



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Architettura (DICEA)

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA CIVILE e AMBIENTALE

**ANALISI SPERIMENTALE DELLE FORZE IDRODINAMICHE
SULLA STRUTTURA DI UN PONTE**

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HYDRODYNAMIC FORCES ON
THE STRUCTURE OF A BRIDGE**

Relatore: Chiar.ma

Prof. Ing. Giovanna DARVINI

Tesi di Laurea di:

Federico ROMAGNOLI

Correlatori:

Prof. Ing. Sara CORVARO

Dott. Ing. Stefania ROCCHI

A.A. 2025 / 2026

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Scopo della tesi	1
1.2 Sintesi dei capitoli	2
2. VULNERABILITA' E FATTORI DI RISCHIO PER I PONTI NELLE DINAMICHE FLUVIALI	4
2.1 Introduzione	4
2.2 Vulnerabilità idrodinamica (interazione con il flusso).....	4
2.3 Vulnerabilità meccanica indiretta	5
2.4 Vulnerabilità strutturale residua (stato di conservazione)	5
3. CORRENTI IN ALVEI FLUVIALI	7
3.1 Introduzione	7
3.2 Numero di Reynolds e regime di moto	7
3.3 Tipologie di moto fluido	8
3.4 Equazione di continuità.....	9
3.5 Formula di Manning-Strickler	10
3.6 Teorema di Bernoulli	10
3.7 Caratteristiche cinematiche della corrente (regime di flusso)	11
3.8 Pressione idrostatica e idrodinamica	13
3.9 Condizione di flusso in pressione.....	14
4. IDRODINAMICA INDOTTA DALLA PRESENZA DI UN PONTE.....	16
4.1 Analisi idrodinamica attorno alla struttura del ponte	16
4.2 Forza di Drag e coefficiente di Drag	17
4.3 Forza di Lift e coefficiente di Lift	19
5. MORFODINAMICA ATTORNO ALLA PILA DI UN PONTE	21
5.1 Fenomeni locali attorno alla pila	21
5.2 Scavo in condizioni “Live-bed” e “Clear-water”	23
5.3 Parametri idraulici e morfologici influenzanti lo scavo	25
6. MODELLI IN SCALA E PRINCIPI DI SIMILITUDINE	27
6.1 Modelli idraulici in scala ridotta	27
6.2 Il concetto di similitudine: geometrica, cinematica e dinamica	28
6.3 Similitudine completa e incompleta	28
6.4 Similitudine idraulica e numero di Froude	29

6.5 Similitudine strutturale e numero di Cauchy	30
6.6 Determinazione dei fattori di scala	31
7. STRUMENTAZIONE E CONFIGURAZIONE DELLE PROVE	36
7.1 Introduzione	36
7.2 Canale idraulico	36
7.3 Strumenti di misura	38
7.4 Sistema di acquisizione dati	43
7.5 Modello della pila e dell'impalcato	43
7.6 Configurazione delle prove	46
8. CAMPAGNA SPERIMENTALE.....	53
8.1 Procedura sperimentale	53
8.2 Acquisizione e conversione dei dati	54
9. ELABORAZIONE DATI E RISULTATI.....	56
9.1 Grandezze fisiche analizzate	56
9.2 Analisi prove del 02.04.2026	58
9.3 Analisi prove del 14.04.2026	61
9.4 Analisi prove del 05.03.2026	64
9.5 Analisi prove del 12.03.2026	72
9.6 Analisi prove del 19.03.2026	79
9.7 Analisi prove del 26.03.2026	98
9.8 Analisi prove con dinamometro e cella di carico.....	115
10. CONCLUSIONI	122
11. BIBLIOGRAFIA	125

1. INTRODUZIONE

1.1 Scopo della tesi

I fenomeni meteorologici estremi, sempre più intensi e frequenti a causa del cambiamento climatico, innalzano drasticamente il rischio idrogeologico del territorio. Un caso emblematico è l'alluvione del settembre 2022 che ha duramente colpito la provincia di Ancona, interessando in particolar modo le valli dei fiumi Misa e Nevola. Le violente piene improvvise, innescate in pochissime ore, hanno spazzato via interi tratti di rete viaria e isolato le comunità, mettendo a nudo la profonda fragilità delle opere di attraversamento.

Garantire la sicurezza e la funzionalità dei ponti è quindi cruciale per salvaguardare la viabilità e assicurare l'accesso dei soccorsi. Tuttavia, per i ponti con pile in alveo, le sole indagini strutturali e sismiche risultano insufficienti. La quasi totalità dei collassi e dei danneggiamenti gravi durante le alluvioni deriva infatti dalla complessa interazione ponte-fiume: la struttura altera l'idraulica del deflusso, innescando sollecitazioni anomale e fenomeni di erosione localizzata al piede delle fondazioni, principali responsabili dei cedimenti. Per un'adeguata valutazione della sicurezza strutturale risulta perciò essenziale considerare congiuntamente l'interazione fluido-struttura e adottare strumenti di monitoraggio mirati.

L'obiettivo principale di questo elaborato di tesi è quello di presentare i risultati di una campagna sperimentale finalizzata all'analisi integrata della morfodinamica attorno alla pila di un ponte e delle forze idrodinamiche investenti la sola pila e l'intero sistema pila-impalcato. Lo studio si propone di analizzare la variazione di intensità delle forze idrodinamiche all'intensificarsi del fenomeno erosivo, confrontandola con la condizione di scavo nullo.

Comprendere tali meccanismi consente di definire l'entità delle sollecitazioni a cui la pila e l'impalcato risultano sottoposti, e quindi di valutare con maggiore rigore la stabilità e la sicurezza dell'infrastruttura. I risultati ottenuti offrono informazioni preziose a supporto non solo della progettazione di nuovi attraversamenti fluviali, ma soprattutto dell'implementazione di piani di monitoraggio e manutenzione per i ponti esistenti.

Nello specifico, è stato realizzato un modello fisico a fondo mobile di un ponte in scala ridotta, comprensivo di pila e impalcato, inserito nel canale fluviale del Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA).

Durante le prove sono state riprodotte differenti condizioni idrodinamiche, e per ognuna di esse si è proceduto a:

- Analizzare le forze idrodinamiche gravanti sulla struttura del ponte, sia in condizioni di deflusso libero che in pressione;
- Quantificare l'evoluzione del fenomeno erosivo locale attorno alla pila;
- Valutare l'influenza dei parametri idraulici (portata, velocità del flusso e tirante idrico) e dell'erosione al fondo sulle forze idrodinamiche;
- Studiare le differenze delle forze gravanti sulla pila e sull'impalcato tra la condizione di fondo fisso e quella in condizioni di scavo sviluppato.

1.2 Sintesi dei capitoli

Nel capitolo 2 vengono analizzati i fattori di rischio e la vulnerabilità dei ponti in ambito fluviale, evidenziando come le principali cause di dissesto durante le piene derivino dalla complessa interazione tra l'opera, la corrente e la morfologia dell'alveo, piuttosto che da sole carenze intrinseche del manufatto.

A seguire, il capitolo 3 definisce le caratteristiche delle correnti a pelo libero. I capitoli 4 e 5 analizzano l'idrodinamica indotta dalla presenza di un ponte con particolare attenzione allo studio delle forze agenti sulla struttura del ponte (forza di Drag e forza di Lift) e la morfodinamica attorno alla pila di un ponte, dovuta a fenomeni locali di scavo.

Il capitolo 6 presenta il modello fisico come strumento di indagine per la progettazione e la verifica delle opere, analizzando le problematiche connesse alla riduzione in scala e i principi di similitudine adottati.

L'apparato sperimentale viene quindi illustrato in dettaglio nel capitolo 7, focalizzandosi sulla descrizione del canale idraulico, della strumentazione impiegata e del modello pila-impalcato.

Il capitolo 8 descrive le prove effettuate, mentre il capitolo 9 è dedicato alle metodologie di elaborazione dei dati e ai risultati ottenuti dalla campagna sperimentale.

Le conclusioni chiudono il lavoro, discutendo i risultati principali ed evidenziando le criticità e i limiti dell'approccio sperimentale adottato, con un accenno ai possibili sviluppi futuri per questo filone di ricerca.

2. VULNERABILITA' E FATTORI DI RISCHIO PER I PONTI NELLE DINAMICHE FLUVIALI

2.1 Introduzione

L'analisi della sicurezza dei ponti in ambito fluviale richiede un approccio multidisciplinare che integri l'idraulica, la geomorfologia e l'ingegneria strutturale. La vulnerabilità di queste infrastrutture non dipende solo dalle caratteristiche intrinseche del manufatto, ma è strettamente legata alle complesse interazioni tra la corrente, il trasporto solido e l'evoluzione morfologica dell'alveo. La comprensione di tali dinamiche è fondamentale per identificare i fattori di rischio, prevedere i fenomeni di dissesto e pianificare interventi di manutenzione o consolidamento efficaci.



Figura 1: Crollo ponte sul fiume Nevola a seguito dell'alluvione del 15 settembre 2022.

2.2 Vulnerabilità idrodinamica (interazione con il flusso)

La vulnerabilità idrodinamica rappresenta la suscettibilità del sistema ponte-alveo a subire alterazioni indotte dalle modifiche del campo di moto della corrente in presenza delle strutture. A differenza delle azioni statiche, le sollecitazioni idrodinamiche sono caratterizzate da un'elevata complessità dovuta alla natura turbolenta del flusso e alla mutua interazione tra la fase liquida e il materiale solido del fondo. L'inserimento di pile e spalle in un alveo fluviale introduce delle singolarità idrauliche che rompono l'equilibrio del deflusso indisturbato minacciando l'integrità strutturale dell'opera.

- **Vulnerabilità da erosione localizzata (Scouring):** L'interazione idrodinamica tra la corrente e le strutture in alveo genera complessi sistemi vorticosi che accelerano l'erosione localizzata del letto fluviale attorno alle pile. Tale fenomeno espone l'opera al grave rischio di scalzamento delle fondazioni.
- **Vulnerabilità da rigurgito:** Il ponte agisce da strozzatura (effetto restringimento), innalzando il livello della corrente a monte e aumentando il rischio di esondazione per le aree adiacenti.
- **Vulnerabilità da instabilità di alveo:** Cambiamenti nella morfologia fluviale (erosione o deposizione) che modificano l'angolo di incidenza del flusso rispetto alle pile, rendendo inefficaci le protezioni originarie.

2.3 Vulnerabilità meccanica indiretta

Questa tipologia di vulnerabilità riguarda i pericoli non direttamente causati dall'acqua, ma da ciò che l'acqua trasporta durante gli eventi estremi.

- **Vulnerabilità da *Logjam* (accumulo detriti):** Il blocco di tronchi e rami tra le pile crea una superficie d'impatto solida. Questo trasforma la pila in una parete contro cui la pressione idrostatica e idrodinamica della corrente aumentano esponenzialmente.
- **Vulnerabilità da impatto di corpi solidi:** Trasporto di materiale flottante di grandi dimensioni (tronchi massicci, manufatti, veicoli trascinati) che possono urtare le pile, causando danni strutturali diretti o sollecitazioni cicliche fuori progetto.

2.4 Vulnerabilità strutturale residua (stato di conservazione)

Per vulnerabilità strutturale residua si intende la capacità intrinseca del manufatto di resistere, indipendentemente dalla sollecitazione esterna.

- **Vulnerabilità da invecchiamento materico:** Degrado del calcestruzzo (carbonatazione, attacchi solfatici) e dell'acciaio (corrosione) che riduce la sezione resistente degli elementi immersi o vicini al pelo libero.

- **Vulnerabilità da obsolescenza progettuale:** Ponti calcolati su parametri idrologici storici non più rappresentativi dell'attuale variabilità climatica, con conseguente sottostima dei carichi di piena e delle spinte.
- **Vulnerabilità da carenza manutentiva:** Mancata rimozione periodica di accumuli di sedimenti o detriti che, se non gestiti, diventano catalizzatori per i fenomeni di erosione sopra descritti.

Le ricerche effettuate hanno evidenziato che le cause principali di instabilità, tra quelle sopra descritte, risiedono nei complessi processi idraulici generati dall'interazione simultanea tra struttura, corrente e alveo durante gli eventi di piena. In tali contesti, il dissesto non ha primariamente origine da carenze strutturali intrinseche o dal semplice degrado materico, ma è determinato dall'azione combinata dell'erosione del fondo, delle spinte idrodinamiche dirette e delle sollecitazioni supplementari indotte dall'impatto o dall'accumulo di detriti flottanti.



Figura 2: Crollo ponte sul fiume Misa con distacco della pila centrale.

3. CORRENTI IN ALVEI FLUVIALI

3.1 Introduzione

Le correnti in alvei fluviali, in condizioni ordinarie, sono definibili come flussi a superficie libera, caratterizzati dal diretto contatto tra il pelo liquido e l'atmosfera. In tale configurazione, la pressione atmosferica agisce direttamente e uniformemente sulla superficie superiore del fluido.

Il moto è governato principalmente dalla componente gravitazionale che, in relazione alla pendenza del fondo, ne determina la velocità e il regime idraulico. Il comportamento del flusso risulta inoltre condizionato dalle portate e dalle condizioni al contorno, che influenzano la variazione spaziale e temporale del tirante idrico.

Da punto di vista cinematico, la velocità non è uniforme nella sezione: essa raggiunge i valori massimi in prossimità della superficie e decresce verso il fondo a causa della resistenza viscosa e dell'attrito esercitato dalla scabrezza dell'alveo.

3.2 Numero di Reynolds e regime di moto

Si definisce regime di flusso laminare quando la velocità è molto bassa e le particelle del fluido si muovono in modo ordinato mantenendosi in strati paralleli, se invece la velocità è elevata, con mescolamenti caotici delle particelle del fluido, si parla di regime di flusso turbolento (Fig 3).

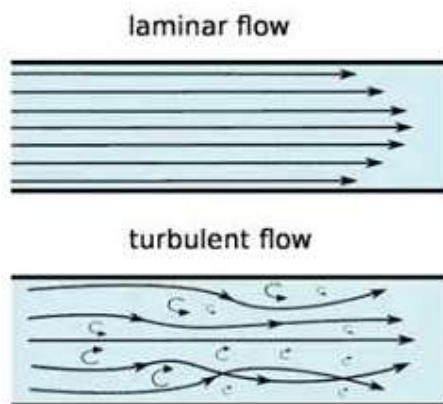


Figura 3: Rappresentazione regime laminare e turbolento.

La transizione tra un regime e l'altro dipende dal numero di Reynolds:

- $Re < 1.500-2.000$ indica un moto laminare;
- $2.000 < Re < 4.000$ rappresenta una zona di transizione tra laminare e turbolento;
- $Re > 5.000$ indica un moto turbolento;
- $Re > 100.000$ corrisponde a un moto pienamente turbolento.

La formula per la determinazione del numero di Reynolds è la seguente:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

dove:

- ρ = densità del fluido [kg/m^3]
- V = velocità media del fluido [m/s]
- D = Raggio idraulico del condotto [m]
- μ = viscosità dinamica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]
- ν = viscosità cinematica [m^2/s]

Il raggio idraulico si definisce come:

$$R_h = A/P$$

dove:

- A = area della sezione bagnata [m^2]
- P = perimetro bagnato [m]

3.3 Tipologie di moto fluido

Si possono distinguere tre diverse tipologie di moto fluido per le correnti a pelo libero:

- **Moto uniforme:** Si verifica quando la velocità media del flusso, la profondità dell'acqua e la portata rimangono costanti sia nel tempo che lungo tutto il tratto del canale considerato. Questo tipo di regime si manifesta in canali rettilinei e regolari, in cui non si presentano variazioni di sezione, direzione o pendenza, e dove il flusso non viene alterato da ostacoli esterni (traverse o pile di ponte). Il

moto uniforme rappresenta una condizione ideale, tipica di situazioni in cui non vi sono elementi di disturbo.

- **Moto permanente:** Le condizioni del flusso non variano nel tempo (stazionario). Il profilo liquido è ascendente o discendente e la velocità media varia a seconda della sezione trasversale considerata; in questo caso, la variazione del livello del pelo libero è solo spaziale.
- **Moto vario:** Si esplica quando la variazione del livello del pelo libero è sia spaziale sia temporale. Si ha un flusso gradualmente variato se le condizioni cambiano lentamente lungo il canale (es. rallentamento del flusso per un ampliamento graduale del letto); si ha un flusso bruscamente variato se ci sono cambiamenti repentini di velocità o profondità (es. nelle rapide o nelle cascate).

In generale, il moto di un fluido può essere variabile sia nello spazio che nel tempo, ed è quindi definito moto vario. Tuttavia, se si assume che le condizioni rimangano costanti nel tempo, si passa alla definizione di moto permanente. Infine, se si ipotizza anche l'invariabilità lungo il canale, si raggiunge la condizione ideale di moto uniforme.

3.4 Equazione di continuità

Il principio di conservazione della massa per fluidi incomprimibili si esprime attraverso l'equazione di continuità. In condizioni di moto permanente (stazionario) e in assenza di scambi laterali (apporti o perdite), il volume di fluido che attraversa una generica sezione nel tempo deve rimanere costante lungo l'intero alveo.

Tale legge si traduce nella relazione fondamentale dell'equazione di continuità tra due sezioni:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \text{costante}$$

Questa grandezza che si mantiene costante è la portata volumetrica, la cui definizione è:

$$Q = A \cdot v$$

dove:

- Q : portata volumetrica [m^3/s]
- A : area della sezione trasversale bagnata [m^2]
- v : velocità media della corrente nella sezione [m/s]

3.5 Formula di Manning-Strickler

Nel caso di correnti a pelo libero, la velocità media nella sezione può essere stimata tramite la formula di Manning, che tiene conto della pendenza del fondo i , del raggio idraulico $R_h = A/P$ e del coefficiente di scabrezza Gauckler-Strickler, k_s :

$$v = k_s \cdot (R_h)^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

Il coefficiente di Strickler k_s risulta inversamente proporzionale alla rugosità delle pareti: valori elevati di tale parametro indicano superfici idraulicamente lisce che, offrendo una minore resistenza al moto, determinano velocità medie più elevate a parità di pendenza e, conseguentemente, una maggiore capacità di trasporto della sezione.

L'applicazione di questa formulazione risulta fondamentale sia nei canali artificiali che negli alvei naturali a geometria complessa. In tali contesti, laddove la misura diretta della velocità risulti complessa, è possibile stimare il valore della portata basandosi sulla pendenza del canale, sulla geometria della sezione e sul coefficiente di scabrezza.

In generale, la velocità del fluido reale, invece, non è uniforme in tutta la sezione: tende ad essere maggiore al centro del canale e minore vicino alle pareti, a causa degli attriti con le superfici solide.

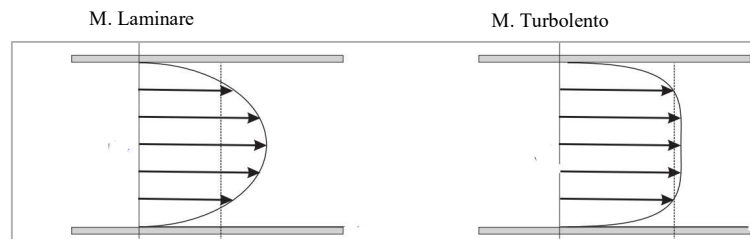


Figura 4: Distribuzione trasversale delle velocità nel canale.

3.6 Teorema di Bernoulli

Il Teorema di Bernoulli costituisce una legge fondamentale della fluidodinamica per la descrizione del comportamento di un fluido in movimento. Esso stabilisce una relazione analitica tra la pressione, la velocità e la quota di un fluido ideale (definito come incomprimibile e privo di viscosità) lungo una linea di flusso. Il teorema enuncia che, all'incrementare della velocità di un fluido, si verifichi una corrispondente diminuzione della sua pressione, e viceversa.

Tale formulazione discende direttamente dal principio di conservazione dell'energia: l'energia totale di un fluido, risultante dalla somma dei contributi cinetico, potenziale e di pressione, si mantiene costante lungo una linea di flusso. L'equazione che esprime matematicamente questo principio è la seguente:

$$p + 0.5\rho v^2 + \rho gz = cost$$

dove:

- p: pressione del fluido,
- ρ : densità,
- v: velocità del flusso,
- z: altezza geodetica rispetto ad un piano di riferimento,
- g: accelerazione di gravità.

