato di volume è letto sull'apposito pannello – Figura 20.

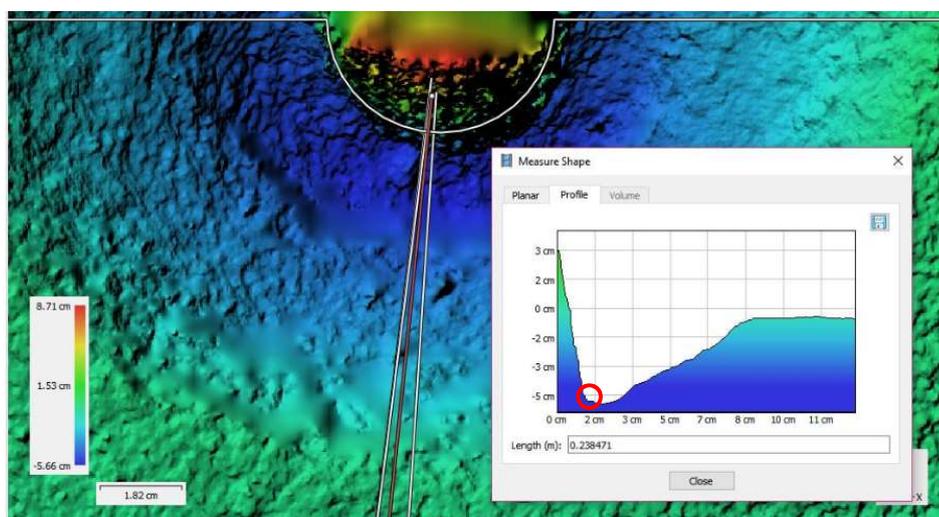
Si fa osservare che il volume dello scavo è calcolato dal software rispetto ad un piano di riferimento orizzontale di quota zero, solidale con il letto del canale.

La massima profondità di scavo è stata ricavata dal DEM attivando il comando “Genera curve di livello”: definito un intervallo di altitudini di tentativo per la ricostruzione delle isoipse, si procede iterativamente riducendone progressivamente l’ampiezza ed il passo tra i tracciati, fino a pervenire al dato di massima profondità di scavo – *Figura 21*.



*Figura 21: Estrapolazione della massima profondità dello scavo di erosione dalle curve di livello.*

Diverso è stato l’approccio impiegato per la misurazione della profondità nell’intorno della pila. Infatti, poiché ai fini della validazione del metodo fotogrammetrico è necessario garantire la confrontabilità dei dati ottenuti con quelli letti all’asta graduata, dai DEM sono stati estrapolati valori di profondità di scavo in corrispondenza dell’asta graduata, ossia a filo pilastro – *Figura 22*.



*Figura 22: Misura di profondità a ridosso della pila.*

Sezionando il DEM con piani verticali - definiti sul modello attraverso le loro tracce – la quota del fondo a filo pilastro è stata letta direttamente sul profilo altimetrico calcolato da PhotoScan. Per garantire una maggiore robustezza del dato ottenuto, il modello è stato sezionato con quattro piani verticali, disposti in modo da coprire la larghezza del nastro graduato.

### **3.3 La validazione della tecnica fotogrammetrica**

Per poter assicurare l'affidabilità e la qualità delle misure restituite, la metodologia fotogrammetrica è stata oggetto di un'ampia attività di validazione, tesa a testarne le prestazioni attraverso:

- Il confronto dei dati sperimentali restituiti dalle tecniche tradizionali;
- La valutazione dell'invasività del metodo, tesa a chiarire il grado di intrusività delle strumentazioni impiegate rispetto all'evoluzione del processo indagato;
- La stima del margine di ottimizzazione delle misure, conseguibile dal potenziamento del sistema di rilievo, tesa, in particolare, a verificare che l'accuratezza del dato sia migliorabile in relazione al numero delle fotocamere.

La valutazione dell'attendibilità della metodica fotogrammetrica ha riguardato i dati sperimentali ottenuti da una prova di erosione in canaletta intorno a una pila cilindrica, di diametro pari a 5 cm. Le condizioni idrauliche della corrente e le caratteristiche granulometriche del fondo erodibile sono quelle ottenute di setup sperimentale - *Paragrafo 2.3.*

I dati sperimentali impiegati per la validazione del metodo sono forniti in allegato - *Tabelle dalla 8 alla 15.*

#### ***3.3.1 Il confronto con i metodi tradizionali di acquisizione: le misure di profondità dello scavo di erosione***

Per accreditare il metodo fotogrammetrico quale tecnica di acquisizione sperimentale, è stato necessario innanzitutto testarne la qualità dei risultati.

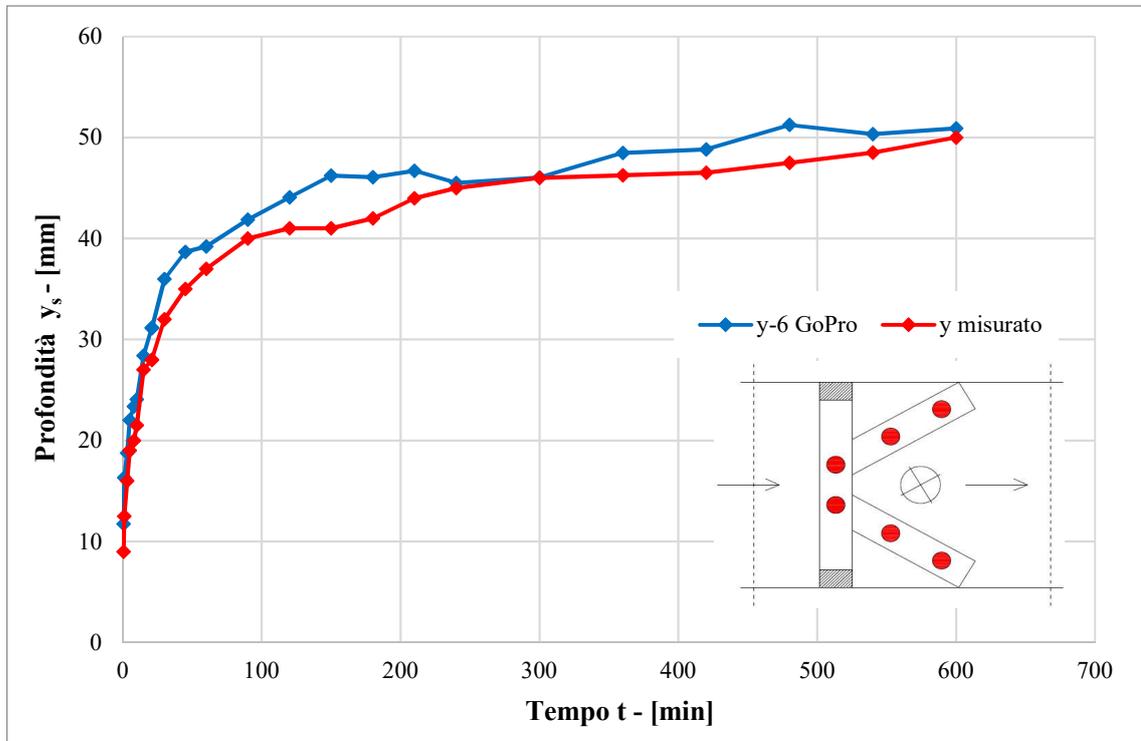
Le prestazioni del metodo testato sono state quindi valutate confrontando i dati di profondità estrapolati dai DEM con quelli ricavati dalla lettura diretta della quota di scavo.

Allo scopo, la prova di erosione è stata sviluppata impiegando un'asta graduata che, applicata direttamente alla pila, ha permesso di registrare nel tempo la quota raggiunta dallo scavo di erosione.

Ovviamente il valore misurato è il livello del fondo eroso in corrispondenza della pila, dove, non necessariamente sono raggiunte le massime profondità di scavo.

Le letture sono state eseguite negli stessi istanti di tempo di acquisizione dei fotogrammi.

Come si attendeva, le misure di profondità restituite dal metodo fotogrammetrico trovano ampio accordo con i valori letti all'asta graduata, nonostante i locali scostamenti osservati tra le curve sperimentali – *Figura 23*.



*Figura 23: Evoluzione nel tempo della massima profondità di scavo ricostruita da misurazioni dirette – in blu – ed estrapolate dai modelli digitali, restituiti dalla processazione di fotogrammi acquisiti da 6 GoPro in rosso.*

Dal confronto delle due serie di misure di profondità, è stata derivata una distribuzione dell'errore relativo<sup>26</sup> caratterizzata da un valore medio del 9% e una deviazione standard è risultata del 7% - *Figura 24*.

Gli errori massimi- con punte fino al 27% - sono rilevati nelle prime fasi di prova, in concomitanza con la fase transitoria del processo erosivo quando, a causa della rapida evoluzione dello scavo di erosione, sono richieste misurazioni più frequenti. Questo aspetto evidentemente ha delle ricadute sulla qualità della lettura di profondità.

<sup>26</sup> Per ciascun istante d'acquisizione  $t$ , l'errore relativo è definito come differenza delle misure di profondità acquisite al tempo  $t$  normalizzata sulla media delle misure stesse:

$$\%E_r(t) = \frac{|y_{DEM}(t) - y_{letto}(t)|}{\overline{y(t)}} \cdot 100$$

Tuttavia gli scarti tra le misure ottenute hanno un ordine di grandezza che al più è di circa il doppio del diametro medio dei grani  $d_{50}$ , circostanza per la quale sono da ritenere più che attendibili le misure di profondità di scavo restituite dalla metodologia fotogrammetrica.

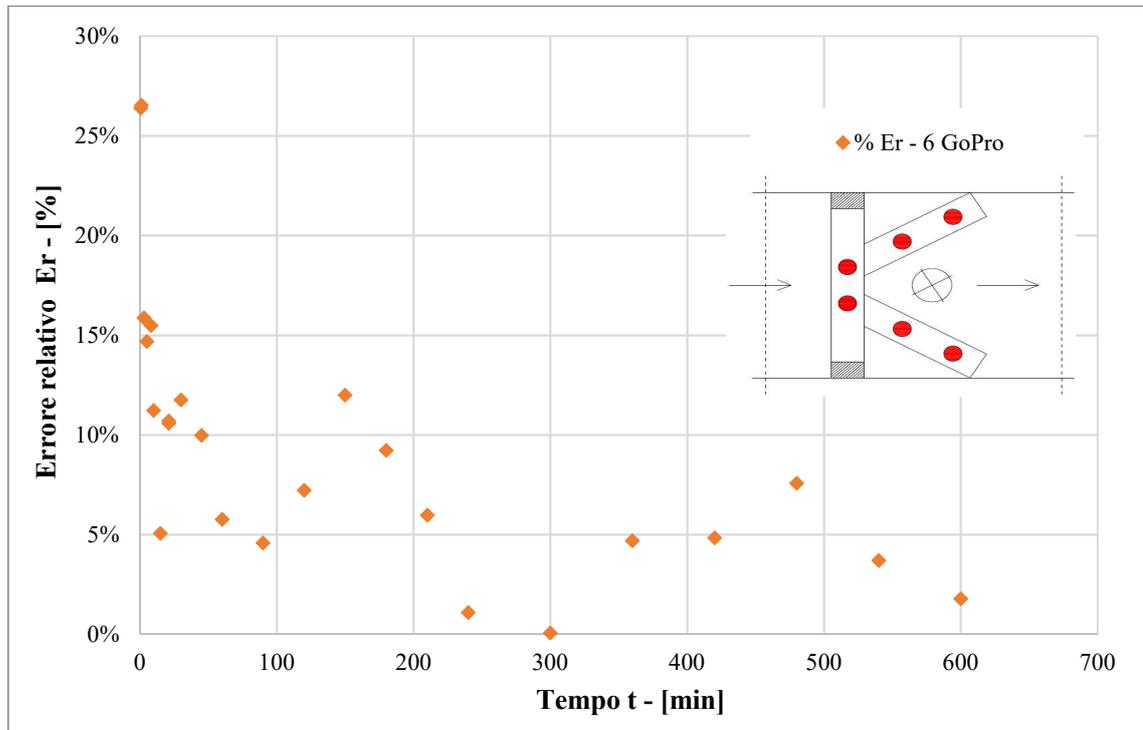


Figura 24: Distribuzione degli errori relativi associati alle due serie di misure di profondità dello scavo di erosione in corrispondenza del lato monte della pila.