L'energia totale è dunque definita dalla combinazione dell'energia potenziale (legata alla quota), cinetica (legata alla velocità) e di pressione. Tuttavia, nello studio specifico dei flussi a pelo libero, l'analisi si concentra prevalentemente sui contributi gravitazionali e cinematici.

È importante sottolineare che il teorema di Bernoulli è rigorosamente valido solo per i fluidi ideali. Nel caso dei fluidi reali, la presenza di viscosità e compressibilità introduce forze dissipative che possono influenzare il flusso, determinando deviazioni rispetto alle previsioni della teoria ideale.

3.7 Caratteristiche cinematiche della corrente (regime di flusso)

Il moto di una corrente fluida viene classificato in base al regime di flusso, il quale dipende dalla velocità dell'acqua in relazione alla velocità con cui si propagano le onde superficiali causate dalla gravità. Per analizzare questa relazione si utilizza un parametro adimensionale fondamentale in idraulica: il numero di Froude (Fr).

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}}$$

dove:

- v : velocità media del flusso,
- g : accelerazione di gravità,
- y : tirante idrico.

Al variare del numero di Froude si distinguono i seguenti regimi di flusso:

- **Flusso Subcritico ($Fr < 1$)**: Definito anche come corrente “lenta” ed è dominato dalla gravità. La velocità del fluido è inferiore alla velocità di propagazione delle onde superficiali. Presenta un profilo regolare e stabile, tipico di alvei a bassa pendenza e grandi profondità.
- **Flusso Critico ($Fr = 1$)**: Rappresenta lo stato di transizione in cui la velocità del fluido eguaglia quella delle onde gravitazionali. È una condizione di instabilità che si verifica solitamente in corrispondenza di singolarità geometriche, come strozzature o cambi di pendenza.
- **Flusso Supercritico ($Fr > 1$)**: Definito come corrente "veloce", è dominato dall'inerzia. La velocità del flusso supera quella delle onde superficiali, rendendo la superficie libera instabile e soggetta a increspature. È caratteristico di forti pendenze, rapide e cascate.

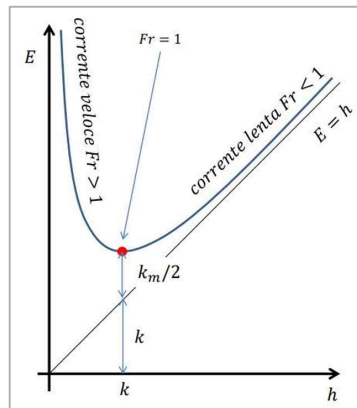


Figura 5: Energia specifica e numero di Froude per correnti veloci e lente.

La distinzione tra questi regimi riveste un'importanza cruciale nella pratica ingegneristica e nella progettazione idraulica. Il regime di moto determina, infatti, il comportamento

della corrente in presenza di ostacoli (come le pile di un ponte) o variazioni altimetriche, influenzando direttamente la sicurezza e l'efficienza delle opere idrauliche.

3.8 Pressione idrostatica e idrodinamica

La pressione in un canale a pelo libero varia principalmente con la profondità: aumenta con l'affondamento a causa dell'aumentare del peso della colonna d'acqua sovrastante. Alla superficie libera, la pressione è pressoché costante e pari alla pressione atmosferica.

La pressione esercitata da un fluido può essere distinta in due contributi fondamentali, legati rispettivamente allo stato di quiete e allo stato cinematico del fluido: la pressione idrostatica e la pressione idrodinamica.

La pressione idrostatica è determinata esclusivamente dal peso della colonna di fluido sovrastante il punto di misura. Tale configurazione si verifica nei fluidi in quiete o in regimi di moto in cui le particelle seguono traiettorie rettilinee e parallele. In conformità alla legge di Stevino, l'intensità della pressione statica cresce linearmente con la profondità ed è definita dalla relazione:

$$P_{statica} = \rho \cdot g \cdot \eta$$

dove:

- ρ : densità del fluido;
- g : accelerazione di gravità;
- η : affondamento del punto considerato rispetto alla superficie libera.

Nel caso di un fluido in movimento, alla componente statica si aggiunge la pressione idrodinamica, legata all'energia cinetica posseduta dalle particelle fluide. Il bilancio tra queste componenti è regolato dal principio di Bernoulli, il quale definisce la pressione totale come somma della quota statica e di quella dinamica:

$$P_{totale} = P_{statica} + P_{dinamica}$$

Esprimendo la componente dinamica in funzione della velocità del flusso v , si ottiene:

$$P_{dinamica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

In regime di moto:

- La pressione totale dipende dalla velocità del flusso,
- All'aumentare della velocità, la pressione dinamica cresce.

In un fluido fermo, è presente solo la componente idrostatica, mentre in un fluido in moto, entrambe le componenti interagiscono, determinando la distribuzione della pressione totale.

In sintesi, la pressione idrostatica è funzione della profondità e della densità del fluido e agisce in tutte le direzioni mentre la pressione idrodinamica è funzione della velocità e della densità, e agisce nella direzione del flusso.

Questa distinzione è fondamentale per l'analisi dei carichi sulle strutture idrauliche, poiché permette di valutare come le variazioni di velocità del flusso influenzino la sollecitazione globale agente sulle superfici di contorno.

3.9 Condizione di flusso in pressione

Durante eventi idrologici estremi, l'innalzamento dei livelli idrici può portare la superficie libera a intersecare o oltrepassare l'intradosso dell'impalcato di un ponte, determinando il passaggio da un regime di moto a pelo libero a uno di deflusso in pressione. In tale assetto, la sezione idraulica della struttura agisce in modo analogo a una luce a battente o a un condotto in pressione, delimitando il fluido nella parte superiore.

Questa variazione delle condizioni di deflusso comporta una forte dissipazione energetica, la quale si traduce in un marcato effetto di rigurgito verso monte, accrescendo conseguentemente il pericolo di esondazione. Parallelamente, il restringimento del flusso al di sotto dell'impalcato causa un repentino aumento delle velocità della corrente; tale fenomeno innesca o intensifica i processi di erosione localizzata al fondo in corrispondenza delle fondazioni.

Da ultimo, l'impatto della corrente produce significative forze idrodinamiche (lift e drag) sulla struttura, mettendo in evidenza sia la vulnerabilità strutturale associata a questa transizione idraulica, sia il ruolo fondamentale garantito dal franco idraulico.

4. IDRODINAMICA INDOTTA DALLA PRESENZA DI UN PONTE

In condizioni ideali, il flusso dell'acqua in un canale a pelo libero può essere considerato uniforme (caratterizzato da velocità costante lungo l'asse del canale) e stazionario (invariato nel tempo). Tuttavia, la presenza di ostacoli, come la pila e l'impalcato di un ponte, introduce importanti perturbazioni che modificano il campo di moto del fluido, alterando la distribuzione delle pressioni e delle velocità.

4.1 Analisi idrodinamica attorno alla struttura del ponte

Lo studio di tali fenomeni complessi rappresenta un tema di fondamentale importanza nell'ingegneria civile, risultando cruciale sia per la progettazione di nuove opere idrauliche, sia per la valutazione della sicurezza delle infrastrutture esistenti.

- **Sezione a monte del ponte:** Il flusso d'acqua, prima di incontrare il ponte, è indisturbato. La pressione dinamica e la velocità sono relativamente costanti su tutta la sezione del canale.
- **Superficie di monte del ponte:** In questo punto, l'acqua incontra l'ostacolo e viene deviata da esso, creando una zona di alta pressione (punto di ristagno). L'energia cinetica dell'acqua viene convertita in pressione che quindi va ad aumentare in questa zona. La velocità aumenta, dove le linee di flusso si concentrano per superare l'ostacolo dato che la portata rimane costante. Si forma un sovrizzo per risalita dell'acqua sul ponte mentre alla base della pila si formano vortici a ferro di cavallo.
- **Superficie di valle del ponte:** La pressione diminuisce rispetto al valore a monte, a causa della divergenza delle linee di flusso. Questa condizione comporta la formazione di vortici di scia ad asse verticale nella parte retrostante la pila. La velocità aumenta nella zona centrale della sezione, ma in misura minore rispetto alla superficie di monte.
- **Superficie laterale della pila:** L'analisi si concentra esclusivamente sulla pila poiché, in condizioni reali, ai lati dell'impalcato l'acqua è assente. In tali punti la pressione varia in funzione del profilo e dell'angolo d'attacco della corrente. Lungo la superficie laterale della pila, la pressione varia, con valori minimi nelle zone di massima velocità e massimi nelle zone di ricircolo.
- **Sezione a valle del ponte:** Il flusso si ricompone e la pressione cresce gradualmente, mentre la velocità cala.

4.2 Forza di Drag e coefficiente di Drag

La forza di Drag, assieme alla forza di Lift (descritta al paragrafo 4.3), rappresentano le forze a cui la pila e l'impalcato sono soggetti nel momento in cui sono investiti dalla corrente.

La forza di resistenza (Forza di Drag), indicata come F_D , definisce la componente della forza totale esercitata da un fluido in movimento su un corpo stazionario che agisce nella medesima direzione del flusso indisturbato. Tale azione macroscopica deriva dalla combinazione di due distinte aliquote fenomenologiche: la resistenza viscosa (o d'attrito) e la resistenza di pressione (o di forma).

- **Resistenza viscosa:** È determinata dagli sforzi di taglio tangenziali τ agenti lungo la superficie del corpo. Essa dipende strettamente dalla rugosità superficiale, dal regime di moto e dall'intensità di turbolenza della corrente indisturbata. Nel caso specifico di corpi tozzi, come la struttura di un ponte, la resistenza viscosa risulta generalmente trascurabile rispetto alla resistenza di forma.
- **Resistenza di pressione:** È originata dalla ridistribuzione delle pressioni normali alla superficie del corpo nella direzione del flusso. Questa forza è il risultato della differenza netta di pressione che si stabilisce tra il punto di ristagno (a monte) e la regione della scia turbolenta (a valle). La resistenza di pressione è fortemente condizionata dalla geometria del corpo e dalla localizzazione dei punti di separazione e di riattaccamento del flusso.

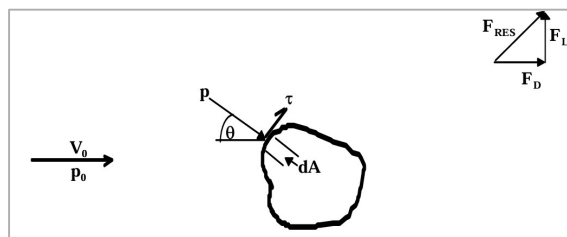


Figura 6: Sforzi in un corpo immerso.

Da un punto di vista analitico, la forza di resistenza totale F_D si ottiene integrando gli sforzi normali (pressione p) e tangenziali (taglio τ) lungo la superficie bagnata del corpo, secondo la direzione del flusso:

$$F_D = \int p \cdot \cos\theta \, dA + \int \tau \cdot \sin\theta \, dA$$

Dove θ rappresenta l'angolo compreso tra il vettore pressione e il vettore velocità, mentre dA è l'area elementare considerata.

La forza di Drag può essere espressa con la seguente equazione:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V_0^2$$

Per rendere adimensionale tale azione, si definisce il coefficiente di Drag C_D , espresso come il rapporto tra la forza di resistenza e il prodotto della pressione dinamica della corrente libera per un'opportuna area di riferimento:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot A \cdot V_0^2}$$

Dove:

- F_D : Forza di Drag [N];
- ρ : Densità del fluido [kg/m³];
- V_0 : Velocità della corrente [m/s];
- A : Area frontale investita dal flusso [m²].

Fattori che intensificano la Forza di Drag

- **Velocità più elevate** (la forza cresce con il quadrato della velocità);
- **Superfici scabre o irregolari** che aumentano l'attrito superficiale;
- **Numero di Reynolds** poichè il valore del coefficiente di drag varia ampiamente per i diversi regimi di flusso:
 - In regime laminare, quindi per bassi valori nel numero di Reynolds ($Re < 10^3$), C_d è inversamente proporzionale a Re ;

- In regime turbolento, quindi per alti valori nel numero di Reynolds ($Re > 10^5$), C_d si riduce e tende a stabilizzarsi, a causa del ritardo nella separazione del flusso;
- **Spigoli vivi o sezioni tozze** che promuovono la separazione del flusso e la formazione di vortici intensi, aumentando il coefficiente C_d .

Per corpi tozzi, quali le pile da ponte, il coefficiente di drag assume tipicamente valori compresi nell'intervallo 0.5–2.0, a seconda della geometria della sezione e del regime di moto.

4.3 Forza di Lift e coefficiente di Lift

Per un corpo stazionario immerso in un fluido in movimento, la forza di portanza (Forza di Lift), indicata come F_L , rappresenta la componente della sollecitazione idrodinamica agente in direzione normale rispetto alla direzione media del flusso indisturbato (ovvero lungo l'asse verticale). Analogamente alla forza di resistenza, la portanza è la risultante macroscopica dell'integrazione accoppiata delle forze viscosi e delle forze di pressione agenti sulla struttura.

La forza di portanza totale è definita dalla seguente equazione di integrazione superficiale:

$$F_L = \int p \cdot \sin\theta \, dA + \int \tau \cdot \cos\theta \, dA$$

La forza di Lift può essere espressa con la seguente equazione:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_L \cdot V_0^2$$

La caratterizzazione adimensionale del fenomeno avviene tramite il coefficiente di Lift C_L , il quale relaziona la forza verticale alla pressione dinamica del flusso indisturbato e alla geometria del corpo tramite la relazione:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot A \cdot V_0^2}$$

L'area di riferimento A [m²] corrisponde all'area bagnata della sovrastruttura.

Un aspetto cruciale nell'analisi della portanza riguarda le condizioni di sommersione parziale o totale del ponte. In tali scenari, la struttura è soggetta a una forza di galleggiamento idrostatica (spinta di Archimede), F_B , che agisce positivamente verso l'alto. Tale aliquota è classicamente definita in funzione del volume di fluido spostato e della densità del fluido stesso:

$$F_B = f(Vol_{dis}, \rho)$$

Al fine di consentire la corretta applicazione del coefficiente C_L in condizioni di similitudine dinamica, la forza F_L utilizzata nel calcolo deve essere composta esclusivamente da azioni di natura puramente idrodinamica (ovvero dipendenti dalla velocità del flusso). La spinta F_B , essendo una componente statica indipendente dalla velocità, non contribuisce alla portanza dinamica e deve essere opportunamente sottratta dalla forza totale misurata in fase sperimentale per isolare la sola componente dinamica della forza ed evitare che il coefficiente vari in modo fittizio al variare della velocità del fluido.

Fattori che influenzano la forza di Lift:

- **Velocità della corrente** (maggiori velocità generano pressioni dinamiche più elevate, incrementando la portanza);
- **Dimensioni e forma dell'ostacolo**, poiché grandezze maggiori e sezioni non circolari comportano una distribuzione asimmetrica delle pressioni, accentuando la componente verticale;
- **Profondità d'immersione** poiché più è immerso il ponte, maggiore è la superficie soggetta a variazione di pressione idrodinamica.

La geometria della sezione influisce indirettamente sulla forza di Lift, alterando la distribuzione delle linee di corrente e la presenza di vortici ascendenti.

5. MORFODINAMICA ATTORNO ALLA PILA DI UN PONTE

Le pile destinate a strutture idrauliche, quali i ponti, vengono frequentemente edificate all'interno di corsi d'acqua. In linea generale, l'ingegnere strutturale si focalizza sull'aspetto di tali elementi in relazione alle caratteristiche del contesto circostante; al contrario, l'ingegnere idraulico concentra la propria attenzione sulla misura in cui esse costituiscono un'ostruzione al flusso, condizionando in questo modo il campo di moto e causando la dissipazione dell'energia della corrente.

La presente trattazione teorica si focalizza sui principali meccanismi e fattori che influenzano la formazione dello scavo localizzato attorno alle pile, esulando da una rassegna esaustiva delle formulazioni analitiche per il calcolo dell'evoluzione temporale e geometrica del fenomeno.

5.1 Fenomeni locali attorno alla pila

L'interazione tra una corrente a pelo libero e una struttura cilindrica rigida inserita nell'alveo determina una complessa alterazione del campo di moto locale. Tale fenomeno si manifesta attraverso la genesi di tre principali sistemi vorticosi: i vortici a ferro di cavallo, i vortici di scia e i roller superficiali. Insieme, questi sistemi governano i processi di erosione localizzata e la dinamica del trasporto solido attorno all'ostacolo.

Il Flusso Discendente (Downflow) e il Vortice a Ferro di Cavallo

L'approssimarsi della corrente incidente alla pila comporta una decelerazione del flusso e la conseguente formazione di una pressione di ristagno sulla facciata a monte dell'ostacolo. Questo profilo di pressione devia la corrente verso il basso, generando un flusso verticale discendente definito downflow. L'impatto del downflow sul fondo innesca l'erosione iniziale del materiale d'alveo, dando origine a un solco che evolve successivamente in una vera e propria fossa di erosione localizzata.

Il vortice a ferro di cavallo, generato proprio dall'interazione tra il downflow e il fondo, si sviluppa attorno alla base della pila e si propaga verso valle, riducendo progressivamente la propria intensità. Questo vortice costituisce il fattore cinematico principale del trascinamento dei sedimenti, in quanto determina un incremento significativo dello sforzo di taglio alla base della struttura, sollevando e risucchiando il materiale solido.

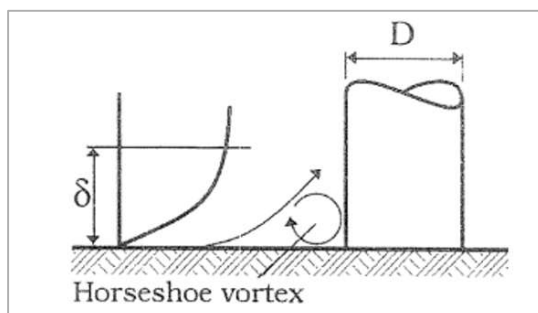


Figura 7: Vortici a ferro di cavallo a monte della pila.

Vortici di Scia

I vortici di scia si formano sul retro della pila e si estendono lungo l'intera colonna d'acqua. Essi traggono origine dalla separazione del flusso in corrispondenza dei fianchi della struttura e vengono convogliati a valle da una corrente residua di debole intensità.

La dinamica di questi vortici è fortemente influenzata dal numero di Reynolds (Re), e la loro forza decade rapidamente all'aumentare della distanza dall'ostacolo. Il loro contributo alla modellazione dell'alveo consiste nel sollevare il sedimento già rimosso e trasportarlo al di fuori della fossa di erosione; in alcune circostanze, il loro progressivo indebolimento a valle può favorire l'accumulo dei materiali, innescando processi di deposizione secondaria.

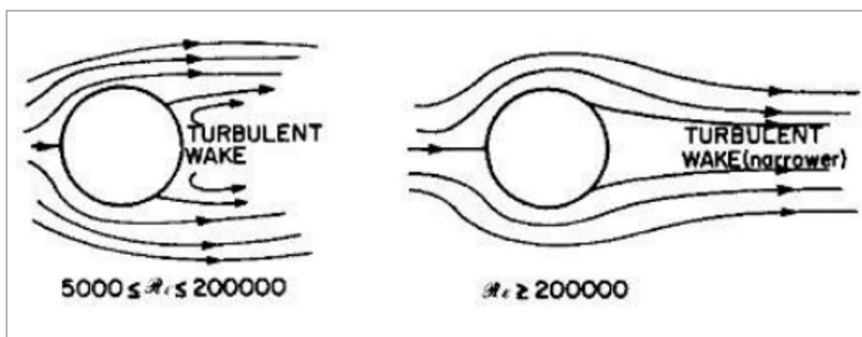


Figura 8: Rappresentazione formazione vortici di scia in base a Re .

Roller Superficiali (Surface Rollers)

In prossimità della superficie libera, la pressione di ristagno a monte induce un innalzamento locale del livello idrico (sovralzo), il quale genera piccoli vortici superficiali denominati surface rollers.

Pur caratterizzati da un'intensità minore rispetto ai sistemi vorticosi profondi, i roller partecipano alla redistribuzione locale dell'energia del flusso.

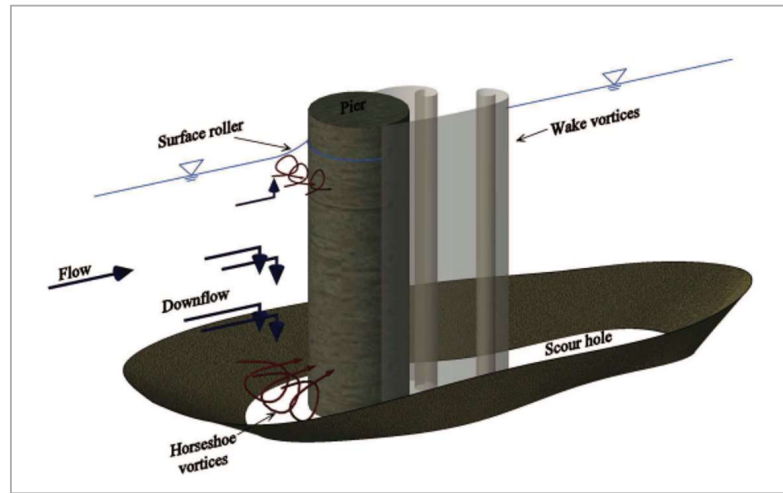


Figura 9: Schema vortici e scavo localizzato attorno alla pila.

5.2 Scavo in condizioni “Live-bed” e “Clear-water”

Il fenomeno dell'erosione localizzata in corrispondenza delle pile d'alveo è governato dal rapporto cinematico V/V_c , dove V è la velocità della corrente e V_c è la velocità critica di inizio moto del sedimento di diametro medio d_{50} . Tale soglia è ricavata dal bilancio tra la forza di trascinamento fluidodinamica e la forza peso della particella:

$$V_c = \sqrt{\frac{f}{C_D} \cdot \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \cdot 2g d_{50} \right)}$$

dove:

- f = Coefficiente di attrito sul fondo,
- C_D = Coefficiente di resistenza (drag) della particella,
- γ_s = Peso specifico del sedimento,
- γ = Peso specifico dell'acqua,
- g = Accelerazione gravitazionale,
- d_{50} = Diametro medio della particella di sedimento.

Scavo in Condizioni Clear-Water ($V/V_c < 1$)

In tale regime, la corrente indisturbata non è in grado di mobilitare il materiale d'alveo. Di conseguenza, non vi è apporto solido da monte verso la fossa d'erosione. L'azione erosiva è guidata unicamente dall'amplificazione locale degli sforzi di taglio indotta dai vortici della pila. Il processo si arresta quando si raggiunge un equilibrio statico, ossia quando le tensioni tangenziali sul fondo della fossa scendono al di sotto del valore critico del sedimento.

Scavo in Condizioni Live-Bed ($V/V_c > 1$)

Quando la velocità del flusso supera la soglia critica, l'intero fondo fluviale diventa cinematicamente attivo, generando un trasporto solido generalizzato. Si instaura così un continuo interscambio di materiale tra l'alveo e la zona di scavo. Il processo raggiunge un equilibrio dinamico nel momento in cui la portata solida entrante nella fossa d'erosione uguaglia perfettamente quella uscente.

Equilibrio ed Evoluzione Temporale dello Scavo

L'ampliamento geometrico della fossa riduce progressivamente la velocità locale del flusso e l'energia dei sistemi vorticosi, fino a stabilizzare la profondità di erosione di equilibrio. L'evoluzione temporale differisce sostanzialmente nei due regimi:

- **Live-Bed:** L'equilibrio dinamico viene raggiunto in tempi molto rapidi grazie al costante rifornimento di materiale da monte, che limita precocemente la crescita della fossa.
- **Clear-Water:** La stabilizzazione è molto più lenta e segue una tendenza asintotica. A causa della totale assenza di sedimenti in ingresso, lo scavo in condizione Clear-Water impiega più tempo per raggiungere l'equilibrio, risultando tendenzialmente più profondo di circa il 10% rispetto al regime di Live-Bed.

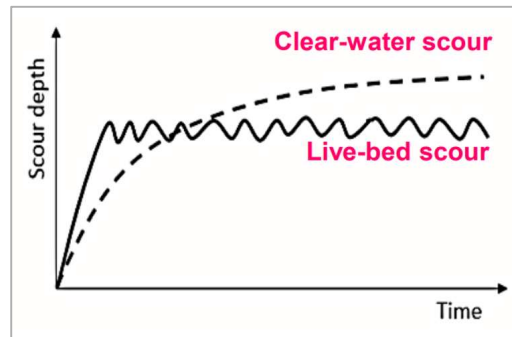


Figura 10: Schema rappresentante il tempo utile a raggiungere lo scavo di equilibrio.

5.3 Parametri idraulici e morfologici influenzanti lo scavo

La profondità dello scavo in corrispondenza delle fondazioni di una pila in alveo è determinata dall'interazione di cinque fattori principali:

- **Tirante idrico (y) e dimensione della pila (D):** Il rapporto adimensionale y/b governa l'intensità dell'erosione, per cui nelle pile profonde e strette lo scavo cresce proporzionalmente alla larghezza b risultando quasi indipendente da y , nelle pile molto larghe è regolato principalmente dal tirante y , mentre nelle geometrie intermedie entrambi i parametri influiscono simultaneamente richiedendo approcci di analisi integrati.
- **Dimensione e gradazione dei sedimenti:** La granulometria del fondo influenza la soglia di mobilità, la porosità e la permeabilità; i sedimenti grossolani (ghiaia e ciottoli) riducono lo scavo grazie al loro peso specifico e all'elevata permeabilità, al contrario dei sedimenti fini (sabbie e limi) che ne favoriscono la mobilitazione.
- **Fattore di forma e di allineamento:** La geometria della sezione e la sua inclinazione rispetto alle linee di flusso incidono sulla separazione della vena fluida. Angoli di attacco elevati su pile rettangolari generano forti turbolenze che incrementano lo scavo localizzato, mentre le pile circolari mantengono un allineamento idraulico ottimale in ogni condizione di incidenza, configurandosi come una soluzione progettuale strategica per limitare i fenomeni erosivi.
- **Geometria del canale:** I dati empirici ottenuti in laboratorio su canali rettilinei e controllati devono essere opportunamente corretti per rispecchiare l'effettiva complessità morfologica dei corsi d'acqua naturali, caratterizzati da ramificazioni,

meandri ed espansioni improvvise. Il passaggio di scala e di contesto geometrico viene generalmente gestito introducendo specifici coefficienti correttivi o mediante simulazioni numeriche di dettaglio.

- **Scala temporale e trasporto solido:** L'evoluzione temporale dello scavo dipende dal bilancio dei sedimenti in alveo. In condizioni “clear-water” lo scavo evolve molto lentamente, tendendo asintoticamente a un valore massimo stabile; in condizioni “live-bed”, il sistema raggiunge un equilibrio dinamico in tempi decisamente più rapidi, manifestando tuttavia continue oscillazioni della profondità di scavo nel tempo.

6. MODELLI IN SCALA E PRINCIPI DI SIMILITUDINE

6.1 Modelli idraulici in scala ridotta

In termini generali, un modello è una rappresentazione di un sistema fisico, che può essere utilizzato per predirne il comportamento sulla base di alcune sue caratteristiche.

I modelli in scala ridotta, tecnicamente chiamati modelli fisici, permettono di rappresentare e conseguentemente analizzare fenomeni reali, chiamati prototipi, in maniera più economica e pratica, nonostante siano necessarie specifiche strumentazioni di laboratorio.

Tale approccio si rivela preferibile qualora le leggi fenomenologiche non siano pienamente note, la definizione dei contorni del dominio risulti complessa o le ipotesi semplificative dei modelli computazionali ne compromettano l'attendibilità.

In questo contesto, i modelli fisici trovano la loro massima utilità nello studio dei fenomeni localizzati negli alvei fluviali. Nonostante l'evoluzione del calcolo numerico, la sperimentazione in scala rimane uno strumento d'indagine imprescindibile, sebbene la sua attuazione sia strettamente vincolata alla disponibilità di infrastrutture e strumentazioni di laboratorio d'avanguardia.

Affinché un modello fisico sia pienamente rappresentativo del prototipo, è indispensabile garantire il soddisfacimento di rigorosi criteri di similitudine, i quali operano come presupposti fondamentali per l'affidabilità dei risultati sperimentali.

Da un lato, quindi, si deve garantire un'accurata rappresentazione dei fenomeni maggiormente significativi, limitando quelli secondari, dall'altro si devono evitare semplificazioni eccessive mostrando una chiara, semplice e completa corrispondenza con la realtà.

6.2 Il concetto di similitudine: geometrica, cinematica e dinamica

I principi di similitudine consentono di trasferire i risultati ottenuti su un modello in scala a un sistema reale di dimensioni maggiori, distinguendo tre tipi di similitudine: geometrica, cinematica e dinamica.

- **Similitudine geometrica:** modello e prototipo si dicono geometricamente simili se tutte le lunghezze nelle tre coordinate prescelte (l_{xi}) hanno lo stesso rapporto di scala (λ_G). La similitudine geometrica implica quindi che modello (indicato dal pedice m) e prototipo (indicato dal pedice p) abbiano stessa forma, stessi angoli e direzioni.

$$l_{xi,m} = \lambda_G \cdot l_{xi,p} \text{ con } \lambda_G < 1$$

- **Similitudine cinematica:** modello e prototipo si dicono cinematicamente simili se ogni punto del modello ha un vettore velocità proporzionale (λ_C) a quello dell'omologo punto del prototipo. Poiché la velocità è una grandezza vettoriale il rapporto costante è riferito al modulo (v_{xi}) mentre direzione e verso vengono conservati. Inoltre, essendo la velocità una grandezza derivata, dipendente dalla lunghezza, la similitudine geometrica è una condizione necessaria per la similitudine cinematica.

$$v_{xi,m} = \lambda_C \cdot v_{xi,p} \text{ con } \lambda_C \geq 1$$

- **Similitudine dinamica:** modello e prototipo si dicono dinamicamente simili se tutte le forze del modello (F_m) hanno lo stesso rapporto di scala (λ_D) con le corrispondenti forze del prototipo (F_p). La similitudine cinematica è condizione necessaria per la similitudine dinamica.

$$F_m = \lambda_D \cdot F_p \text{ con } \lambda_D \geq 1$$

6.3 Similitudine completa e incompleta

Definite le varie forme di similitudine, è possibile ricavare le leggi principali che le regolano.

Ogni fenomeno fisico può essere completamente descritto attraverso un'equazione in n variabili dimensionali, costituite dalle grandezze fisiche in gioco.

Il teorema di Buckingham, o teorema π , stabilisce che individuando m grandezze fisiche fondamentali, quindi linearmente indipendenti, dalle quali ricavare le altre grandezze fisiche coinvolte, è possibile, partendo dall'equazione dimensionale, definire una

relazione che descrive compiutamente il fenomeno fisico attraverso n parametri adimensionali.

La relazione può essere espressa come:

$$\phi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n) = 0$$

dove $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ sono i parametri adimensionali, tecnicamente chiamati numeri indice o parametri π .

Considerando la relazione di uno specifico fenomeno e quella del rispettivo modello è possibile, per entrambe, scrivere i parametri adimensionali dipendenti in funzione di quelli indipendenti.

Per esempio, se π_1 è un numero indice dipendente si può scrivere, rispettivamente per il prototipo (p) e per il modello (m):

$$\pi_{1p} = f(\pi_{2p}, \pi_{3p}, \dots, \pi_{np})$$

$$\pi_{1m} = f(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \dots, \pi_{nm})$$

Poiché la funzione f è la stessa nel modello e nel prototipo, affinché il parametro adimensionale π_{1p} sia uguale al parametro adimensionale π_{1m} devono essere necessariamente uguali tutti gli altri.

Quando tutti i numeri indice del fenomeno sono uguali a tutti i rispettivi numeri indice del modello si parla di similitudine completa; il comportamento fisico del prototipo è fedelmente riprodotto dal modello, garantendo la trasferibilità diretta dei risultati sperimentali alla scala reale.

Tuttavia, nella pratica ingegneristica, quando non è possibile garantire una similitudine completa, perché non si riesce a rappresentare in maniera esatta la complessità di un fenomeno reale, si opta per una similitudine incompleta.

La similitudine incompleta assicura l'uguaglianza dei soli parametri adimensionali che caratterizzano in modo predominante il fenomeno in esame. Sebbene tale approccio comporti una parziale riduzione della precisione assoluta, i risultati ottenuti conservano la loro validità scientifica e applicativa per l'analisi dei processi idrodinamici principali.

6.4 Similitudine idraulica e numero di Froude

Nell'ambito dell'ingegneria idraulica, la complessità fenomenologica e le scale spaziali dei processi analizzati rendono l'impiego di modelli in scala ridotta una metodologia

d'indagine di fondamentale importanza. Tali strumenti risultano tuttora indispensabili per lo studio dei complessi fenomeni idrodinamici degli alvei fluviali, come l'erosione localizzata alla base dei manufatti o le reciproche interferenze tra correnti a pelo libero e infrastrutture.

Affinché un modello fisico sia un predittore affidabile del prototipo, è necessario garantirne la similitudine dinamica. Tuttavia, nella meccanica dei fluidi generalmente si lavora con modelli distorti caratterizzati da una similitudine incompleta con i rispettivi prototipi.

I parametri adimensionali che caratterizzano gli eventi idraulici sono molteplici e spesso è impossibile riprodurre un modello che li mantenga tutti costanti. Si individua, quindi, quello che maggiormente influenza lo specifico fenomeno e si sviluppa il modello sulla base di quell'unico criterio di similitudine.

Per i fenomeni idraulici oggetto di questo studio si è scelto di garantire la similitudine di Froude, particolarmente adatta a rappresentare tutti i fenomeni in cui prevalgono le forze gravitazionali: correnti a pelo libero, canali e propagazione delle onde.

Il numero di Froude prende il nome da William Froude (1810-1879), ingegnere idrodinamico e architetto navale britannico.

È definito come:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

dove V è la velocità del flusso, g è l'accelerazione gravitazionale e L è una lunghezza di riferimento.

Il numero di Froude può anche essere espresso come rapporto tra le forze d'inerzia e la forza peso, moltiplicando e dividendo la precedente equazione per ρL^3 .

Infatti:

$$Fr^2 = \frac{V^2 \rho L^3}{g \rho L^4} = \frac{\rho L^3 \left(\frac{V^2}{L} \right)}{\rho L^3 g}$$

6.5 Similitudine strutturale e numero di Cauchy

Nello studio della meccanica dei solidi deformabili, così come avviene nella meccanica dei fluidi, l'elevata complessità dei parametri adimensionali in gioco rende spesso impossibile il soddisfacimento simultaneo di tutte le condizioni di similitudine. Per

ovviare a tale limitazione, si ricorre abitualmente all'impiego di modelli distorti, ovvero sistemi caratterizzati da una similitudine incompleta rispetto al prototipo reale.

Si individua il parametro adimensionale che maggiormente influenza lo specifico fenomeno e si sviluppa il modello sulla base di quell'unico criterio di similitudine.

Per il presente studio si è scelto di soddisfare la similitudine di Cauchy per il comportamento strutturale. Infatti, tale similitudine risulta particolarmente adatta a rappresentare la risposta strutturale di corpi con comportamento elastico, sottoposti a carichi dinamici rapidi.

Il numero di Cauchy prende il nome da Augustin Louis Cauchy (1789-1857), matematico e fisico francese.

È definito come il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze elastiche di un sistema e può essere scritto come:

$$Ca = \frac{\rho V^2}{E}$$

dove ρ è la densità del materiale, V è la velocità caratteristica ed E è il modulo elastico del materiale.

La relazione sopra riportata, nei fenomeni strutturali, può essere riscritta in funzione delle caratteristiche della struttura, poiché la risposta elastica dipende sia dalla geometria della sezione trasversale, sia dalle proprietà del materiale.

Nello specifico si ha:

$$Ca = \frac{M \frac{V^2}{L}}{Ku}$$

dove M è la massa della struttura o la porzione considerata, V è la velocità caratteristica, K è la rigidezza, u è lo spostamento e L è la lunghezza di riferimento.

6.6 Determinazione dei fattori di scala

Il modello riprodotto, utilizzato per i test svolti presso il laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche, segue il criterio di similitudine di Froude e Cauchy.

Per la determinazione dei fattori di scala adoperati nel dimensionamento del modello e nella scelta dei materiali si è partiti dalla relazione che lega il numero adimensionale di Froude e quello di Cauchy:

$$Fr^2 = \frac{\text{forza d'inerzia}}{\text{forza peso}}$$

$$Ca = \frac{\text{forze d'inerzia}}{\text{forze di richiamo elastico}}$$

$$Ca = \frac{Fr^2 \cdot F_g}{F_{el}}$$

dove F_g è la forza peso e F_{el} è la forza di richiamo elastica.

Inserendo le forme esplicite delle forze:

$$Ca = \frac{V^2 M}{LK u} \quad K = \frac{3EJ}{h^3}$$

dove V è la velocità del flusso, M è la massa della struttura, u è lo spostamento e L è una lunghezza di riferimento, mentre nella formula della rigidezza K , E è il modulo di Young, J è il momento d'inerzia della sezione trasversale e h è l'altezza dalla pila.

Affinché modello e prototipo siano equivalenti occorre che:

$$Ca_p = Ca_m$$

Definita la scala geometrica del modello $\lambda_L = \lambda$, il calcolo dei parametri di similitudine procede attraverso l'imposizione delle condizioni fisiche operative. Poiché le prove sono condotte nel campo gravitazionale terrestre, il fattore di scala dell'accelerazione deve essere considerato unitario, ovvero:

$$\lambda_a = \frac{a_p}{a_m} = 1$$

Allo stesso modo, l'utilizzo dell'acqua come fluido di prova sia per il prototipo che per il modello sperimentale impone che il fattore di scala della densità sia pari a uno:

$$\lambda_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} = 1$$

Partendo da questi presupposti e applicando le leggi della similitudine meccanica, è possibile ricavare analiticamente tutti i restanti fattori di scala.

Nella tabella 1 si riportano le grandezze fisiche in gioco, le rispettive dimensioni e i fattori di scala adoperati per la definizione del modello.

GRANDEZZA	DIMENSIONE	FATTORE DI SCALA
Accelerazione (λ_a)	$\frac{L}{T^2}$	1
Densità (λ_ρ)	$\frac{M}{L^3}$	1
Lunghezza (λ_L)	L	λ
Area (λ_A)	L^2	λ^2
Massa (λ_M)	L^3	λ^3
Tempo (λ_T)	T	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Velocità (λ_v)	$\frac{L}{T}$	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Spostamento (λ_u)	L	λ
Rigidezza flessionale (λ_{Ej})	$\frac{ML^3}{T^2}$	λ^5
Portata (λ_Q)	$\frac{L^3}{T}$	$\lambda^{\frac{5}{2}}$
Pressione (λ_p)	$\frac{M}{LT^2}$	λ
Deformazione (λ_ϵ)	-	1
Sollecitazione (λ_σ)	$\frac{M}{LT^2}$	λ
Curvatura (λ_K)	$\frac{1}{L}$	λ^{-1}
Momento flettente ($\lambda_{Momento}$)	$\frac{ML^2}{T^2}$	λ^4
Modulo elastico (λ_E)	$\frac{M}{LT^2}$	λ

Tabella 1: Fattori di scala.

La scala geometrica λ_L , con la quale poi sono stati calcolati tutti gli altri fattori di scala, è stata fissata in modo da ridurre gli effetti derivanti dalla scala di laboratorio.

Al fine di garantire che lo sviluppo del fenomeno erosivo non risentisse degli effetti di disturbo indotti dalle pareti laterali del canale, la progettazione sperimentale ha tenuto

conto dei limiti geometrici definiti in letteratura. Nello specifico, è stato rispettato il valore limite relativo al rapporto tra l'ingombro trasversale della pila e la larghezza della sezione idrica, come individuato negli studi di Chiew e Melville (1987).

Pertanto, è stato rispettato il seguente criterio:

$$\frac{D}{B} < 0,1$$

dove D è il diametro della pila e B è la larghezza del canale.