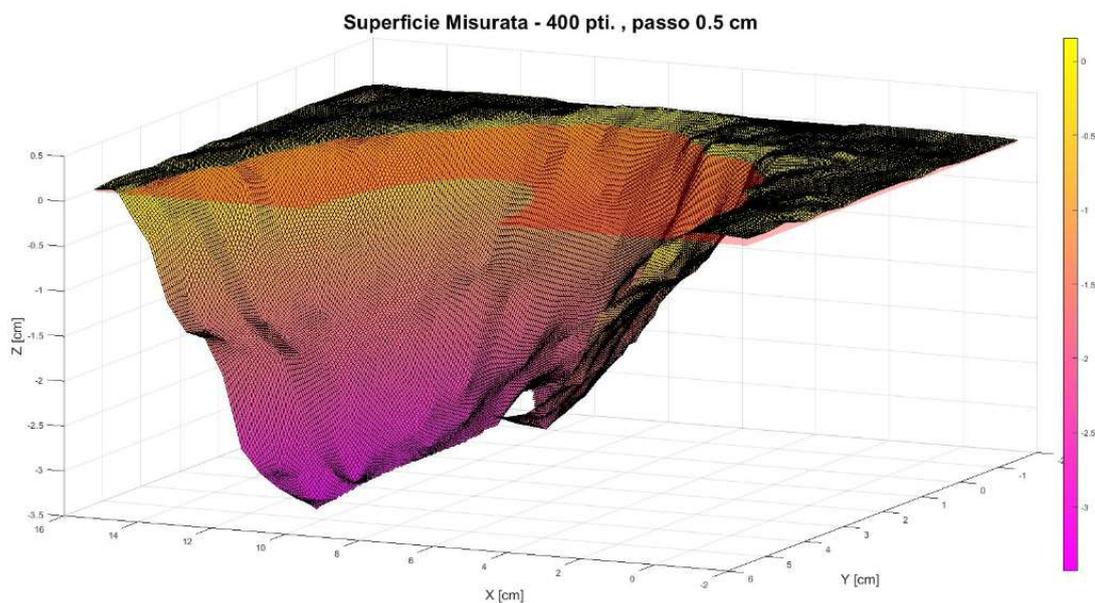
L'attendibilità delle misure di volume restituite dalla metodologia fotogrammetrica è stata testata attraverso la sovrapposizione della nuvola densa di punti, restituita dal software Agisoft PhotoScan, al modello 3D ricostruito in seguito al rilievo diretto dello scavo di erosione, ossia a partire da misure di profondità dello scavo di erosione acquisite direttamente dall'operatore. I due modelli riproducono un unico medesimo assetto del fondo mobile nell'intorno della pila, più precisamente quello corrispondente al tempo di fine prova  $t = t_{end}$ . La ragione di tale limitazione risiede nel fatto che per poter accertare la qualità delle misure fotogrammetriche è necessario confrontarle con i risultati ottenibili da metodiche tradizionali che, come già anticipato, permettono la misurazione del volume solo al termine del processo erosivo.

Al termine della prova, lo scavo di erosione è stato rilevato direttamente al fine di poterne ricostruire la superficie interna e confrontarla con quella restituita dal software.

Allo scopo sono state determinate le coordinate di 400 punti ricadenti entro l'area definita dall'impronta dello scavo. Questi sono individuati ai nodi della griglia a maglie quadrate, di lato 0.5 cm, ottenuta dalla discretizzazione del dominio di calcolo.

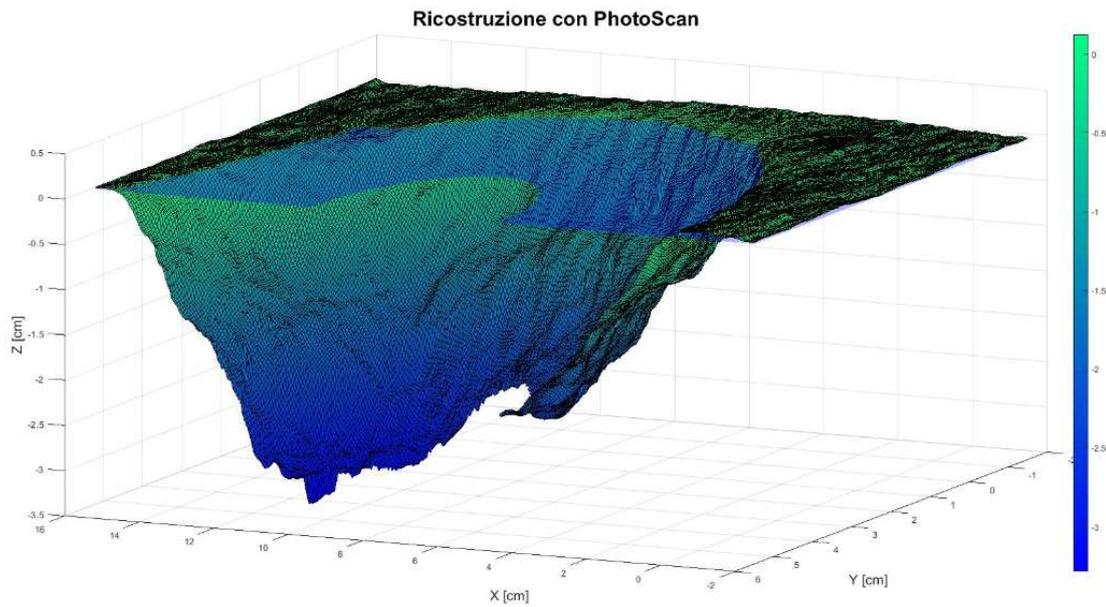
Il rilievo è stato realizzato attraverso un'apposita strumentazione comprensiva di un carrello mobile, montato sul canale, traslato orizzontalmente nelle direzioni x-y, e un calibro verticale, vincolato al primo, che calato all'interno dello scavo permette l'acquisizione del dato puntuale di profondità.

Il modello 3D dello scavo di erosione è ottenuto in ambiente Matlab dal plotting dei 400 punti del dominio di calcolo precedentemente rilevati. La superficie di erosione misurata direttamente alla decima ora della prova di erosione è restituita in *Figura 25*.



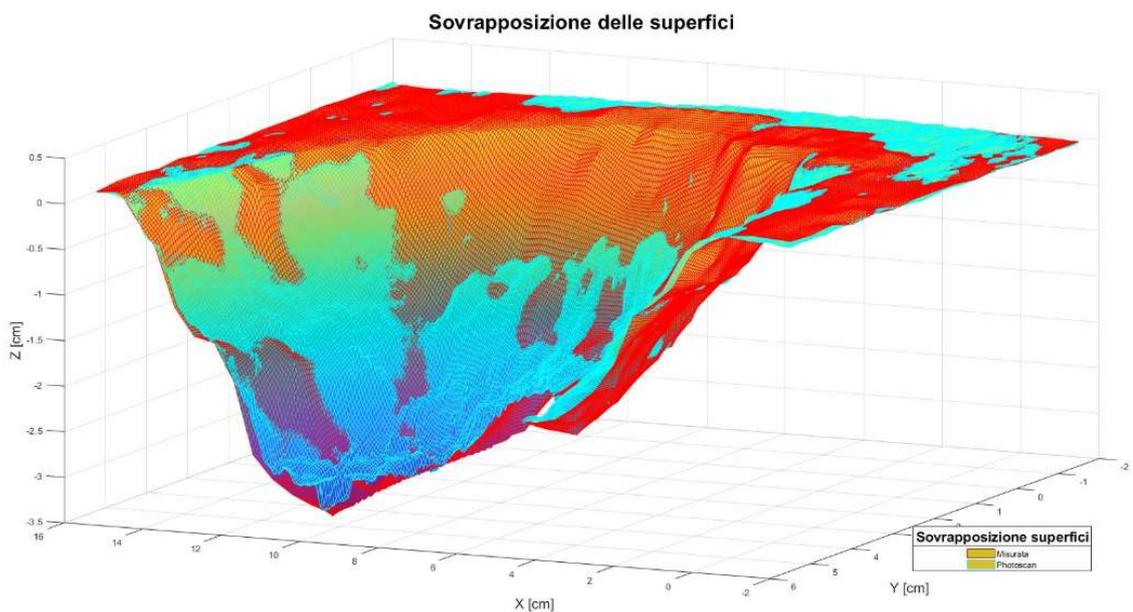
*Figura 25: Configurazione dello scavo di erosione relativo al tempo di fine prova, ricostruita attraverso il rilievo diretto del fondo di erosione.*

La stessa configurazione dello scavo di erosione è stata ottenuta dal software Agisoft Photoscan Professional: dal processamento dei fotogrammi catturati al tempo  $t_{end}$  di fine prova, il programma ha restituito una nuvola densa comprensiva di circa 9 milioni di punti – *Figura 26*.



*Figura 26: Ricostruzione dello scavo di erosione restituita dal software Agisoft Photoscan.*

La sovrapposizione della nuvola densa di punti e del modello 3D – *Figura 27* - ha rivelato discrepanze del 2.04% tra le misure di volume e del 4.10% tra le misure di area delle corrispondenti superfici.



*Figura 27: Sovrapposizione della nuvola densa di punti, restituita dal software Photoscan - blu - al modello 3D ricostruito dal rilievo manuale dello scavo di erosione.*

Tali inesattezze sono da attribuire alla evidente inadeguatezza del rilievo manuale, derivante essenzialmente dalla scarsa risoluzione<sup>27</sup> dei modelli ottenibili e dall'ampio margine d'errore cui sono fisiologicamente esposte le misurazioni dirette.

Alla luce di ciò la metodologia fotogrammetrica non soltanto si configura come metodo efficace per l'acquisizione di misure di volume dello scavo di erosione ma, in ragione della sua maggiore attendibilità, si erige a valida alternativa ai metodi tradizionali.

### 3.3.2 *L'intrusività della metodologia fotogrammetrica*

La metodologia fotogrammetrica di acquisizione impone che i dispositivi di ripresa siano mantenuti in acqua per l'intera durata della prova. Sebbene siano solo parzialmente immerse, la presenza in acqua delle GoPro potrebbe produrre impatti significativi sul



*Figura 28: Nastri graduati applicati alla pila, sul lato monte e al finaco, per l'esecuzione di letture di profondità di erosione a ridosso della pila.*

processo di erosione, alterando così le grandezze da misurare. In questo senso, per poter accreditare la metodica fotogrammetrica è stato necessario testarne l'intrusività ripetendo una singola prova di erosione in assenza dell'impianto di ripresa.

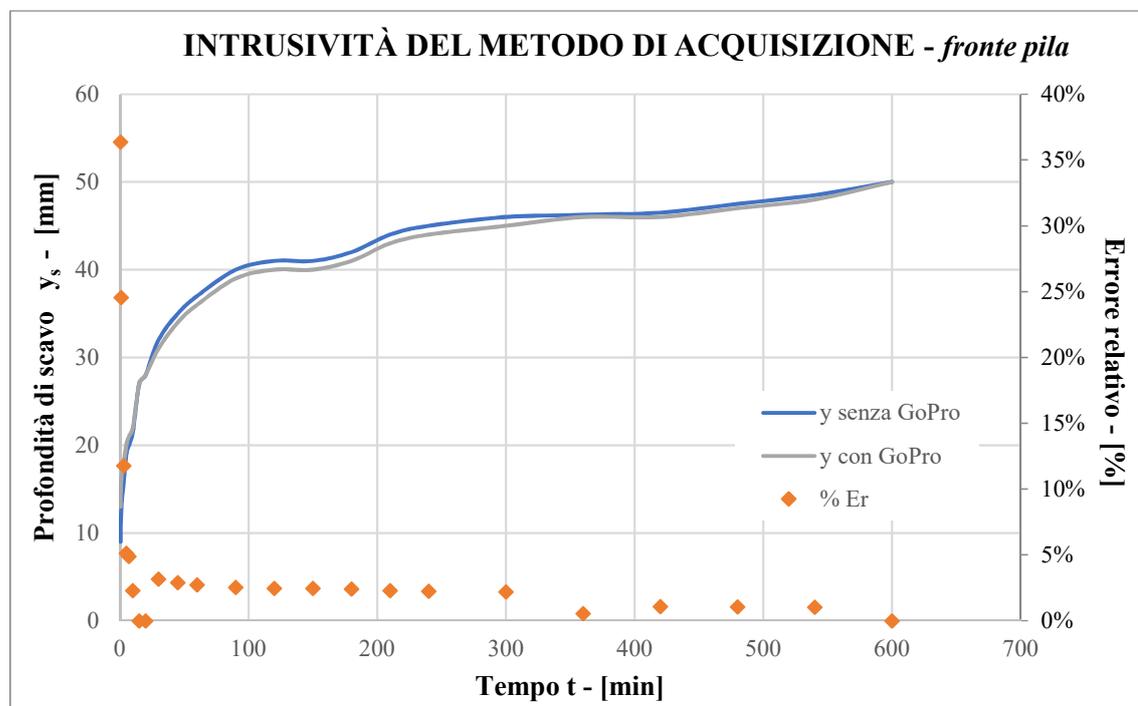
L'intrusività è stata testata confrontando le misure di profondità di scavo lette, in entrambe le prove di erosione, su aste graduate applicate direttamente alla pila<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup> Relativamente a ciò si fa notare che la superficie "misurata" è ricostruita a partire dalla referenziazione di 400 punti dell'area di scavo mentre la nuvola densa di punti ne contiene circa nove milioni.