Il rispetto di tale valore limite assicura che le linee di corrente deviate dall'ostacolo non interagiscano con i confini laterali del dominio, permettendo così di assimilare il comportamento del flusso a quello di un alveo di larghezza indefinita e di isolare correttamente il meccanismo erosivo locale.

Oltre ai vincoli geometrici del canale, è stato necessario considerare l'influenza della granulometria del fondo mobile sul processo di scavo. Per evitare che la dimensione dei grani interferisse con lo sviluppo dell'erosione locale, è stato rispettato il valore limite del rapporto tra il diametro della pila e il diametro medio del sedimento, come individuato da Ettema (1980):

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

dove D è il diametro della pila e d_{50} è il diametro medio del sedimento.

Sulla base delle caratteristiche geometriche del canale fluviale, si è fissato un opportuno fattore di scala della lunghezza $\lambda=35$ e si è adoperato un sedimento avente diametro medio 0.70 mm (d_{50}).

Nella tabella 2 si riportano i valori dei fattori di scala relativi alle diverse grandezze.

GRANDEZZA	FATTORE DI SCALA
Accelerazione (λ_a)	1
Densità (λ_p)	1
Lunghezza (λ_L)	35
Area (λ_A)	1225
Massa (λ_M)	42875
Tempo (λ_T)	5,9161
Velocità (λ_v)	5,9161
Spostamento (λ_u)	35
Rigidezza flessionale (λ_{Ej})	52521875
Portata (λ_Q)	7247,20
Pressione (λ_p)	35
Deformazione (λ_ϵ)	1
Sollecitazione (λ_σ)	35
Curvatura (λ_X)	0,029
Momento flettente ($\lambda_{Momento}$)	1500625
Modulo elastico (λ_E)	35

Tabella 2: Valori fattori di scala.

7. STRUMENTAZIONE E CONFIGURAZIONE DELLE PROVE

7.1 Introduzione

Nel presente capitolo viene illustrato nel dettaglio l'apparato sperimentale impiegato, con particolare riferimento al canale idraulico, al modello fisico del ponte e alla strumentazione di misura adottata.

Nello specifico, si analizzano le proprietà geometriche e funzionali del canale, le caratteristiche dei materiali costitutivi del modello e le specifiche tecniche dei sensori.

La precisione e la riproducibilità delle misure sono intrinsecamente legate alla corretta taratura dei dispositivi; pertanto, una caratterizzazione approfondita degli stessi si rende necessaria per definire con accuratezza il dominio di validità e le potenzialità dell'indagine svolta.

7.2 Canale idraulico

Le sperimentazioni sono state condotte nel Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona).



Figura 11: Canale fluviale presso il laboratorio di Idraulica e Costruzioni Marittime.

Il canale utilizzato ha una lunghezza complessiva di 15 m, una larghezza di 0,60 m e un'altezza di 0,60 m.

Il canale è rialzato e sorretto da due supporti: il primo, più a monte, è realizzato tramite una cerniera fissa, il secondo invece poggia su due martinetti idraulici. Tale sistema di appoggio permette di variare l'inclinazione del canale tra 0% e 5%. Il sistema di

sollevamento a pistone è motorizzato e l'inclinazione può essere controllata attraverso una scala millimetrica posizionata in prossimità dei martinetti.

Le pareti laterali sono costituite da vetri trasparenti, fissati alla struttura metallica attraverso dei montanti, e nel telaio superiore del canale è posizionato un binario dove scorrono due carrelli utilizzati per la movimentazione ed il posizionamento della strumentazione necessaria.

Il canale è dotato di un serbatoio di testata, di una vasca di raccolta a valle e di una vasca posizionata al di sotto del canale. Nella vasca di accumulo al di sotto del canale, sono presenti due pompe sommerse, che possono lavorare separatamente o insieme ed un galleggiante che fa spegnere le pompe nel caso in cui il livello d'acqua presente sia troppo basso.

Ogni pompa ha una portata massima di 50 l/s che può essere regolata manualmente attraverso l'apposito quadro di controllo.

Le pompe azionate mandano l'acqua nel serbatoio posizionato in testa al canale. Da questo l'acqua defluisce nel canale e arriva nella sezione d'uscita.



Figure 12-13: Serbatoio di accumulo e pompe-Sistema di controllo per azionamento pompe.

La sezione di uscita è provvista di una paratoia regolabile, che permette di controllare il livello d'acqua interno al canale.

Dalla sezione d'uscita, dopo che i sedimenti sono stati separati per gravità con una piastra forata, l'acqua viene convogliata nella vasca di valle e, da essa, attraverso una condotta torna nella vasca sotto il canale.



Figura 14: Paratoia di valle del canale idraulico.

7.3 Strumenti di misura

La strumentazione impiegata ha consentito di monitorare sia la dinamica della corrente idraulica che la risposta strutturale del modello.

Nelle descrizioni successive si riportano le specifiche tecniche e le capacità prestazionali dei vari sensori impiegati.

Per misurare la portata in ingresso al canale è stato adoperato il misuratore di portata elettromagnetico Proline Promag W 400.



Figura 15: Misuratore di portata Proline Promag W 400.

Lo strumento fornisce il valore della portata in l/s ed ha un range di acquisizione che va da 0 a 150 l/s. Il funzionamento del sensore è basato sulla legge di induzione magnetica di Faraday, secondo la quale in un conduttore che si muove in un campo magnetico viene indotta una tensione. In pratica il misuratore genera al suo interno un campo magnetico.

Quando il fluido, che costituisce il conduttore in movimento, attraversa il sensore, all'interno del campo magnetico si genera una tensione elettrica proporzionale alla velocità del fluido.

Per misurare il livello d'acqua nel canale sono stati adoperati i sensori di livello ad ultrasuoni Baumer UR18.DA0.2-UAMJ.9SF.



Figura 16: Sensori di livello Baumer UR18.DA0.2-UAMJ.9SF.

Gli strumenti leggono i valori della distanza in mm ed hanno un range di acquisizione che va da 20 a 1000 mm.

Il funzionamento è basato sul calcolo del tempo di volo.

In pratica i sensori emettono delle onde sonore ad alta frequenza che si propagano nell'ambiente fino ad incontrare un'oggetto, in questo caso l'acqua. Lo stesso oggetto riflette le onde e le rimanda ai sensori che, misurando il tempo impiegato dall'impulso per andare e tornare, calcolano la distanza tra loro stessi e l'oggetto.

Per misurare la pressione esercitata dall'acqua sulla struttura sono stati utilizzati i sensori Keller 23SY e i sensori Kulite XTL-190 M (miniaturizzati).



Figure 17-18: Sensori di pressione Kulite XTL-190 M – Sensore di pressione Keller 23SY.

I Keller 23SY hanno un range di acquisizione compreso tra 0 e 200 mbar, i Kulite XTL-190 M lavorano nell'intervallo 0-1 bar.

Entrambi i sensori funzionano sulla base del principio della piezoresistività: al loro interno hanno un elemento piezoelettrico che, quando viene sottoposto a pressione, genera una carica elettrica proporzionale alla variazione di pressione.

Questa carica viene poi convertita in tensione tramite l'elettronica integrata nei trasduttori.

Per misurare la velocità dell'acqua nel canale è stato adoperato l'ADV, Acoustic Doppler Velocimeter, prodotto dalla Nortek.



Figura 19: Misuratore di velocità ADV e relativo sistema di coordinate.

Lo strumento rileva il valore delle tre componenti (x, y, z) della velocità in m/s ed ha un range di acquisizione che va da -1 a 1 m/s.

Essendo caratterizzato da 4 ricevitori, tutti focalizzati sullo stesso volume di campionamento, misura due velocità lungo z, una verso l'alto (z1) ed una verso il basso (z2). Il principio di funzionamento dello strumento è basato sull'effetto Doppler. Il Vectrino emette impulsi ultrasonori che colpiscono le particelle sospese nell'acqua e

tornano allo strumento. Lo stesso misura la frequenza con cui gli impulsi vengono riflessi, perché alterata dal movimento dalle particelle.

Per misurare gli spostamenti dell'impalcato durante le prove ed eseguire il rilievo del fondo sabbioso al termine delle stesse, è stato adoperato il sensore smart laser sensors for industry & automation optoNCDT 1420.



Figura 20: Sensore laser optoNCDT.

Lo strumento rileva la distanza in mm ed ha un range che va da 10 a 500 mm.

Il funzionamento del sensore è basato sulla triangolazione laser.

In pratica lo strumento emette un sottile raggio laser su una superficie bersaglio. Il raggio colpisce la superficie e torna nel laser. Qui viene focalizzato su un elemento di rilevamento. La distanza viene misurata in relazione alla posizione che assume il laser riflesso sull'elemento di rilevamento.

Per la misura delle forze che gravano sull'impalcato e sulla pila si è utilizzata la cella di carico biassiale Deltatech P500.BIAX-S/400N. La cella di carico lavora a taglio e consente la misura di due forze ortogonali.

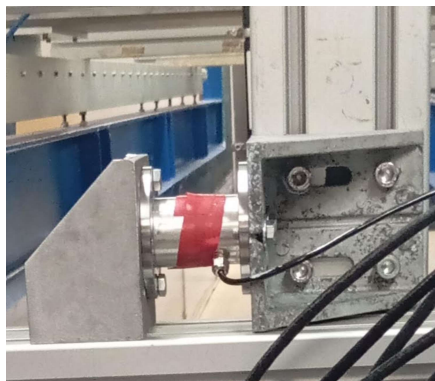


Figura 21: Cella di carico Deltatech P500.BIAX-S/400N.

Tale dispositivo funziona da trasduttore, ovvero uno strumento che converte una grandezza fisica (in questo caso, una forza) in un segnale elettrico misurabile. In pratica, il sensore misura la forza applicata su di esso, deformandosi leggermente sotto carico. Questa deformazione provoca una variazione di resistenza elettrica degli estensimetri integrati nella cella, generando un segnale elettrico proporzionale alla forza applicata. Tale segnale viene acquisito ed elaborato da un trasmettitore di peso TLB4 per ottenere un valore numerico corrispondente alla forza applicata. Il trasmettitore di peso converte il segnale analogico (continuo) proveniente dalla cella in segnale digitale (discreto).



Figura 22: Centralina TBL4 della cella di carico.

Per confrontare i valori di forza misurati dalla cella di carico con valori di forza noti applicati al modello fisico del ponte, è stato impiegato un dinamometro DINI 107. Lo strumento ha permesso di applicare al sistema una forza nota e di stimare indirettamente, nel caso di pila immersa nel terreno, la reazione del terreno come differenza tra la forza applicata e la forza misurata dalla cella di carico.



Figura 23: Dinamometro DINI 107.

Il dinamometro DINI 107 è uno strumento dotato di una cella di carico in acciaio, progettato per operare sia in trazione che in compressione.

Tale unità presenta una portata massima di 50 kg, con una precisione dello 0.1% sul valore di fondo scala (s.v.f.s.), garantendo così un'elevata sensibilità anche per variazioni di carico minime.

Il dispositivo è provvisto di un display a 4 cifre LED (altezza 14 mm) che permette la lettura immediata del dato e di un sistema integrato di acquisizione e memorizzazione dei dati su chiavetta USB.

7.4 Sistema di acquisizione dati

La strumentazione descritta in precedenza è collegata alle schede di acquisizione dati tramite cavi a basso rumore, inserite poi nella cRIO-9045 o nella cDAQ-9185.

Entrambe sono prodotte dalla National Instruments, la cDAQ-9184 è un chassis a 4 slot, la cRIO-9045 è un controller ad 8 slot, 1.30 GHz Dual-Core CPU, 2 GB DRAM, 4 GB Storage, -20 °C to 55 °C, Kintex-7 70TFPGA.

Sia la cRIO-9045 che la cDAQ-9185 sono state a loro volta collegate ad un computer provvisto di LabVIEW, software utilizzato per l'acquisizione dei dati.

7.5 Modello della pila e dell'impalcato

Il modello realizzato riproduce un ponte multi-campata con luce di 40 m.

L'impalcato prototipo, realizzato in calcestruzzo armato precompresso, è di tipo a cassone, ha una larghezza di 12 m, un'altezza di 2 m ed ha una massa complessiva pari a 900 t.

La pila prototipo, realizzata in calcestruzzo armato con getto in opera, ha una sezione circolare cava con diametro esterno pari 2,21 m e diametro interno pari a 1,76 m e un'altezza di 7 m. La pila ha un modulo elastico di 30 GPa e una densità di 2,50 t/m³.

La pila poggia su una fondazione a pozzo del diametro di 2,21 m, costituita da una corona circolare di pali, che si estende per una profondità complessiva di 8 m all'interno del deposito deformabile superficiale e per altri 3 diametri all'interno del bedrock sottostante. Tale configurazione è stata progettata per garantire i necessari requisiti di stabilità e portanza strutturale.

Il modello della pila ha diametro esterno pari a 63 mm, diametro interno pari a 50,2 mm e altezza pari a 427,5 mm.

Esso è stato realizzato con tubo in polietilene PN 16 ad alta densità (HDPE), materiale caratterizzato da un modulo elastico di 1000MPa e da una densità di 970 kg/m³.

Lungo il fusto della porzione di pila immersa nel terreno è presente una scala graduata che permette la stima ad occhio della profondità di scavo.

Il modello dell'impalcato, realizzato in pvc, ha un'altezza pari a 120 mm e dimensioni in pianta 560x290 mm. La massa complessiva dell'impalcato è pari a 21 kg per rispettare il rapporto di scalatura delle masse.

Un lato della cella di carico è collegato all'estradosso dell'impalcato mediante un telaio rigido che assicura un vincolo di incastro; l'altro lato della cella di carico è vincolato alla struttura del canale attraverso un sistema di travette di supporto.

L'estremità inferiore della pila risulta svincolata dal fondo del canale. Tale configurazione non è da considerarsi completamente isostatica, in quanto il terreno che ricopre la pila costituisce un grado di vincolo, la cui rigidezza dipende dalle proprietà meccaniche del terreno.

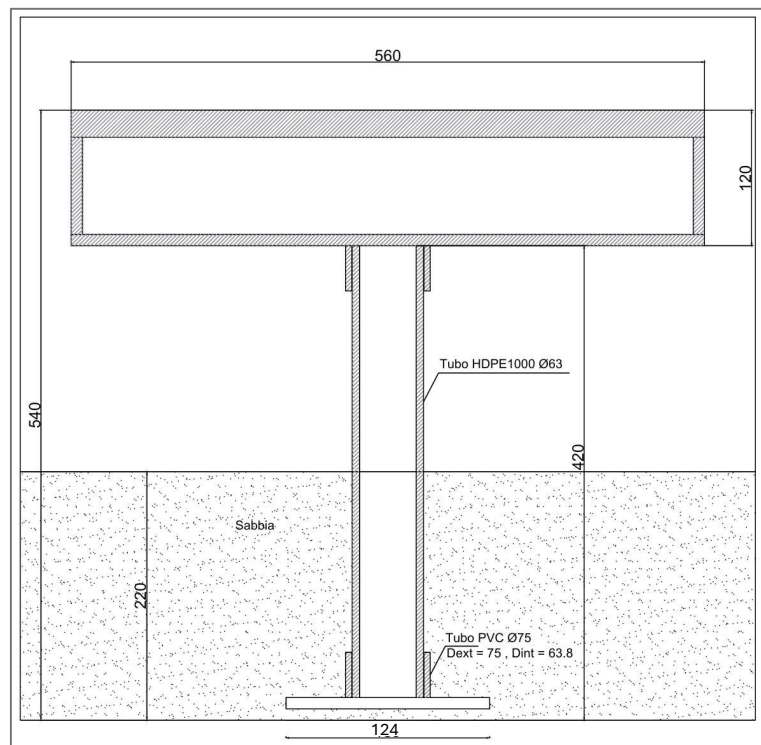


Figura 24: Rappresentazione grafica del modello pila e impalcato.



Figura 25: Modello appena completato.

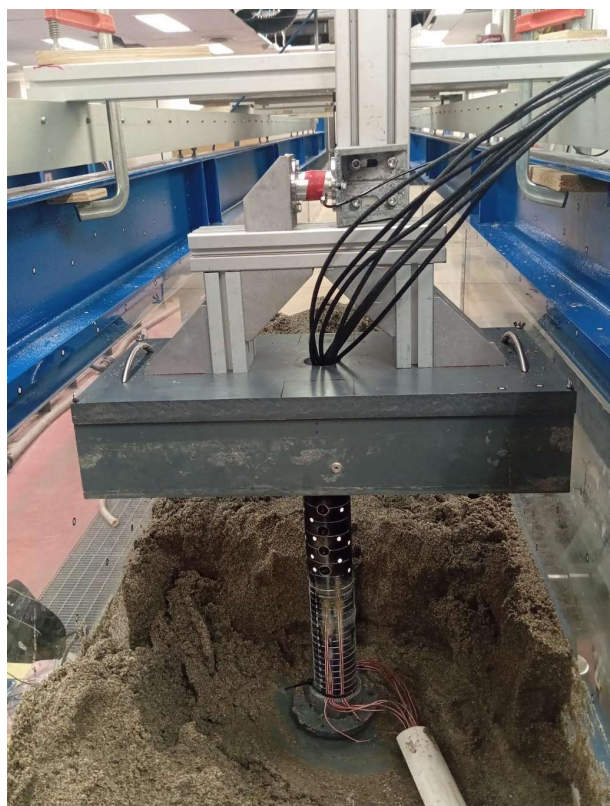


Figura 26: Installazione modello all'interno del canale idraulico.

7.6 Configurazione delle prove

Sul fondo del canale idraulico, ad eccezione della parte centrale dove si è realizzato un fondo mobile, sono state collocate dodici pedane di altezza 0,22 m, appesantite alla base con barre di armatura per evitare il loro galleggiamento. Nella parte centrale del canale, dove è stata posizionata la pila, è stato realizzato un fondo mobile di lunghezza 3 m e spessore 220 mm.

Al fine di selezionare il materiale più idoneo per la realizzazione del fondo mobile, sono state condotte diverse analisi granulometriche, tramite setacciatura meccanica, su differenti campioni di sabbia non lavata. Sulla base dei dati ottenuti dalle diverse prove, sono state elaborate le rispettive curve granulometriche, messe a confronto nel diagramma semilogaritmico di Figura 27 (che riporta in ascissa il diametro dei granuli in millimetri in scala logaritmica e in ordinata la percentuale di passante cumulativo in scala lineare). Tra i materiali analizzati, la scelta finale per le prove sperimentali è ricaduta sulla sabbia denominata "Esincalce grande 2024". Questa si caratterizza per essere una sabbia uniforme con peso specifico dei granuli $\rho_s = 2,63 \text{ g/cm}^3$, diametro $d_{90} = 1,2 \text{ mm}$ e diametro

medio $d_{50} = 0,701$ mm (quest'ultimo definito come la dimensione della particella al di sotto della quale ricade il 50% in peso del campione).

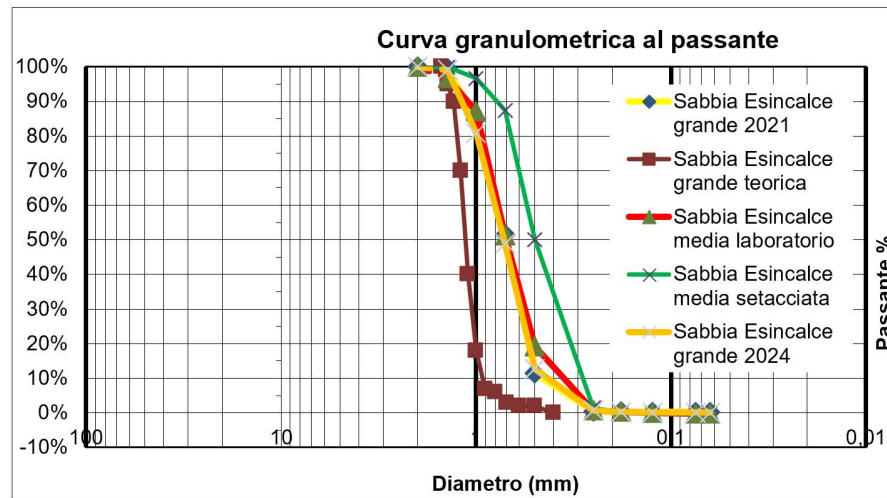




Figura 29: Fondo mobile.