<sup>28</sup> Nelle due prove di erosione è stata impiegata una pila cilindrica, di diametro pari a 5 cm, alla quale sono state applicate le aste graduate per la lettura di profondità dello scavo di erosione. Infissa nello strato sedimentario, la pila è stata orientata in modo che i nastri metrici risultassero in posizione frontale e laterale, rispettivamente.

Come è evidente dalle *Figura 29*, la profondità di erosione, letta a ridosso della pila in entrambe le prove, è aumentata nel tempo secondo andamenti che risultano chiaramente molto simili.



*Figura 29: Evoluzione delle profondità di scavo, osservate direttamente sul lato monte della pila, in prove di erosione eseguite con e senza l'impianto di rilevamento e distribuzione degli errori restituiti dall'analisi comparativa delle due serie.*

Per comprovare la similarità dei patterns evolutivi, si è provveduto a confrontare singolarmente le profondità misurate in entrambe le prove – *Figura 30*. La distribuzione dei punti sperimentali collassa sulla bisettrice I-IV quadrante rivelando una notevole conformità delle letture.

L'analisi dell'errore mostra chiaramente come il transitorio iniziale condizioni la qualità dei risultati acquisiti. Le maggiori discrepanze tra le misurazioni si registrano nei primi istanti di prova, quando il vortice a ferro di cavallo inizia a svilupparsi determinando una rapida evoluzione dello scavo di erosione. Al contrario, a stabilizzazione raggiunta, si osservano scostamenti molto ridotti tra i punti sperimentali che, a partire dai 30 minuti, si mantengono sempre al di sotto del 3%. La discrepanza media misurata tra le due serie è del 5%, valore che si riduce al 2% se si escludono i valori durante la fase transitoria del processo - acquisiti nei primi 30 minuti della prova.

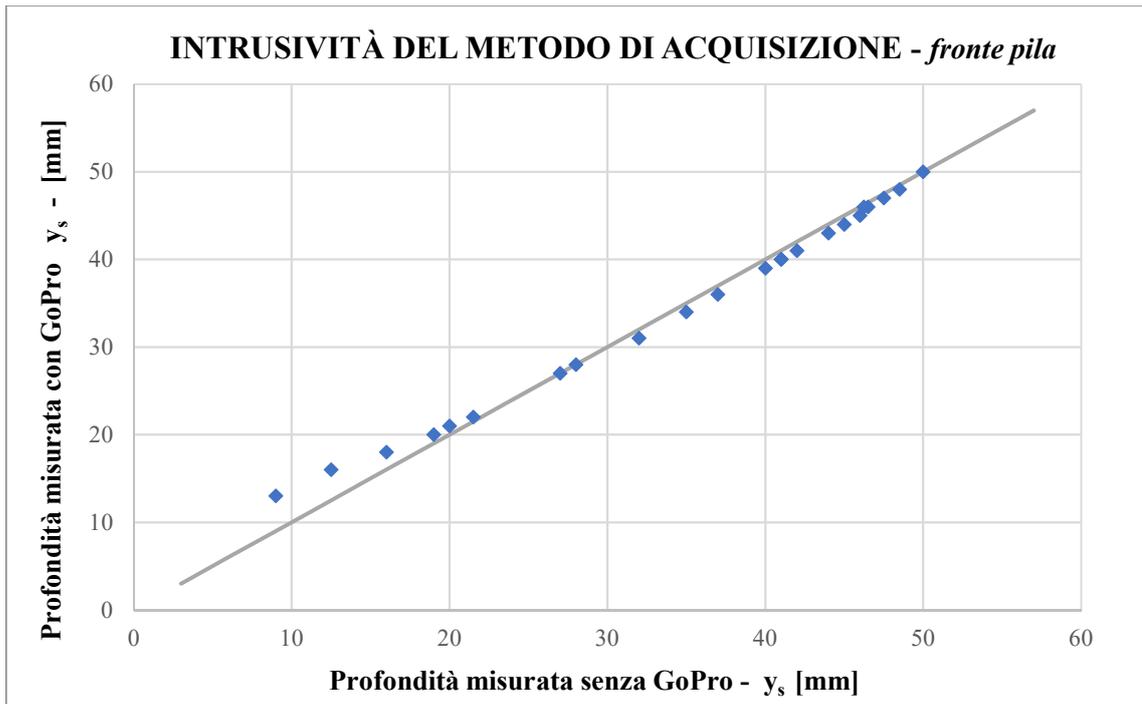


Figura 30: Confronto delle misure di profondità - al fronte delle pila - ottenute dalla prova di erosione sviluppata con e senza l'impianto di prova

Stesso approccio analitico ha riguardato le misure di profondità lette al fianco della pila. Ancora una volta i pattern evolutivi molto prossimi testimoniano una buona conformità delle misure di profondità ottenute in presenza/assenza delle camere - *Figura 31*.

Tuttavia si rileva una minore accuratezza delle misure di profondità “al fianco della pila” rispetto al caso precedente: l'errore relativo medio ottenuto è del 5%, valore che si riduce al 4% se si escludono le misurazioni più imprecise, acquisite nel transitorio di prova.

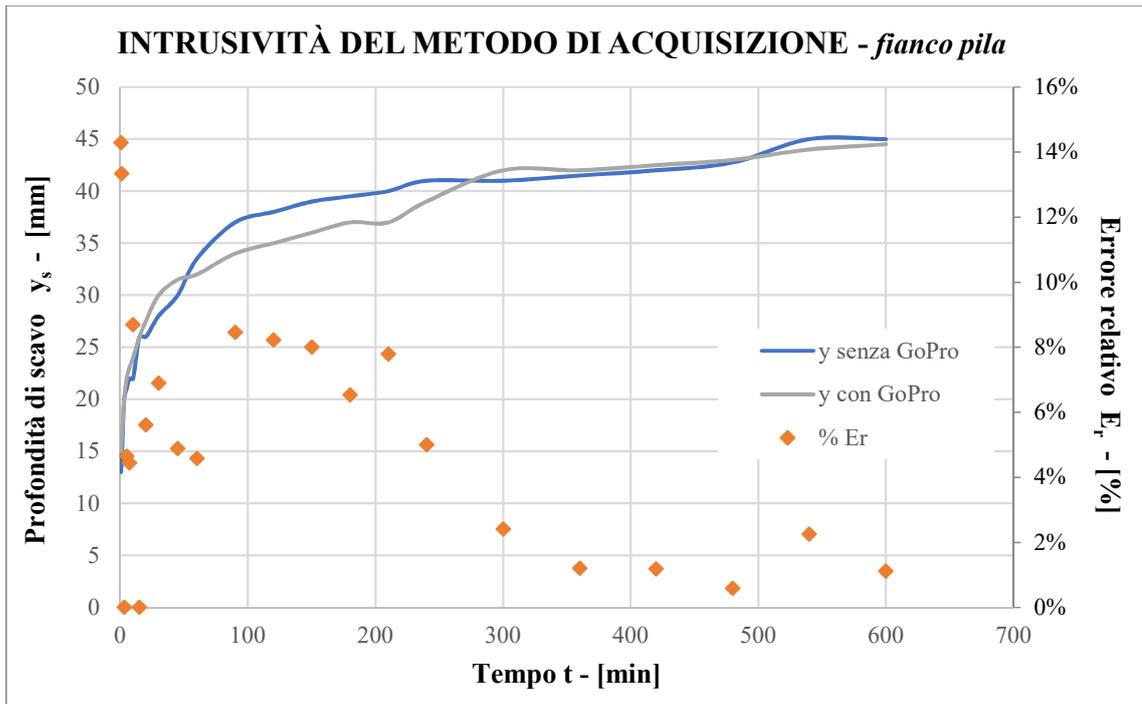


Figura 31: Evoluzione della profondità di scavo - al fianco delle pile - misurata in prove di erosione eseguite con e senza l'impianto di rilevamento – GoPro -e distribuzione degli errori relativi tra le misure ottenute nel tempo.

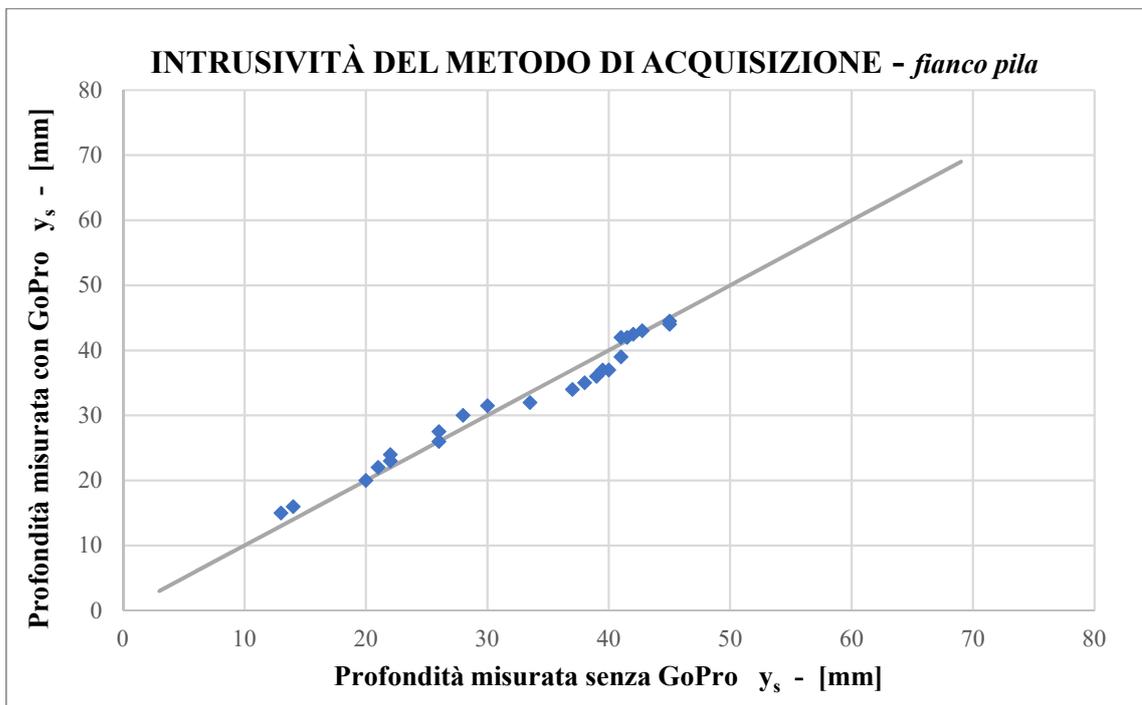


Figura 32: Confronto delle misure di profondità - al fronte delle pile - ottenute dalla prova di erosione sviluppata con e senza l'impianto di prova

La minore accuratezza di tali misure, imputabile alla maggiore difficoltà di lettura, è confermata dal diagramma restituito in *Figura 32*, in cui tra i punti sperimentali e la bisettrice I-IVquadrante. si osservano scarti verticali maggiori che il caso precedente.

In conclusione, i ridotti margini d'errore ottenuti assicurano la non intrusività della metodologia fotogrammetrica nei confronti dell'evoluzione dello scavo di erosione, risultando irrilevanti gli impatti che l'installazione del sistema di acquisizione ha sul processo erosivo.

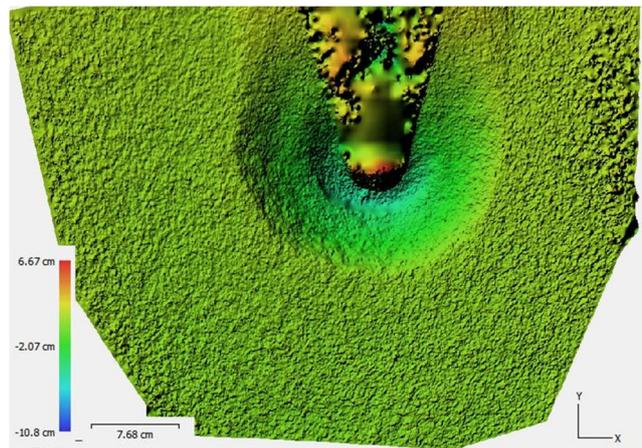
In questo senso, assicurando condizioni di narrow piers nella pianificazione del setup sperimentale, i risultati prodotti dalla metodica fotogrammetrica sono da ritenersi coerenti con la reale configurazione dello scavo di erosione.