A monte del modello sono stati posizionati tre sensori di livello (in ordine progressivo partendo da monte: SL1-SL0-SL2) ed il Vectrino, mentre, a valle sono stati collocati due sensori di livello (in ordine progressivo SL3-SL4) ed il laser, quest'ultimo puntato verso l'impalcato.

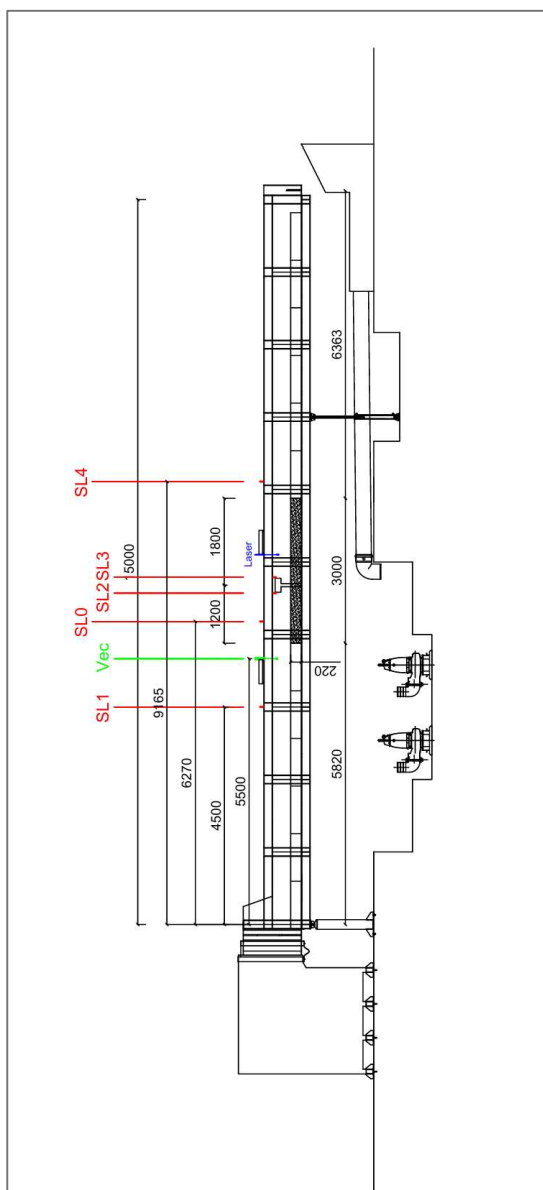


Figura 30: Vista laterale del canale con posizione dei vari strumenti.

La pila è stata equipaggiata con quattro sensori di pressione Kulite miniaturizzati. I quattro sensori sono stati disposti lungo la verticale centrale della pila, con angolo di attacco pari a 0° rispetto alla direzione del flusso, ad una distanza reciproca di 30 mm.

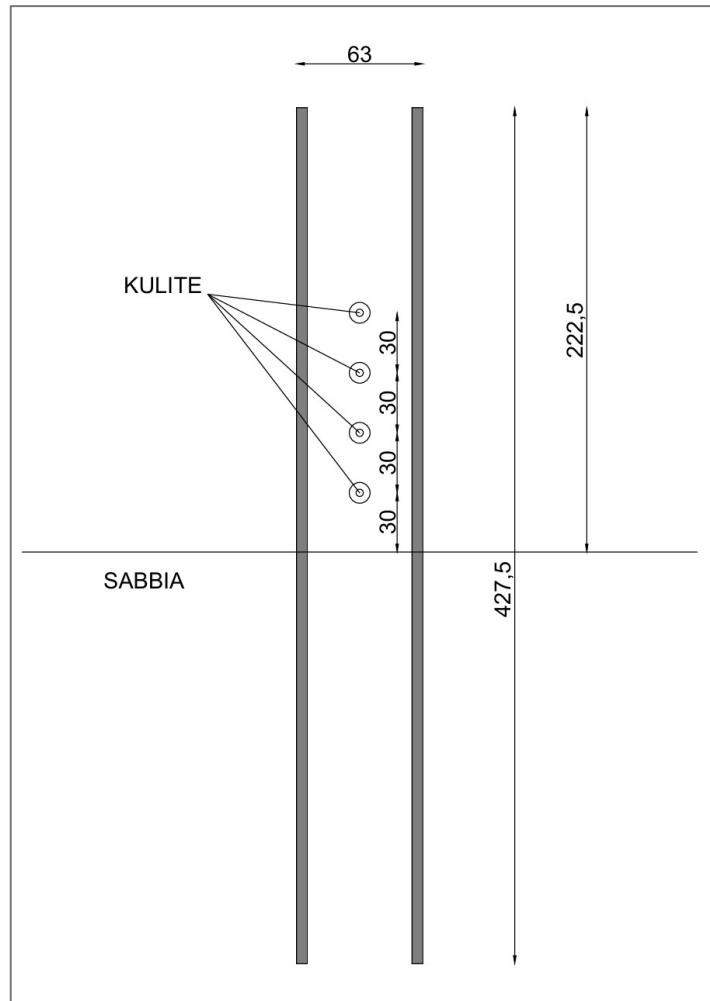


Figura 31: Disegno modello pila con posizionamento sensori.

L'impalcato è stato strumentato con otto sensori di pressione, in particolare quattro di essi sono stati posizionati sulla facciata di monte, uno sulla facciata di valle e tre sulla superficie inferiore.

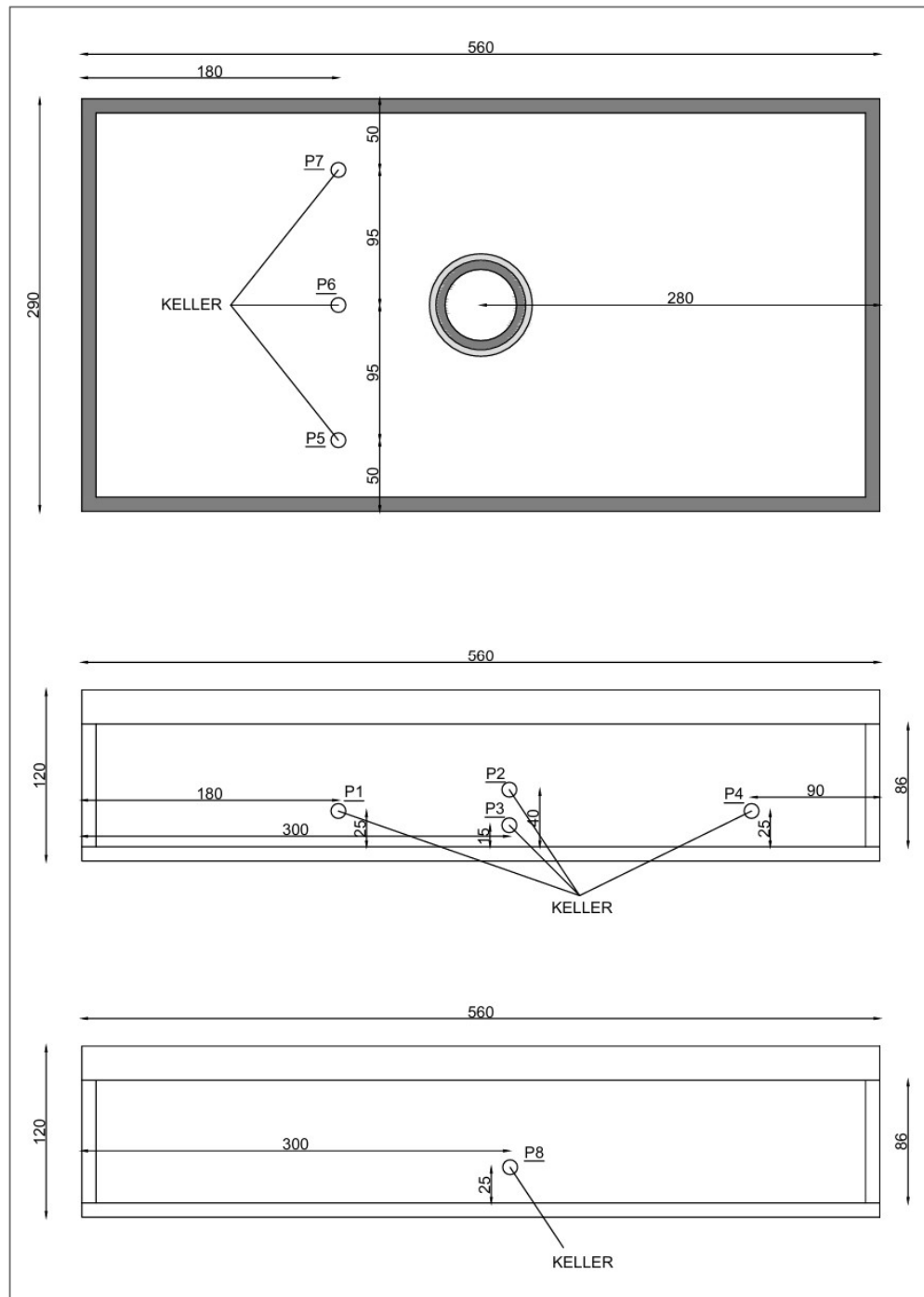


Figura 32: Disegni impalcato e posizionamento dei sensori di pressione (vista in pianta, prospetto frontale e retro).

L'impalcato è stato vincolato in testa tramite l'ausilio di travette, viti e bulloni, in modo da realizzare un vincolo di incastro. Al contrario, la base della struttura risulta svincolata dal fondo; tuttavia, l'interazione con il terreno fornisce comunque dei gradi di vincolo parziali, motivo per cui la struttura così descritta costituisce un sistema staticamente indeterminato (iperstatico).

Alla sommità dell'impalcato è stata installata la cella di carico Deltatech P500.BIAX-S/400N per misurare la forza totale esercitata dal flusso.

Il trasduttore di forza è orientato in modo tale che la direzione "x" sia parallela allo sviluppo longitudinale del canale positiva verso valle, mentre la direzione "y" risulta essere ortogonale al fondo del canale positiva verso l'alto.

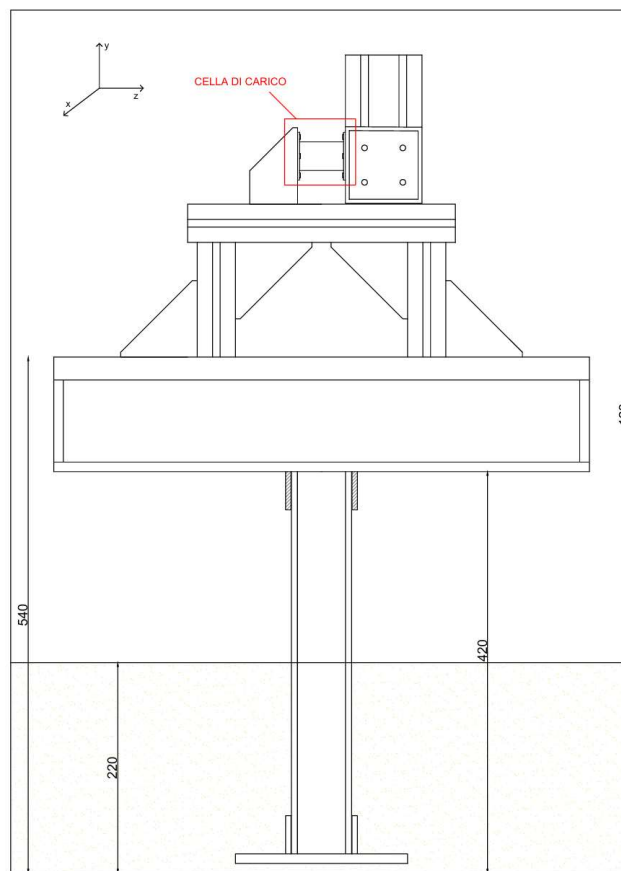


Figura 33: Disegno del modello collegato alla cella di carico.

8. CAMPAGNA SPERIMENTALE

8.1 Procedura sperimentale

La campagna sperimentale è stata condotta con l'obiettivo di analizzare le forze idrodinamiche agenti sulla struttura di un ponte. A tal fine, è stata valutata in primo luogo la condizione di ponte non in pressione, ossia caratterizzata da un tirante idrico inferiore all'intradosso dell'impalcato; in secondo luogo, è stata analizzata la configurazione in cui il livello dell'acqua supera tale quota (ponte in pressione), interessando la sezione dell'impalcato senza tuttavia sormontarlo.

Nello specifico, lo studio ha esaminato le pressioni e le forze esercitate dalla corrente sull'impalcato e sulla pila del ponte, mettendo in luce le differenze di intensità delle forzanti tra lo scenario con assenza di erosione attorno alla pila (simulazione del fondo fisso) e quello con libera evoluzione dello scavo.

Tutte le acquisizioni sono state eseguite in condizioni di pendenza nulla del fondo.

Alcuni test preliminari sono stati condotti con l'obiettivo di verificare il corretto funzionamento della strumentazione e di valutare l'affidabilità dei segnali acquisiti.

Successivamente, si è passati alla caratterizzazione del terreno. Sono state quindi effettuate indagini di portanza tramite penetrometro tascabile e prove di carico su piastra. Sono state inoltre eseguite alcune prove mediante l'ausilio del dinamometro, per valutare, sotto l'applicazione di una forzante nota, la reazione del terreno come differenza tra la forza applicata e la forza letta dalla cella di carico.

Concluse le fasi di valutazione dell'influenza del terreno, si è proceduto all'esecuzione delle prove definitive.

Lo schema sperimentale seguito nel caso di ponte non in pressione è analogo a quello adottato per la configurazione in pressione. Inizialmente sono state effettuate le simulazioni su fondo fisso, le quali hanno avuto una durata di due minuti; successivamente, sono stati eseguiti i test con scavo libero in prossimità della pila. Questi ultimi avevano una durata di dieci minuti, al fine di consentire la formazione e l'evoluzione dello scavo.

Infine, sono state eseguite delle prove sollevando il modello del ponte rispetto al terreno, così da poter misurare direttamente dalla cella di carico la forza di drag agente sulla pila

del ponte, eliminando completamente la reazione dovuta al vincolo del terreno. Tali prove sono state eseguite solamente per il caso di ponte non in pressione, a causa dei limiti dimensionali del canale idraulico, che non consentivano di raggiungere il tirante idrico necessario per le prove in pressione.

Sono state eseguite prove variando la portata nel canale con incrementi di 5 l/s. Ogni serie di prove è stata preceduta da prove ad acqua ferma, per calibrare i sensori di pressione.

8.2 Acquisizione e conversione dei dati

I dati sono stati acquisiti in tempo reale e in modalità simultanea tramite il software LabVIEW, che consente anche la visualizzazione dei segnali durante la fase di registrazione. Durante l'acquisizione, i segnali possono essere monitorati mediante grafici personalizzabili che riportano in ordinata la grandezza fisica considerata e in ascissa il tempo.

I file generati sono stati archiviati in modo sistematico in cartelle dedicate, denominate in funzione della tipologia di prova e delle sue specifiche caratteristiche, al fine di poter essere successivamente elaborati attraverso codici di calcolo sviluppati in ambiente MATLAB.

Per quanto riguarda le prove idrodinamiche in condizione di ponte non in pressione, l'assetto di valle è identificato dalle lettere "a" e "b". Nello specifico, la lettera "a" indica un'altezza della paratoia pari a 0,295 m (determinando una condizione di live-bed), mentre la lettera "b" corrisponde a un'altezza di 0,32 m (condizione di clear-water).

Analogamente, per i test in regime di ponte in pressione, si adotta la nomenclatura "c" e "d". In questo caso, la lettera "c" individua un'altezza della paratoia di 0,358 m (condizione di live-bed), mentre la lettera "d" indica un'altezza di 0,38 m (condizione di clear-water). Inoltre, le prove sono state raggruppate e identificate in base alla data del loro svolgimento.

I dati acquisiti sono stati rielaborati mediante MATLAB, software di calcolo numerico e di programmazione sviluppato da MathWorks. I segnali dei diversi sensori sono stati innanzitutto rappresentati graficamente, filtrati e ricampionati per ridurre la frequenza di campionamento dei segnali. Per prevenire eventuali fenomeni di aliasing, prima del ricampionamento è stato applicato un filtro passa-basso; quest'ultimo agisce attenuando

gli spike dovuti al rumore ad alta frequenza, senza alterare le componenti di interesse del segnale.

Successivamente si è proceduto con l'analisi e la rielaborazione dei segnali, tramite l'utilizzo congiunto di MATLAB e fogli di calcolo Excel. Nel capitolo 9 viene spiegata in dettaglio la fase di elaborazione dei dati, illustrando le procedure e le considerazioni effettuate.

9. ELABORAZIONE DATI E RISULTATI

9.1 Grandezze fisiche analizzate

Al fine di agevolare la lettura e la rapida interpretazione dei dati, si riportano di seguito gli acronimi utilizzati per identificare i diversi parametri studiati:

- Fdcorr_22cm: Forza di Drag corretta, misurata durante le prove in cui il modello è stato sollevato di 22 cm dal fondo del canale.
- Fdteo_22cm: Forza di Drag teorica, calcolata per il caso di pila sollevata di 22cm.
- Fdcorr_12cm(_16cm): Forza di Drag corretta, calcolata nelle prove con pila completamente libera e sollevata di 12 cm e di 16 cm rispetto alla configurazione iniziale con pila immersa nel terreno;
- Fdteo_12cm(_16cm): Forza di Drag teorica, calcolata per il caso di pila sollevata di 12 cm e di 16 cm rispetto alla configurazione iniziale;
- Fd_corr_ns: Forza di Drag calcolata tramite cella di carico in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte non in pressione;
- Fd_corr_cs: Forza di Drag calcolata tramite cella di carico in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte non in pressione;
- Fd_teo_ns: Forza di Drag teorica in condizione di scavo nullo, nelle prove di ponte non in pressione;
- Fd_teo_cs: Forza di Drag teorica in condizione di scavo formato, nelle prove di ponte non in pressione;
- Fx_fp: Forza di Drag misurata in condizioni di pila sollevata al di sopra del fondo in sabbia, utilizzata per il confronto con le prove in presenza di terreno;
- Fd_cella_ns: Forza di Drag calcolata dalla cella di carico in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte in pressione;
- Fd_cella_cs: Forza di Drag calcolata dalla cella di carico in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte in pressione;
- Fd_press_ns: Forza di Drag calcolata dai sensori di pressione in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte in pressione;
- Fd_press_cs: Forza di Drag calcolata dai sensori di pressione in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte in pressione;
- Cd_cella_ns: Coefficiente di Drag calcolato da cella di carico in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte in pressione;

- Cd_cella_cs: Coefficiente di Drag calcolato da cella di carico in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte in pressione;
- FL_cella_ns: Forza di Lift calcolata dalla cella di carico in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte in pressione;
- FL_cella_cs: Forza di Lift calcolata dalla cella di carico in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte in pressione;
- FL_press_ns: Forza di Lift calcolata dai sensori di pressione in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte in pressione;
- FL_press_cs: Forza di Lift calcolata dai sensori di pressione in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte in pressione;
- CL_press_ns: coefficiente di Lift calcolato dai sensori di pressione in condizioni di scavo nullo, nelle prove di ponte in pressione;
- CL_press_cs: coefficiente di Lift calcolato dai sensori di pressione in condizioni di scavo sviluppato, nelle prove di ponte in pressione.

9.2 Analisi prove del 02.04.2026

L'analisi è stata condotta il 2 aprile presso il Laboratorio di Idraulica, operando in condizioni di flusso a pelo libero (ponte non in pressione) con paratoia a valle avente altezza di 0,32 m e in regime clear-water.

Dal punto di vista metodologico, per le prove indicate con la sigla "fp", la pila è stata sollevata di 22 cm rispetto al fondo del canale, distanziandola così completamente dallo spessore dello strato di sedimento. Tale configurazione è stata adottata per eliminare ogni possibile interazione tra la pila e il fondo mobile: in queste condizioni, la forza di Drag agente sulla struttura non risulta influenzata dal contributo della reazione del terreno o da effetti di erosione localizzata, permettendo di isolare puramente l'azione idrodinamica.



Figura 34: Pila svincolata dal terreno.