### 3.3.3 *Ottimizzazione dei risultati in relazione al potenziamento dell'impianto di misura*

In relazione alla qualità delle misurazioni restituite dal metodo fotogrammetrico, si è provveduto a valutare il margine di miglioramento conseguibile dal potenziamento del sistema di acquisizione, in particolare in relazione al numero delle GoPro impiegate.

In questo senso, le prestazioni della tecnica fotogrammetrica nella ricostruzione della geometria dello scavo sono state determinate in relazione al numero di dispositivi di ripresa impiegati in fase di acquisizione.

Per la medesima prova di erosione – pila cilindrica di diametro pari a 5 cm -, le misure di profondità osservate<sup>29</sup> sono state confrontate con quelle estrapolate dai DEM, rasterizzati da nuvole dense di punti ottenute dal processamento di 2, 3, 4, 5 e 6 immagini della scena acquisita – *Figure 33 a 35*.



*Figura 33: DEM restituito dall'elaborazione di soli 2 fotogrammi acquisiti al tempo di prova  $t=600$  min.*

---

<sup>29</sup> Per profondità misurate si intendono- quelle lette a ridosso della pila, a mezzo dell'asta graduata applicata alla struttura.

L'analisi dell'errore ha quindi permesso di stimare il margine di miglioramento degli output conseguibile dal potenziamento del sistema di ripresa.

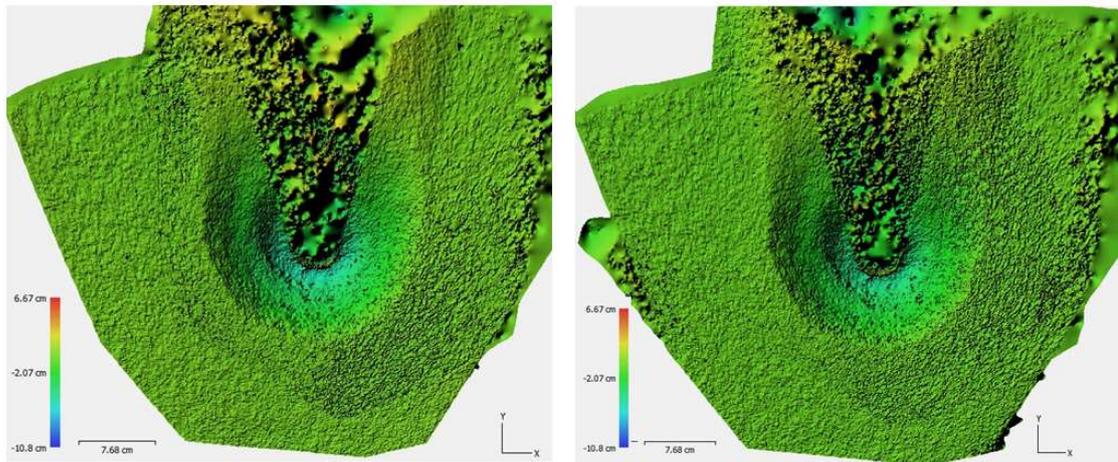


Figura 34: DEM restituito dall'elaborazione di soli 3 e 4 fotogrammi –rispettivamente a sinistra e destra- acquisiti al tempo di prova  $t=600$  min.

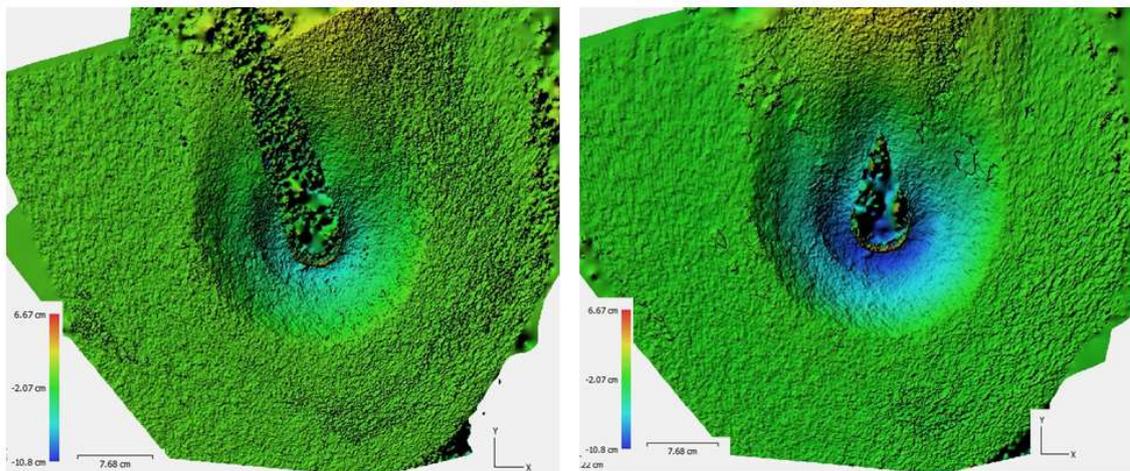


Figura 35: DEM restituito dall'elaborazione di soli 5 e 6 fotogrammi –rispettivamente a sinistra e destra- acquisiti al tempo di prova  $t=600$  min.

I pattern evolutivi ottenuti dalle misure di profondità restituite dall'abbinamento di un numero crescente di fotogrammi – linee continue -, così come quelle derivate dalla lettura diretta del dato altimetrico -linea tratteggiata, sono rappresentati in *Figura 36*

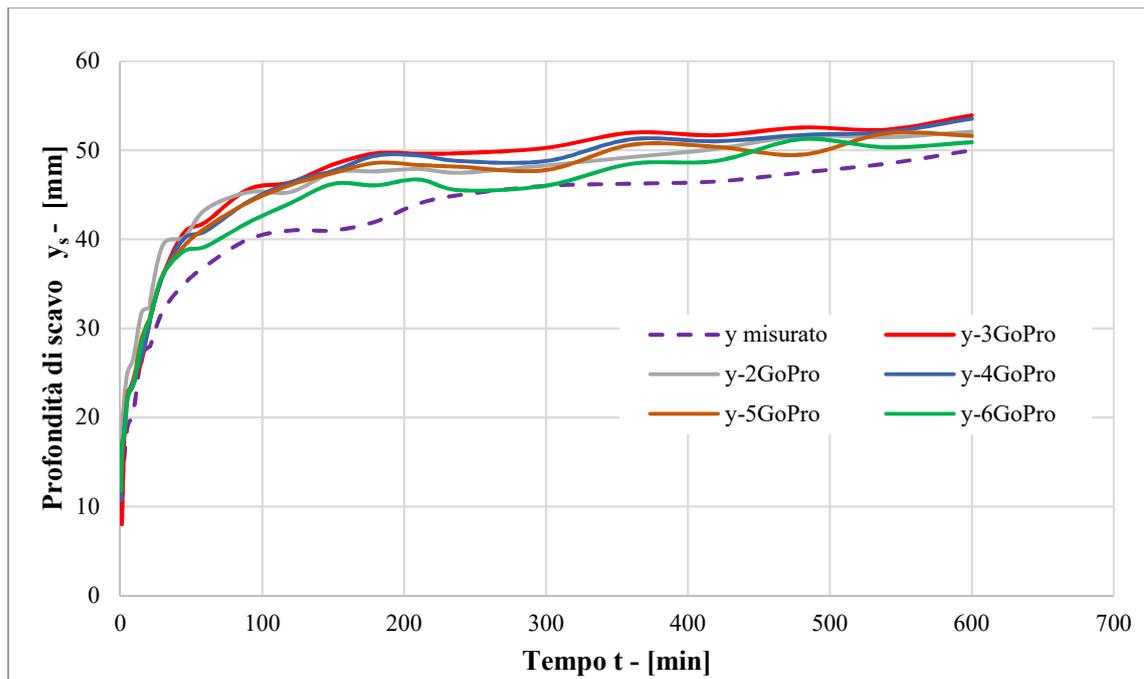


Figura 36: Evoluzione nel tempo di prova della profondità di scavo restituita dalla ricostruzione fotogrammetrica dello scavo di erosione, utilizzando 2,3,4,5 e 6 camere, e dalla lettura sull'asta graduata.

Diversamente, rispetto alle letture di profondità condotte durante la prova, si restituiscono i profili evolutivi e le distribuzioni di errore delle misure estrapolate dai DEM, generati dal processamento dei fotogrammi restituiti da 2, 3, 4, 5 o 6 GoPro – Figure da 37a 40. Gli esiti dell'analisi statistica dell'errore sono restituiti sinteticamente in Figura 41.

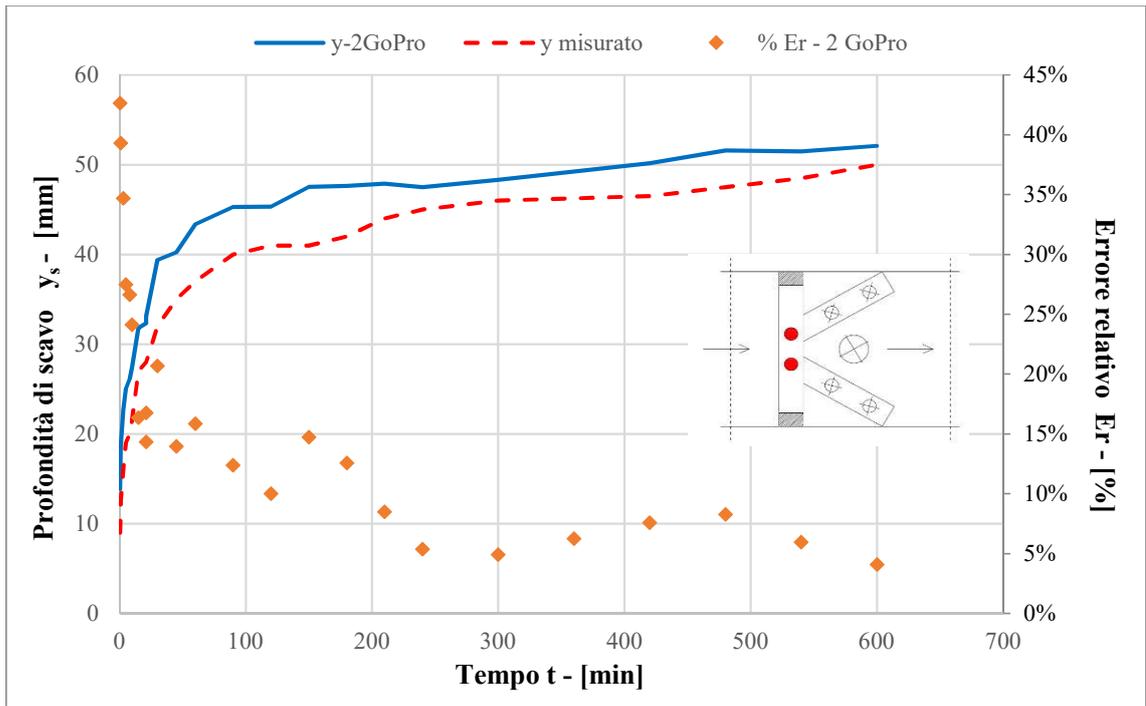


Figura 37: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo "misurate" e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 2 GoPro.

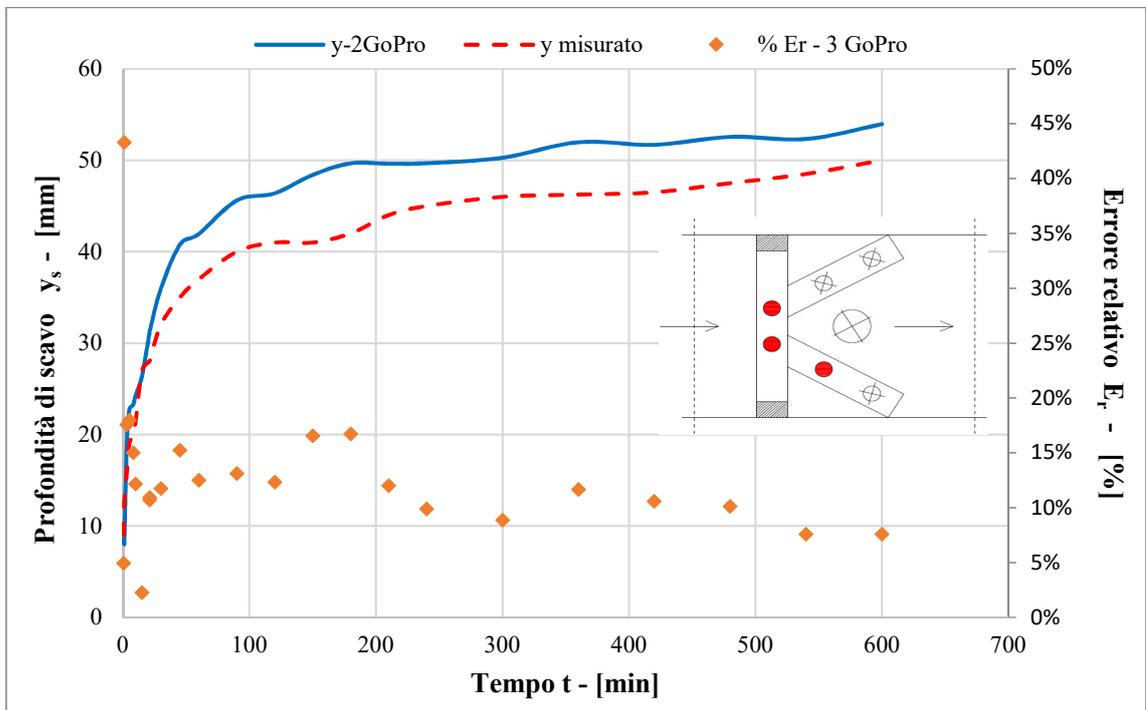


Figura 38: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo "misurate" e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 3 GoPro.

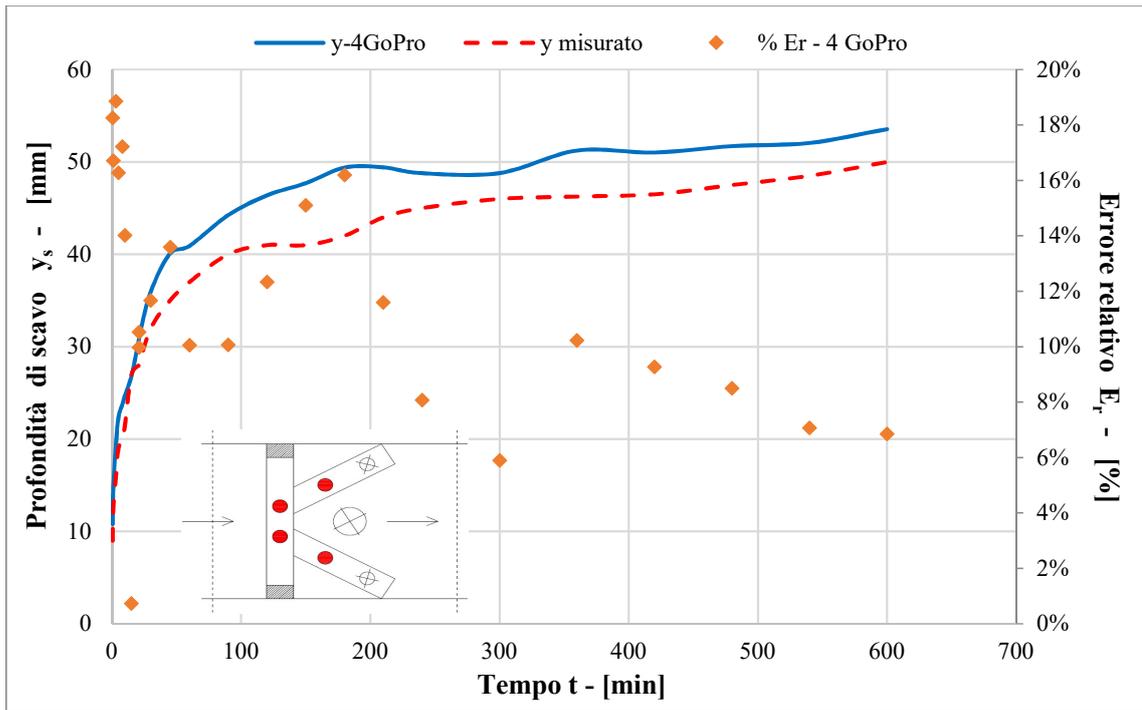


Figura 39: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo "misurate" e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 4 GoPro.

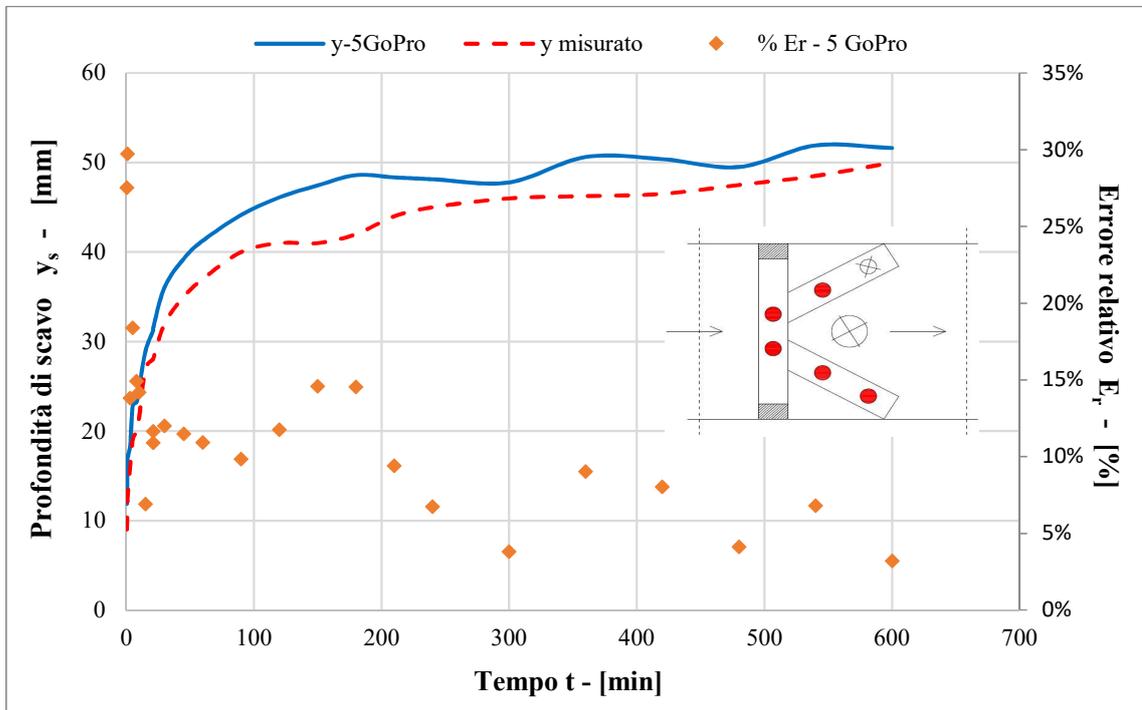
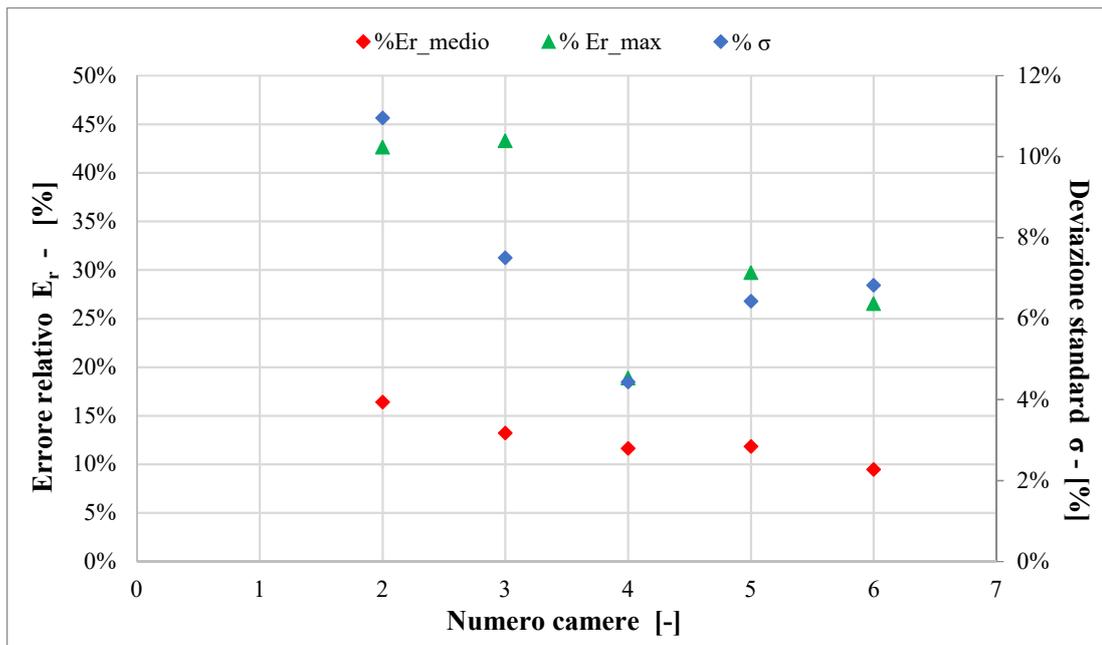


Figura 40: Profili di profondità e distribuzione dell' errore relativo percentuale ricostruiti dalle misure di profondità di scavo "misurate" e restituite dal processamento dei fotogrammi catturati da 5 GoPro.

Dal diagramma restituito in *Figura 41* emerge chiaramente che le performance del metodo fotogrammetrico sono fortemente condizionate dal numero di camere utilizzate in fase di acquisizione della scena. All'aumentare del numero dei dispositivi di ripresa, migliora l'accuratezza del dato acquisito in ragione di un abbattimento degli errori, sia nei valori medi che in quelli massimi, così come si rileva una riduzione della dispersione delle misure di errore intorno alla media.



*Figura 41: Analisi statistica dell'errore di misura per la valutazione delle prestazioni del metodo fotogrammetrico, in relazione al numero di dispositivi di ripresa impiegati.*

Pertanto, ricostruendo in maniera dettagliata il fondo del canale, si ritiene che la tecnica fotogrammetrica permetta l'ottenimento dati di profondità prossimi a quelli reali, la cui precisione può essere ulteriormente migliorata in relazione al numero delle camere impiegate.

In conclusione, data l'accuratezza delle misure di volume e di profondità, restituite in una maniera del tutto non invasiva – in condizioni di *narrow piers* - la metodologia fotogrammetrica è da ritenersi valida ed implementabile per la caratterizzazione della geometria dello scavo di erosione utile alla comprensione del fenomeno erosivo in prove in canaletta.

Poiché, come è emerso, la precisione dei risultati ottenibili può essere ampiamente migliorata in relazione al numero delle camere impiegate, le tecniche fotogrammetriche, garantendo un basso costo di implementazione, assicurano un'ampia versatilità.

#### 4. Validazione modello teorico Manes e Brocchini (2015) – MB15

La metodologia fotogrammetrica ha permesso di monitorare l'evoluzione nel tempo dell'intero volume di scavo, attraverso l'acquisizione di dati relativi al volume di sedimenti complessivamente asportati e alla massima profondità di erosione. Le misurazioni ottenute da quattro prove sperimentali, in cui sono state adottate pile di differente geometria, sono state funzionali alla validazione del modello teorico di dipendenza lineare del volume di scavo dalla potenza terza della massima profondità di erosione, proposto da Manes e Brocchini, 2015, e alla valutazione dell'adeguatezza della scala temporale impiegata per il raggiungimento della condizione di equilibrio.

Con riferimento alla scala temporale adottata – 10 ore - l'evoluzione temporale dei due parametri geometrici, ricostruita per ciascuna prova di erosione, è rappresentata nei diagrammi restituiti in *Figura 42 e 43*<sup>30</sup>, ottenuti plottando i valori misurati di volume eroso e di massima profondità di scavo, in funzione del tempo. Ai fini di una più agevole lettura degli andamenti, ciascuna variabile dipendente è stata normalizzata rispetto al valore massimo, corrispondente all'ultima acquisizione.

---

<sup>30</sup> I dati rappresentati sono organizzati per dimensione della pila – 5 cm e 9 cm.