Sono state misurate le grandezze riportate in Tabella 3, dove:

- Le diciture “y0” e “y1” indicano rispettivamente prova in assenza di acqua (y0) e prova ad acqua ferma con livello y1;
- Q è la portata;
- L0, L1, L2, L3 e L4 indicano i livelli del tirante nelle diverse sezioni;
- V_{xm} è la componente di velocità longitudinale al canale, misurata a monte del ponte (in condizioni indisturbate);
- F_x è la forza misurata in direzione x.

prova	Q(l/s)	L1(m)	L0(m)	L2(m)	L3(m)	L4(m)	Vxm(m/s)	Fx(N)
Q0b_000_y0_fp	0,0226	0,7096	0,7015	0,3031	0,3040	0,7002	-0,0030	0,0035
Q0b_000_y1_fp	0,0230	0,0669	0,0679	0,0657	0,0653	0,0643	-0,0007	-0,0176
Q20b_000_fp	19,6633	0,1585	0,1573	0,1563	0,1541	0,1534	0,2100	0,1737
Q25b_000_fp	24,9774	0,1695	0,1682	0,1674	0,1643	0,1640	0,2486	0,2695
Q30b_000_fp	30,0814	0,1796	0,1774	0,1770	0,1727	0,1733	0,3012	0,3189
Q35b_000_fp	35,1965	0,1887	0,1864	0,1862	0,1809	0,1820	0,3373	0,4941
Q40b_000_fp	40,0816	0,1970	0,1947	0,1944	0,1886	0,1900	0,3659	0,5471
Q45b_000_fp	45,1413	0,2052	0,2026	0,2027	0,1960	0,1976	0,4075	0,7249

Tabella 3: Risultati prova 02.04.2026.

Per la prova “Q0b_000_y0_fp” eseguita in assenza di acqua, i livelli riportati in Tabella 3 indicano la distanza verticale tra il sensore e il fondo dell'alveo. Poiché i sensori di livello misurano la distanza tra lo strumento e il pelo libero dell'acqua, il tirante idrico delle prove successive è stato ricavato, calcolando la differenza tra la distanza iniziale rispetto al fondo alveo e quella misurata nelle prove.

Forza di Drag

Il valore della forza misurata F_x è stato corretto per ottenere F_{dcorr} che rappresenta la forza idrodinamica di Drag che investe la pila, tale valore è ottenuto sottraendo a F_x delle prove dinamiche il valore F_x della prova “Q0b_000_y1_fp” ad acqua ferma. Per la prova “Q0b_000_y0_fp” il valore di F_x è stato settato pari a 0.

prova	$F_x(N)$	$F_{dcorr}(N)$
Q0b_000_y0_fp	0,0035	
Q0b_000_y1_fp	-0,0176	
Q20b_000_fp	0,1737	0,1913
Q25b_000_fp	0,2695	0,2871
Q30b_000_fp	0,3189	0,3365
Q35b_000_fp	0,4941	0,5117
Q40b_000_fp	0,5471	0,5648
Q45b_000_fp	0,7249	0,7425

Tabella 4: Valore forza di Drag.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori della forza teorica di Drag, calcolati mediante la formula descritta al paragrafo 4.2:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V_{xm}^2$$

Considerando:

- ρ : Densità dell'acqua pari a 1000kg/m³;
- A: Area di impatto, corrispondente alla superficie bagnata della pila;
- C_D : Coefficiente di Drag, preso pari a 0.7, da precedenti prove effettuate su pila circolare di pari diametro;
- V_{xm} : velocità media indisturbata a monte della pila in direzione x.

prova	Area(m2)	Vxm*(m/s)	Fdteo(N)	Fdcorr(N)
Q0b_000_y0_fp				
Q0b_000_y1_fp				
Q20b_000_fp	0,0139	0,2265	0,2504	0,1913
Q25b_000_fp	0,0146	0,2815	0,4059	0,2871
Q30b_000_fp	0,0152	0,3414	0,6220	0,3365
Q35b_000_fp	0,0158	0,3819	0,8078	0,5117
Q40b_000_fp	0,0163	0,4143	0,9819	0,5648
Q45b_000_fp	0,0169	0,4608	1,2536	0,7425

Tabella 5: Calcolo Fdteo e confronto con Fdcorr.

Al fine di evidenziare le differenze tra i valori misurati e quelli teorici, si riportano le due forze in un grafico in funzione della velocità longitudinale (V_{xm}).

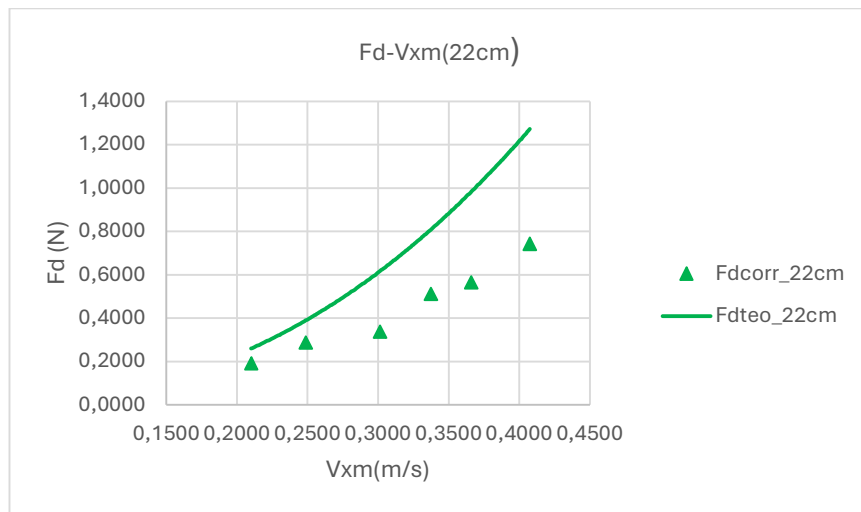


Figura 35: Confronto forza teorica e misurata.

Il discostamento tra i due risultati può essere frutto delle possibili interferenze generate nel flusso al di sotto della pila, che è stata alzata per eliminare l'influenza del terreno.

9.3 Analisi prove del 14.04.2026

La prova del 14 aprile è stata condotta in condizioni di flusso a pelo libero (ponte non in pressione) e in regime clear-water, con la paratoia di valle posta a un'altezza di 0,295 m.

Per tale prova, inizialmente il modello è stato sollevato di 16 cm rispetto al fondo del canale. In questa configurazione, con una profondità di scavo intorno alla pila di 6 cm, la base della pila risultava completamente distaccata dal terreno. Successivamente, in corrispondenza di portate maggiori che hanno determinato un incremento della profondità di scavo, il modello è stato abbassato di 4 cm (portandolo a una quota di 12 cm dal fondo). Tale modifica è stata effettuata per ridurre lo spazio interposto tra la base della pila e il fondo del canale al crescere dell'erosione; tale accorgimento è risultato necessario per simulare correttamente la condizione fisica di una pila soggetta allo scavo localizzato circostante.

I termini riportati in tabella hanno lo stesso significato di quelli riportati nel paragrafo 9.2.

prova	Q(l/s)	L1(m)	L0(m)	L2(m)	L3(m)	L4(m)	Vxm(m/s)	Fx(N)
Q0a_000_y0_fp	0,0224	0,7092	0,7043	0,3039	0,3050	0,6998	-0,0119	0,0779
Q0a_000_y1_fp	0,0221	0,0537	0,0561	0,0512	0,0511	0,0505	-0,0093	0,0008
Q20a_000_fp	20,1058	0,1183	0,1184	0,1150	0,1122	0,1107	0,3166	0,3180
Q25a_000_fp	25,0761	0,1283	0,1282	0,1249	0,1210	0,1199	0,3535	0,4565
Q30a_000_fp	29,9991	0,1375	0,1371	0,1341	0,1289	0,1284	0,3912	0,6599
Q35a_000_fp	35,0271	0,1463	0,1455	0,1428	0,1374	0,1362	0,4388	0,8884
Q40a_000_fp	40,1641	0,1547	0,1544	0,1512	0,1459	0,1439	0,4723	1,0029
Q45a_000_fp	45,0613	0,1630	0,1624	0,1600	0,1530	0,1507	0,5135	1,2059
Q50a_000_fp	49,9323	0,1705	0,1706	0,1673	0,1595	0,1570	0,5457	1,4412
Q55a_000_fp	55,0413	0,1780	0,1777	0,1747	0,1663	0,1629	0,5700	1,6493
Q0a_000_y0_fp_12cm	0,0225	0,7005	0,6936	0,2980	0,2993	0,6947	-0,0161	-0,0094
Q35a_000_fp_12cm	35,1103	0,1383	0,1367	0,1386	0,1346	0,1315	0,4432	0,7085
Q40a_000_fp_12cm	40,0221	0,1466	0,1451	0,1467	0,1424	0,1385	0,4752	0,8334
Q45a_000_fp_12cm	45,1693	0,1549	0,1530	0,1547	0,1502	0,1454	0,5166	1,0465
Q50a_000_fp_12cm	50,1157	0,1631	0,1618	0,1641	0,1579	0,1480	0,5445	1,2374
Q55a_000_fp_12cm	55,0857	0,1704	0,1687	0,1724	0,1648	0,1600	0,5671	1,4626

Tabella 6: Risultati prova 14.04.2026.

Analogamente a quanto descritto nel paragrafo 9.2, i valori registrati dai sensori di livello per le prove “Q0a_000_y0_fp” e “Q0a_000_y0_fp_12cm” rappresentano la distanza verticale

tra il sensore e il pelo libero. Tali misure non forniscono direttamente il valore del tirante idrico, che viene quindi calcolato per differenza, tenendo conto dell'altezza di sollevamento del modello (rispettivamente 16 cm e 12 cm rispetto al fondo del canale).

Forza di Drag

Si procede successivamente alla correzione del valore della forza F_x al fine di determinare F_{xcorr} , la quale esprime la forza idrodinamica di Drag agente sulla pila.

Nello specifico, per i test condotti con il palo sollevato di 16 cm, tale risultato viene ottenuto deducendo dal valore di F_x delle prove dinamiche il corrispondente valore di F_x ricavato nella prova ad acqua ferma denominata “Q0a_000_y1_fp”. Al contrario, nella configurazione sperimentale con sollevamento della pila pari a 12 cm, la medesima correzione è stata apportata impiegando i dati della relativa prova “Q0a_000_y0_fp_12cm”.

prova	$F_x(N)$	$F_{dcorr}(N)$
Q0a_000_y0_fp	0,0779	
Q0a_000_y1_fp	0,0008	
Q20a_000_fp	0,3180	0,3173
Q25a_000_fp	0,4565	0,4557
Q30a_000_fp	0,6599	0,6591
Q35a_000_fp	0,8884	0,8877
Q40a_000_fp	1,0029	1,0021
Q45a_000_fp	1,2059	1,2051
Q50a_000_fp	1,4412	1,4404
Q55a_000_fp	1,6493	1,6485
Q0a_000_y0_fp_12cm	-0,0094	
Q35a_000_fp_12cm	0,7085	0,7179
Q40a_000_fp_12cm	0,8334	0,8427
Q45a_000_fp_12cm	1,0465	1,0559
Q50a_000_fp_12cm	1,2374	1,2468
Q55a_000_fp_12cm	1,4626	1,4720

Tabella 7: Valore forza di Drag.

I risultati ottenuti sono stati confrontati con i valori della forza teorica di Drag, calcolati mediante la formula descritta al paragrafo 4.2:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V_{xm}^2$$

L'applicazione di tale formula segue considerazioni analoghe a quelle descritte al paragrafo 9.2, con un'importante distinzione metodologica: per le prove in cui si è verificata la formazione dello scavo alla base della pila, il valore della velocità media misurata è stato opportunamente corretto per tener conto dell'incremento locale della sezione di deflusso. Tale correzione è stata eseguita in accordo con l'equazione di continuità, garantendo così una rappresentazione coerente del campo di moto in presenza dell'erosione.

prova	Area(m2)	Vxm*(m/s)	Fdteo(N)	Fdcorr(N)
Q0a_000_y0_fp				
Q0a_000_y1_fp				
Q20a_000_fp	0,0113	0,3406	0,4604	0,3173
Q25a_000_fp	0,0120	0,3815	0,6096	0,4557
Q30a_000_fp	0,0125	0,4232	0,7862	0,6591
Q35a_000_fp	0,0131	0,4760	1,0381	0,8877
Q40a_000_fp	0,0136	0,5135	1,2568	1,0021
Q45a_000_fp	0,0142	0,5569	1,5391	1,2051
Q50a_000_fp	0,0146	0,5933	1,8031	1,4404
Q55a_000_fp	0,0151	0,6206	2,0363	1,6485
Q0a_000_y0_fp_12cm				
Q35a_000_fp_12cm	0,0153	0,4304	0,9953	0,7179
Q40a_000_fp_12cm	0,0159	0,4653	1,2017	0,8427
Q45a_000_fp_12cm	0,0164	0,5104	1,4917	1,0559
Q50a_000_fp_12cm	0,0170	0,5376	1,7146	1,2468
Q55a_000_fp_12cm	0,0175	0,5597	1,9161	1,4720

Tabella 8: Calcolo Fdteo e confronto con Fdcorr.

Per confrontare i risultati sperimentali con le stime teoriche, le due forze sono riportate in un grafico in funzione della velocità longitudinale Vxm.

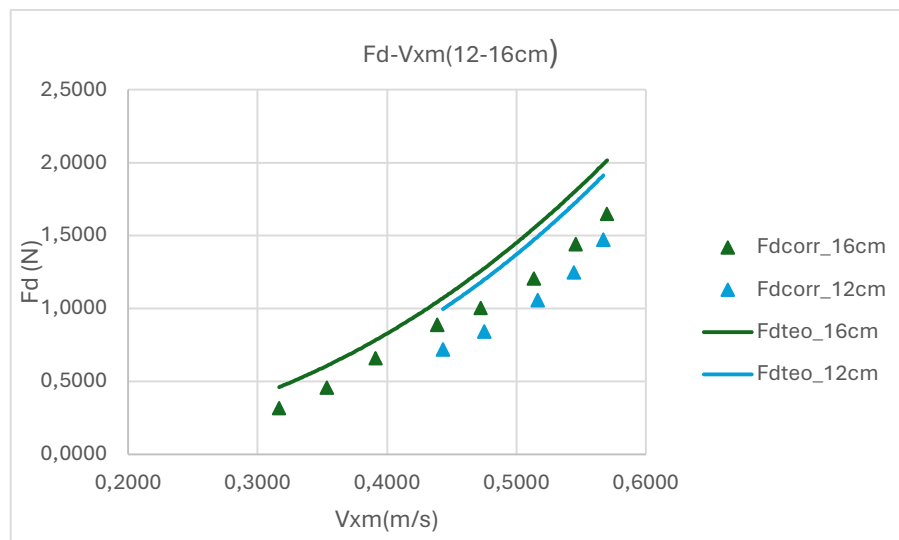


Figura 36: Confronto forza teorica e forza misurata.

Rispetto ai risultati del paragrafo 9.2, lo scostamento tra la forza misurata e quella teorica risulta sensibilmente ridotto. Questo miglioramento è dovuto alla configurazione sperimentale adottata: il posizionamento della pila a una quota specifica ha permesso di minimizzare le interferenze fluidodinamiche che, nei test precedenti, si generavano nello spazio tra la base della pila e il terreno.

Tuttavia, la discrepanza residua indica che la schematizzazione teorica non coglie appieno la complessità del fenomeno. È probabile che, nonostante l'accorgimento geometrico, persistano turbolenze locali o gradienti di pressione nel punto di distacco del flusso sotto la pila.

9.4 Analisi prove del 05.03.2026

L'analisi è stata condotta il 5 marzo, operando in condizioni di flusso a pelo libero (ponte non in pressione) con paratoia a valle avente un'altezza di 0,32 m e in regime clear-water.

Le attività sperimentali condotte in tale giornata prevedevano due diverse configurazioni.

Il primo gruppo di test, identificato dalla sola dicitura “cella”, è stato eseguito in condizioni di scavo nullo. Per impedire la movimentazione del sedimento sotto l'azione del flusso, il fondo del canale è stato protetto con dei rivestimenti in gomma rigida; questi ultimi sono stati opportunamente sagomati per assecondare la geometria della pila, precludendo così l'innesco dell'erosione localizzata attorno alla struttura. Data la

leggerezza del materiale, tali elementi sono stati zavorrati posizionandovi al di sopra dei pesi in ferro, al fine di ridurre eventuali spostamenti. In questa configurazione sono state eseguite 6 prove, ciascuna di durata 10 minuti, con differenti valori di portata.

La seconda serie di prove, identificata dalla dicitura “cella_scavo”, è stata effettuata nelle stesse condizioni idrodinamiche del primo gruppo ma in condizioni di scavo libero. Per ciascuna prova, sempre di durata pari a 10 minuti, è stato registrato il valore dello scavo nell’istante iniziale, dopo 5 minuti e al termine della prova.

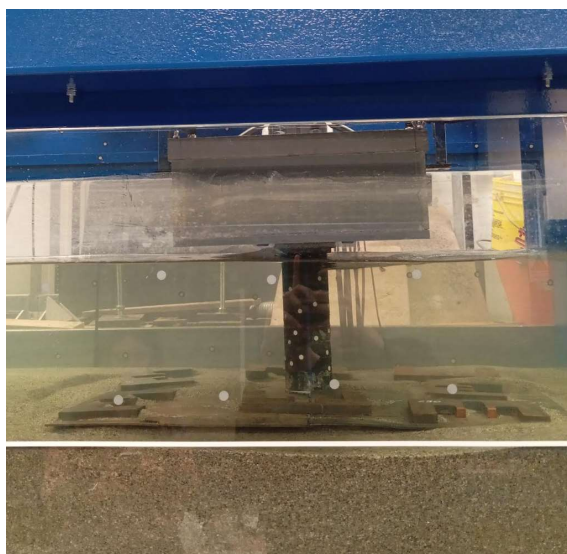


Figura 37: Collocamento dei “tappeti” al di sopra del terreno.

I termini riportati in Tabella 9 sono analoghi a quelli riportati nei paragrafi precedenti.

prova	Q(l/s)	L1(m)	L0(m)	L2(m)	L3(m)	L4(m)	Vxm(m/s)	Fx(N)
Q0b_000_0cm	0,0238	0,7072	0,6965	0,2969	0,2985	0,6937	-0,0065	1,0146
Q0b_000_2cm	0,0226	0,6758	0,6676	0,2719	0,2733	0,6695	-0,0075	-0,0482
Q20b_000_cella	20,2536	0,1586	0,1544	0,1519	0,1498	0,1487	0,2229	0,2199
Q25b_000_cella	25,0483	0,1686	0,1640	0,1618	0,1589	0,1584	0,2585	0,2246
Q30b_000_cella	29,9086	0,1783	0,1733	0,1713	0,1681	0,1673	0,2891	0,3375
Q35b_000_cella	35,0475	0,1874	0,1823	0,1804	0,1759	0,1764	0,3369	0,2588
Q40b_000_cella	39,8903	0,1956	0,1903	0,1885	0,1829	0,1841	0,3591	0,3154
Q45b_000_cella	44,9711	0,2043	0,1985	0,1969	0,1911	0,1921	0,4014	0,7638
Q20b_000_cella_scavo	20,2011	0,1586	0,1543	0,1521	0,1504	0,1491	0,2222	0,7065
Q25b_000_cella_scavo	24,9878	0,1686	0,1637	0,1620	0,1595	0,1586	0,2565	0,6666
Q30b_000_cella_scavo	29,9285	0,1781	0,1731	0,1715	0,1684	0,1676	0,2889	0,7043
Q35b_000_cella_scavo	35,0025	0,1872	0,1819	0,1806	0,1773	0,1763	0,3294	1,0838
Q40b_000_cella_scavo	39,7909	0,1951	0,1898	0,1888	0,1851	0,1840	0,3631	1,1256
Q45b_000_cella_scavo	44,9136	0,2035	0,1980	0,1973	0,1932	0,1918	0,4005	1,3706

Tabella 9: Risultati prova 05.03.2026.

Analogamente a quanto descritto nei paragrafi precedenti per la prima prova, “Q0b_000_0cm”, i livelli indicano la distanza tra ciascun sensore e il terreno.