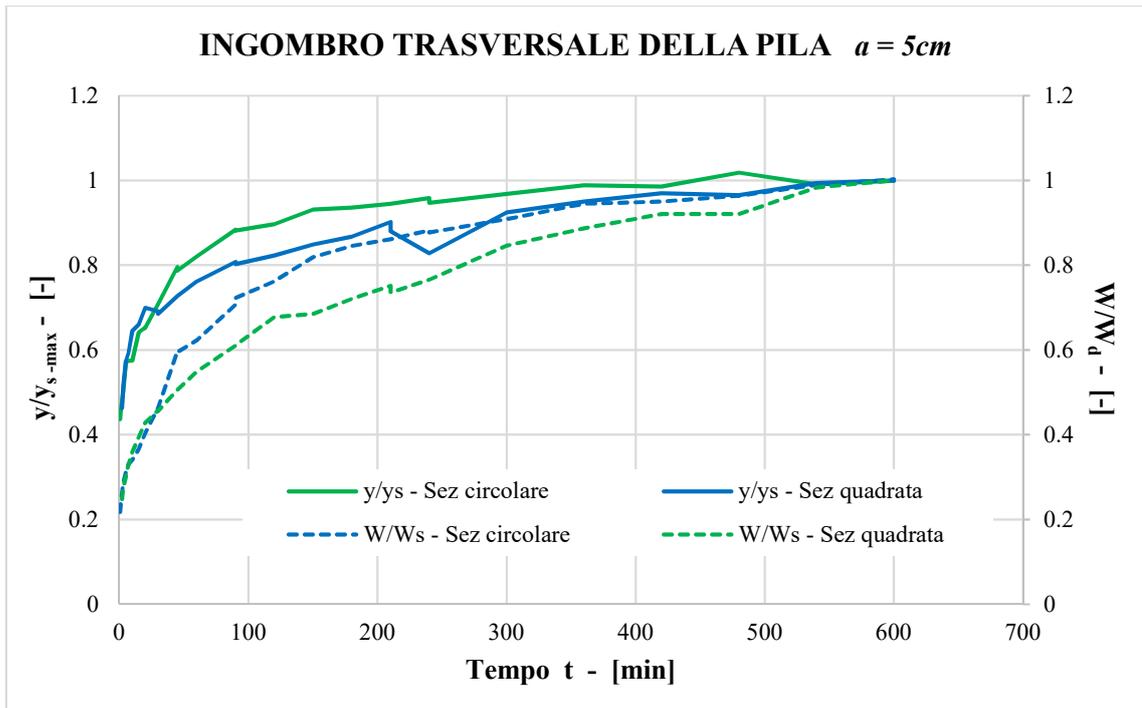


Figura 42: Andamento del tempo della potenza terza della massima profondità di scavo e del volume di erosione, entrambi normalizzati sui massimi, per pile di dimensione 5 cm e diversa geometria della sezione trasversale - quadrata e circolare.

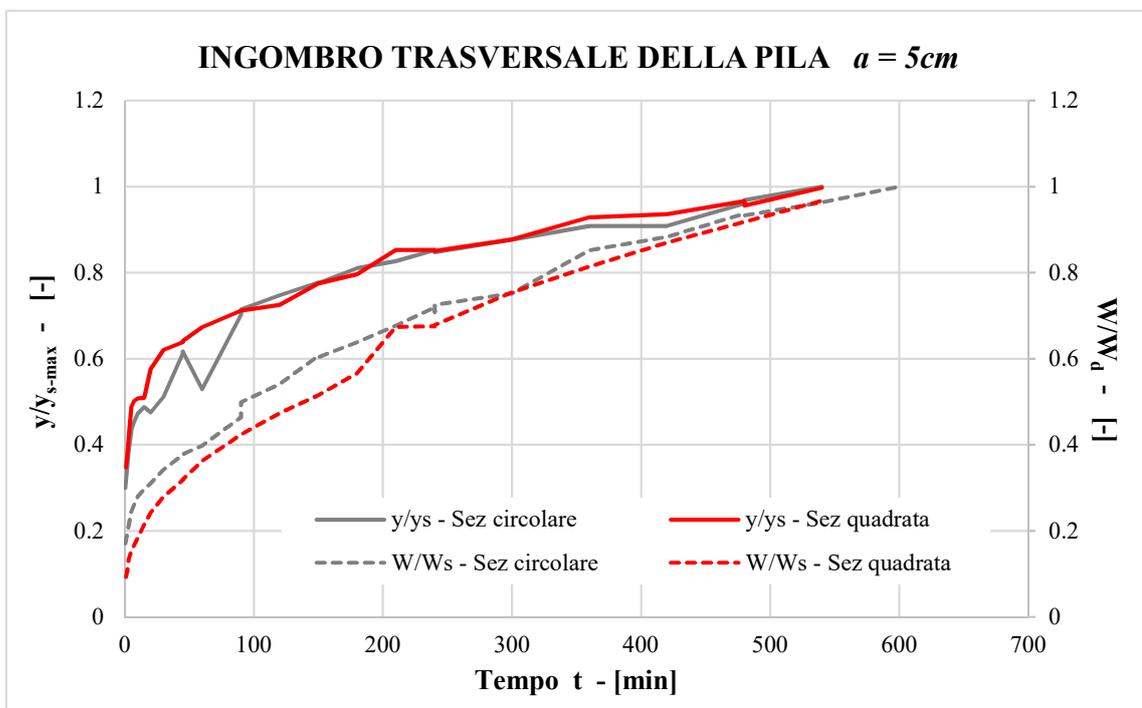


Figura 43: Andamento del tempo della potenza terza della massima profondità di scavo e del volume di erosione, entrambi normalizzati sui massimi, per pile di dimensione 9 cm e diversa geometria della sezione trasversale - quadrata e circolare.

Da una prima lettura emerge una evidente similarità dei pattern evolutivi dei due parametri che suggerisce una dipendenza di tipo lineare del volume dalla potenza terza della massima profondità di scavo - Manes e Brocchini, 2015 :

$$W_s \propto y_s^3$$

Per poterne confermare la validità, per ciascuna prova, i valori di volume eroso sono stati plottati in funzione della potenza terza della massima profondità di scavo.

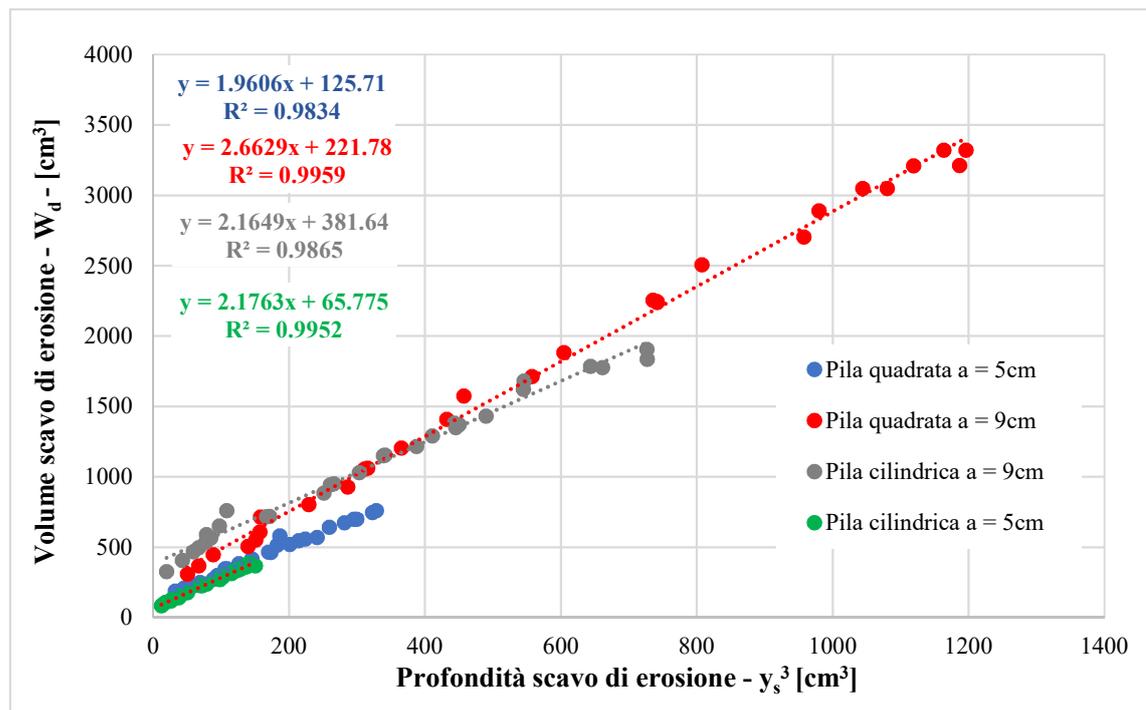


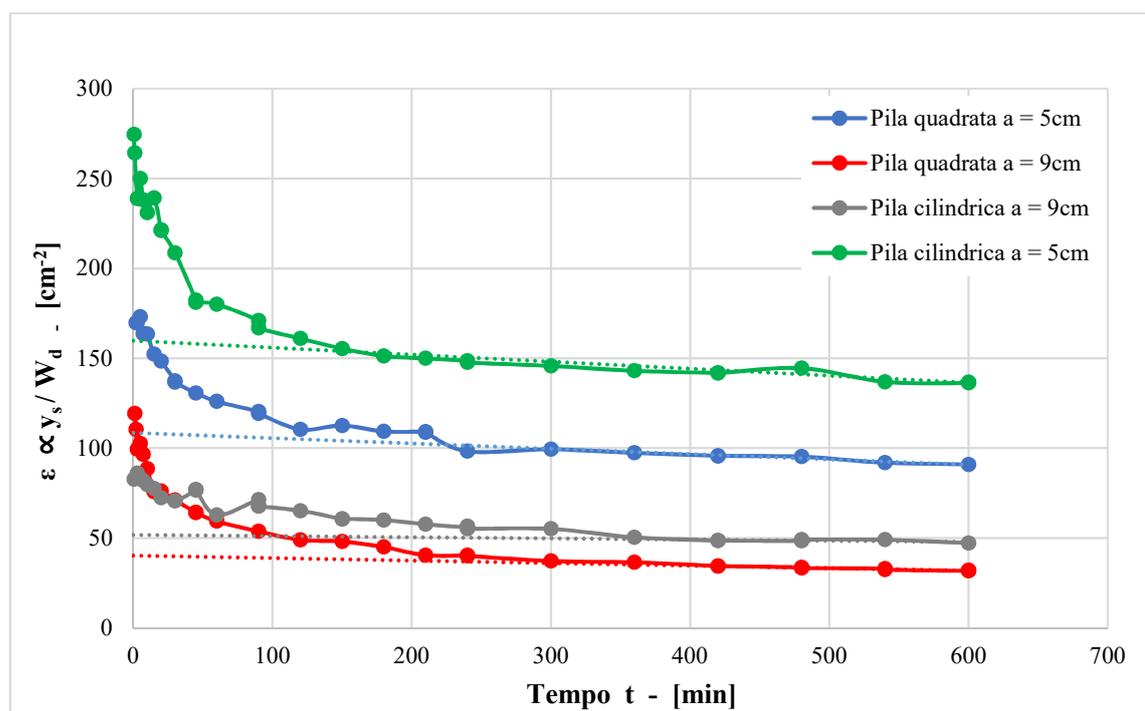
Figura 44: Variazione del volume di scavo con la potenza terza della massima profondità , ricostruite per tutte le prove di erosione.

Il diagramma, riportato in Figura 44 ottenuto ha rivelato un trend di crescita lineare del volume eroso con la massima profondità di scavo che, sviluppandosi secondo rette ad intercetta non nulla, sembra confermare in parte il modello di dipendenza proposto dagli autori. La conformità delle rette di regressione ai punti sperimentali<sup>31</sup>, è confermato dai valori elevati dell'indice di determinazione,  $R^2$  – intorno a 0.99 per tutti i casi in esame. In ragione dei valori non nulli delle intercette, si ritiene che gli andamenti ottenuti siano conformi al secondo regime di evoluzione dello scavo di erosione, associato ad una fase

<sup>31</sup> I punti sperimentali sono stati fittati ricorrendo a metodi di regressione lineare, basati sul metodo dei minimi quadrati. La conformità della retta di regressione ai dati sperimentali è stata verificata attraverso l'indice di determinazione  $R^2$ .

del processo governata dallo stabile sviluppo del vortice a ferro di cavallo e dalla definizione della forma tronco-conica inversa dello scavo di erosione— Rogers et al., 2019.

Alla luce di questo risultato si è provveduto a verificare l'adeguatezza della scala temporale adottata ai fini del raggiungimento della condizione di equilibrio. In questo senso si è fatto ricorso al concetto di tempo di crossover,  $t_{ssd}$ . La rappresentazione grafica della variazione nel tempo del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta, restituito come rapporto della massima profondità di scavo sul corrispondente volume di erosione, è restituita in *Figura 45*.



*Figura 45: Variazione del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta nel tempo, restituita per tutte le quattro prove di erosione.*

Conformemente ai risultati ottenuti da Rogers et al., 2019, un trend generale accomuna gli andamenti ricostruiti per ciascuna prova di erosione.

Qualunque sia la pila impiegata, il rapporto profondità massima/volume -  $y_s/W_d$  - dello scavo di erosione diminuisce progressivamente nel tempo, con un tasso di variazione che si riduce progressivamente. Il calo osservato nella produzione di energia cinetica turbolenta è più pronunciato nei primi istanti del processo erosivo e prosegue tendendo ad una stabilizzazione finale. Nonostante si rilevi un sostanziale appiattimento delle curve sperimentali, alla decima ora sono ancora apprezzabili piccole variazioni tra i valori del

rapporto  $y_s/W_d$ . Da ciò si deduce che in nessuna delle prove di erosione eseguite è stato raggiunto l'equilibrio a causa dell'inadeguatezza della scala temporale adottata. In realtà, le entità delle variazioni di  $\varepsilon$ , osservate nelle ultime quattro ore di prova – *Figura 45* –, lasciano supporre che il tempo di crossover sia prossimo al tempo di “fine prova” - e, inoltre, che il loro scarto sia tanto maggiore quanto minore è l'ingombro trasversale della pila.

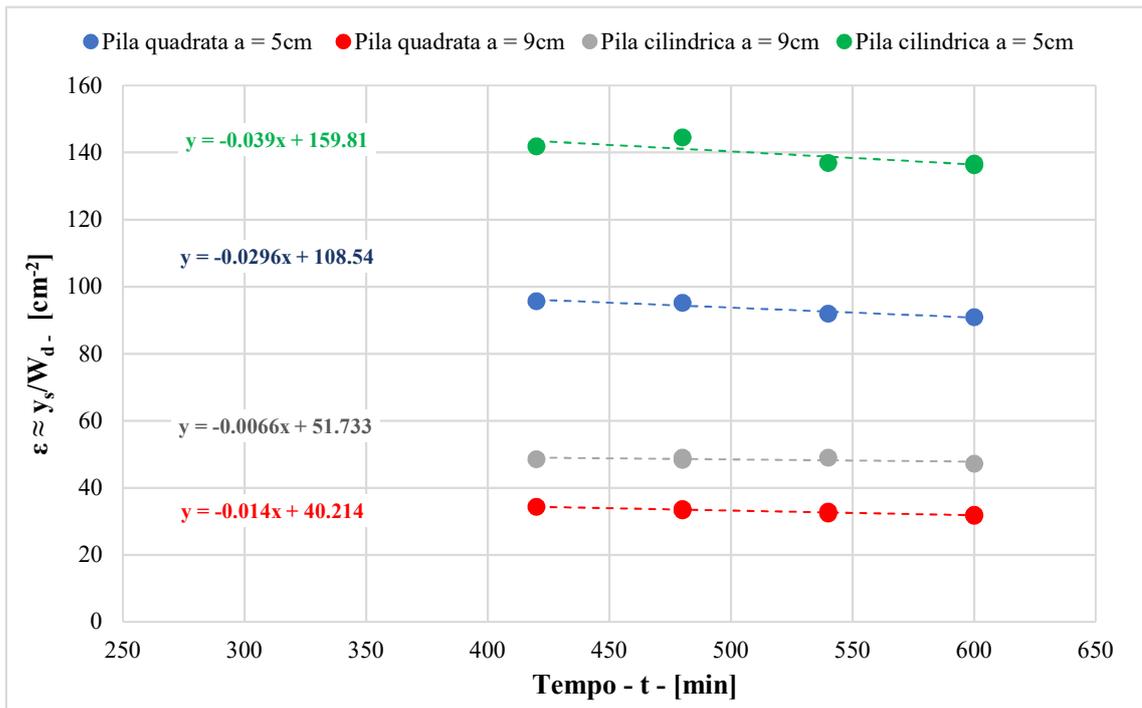


Figura 46: Variazione del tasso di produzione di energia cinetica turbolenta nelle ultime quattro ore di osservazione, per tutte le prove di erosione.

Pertanto, atteso che il modello di regressione lineare restituito dal fitting delle misure sperimentali esibisce un'intercetta non nulla, ossia:

$$W_s = \alpha y_s^3 + \beta$$

In riferimento al tempo “fine prova”,  $t_{end}$ , l'incertezza associata al volume di erosione restituito dal modello proposto da Manes e Brocchini, 2015 -  $V_s \propto y_s^3$  - può essere stimata attraverso il rapporto  $\frac{\beta}{\alpha \cdot y_{s,end}^3}$ , in cui  $\alpha$  e  $\beta$  sono, rispettivamente il coefficiente angolare e l'intercetta delle rette di regressione ottenute per ciascun set di dati sperimentali. I valori ottenuti sono forniti in *Tabella 7*.

Tabella 7: Incertezza del modello di dipendenza lineare di Manes e Brocchini 2015

ID _ Pile sperimentali	$\alpha$	$\beta$	$\frac{\beta}{\alpha \cdot y_{s,end}^3}$
	[-]	[cm <sup>3</sup> ]	[-]
Sez. quadrata a = 5cm	1.96	125.71	19.5%
Sez. quadrata a = 9cm	2.66	221.78	7.0%
Sez. cilindrica a = 9cm	2.16	381.64	24.3%
Sez. cilindrica a = 5cm	2.18	65.77	22.1%
<b>MEDIE</b>	<b>2.24</b>	<b>198.72</b>	<b>18.2%</b>
<b>DEVIAZIONE STANDARD</b>	<b>0.30</b>	<b>137.84</b>	<b>7.7%</b>

Gli errori di stima, ottenuti per le quattro prove di erosione, sono risultati piuttosto ridotti, variando tra il 7% e il 28%. Sulla base di ciò, si ritiene che i risultati ottenuti siano incoraggianti ai fini della validazione del dell'ipotesi di MB15.

In merito alle rette di regressione restituite dal fitting dei dati sperimentali, è interessante far notare che, sebbene mostrino pendenze piuttosto simili - con valori che variano tra 1.96-2.66 - si riscontra un'ampia variabilità nei valori delle loro intercette verticali che, per le casistiche indagate, risultano comprese tra 65.76 cm<sup>3</sup> e 384.64 cm<sup>3</sup>. La natura di questo termine è ignota e non è approfondibile in questa sede data la scarsità di informazioni disponibili<sup>32</sup>. Va da sé che qualora una maggiore disponibilità di informazioni dovesse confermare il risultato ottenuto, sarà necessario rivedere l'ipotesi alla base del modello teorico MB15 in modo da inglobare un termine noto che, allo stato attuale, non è previsto.

I dati sperimentali impiegati per la validazione del modello teorico MB15 sono restituiti in allegato -*Tabelle 16 a 19*.

---

<sup>32</sup> Quattro prove sperimentali non sono sufficienti a chiarire l'origine delle intercette

## Conclusioni

Le attività condotte nell'ambito del presente elaborato mirano alla validazione di una metodologia innovativa a basso costo per la misurazione della geometria degli scavi di erosione sviluppati in prove in canaletta, tentando di superare i limiti delle procedure tradizionalmente impiegate.

Applicando le tecniche tipiche del rilievo fotogrammetrico ad immagini catturate nel tempo da sistemi non invasivi - camere *waterproof* GoPro Hero5 Session-, la metodologia permette la riproduzione tridimensionale della sequenza delle configurazioni assunte del fondo nell'intorno della pila e quindi, per ciascun istante di acquisizione della scena, la restituzione di misure di volume e profondità utili alla definizione dei pattern evolutivi degli scavi di erosione.

La possibilità di impiegare una metodica fotogrammetrica a basso costo, come alternativa alle attuali procedure di misura, apre interessanti scenari dalla notevole rilevanza pratica. Se validata, la procedura fotogrammetrica consentirebbe il superamento dei limiti associati alle tecniche tradizionali, non soltanto restituendo valori più accurati, ma ampliando la gamma di informazioni geometriche acquisibili durante le prove di erosione, concretizzando la possibilità di monitorare l'evoluzione nel tempo dello scavo di erosione, e quindi di ricostruirne la curva fenomenologica.

Per poter stabilirne l'impiegabilità in prove in canaletta, la metodologia fotogrammetrica è stata oggetto di un'ampia attività di validazione.

Le profondità restituite dal metodo fotogrammetrico sono state validate mediante l'impiego di aste graduate applicate direttamente alla pila di erosione. L'analisi comparativa tra le misure estrapolate dai DEM e quelle ricavate dalla lettura diretta della quota di scavo ha restituito errori che al più sono pari a circa il doppio del diametro medio dei sedimenti. Inoltre, relativamente alla configurazione assunta dallo scavo di erosione al tempo di fine prova, la sovrapposizione del modello 3D a bassa risoluzione, derivato dal rilievo manuale, alla *dense cloud*, restituita dal processamento dei fotogrammi, ha rilevato una forte adattabilità delle superfici ricostruite.

Poiché, ai fini dell'acquisizione della scena è necessario che le fotocamere siano costantemente mantenute in acqua, ripetendo la prova di erosione in assenza del sistema di ripresa si è provveduto a valutare l'impatto del metodo fotogrammetrico sull'evoluzione dello scavo di erosione. L'analisi comparativa tra le misure di profondità di scavo lette, in entrambe le prove, su aste graduate applicate direttamente alla pila, ha

confermato la non intrusività del metodo nei confronti dello sviluppo dello scavo di erosione.

Alla luce dei risultati ottenuti, il metodo fotogrammetrico permette, in una maniera del tutto non invasiva, l'ottenimento di misure di volume e di profondità coerenti con la reale configurazione dello scavo, la cui precisione può essere ulteriormente migliorata dal potenziamento del sistema di rilievo. Infatti, il confronto tra misure ottenute dalla lettura della quota di scavo e le misure profondità restituite dall'elaborazione di fotogrammi, acquisiti con un numero crescente di fotocamere – da 2 a 6 GoPro- ha evidenziato un netto abbattimento degli errori, sia nei valori medi che nei valori massimi, sintomatico di un miglioramento della qualità delle misure. Dalla stessa analisi è emerso che sono sufficienti appena 4 fotocamere per ottenere misurazioni robuste ed accurate.

Dati i risultati più che soddisfacenti della validazione, le misurazioni ottenute da quattro prove sperimentali, in cui sono state adottate pile di differente geometria, sono state funzionali alla validazione del modello teorico  $W_s \propto y_s^3$  proposto da Manes e Brocchini, 2015. Per ciascuna prova, l'elaborazione dei dati sperimentali ha rivelato un trend di crescita lineare del volume eroso con la potenza terza della massima profondità di scavo che, in ragione di intercette non nulle, conferma in parte il modello di dipendenza proposto dagli autori.

Alla luce del recente lavoro di *Rogers et al., 2019*, i valori non nulli delle intercette ed il mancato raggiungimento del punto di *crossover* hanno palesato l'inadeguatezza della scala temporale adottata ai fini del raggiungimento della condizione di equilibrio, indicando la similitudine tra i pattern ricostruiti ed il secondo regime di evoluzione dello scavo.

Inoltre, il confronto delle rette di best fitting ottenute ne ha posto in luce l'ampia variabilità delle intercette. La scarsità di informazioni disponibili, determinata dal numero limitato di prove effettuate, non ha permesso ulteriori approfondimenti in merito alla natura di questo termine. Va da sé che qualora una maggiore disponibilità di informazioni dovesse confermare il risultato ottenuto, sarà necessario rivedere l'ipotesi alla base del modello teorico Manes e Brocchini, 2015, in modo da inglobare un termine noto che, allo stato attuale, non è previsto.

## Allegati

Di seguito si riportano i risultati sperimentali ottenuti dalle prove di erosione in canaletta e impiegati per la validazione del metodo fotogrammetrico – *Tabelle 8 a 15*– e del modello teorico Manes e Brocchini, 2015, - *MB15 - Tabelle 16 a 19*.

*Tabella 8: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 2 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.*

<i>Tempo</i>	<i>y<sub>misurato</sub></i>	<i>y<sub>DEM - 2 GoPro</sub></i>	<i>E<sub>r</sub></i>
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	9	13.88	43%
1	12.5	18.61	39%
3	16	22.71	35%
5	19	25.06	27%
8	20	26.15	27%
10	21.5	27.39	24%
15	27	31.81	16%
21	28	32.32	14%
21	28	33.12	17%
30	32	39.39	21%
45	35	40.25	14%
60	37	43.36	16%
90	40	45.29	12%
120	41	45.32	10%
150	41	47.52	15%
180	42	47.64	13%
210	44	47.90	8%
240	45	47.49	5%
300	46	48.31	5%
360	46.25	49.23	6%
420	46.5	50.17	8%
480	47.5	51.59	8%
540	48.5	51.47	6%
600	50	52.09	4%

Tabella 9: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 3 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.