I valori evidenziati in grigio non mostrano l'andamento crescente atteso; la causa è presumibilmente riconducibile a disturbi nel segnale subiti dalla cella di carico durante l'esecuzione di tali prove. Queste discrepanze risulteranno chiaramente visibili nella successiva rappresentazione grafica dei dati.

Forza di Drag

I valori della forza F_x , dalla quale poi si ricava la forza di Drag effettiva, misurati tramite la cella di carico risultano inizialmente affetti da un errore di zero. Tale sfasatura è riscontrabile nel dato della prova “Q0b_000_0cm”, il quale avrebbe dovuto essere teoricamente pari a zero, dacché il test è stato eseguito in condizioni statiche e con il pelo libero coincidente con la superficie del terreno.

La correzione di F_x , applicata sia alle prove a fondo fisso sia a quelle a scavo libero, è stata eseguita imponendo che il valore della forza registrato alla portata di 20 l/s fosse uguale a quello ricavato nell'analisi del 02/04/2026. In questo modo è stata determinata l'entità della correzione da apportare a tutti i successivi test condotti a portate superiori. Tale procedura è stata ritenuta idonea sul presupposto che, alla portata di 20 l/s, l'influenza dello scavo sulla forza di drag sia minima; si ipotizza, pertanto, che le prove a fondo fisso e a scavo libero siano caratterizzate dallo stesso valore della forza di drag per tale valore di portata.

prova	Fx(N)	Fx_fp(N)	Fd_corr(N)
Q0b_000_0cm	1,0146		
Q0b_000_2cm	-0,0482		
Q20b_000_cella	0,2199	0,1913	0,1913
Q25b_000_cella	0,2246	0,2871	0,1961
Q30b_000_cella	0,3375	0,3365	0,3090
Q35b_000_cella	0,2588	0,5117	0,2302
Q40b_000_cella	0,3154	0,5648	0,2868
Q45b_000_cella	0,7638	0,7425	0,7353
Q20b_000_cella_scavo	0,7065		0,1913
Q25b_000_cella_scavo	0,6666		0,1514
Q30b_000_cella_scavo	0,7043		0,1891
Q35b_000_cella_scavo	1,0838		0,5686
Q40b_000_cella_scavo	1,1256		0,6105
Q45b_000_cella_scavo	1,3706		0,8555

Tabella 10: Forza di Drag a seguito della correzione.

La colonna denominata “Fx_fp” raccoglie i risultati dell’analisi effettuata in data 02/04/2026; la dicitura originale “Fdcorr” è stata modificata proprio per evitare sovrapposizioni terminologiche con la nomenclatura delle due prove. Di tale colonna, ai fini della procedura di correzione, è stato impiegato esclusivamente il primo valore, pari a 0,1913 N.

Coerentemente con l'approccio adottato nei paragrafi 9.2 e 9.3, i dati sperimentali relativi alle forze di Drag misurati sperimentalmente sono stati confrontati con la formula teorica:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V_{xm}^2$$

Ai fini dell'applicazione di tale espressione analitica, sono state formulate le seguenti considerazioni preliminari:

- Il coefficiente C_D è stato posto pari a 0,7;
- L’area di impatto frontale A è pari alla proiezione dell’ingombro della pila sul piano ortogonale alla corrente.
- Nel caso di scavo impedito la formula per il calcolo di essa è della seguente forma:

$$A = d_{pila} \cdot L2$$

Dove:

$$-d_{pila}=0,063m$$

- Nel caso di scavo libero l'area di impatto è stata maggiorata considerando l'incremento di superficie investita dalla corrente, dovuto allo scavo in prossimità della pila d_{smedio} :

$$A = (d_{pila} + d_{smedio}) \cdot L2$$

Dove:

- d_{smedio} rappresenta lo scavo medio calcolato come media delle tre misure (istante iniziale, metà prova e istante finale) eseguite durante ogni singola prova

- La velocità in prossimità della pila (V_{xm}^*) è stata determinata applicando l'equazione di continuità considerando la portata costante tra la sezione indisturbata a monte del ponte e la sezione in corrispondenza della pila. Il calcolo ha tenuto conto della riduzione della sezione d'efflusso causata dall'ingombro della pila e dell'incremento dell'area indotto dallo sviluppo dello scavo.

prova	dsmedio(m)	Area(m2)	Vxm*(m/s)	Fd_teo(N)	Fd_corr(N)
Q0b_000_0cm					
Q0b_000_2cm					
Q20b_000_cella		0,0096	0,2601	0,2267	0,1913
Q25b_000_cella		0,0102	0,3011	0,3234	0,1961
Q30b_000_cella		0,0108	0,3363	0,4272	0,3090
Q35b_000_cella		0,0114	0,3910	0,6081	0,2302
Q40b_000_cella		0,0119	0,4164	0,7208	0,2868
Q45b_000_cella		0,0124	0,4654	0,9403	0,7353
Q20b_000_cella_scavo	0,0285	0,0114	0,2563	0,2615	0,1913
Q25b_000_cella_scavo	0,0375	0,0126	0,2934	0,3788	0,1514
Q30b_000_cella_scavo	0,0510	0,0140	0,3259	0,5213	0,1891
Q35b_000_cella_scavo	0,0650	0,0155	0,3654	0,7232	0,5686
Q40b_000_cella_scavo	0,0760	0,0167	0,3967	0,9186	0,6105
Q45b_000_cella_scavo	0,0835	0,0177	0,4330	1,1610	0,8555

Tabella 11: Calcolo forza teorica (Fd_{teo}) e confronto con forza misurata (Fd_{corr}).

Al fine di confrontare la forza di Drag teorica con quella misurata sperimentalmente, i relativi valori sono stati graficati in funzione della velocità di monte in condizioni indisturbate (V_{xm}). Nella rappresentazione grafica, la sigla “ns” (*no scavo*) identifica la configurazione in assenza di scavo, mentre la sigla “cs” (*con scavo*) si riferisce alla condizione in presenza di scavo.

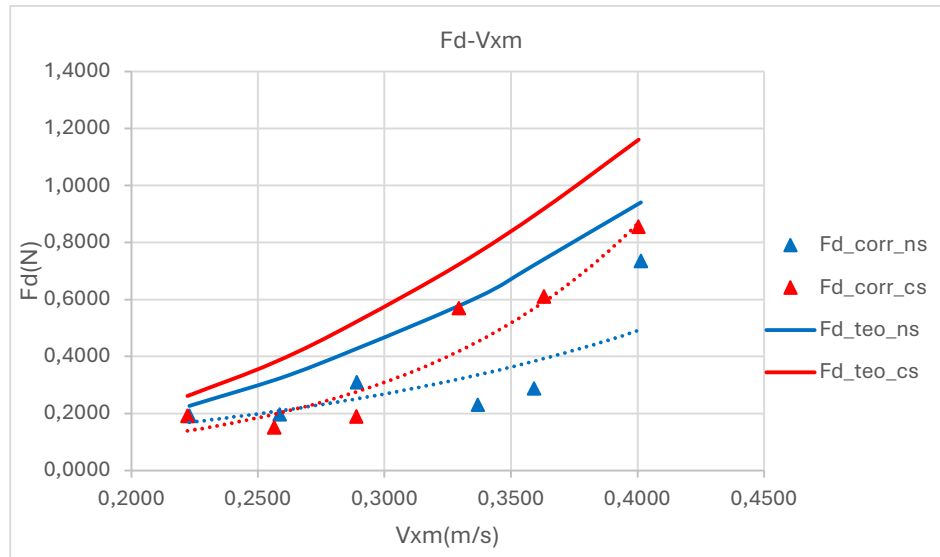


Figura 38: Confronto forza di drag teorica e sperimentale, nelle condizioni di scavo impedito e libero.

Sia i dati sperimentali che le formulazioni teoriche evidenziano che le forze di Drag agenti sulla pila risultano superiori in presenza di scavo; per quanto concerne il modello teorico, tale incremento risulta ovvio essendo la forza calcolata in funzione del quadrato della velocità, mentre per i dati sperimentali si osserva una correlazione direttamente proporzionale tra l'entità delle sollecitazioni dinamiche e l'aumento della velocità della corrente, la quale determina, a sua volta, una progressiva evoluzione del fenomeno di scavo alla base della struttura.

Nella figura 38 sono stati inseriti, inoltre, i valori relativi a F_{x_fp} , i quali descrivono la configurazione in cui il modello risulta sollevato dal fondo del canale, escludendo così il contatto tra la pila e il terreno. Tali dati sono stati ricavati durante la sessione sperimentale del 2 aprile 2026.

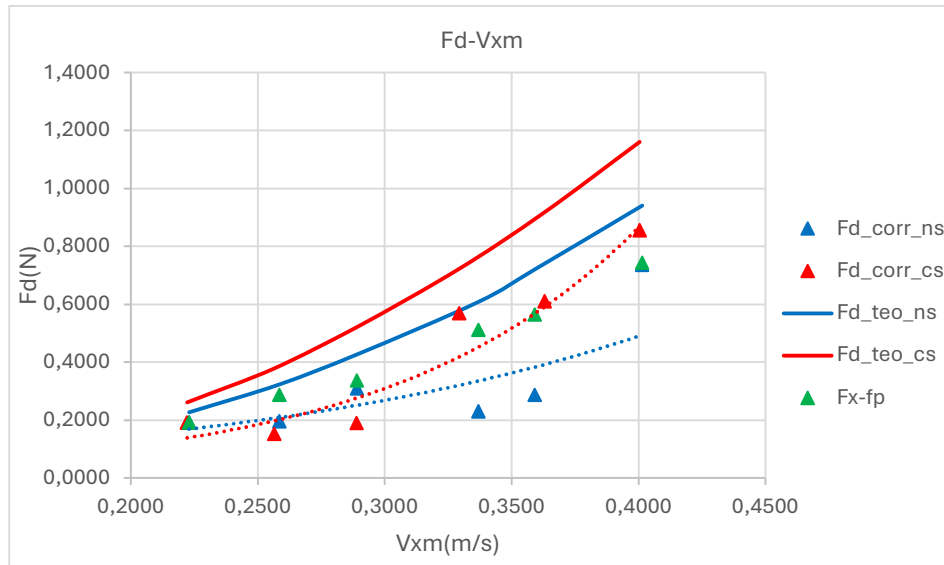


Figura 39: Confronto forza di Drag con scavo impedito, con scavo libero e in assenza di terreno.

La sovrapposizione dei risultati ottenuti nelle diverse configurazioni evidenzia come la forza di Drag misurata in presenza del terreno (sia nello scenario con scavo libero, sia in quello in cui lo scavo è impedito) risulti ampiamente confrontabile con la forza dinamica rilevata nella condizione di pila completamente svincolata dal fondo. Sulla base di tali evidenze, si può dedurre che, almeno per le configurazioni sperimentali analizzate, la reazione del terreno non sembri comportare una significativa interferenza o una riduzione dei valori di forza registrati dalla cella di carico. Di conseguenza, il contributo della componente reazionale del terreno può essere considerato trascurabile ai fini della presente analisi.

Coefficiente di Drag

Infine, a partire dalle forze di Drag misurate sperimentalmente tramite la cella di carico e opportunamente corrette (sia per la configurazione di scavo libero sia per quella di scavo impedito), è stato valutato il coefficiente di Drag (C_D). Quest'ultimo è definito analiticamente dalla formula riportata al paragrafo 4.2:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot A \cdot V_0^2}$$

prova	Re	Fr	Cd(-)
Q0b_000_0cm			
Q0b_000_2cm			
Q20b_000_cella	14043,9431	0,1846	0,8045
Q25b_000_cella	16287,4730	0,2074	0,5757
Q30b_000_cella	18212,9696	0,2257	0,6852
Q35b_000_cella	21226,4250	0,2561	0,3568
Q40b_000_cella	22626,0696	0,2672	0,3745
Q45b_000_cella	25286,6428	0,2924	0,7359
Q20b_000_cella_scavo	13997,3879	0,1837	0,6812
Q25b_000_cella_scavo	16157,0183	0,2056	0,3664
Q30b_000_cella_scavo	18202,7326	0,2253	0,3231
Q35b_000_cella_scavo	20753,7708	0,2505	0,6771
Q40b_000_cella_scavo	22873,5839	0,2703	0,5552
Q45b_000_cella_scavo	25228,4340	0,2919	0,6030

Tabella 12: Numero di Reynolds, numero di Froude e coefficiente di Drag.

Il grafico seguente (figura 39) rappresenta il coefficiente di Drag in funzione del numero di Reynolds, il quale è stato calcolato con l'espressione riportata al paragrafo 3.2, sostituendo a V la velocità della corrente nella sezione indisturbata e a D il raggio idraulico del condotto:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

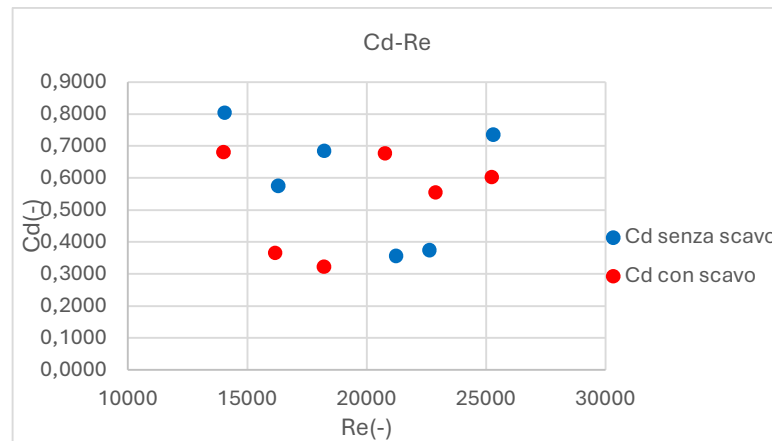


Figura 40: Rappresentazione valori coefficiente di Drag in funzione di Re.

Il coefficiente di Drag calcolato nelle diverse prove assume valori compresi nell'intervallo [0,35; 0,80]. Il valore di 0,70, impiegato per la determinazione delle forze dinamiche teoriche, trova conferma nei dati sperimentali, validando così l'approccio adottato. Si precisa che tale valore non costituisce un'ipotesi assunta a priori, bensì un parametro

derivato da consolidate prove di laboratorio condotte in precedenza, che ne attestano l'affidabilità per il caso in esame.

Il coefficiente di Drag viene rappresentato anche in funzione del numero di Froude, definito dall'espressione riportata nel paragrafo 3.7:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gy}}$$

Dove v rappresenta la velocità del flusso, g l'accelerazione di gravità e y il tirante idrico.

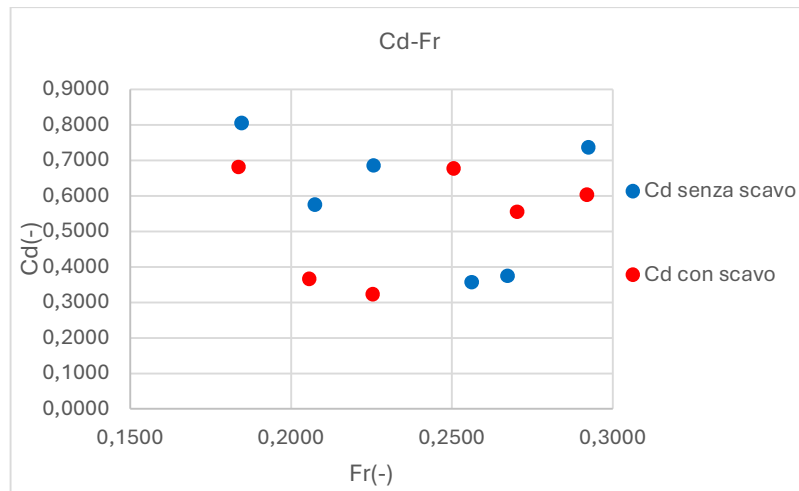


Figura 41: Rappresentazione valori coefficiente di Drag in funzione di Fr.

9.5 Analisi prove del 12.03.2026

Le prove del 12 marzo prevedevano una configurazione a pelo libero, con paratoia di valle di altezza 0,295 m (prove indicate con “a”); tali condizioni al contorno garantiscono velocità longitudinali maggiori rispetto alle prove del 5 marzo descritte al paragrafo 9.4.

Sono state studiate due configurazioni diverse: una prima serie di prove a scavo impedito (denominate con la dicitura “s0”), eseguite proteggendo il fondo del canale con rivestimenti zavorrati per inibire l'erosione localizzata, e una seconda serie di prove a scavo libero (denominate con “scavo”). Per ciascuna configurazione sono state eseguite 8 prove di durata 10 minuti con differenti portate. Per le prove in presenza di scavo, è stata misurata la profondità di scavo in prossimità della pila all'istante iniziale, dopo 5 minuti e al termine di ciascuna prova.

Nella tabella 13 sono riportate le grandezze misurate durante le varie prove.

prova	Q(l/s)	L1(m)	L0(m)	L2(m)	L3(m)	L4(m)	Vxm(m/s)	Fx(N)
Q0a_000_y0	0,0000	0,6943	0,6870	0,2918	0,2932	0,6875	-0,0039	8,7458
Q0a_000_y1	0,0238	0,6378	0,6309	0,2330	0,2350	0,6310	0,0090	12,8895
Q20a_000_s0	20,3163	0,1177	0,1157	0,1184	0,1151	0,1142	0,2753	10,2512
Q25a_000_s0	24,9658	0,1268	0,1248	0,1279	0,1232	0,1232	0,3174	10,3166
Q30a_000_s0	30,0011	0,1361	0,1338	0,1370	0,1297	0,1317	0,3558	10,3629
Q35a_000_s0	34,9322	0,1451	0,1425	0,1461	0,1371	0,1400	0,3945	10,6130
Q40a_000_s0	39,9405	0,1536	0,1507	0,1543	0,1446	0,1478	0,4279	10,7080
Q45a_000_s0	45,0148	0,1616	0,1589	0,1625	0,1516	0,1551	0,4677	10,8386
Q50a_000_s0	50,0593	0,1695	0,1662	0,1699	0,1597	0,1620	0,5020	10,9612
Q55a_000_s0	55,0271	0,1770	0,1744	0,1772	0,1669	0,1688	0,5288	11,0623
Q20a_000_scavo	20,2641	0,1166	0,1149	0,1179	0,1153	0,1136	0,2753	11,3708
Q25a_000_scavo	24,8878	0,1261	0,1245	0,1274	0,1243	0,1228	0,3157	11,7428
Q30a_000_scavo	29,8494	0,1354	0,1336	0,1368	0,1336	0,1312	0,3559	11,9392
Q35a_000_scavo	34,8621	0,1444	0,1424	0,1459	0,1420	0,1394	0,3958	12,0926
Q40a_000_scavo	39,8901	0,1531	0,1509	0,1542	0,1501	0,1472	0,4356	12,4247
Q45a_000_scavo	44,9342	0,1612	0,1592	0,1624	0,1577	0,1544	0,4738	12,4174
Q50a_000_scavo	49,9999	0,1693	0,1671	0,1704	0,1650	0,1615	0,5057	12,6477
Q55a_000_scavo	54,9110	0,1758	0,1743	0,1782	0,1722	0,1677	0,5299	13,0846

Tabella 13: Risultati prova del 12.03.2026.

Analogamente a quanto descritto nei paragrafi precedenti, i livelli della prima prova, “Q0a_000_y0”, non corrispondono a valori del tirante idrico, ma identificano la distanza tra i sensori e il terreno.

Forza di Drag

Come descritto nel paragrafo precedente, i valori della forza Fx misurati tramite la cella di carico nella prova “Q0a_000_y0” risultano affetti da un errore, dovuto presumibilmente a possibili eccentricità dell’intero modello.