<i>Tempo</i>	<i>y</i> <sub>misurato</sub>	<i>y</i> <sub>DEM - 3 GoPro</sub>	<i>E<sub>r</sub></i>
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	9	8.6	5%
1	12.5	8.1	43%
3	16	19.1	18%
5	19	22.8	18%
8	20	23.2	15%
10	21.5	24.3	12%
15	27	26.4	2%
21	28	31.2	11%
21	28	31.2	11%
30	32	36.0	12%
45	35	40.8	15%
60	37	41.9	13%
90	40	45.6	13%
120	41	46.4	12%
150	41	48.4	17%
180	42	49.7	17%
210	44	49.6	12%
240	45	49.7	10%
300	46	50.3	9%
360	46.25	52.0	12%
420	46.5	51.7	11%
480	47.5	52.6	10%
540	48.5	52.3	8%
600	50	53.9	8%

Tabella 10: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 4 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.

<i>Tempo</i>	<i>y</i> <sub>misurato</sub>	<i>y</i> <sub>DEM - 4 GoPro</sub>	<i>E<sub>r</sub></i>
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	9	10.8	18%
1	12.5	14.8	17%
3	16	19.3	19%
5	19	22.4	16%
8	20	23.8	17%
10	21.5	24.7	14%
15	27	26.8	1%
21	28	30.9	10%
21	28	31.1	11%
30	32	36.0	12%
45	35	40.1	14%
60	37	40.9	10%
90	40	44.2	10%
120	41	46.4	12%
150	41	47.7	15%
180	42	49.4	16%
210	44	49.4	12%
240	45	48.8	8%
300	46	48.8	6%
360	46.25	51.2	10%
420	46.5	51.0	9%
480	47.5	51.7	8%
540	48.5	52.1	7%
600	50	53.5	7%

Tabella 11: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 5 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.

<i>Tempo</i>	$y_{misurato}$	$y_{DEM - 5 GoPro}$	$E_r$
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	9	11.9	28%
1	12.5	16.9	30%
3	16	18.4	14%
5	19	22.8	18%
8	20	23.2	15%
10	21.5	24.8	14%
15	27	28.9	7%
21	28	31.2	11%
21	28	31.5	12%
30	32	36.1	12%
45	35	39.3	11%
60	37	41.3	11%
90	40	44.1	10%
120	41	46.1	12%
150	41	47.5	15%
180	42	48.6	15%
210	44	48.3	9%
240	45	48.1	7%
300	46	47.8	4%
360	46.25	50.6	9%
420	46.5	50.4	8%
480	47.5	49.5	4%
540	48.5	51.9	7%
600	50	51.6	3%

Tabella 12: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata e misurate da DEM, rasterizzati dal processamento di soli 6 fotogrammi. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.

$T_{\text{tempo}}$	$y_{\text{misurato}}$	$y_{\text{DEM - 6 GoPro}}$	$E_r$
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	9	11.7	26%
1	12.5	16.3	27%
3	16	18.8	16%
5	19	22.0	15%
8	20	23.4	15%
10	21.5	24.1	11%
15	27	28.4	5%
21	28	31.2	11%
21	28	31.1	11%
30	32	36.0	12%
45	35	38.7	10%
60	37	39.2	6%
90	40	41.9	5%
120	41	44.1	7%
150	41	46.2	12%
180	42	46.1	9%
210	44	46.7	6%
240	45	45.5	1%
300	46	46.0	0%
360	46.25	48.5	5%
420	46.5	48.8	5%
480	47.5	51.2	8%
540	48.5	50.3	4%
600	50	50.9	2%

Tabella 13: Analisi statistica dell'errore relativo alle misure di profondità, restituite dal metodo fotogrametrico, in relazione al numero delle fotocamere impiegato in fase di acquisizione.

$N_{\text{camere}}$	$E_{r-\text{max}}$	$E_{r-\text{medio}}$	$\sigma$
[-]	[%]	[%]	[%]
2	43%	16%	11%
3	43%	13%	8%
4	19%	12%	4%
5	30%	12%	6%
6	27%	9%	7%

Tabella 14: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata frontale ottenute da prove di erosione sviluppate con e senza GoPro. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.

<i>Tempo</i>	$y_{\text{con GoPro}}$	$y_{\text{senza GoPro}}$	$E_r$
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	13	9	36%
1	16	12.5	25%
3	18	16	12%
5	20	19	5%
7	21	20	5%
10	22	21.5	2%
15	27	27	0%
20	28	28	0%
30	31	32	3%
45	34	35	3%
60	36	37	3%
90	39	40	3%
120	40	41	2%
150	40	41	2%
180	41	42	2%
210	43	44	2%
240	44	45	2%
300	45	46	2%
360	46	46.25	1%
420	46	46.5	1%
480	47	47.5	1%
540	48	48.5	1%
600	50	50	0%

Tabella 15: Profondità dello scavo di erosione da osservazione diretta all'asta graduata laterale ottenute da prove di erosione sviluppate con e senza GoPro. La quarta colonna riporta per ciascun istante di acquisizione l'errore relativo ottenuto dall'analisi comparativa delle due serie.

<i>Tempo</i>	$y_{\text{con GoPro}}$	$y_{\text{senza GoPro}}$	$E_r$
[min]	[mm]	[mm]	[%]
0.5	15	13	14%
1	16	14	13%
3	20	20	0%
5	22	21	5%
7	23	22	4%
10	24	22	9%
15	26	26	0%
20	27.5	26	6%
30	30	28	7%
45	31.5	30	5%
60	32	33.5	5%
90	34	37	8%
120	35	38	8%
150	36	39	8%
180	37	39.5	7%
210	37	40	8%
240	39	41	5%
300	42	41	2%
360	42	41.5	1%
420	42.5	42	1%
480	43	42.75	1%
540	44	45	2%
600	44.5	45	1%

Tabella 16: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta quadrata -  $a = 5\text{cm}$  - restituite dal metodo fotogrammetrico.

<i>Tempo</i>	$W_d(t)$	$y_s(t)$	$y_s^3(t)$
[min]	[cm <sup>3</sup> ]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]
2	188	31.9	32.5
3	209	35.6	44.9
5	229	39.6	62.2
7	250	40.9	68.6
10	272	44.5	88.0
15	299	45.5	94.4
20	325	48.2	112.3
30	347	47.7	108.4
30	346	47.3	105.6
45	384	50.2	126.2
60	417	52.6	145.1
90	463	55.7	172.8
90	464	55.4	169.9
120	514	56.7	182.6
150	520	58.5	200.7
180	547	59.8	213.9
210	570	62.2	241.1
210	558	60.7	223.7
240	581	57.1	186.2
300	642	63.8	259.4
360	673	65.5	281.4
420	699	66.9	299.5
480	699	66.6	294.9
540	746	68.6	322.4
600	759	69.0	328.4

Tabella 17: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta quadrata -  $a = 9 \text{ cm}$  - restituite dal metodo fotogrammetrico.

<i>Tempo</i>	$W_d(t)$	$y_s(t)$	$y_s^3(t)$
[min]	[cm <sup>3</sup> ]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]
1	309	36.9	50.1
2	368	40.6	66.9
3	448	44.5	88.4
5	506	51.9	139.6
7	551	53.2	150.6
10	609	53.9	156.7
15	714	54.1	158.0
20	804	61.2	228.8
30	927	65.9	286.2
45	1056	67.7	310.8
45	1061	68.1	315.3
60	1205	71.5	365.1
90	1408	75.6	431.8
120	1574	77.0	457.0
150	1712	82.3	557.3
180	1882	84.6	604.5
210	2240	90.5	741.9
240	2245	90.5	741.2
240	2254	90.3	735.7
300	2506	93.1	807.4
360	2704	98.6	957.6
420	2890	99.3	979.7
480	3050	102.6	1080.2
480	3050	101.4	1044.1
540	3213	105.9	1187.0
540	3209	103.8	1119.2
600	3322	105.2	1163.7
600	3322	106.2	1196.4

Tabella 18: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta circolare -  $a = 5 \text{ cm}$  - restituite dal metodo fotogrammetrico.

<i>Tempo</i>	$W_d (t)$	$y_s (t)$	$y_s^3 (t)$
[min]	[cm <sup>3</sup> ]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]
0.5	83	22.8	11.8
1	90	23.8	13.5
3	110	26.3	18.2
5	119	29.8	26.4
7	126	30.0	27.0
10	130	30.0	27.1
15	140	33.5	37.5
20	154	34.1	39.6
20	154	34.0	39.4
30	177	36.9	50.4
45	228	41.6	71.9
45	227	41.1	69.5
60	238	42.9	78.7
90	270	46.1	98.2
90	276	46.1	97.7
120	291	46.8	102.8
150	313	48.6	115.1
180	323	48.9	116.6
210	329	49.3	120.0
240	337	50.1	125.5
240	335	49.5	120.9
300	347	50.6	129.4
360	361	51.6	137.6
420	363	51.5	136.4
480	368	53.2	150.3
540	378	51.7	138.5
600	383	52.2	142.1
600	382	52.2	142.5

Tabella 19: Misure di profondità e volume dello scavo di erosione alla base di una pila a sezione retta circolare -  $a = 9 \text{ cm}$  - restituite dal metodo fotogrammetrico.

<i>Tempo</i>	$W_d(t)$	$y_s(t)$	$y_s^3(t)$
[min]	[cm <sup>3</sup> ]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]
0.5	326	27.0	19.6
3	407	35.0	42.9
5	467	38.9	58.6
7	496	40.6	67.0
10	534	42.5	76.9
15	566	43.9	84.5
20	591	42.7	78.1
30	652	46.0	97.3
45	718	55.0	166.7
45	720	55.5	170.8
60	759	47.6	107.9
90	884	63.1	251.3
90	943	63.9	260.6
90	950	64.3	265.7
120	1031	67.2	303.2
150	1155	69.9	341.0
150	1150	69.7	338.8
180	1216	72.9	387.2
210	1290	74.3	410.5
240	1370	76.6	449.9
240	1349	76.3	445.0
240	1382	76.2	443.1
300	1432	78.8	489.9
360	1623	81.7	544.7
420	1682	81.7	545.5
480	1786	86.3	643.7
480	1777	87.1	660.9
540	1835	89.9	726.9
600	1905	89.9	726.6

## Bibliografia

- ROCA M. et WHITEHOUSE R. - *Scour risk assessments at river crossing* – ICSE6, Paris, 2012.
- PITCHER G. – *Storm Desmond: bridges damaged* – New Civil Engineer, 7 December 2015.
- MANES C. et BROCCINI M. - *Local scour around structures and the phenomenology of turbulence* – Journal of Fluid Mechanics, 2015.
- LIMARE A., TAL M., REITZ M., LAJEUNESSE E. et MÉTIVIER F. - *Optical method for measuring bed topography and flow depth in an experimental flume* - Solid Earth, 2011.
- LI W., GEE T., DELMAS P. et FRIEDRICH H. - *Evaluating using GoPro cameras and Tsai's calibration for video-based submerged river-bed reconstruction* - International Conference on Image and Vision Computing, New Zealand 2016.
- LI W., GEE T., DELMAS P. et FRIEDRICH H. - *Tsai's calibration applied for close-range hydraulic engineering research* - International Conference on Image and Vision Computing, New Zealand 2015.
- BRATH A. - *La sicurezza idraulica degli attraversamenti fluviali*.
- MARCHIE. et RUBATTA A. – *Meccanica dei fluidi, principi e applicazioni idrauliche, 1981*.
- ROGERS et al.,- “ \_ ” - International Journal of Sediment Research, 2019, *submitted*.
- BERT R. – *Monitoraggio del volume di scavo localizzato mediante tecniche fotogrammetriche a basso costo* - Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, Torino, 2018.
- ETTEMA R., KIRKIL G. et MUSTE M.-*Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders* – Journal of Hydraulic Engineering, 2006.
- MELVILLE B. W. et CHIEW Y. M. - *Time scale for local scour at bridge piers* - Journal of Hydraulic Engineering, 1999.
- MELVILLE B.W. - *The physics of local scour at bridge piers* - Fourth International Conference on Scour and Erosion, Tokyo 5-7th, November 2008.
- FAEL C., LANÇA R., COUTO L. et CARDOSO A. - *Local scour at single piers revisited* - 3th IAHR Europe Congress, Porto, 2014

ETTEMA, R., CONSTANTINESCU, G. et MELVILLE, B. - *Evaluation of bridge scour research: pier scour processes and predictions* - NCHRP Report, 2011

Manuale Agisoft PhotoScan Professional