La correzione di Fx, applicata sia alle prove a scavo nullo sia a quelle a scavo libero, è stata eseguita imponendo che il valore della forza registrato alla portata di 20 l/s fosse coincidente con quello ricavato nella prova “Q20a_000_fp” del 14/04/2026. Tale procedura è stata ritenuta idonea in base al presupposto che, alla portata di 20 l/s, l'influenza dello scavo sia minima.

prova	Fx_fp(N)	Fd_corr(N)
Q0a_000_y0		
Q0a_000_y1		
Q20a_000_s0	0,3173	0,3173
Q25a_000_s0	0,4557	0,3827
Q30a_000_s0	0,6591	0,4290
Q35a_000_s0	0,8877	0,6791
Q40a_000_s0	1,0021	0,7741
Q45a_000_s0	1,2051	0,9046
Q50a_000_s0	1,4404	1,0273
Q55a_000_s0	1,6485	1,1284
Q20a_000_scavo		0,3173
Q25a_000_scavo		0,6892
Q30a_000_scavo		0,8857
Q35a_000_scavo		1,0390
Q40a_000_scavo		1,3711
Q45a_000_scavo		1,3639
Q50a_000_scavo		1,5941
Q55a_000_scavo		2,0310

Tabella 14: Forza di Drag a seguito della correzione.

La colonna denominata “Fx_fp” raccoglie i risultati dell’analisi effettuata in data 14/04/2026; la dicitura originale “Fdcorr” è stata modificata proprio per evitare sovrapposizioni terminologiche con la nomenclatura della prova in esame. Di tale colonna, ai fini della procedura di correzione, è stato impiegato esclusivamente il primo valore, pari a 0,3173.

A differenza dell’analisi descritta nel paragrafo 9.4, i valori della forza dinamica relativi alla configurazione con pila svincolata dal terreno sono stati valutati sollevando l’impalcato di 16 cm rispetto al fondo del canale. Tale impostazione si differenzia da quella del caso precedente, in cui l’innalzamento era pari a 22 cm.

Come nei paragrafi precedenti la forza di Drag, misurata dalla cella di carico, viene confrontata con dei valori teorici ricavati dalla seguente espressione:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V_0^2$$

Per l’applicazione di tale equazione valgono le stesse ipotesi descritte al paragrafo 9.4, correggendo il valore della velocità in prossimità della pila per considerare la variazione della sezione rispetto alla situazione indisturbata di monte.

prova	dsmedio(m)	Area (m2)	Vxm*(m/s)	Fd_teo (N)
Q0a_000_y0				
Q0a_000_y1				
Q20a_000_s0		0,0075	0,3056	0,2440
Q25a_000_s0		0,0081	0,3517	0,3488
Q30a_000_s0		0,0086	0,3947	0,4708
Q35a_000_s0		0,0092	0,4378	0,6176
Q40a_000_s0		0,0097	0,4758	0,7701
Q45a_000_s0		0,0102	0,5199	0,9684
Q50a_000_s0		0,0107	0,5597	1,1733
Q55a_000_s0		0,0112	0,5901	1,3605
Q20a_000_scavo	0,046	0,0103	0,2943	0,3129
Q25a_000_scavo	0,0585	0,0117	0,3325	0,4534
Q30a_000_scavo	0,071	0,0131	0,3683	0,6217
Q35a_000_scavo	0,08	0,0142	0,4046	0,8155
Q40a_000_scavo	0,0875	0,0152	0,4423	1,0426
Q45a_000_scavo	0,0935	0,0161	0,4776	1,2874
Q50a_000_scavo	0,097	0,0168	0,5089	1,5273
Q55a_000_scavo	0,0995	0,0175	0,5296	1,7170

Tabella 15: Calcolo forza teorica (F_{d_teo}) e confronto con forza misurata (F_{d_corr}).

Al fine di confrontare la forza di Drag teorica con quella misurata sperimentalmente, i relativi valori sono stati graficati in funzione della velocità di monte in condizioni indisturbate (V_{xm}). Nella rappresentazione grafica, la sigla “ns” (*no scavo*) identifica la configurazione in assenza di scavo, mentre la sigla “cs” (*con scavo*) si riferisce alla condizione in presenza di scavo.

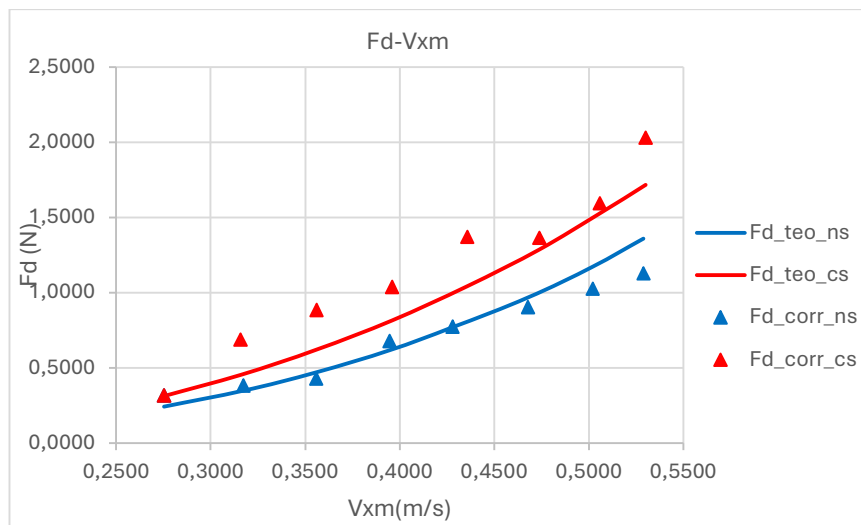


Figura 42: Confronto forza teorica e sperimentale, nelle condizioni di scavo impedito e libero.

L'approccio teorico e quello sperimentale mostrano entrambi che lo sviluppo dello scavo incrementa le forze di Drag sulla pila rispetto alla condizione di fondo fisso.

Il buon accordo tra i valori misurati e quelli predetti dalla teoria convalida rigorosamente le procedure sperimentali adottate.

Al grafico di Figura 42, sono stati aggiunti i valori di F_{x_fp} , i quali descrivono la configurazione in cui il modello è sollevato rispetto al fondo di una quantità pari a 16 cm, evitando così la presenza di terreno attorno alla pila (valori della prova del 14 aprile descritta al paragrafo 9.3).

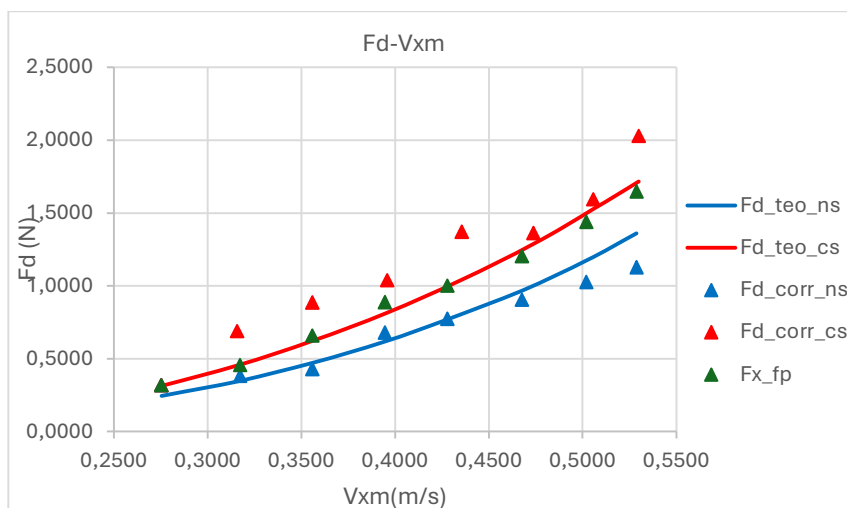


Figura 43: Confronto forza di Drag con scavo impedito, con scavo libero e in assenza di terreno intorno alla pila.

La sovrapposizione dei risultati $F_{d_corr_cs}$ e F_{x_fp} evidenzia come la forza di Drag misurata nelle prove con scavo sia del tutto confrontabile con la forza dinamica misurata nella condizione di pila completamente svincolata dal fondo. Da quanto emerso si evince che, quantomeno per le configurazioni di test indagate, l'azione del terreno non causa un'interferenza rilevante o un calo delle forze lette dallo strumento di misurazione. Ne consegue che l'apporto della componente reattiva del suolo possa essere giudicato ininfluenza per gli scopi di questa trattazione.

Coefficiente di Drag

Il calcolo del coefficiente di Drag, sia per la configurazione di scavo libero sia per quella di scavo impedito, è effettuato tramite l'applicazione della seguente formula:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot A \cdot V_0^2}$$

prova	Re	Fr	Cd(-)
Q0a_000_y0	-243,7344	-0,0015	
Q0a_000_y1	564,764151	0,0036	
Q20a_000_s0	17346,6351	0,2601	0,9102
Q25a_000_s0	19993,1218	0,2887	0,7680
Q30a_000_s0	22412,7497	0,3130	0,6379
Q35a_000_s0	24855,0722	0,3366	0,7697
Q40a_000_s0	26955,0048	0,3554	0,7036
Q45a_000_s0	29465,3196	0,3791	0,6539
Q50a_000_s0	31623,3426	0,3982	0,6129
Q55a_000_s0	33313,73	0,4110	0,5806
Q20a_000_scavo	17341,6086	0,2607	0,7098
Q25a_000_scavo	19891,5228	0,2877	1,0641
Q30a_000_scavo	22420,7773	0,3137	0,9972
Q35a_000_scavo	24934,8213	0,3384	0,8918
Q40a_000_scavo	27443,1545	0,3625	0,9206
Q45a_000_scavo	29850,1478	0,3849	0,7416
Q50a_000_scavo	31861,6471	0,4017	0,7306
Q55a_000_scavo	33385,8461	0,413114	0,8280

Tabella 16: Numero di Reynolds, numero di Froude e coefficiente di Drag.

Di seguito viene rappresentato il coefficiente di Drag in funzione del numero di Reynolds e del numero di Froude, come fatto al paragrafo 9.4.

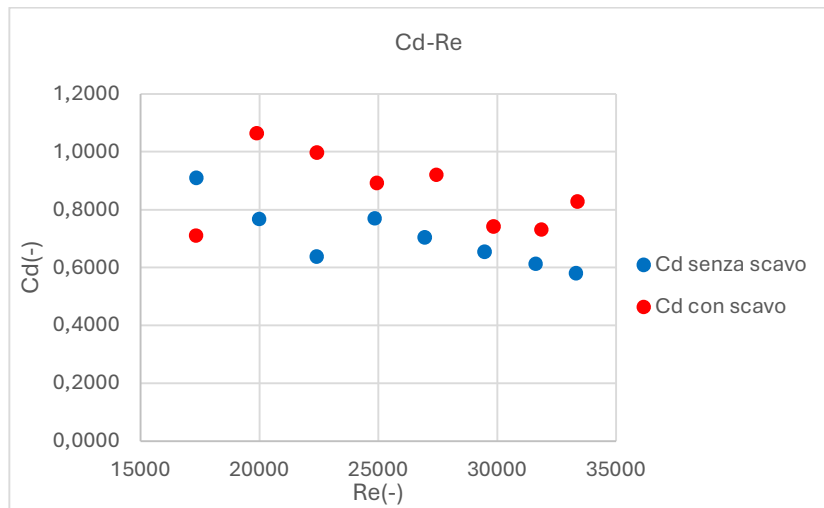


Figura 44: Rappresentazione valori coefficiente di Drag in funzione del numero di Reynolds.

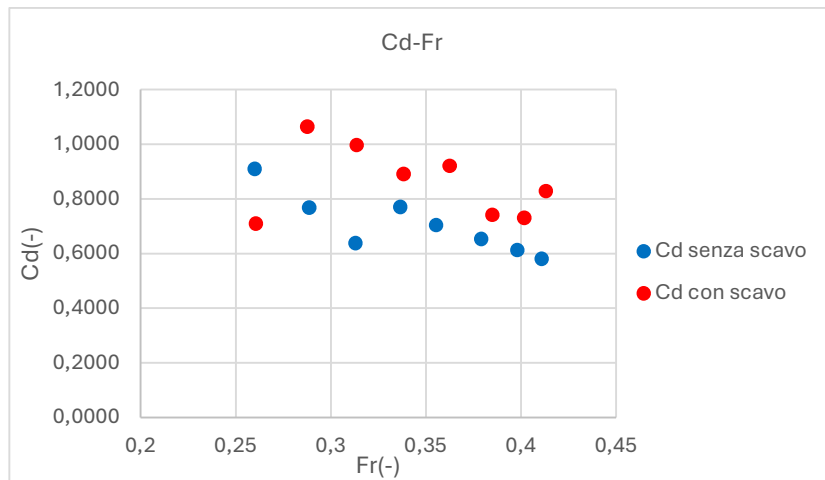


Figura 45: Rappresentazione valori coefficiente di Drag in funzione del numero di Froude.

Coerentemente con i risultati del paragrafo 9.3, i coefficienti di Drag sperimentali si attestano all'interno del range [0.6; 1.1]. Dall'analisi della figura 45, emerge chiaramente come il coefficiente C_d relativo alla configurazione senza scavo assuma valori sistematicamente inferiori rispetto a quelli registrati nella condizione con scavo. Parallelamente, per entrambe le casistiche in esame, si osserva un andamento decrescente del parametro all'aumentare del numero di Reynolds (Re) e del numero di Froude (Fr).

9.6 Analisi prove del 19.03.2026

Le prove del 19 marzo sono state eseguite in condizione di ponte in pressione, con il tirante idrico che risulta superiore all'intradosso dell'impalcato. Nello specifico, la paratoia di valle aveva un'altezza di 0,38 m. Dal confronto tra la velocità della corrente e la velocità critica del materiale, lo scavo avveniva in condizioni clear-water. Tutte le prove sono state eseguite con fondo orizzontale.

In analogia con le prove del 5 e del 12 marzo, l'attività sperimentale prevedeva due configurazioni. Nella prima serie di prove (identificate dalla sigla "s0"), lo scavo era impedito proteggendo il fondo alveo con rivestimenti zavorrati per prevenire l'erosione localizzata. Nella seconda serie di prove (indicate come "scavo"), lo scavo era libero. Per ciascuna configurazione sono state eseguite 7 prove di durata 10 minuti con differenti portate. Per le prove con scavo libero, è stata misurata la profondità di scavo in prossimità della pila all'istante iniziale, dopo 5 minuti e al termine di ciascuna prova.

Rispetto alle analisi precedenti, in questo caso non è possibile effettuare un confronto tra le forze idrodinamiche teoriche e quelle sperimentali, poiché non sono noti il coefficiente di Drag e quello di Lift. Tuttavia, oltre ai dati misurati dalla cella di carico, i sensori di pressione sul fronte, sul retro e sulla superficie inferiore dell'impalcato hanno permesso di misurare i valori delle pressioni locali. Le forze di Drag e Lift sono quindi state misurate anche a partire dall'integrale delle pressioni sull'impalcato. Di conseguenza, l'analisi si focalizza sul confronto tra le forze idrodinamiche rilevate direttamente dalla cella di carico e quelle dedotte dai trasduttori di pressione.

In Figura 46 è mostrata una prova in condizione di scavo impedito mentre Figura 47 è relativa ad una prova di scavo libero; in entrambi i casi valgono le condizioni di ponte in pressione.



Figura 46: Prova con fondo fisso.



Figura 47: Prova con fondo mobile.

In Tabella 17 sono raccolte le grandezze misurate durante le diverse prove. Rispetto alle analisi precedenti, sono stati misurati ulteriori parametri necessari allo studio in oggetto, quali:

- P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8: i valori di pressione totale registrati dai singoli sensori installati sul modello;
- F_y : la componente di forza agente in direzione y ortogonale alla corrente e parallela all'asse della pila, con asse positivo orientato verso l'alto.

prova	Q(l/s)	L1(m)	L0(m)	L2(m)	L3(m)	L4(m)	Vxm(m/s)	Fx(N)	Fy(N)
Q0d_000_y0	0,0223	0,7017	0,6931	0,2979	0,2985	0,6943	-0,9905	0,0304	-0,0587
Q0d_000_2cm	0,0223	0,0274	0,0259	0,0271	0,0270	0,0256	-0,9904	3,0611	16,8430
Q20d_000_s0	20,2984	0,2116	0,2090	0,2118	0,2104	0,2087	0,1548	3,0285	11,1527
Q25d_000_s0	25,1122	0,2239	0,2216	0,2245	0,2219	0,2204	0,1872	2,4390	3,6793
Q30d_000_s0	29,9661	0,2340	0,2315	0,2327	0,2293	0,2299	0,2162	2,1172	14,8178
Q35d_000_s0	35,1481	0,2442	0,2415	0,2430	0,2366	0,2393	0,2420	1,9542	26,0610
Q40d_000_s0	40,1134	0,2537	0,2508	0,2534	0,2444	0,2477	0,2731	2,0676	35,6712
Q45d_000_s0	45,0099	0,2626	0,2598	0,2635	0,2519	0,2556	0,3039	2,3325	44,7120
Q50d_000_s0	50,0159	0,2717	0,2687	0,2726	0,2591	0,2634	0,3313	2,6048	51,7033
Q20d_000_scavo	20,2437	0,2116	0,2092	0,2036	0,2104	0,2088	0,1578	2,9300	-3,0215
Q25d_000_scavo	24,8744	0,2235	0,2212	0,2241	0,2216	0,2203	0,1847	2,6216	7,8820
Q30d_000_scavo	30,0018	0,2338	0,2311	0,2328	0,2297	0,2298	0,2132	2,3307	19,2775
Q35d_000_scavo	35,0202	0,2437	0,2407	0,2425	0,2359	0,2388	0,2448	2,3033	30,5009
Q40d_000_scavo	39,9863	0,2531	0,2499	0,2526	0,2443	0,2471	0,2725	2,6203	40,8941
Q45d_000_scavo	44,9729	0,2622	0,2590	0,2628	0,2522	0,2552	0,3036	3,0064	51,1819
Q50d_000_scavo	49,9101	0,2710	0,2677	0,2719	0,2596	0,2629	0,3305	3,4592	62,6026
Q0d_000_y1	0,0222	0,2696	0,2657	0,2671	0,2670	0,2653	-0,0015	0,3839	76,6489

prova	P1(mbar)	P2(mbar)	P3(mbar)	P4(mbar)	P5(mbar)	P6(mbar)	P7(mbar)	P8(mbar)
Q0d_000_y0	1,024	9,930	17,903	0,976	0,419	0,023	-0,051	-0,372
Q0d_000_2cm	1,053	9,983	17,975	0,898	0,442	0,023	-0,089	-0,397
Q20d_000_s0	1,095	9,932	18,014	0,851	1,889	1,298	1,175	-0,407
Q25d_000_s0	1,057	9,927	17,970	0,827	2,841	2,339	2,102	-0,393
Q30d_000_s0	1,311	9,930	18,903	1,288	3,638	3,057	2,802	-0,392
Q35d_000_s0	2,229	9,963	20,148	2,297	4,389	3,874	3,584	0,045
Q40d_000_s0	3,329	10,424	21,047	3,407	4,987	4,633	4,310	0,818
Q45d_000_s0	4,381	11,281	21,907	4,293	5,564	5,302	5,092	1,470
Q50d_000_s0	5,331	12,293	22,774	11,006	6,129	5,940	5,826	2,184
Q20d_000_scavo	1,531	9,896	17,938	3,087	2,017	1,413	0,982	0,081
Q25d_000_scavo	1,428	9,903	18,043	4,418	3,039	2,399	1,909	0,199
Q30d_000_scavo	1,407	9,920	18,988	4,037	3,824	3,257	2,772	0,224
Q35d_000_scavo	2,387	9,891	19,960	2,750	4,503	4,035	3,594	0,340
Q40d_000_scavo	3,331	10,401	20,890	4,295	5,152	4,756	4,375	1,012
Q45d_000_scavo	4,326	11,336	21,757	4,408	5,787	5,400	5,143	1,652
Q50d_000_scavo	5,265	12,233	22,613	5,286	6,417	6,028	6,044	2,319
Q0d_000_y1	4,802	12,051	22,226	4,873	7,537	6,815	6,720	3,038

Tabella 17: Valori misurati prova del 19.03.2026.

I test contrassegnati dalle diciture “s0” e “scavo” sono quelli eseguiti con diversi valori di portata. Al contrario, le rimanenti prove sono state condotte in condizioni idrostatiche, per determinare i valori “zero” di riferimento della cella di carico e dei sensori di pressione con il quale correggere le forze e le pressioni misurate in condizioni dinamiche.

Forza di Drag

I valori della componente di forza F_x , dai quali si ricava l'effettiva forza di drag, misurati dalla cella di carico necessitano di una correzione basata sul valore di riferimento acquisito in condizioni statiche. Nel caso specifico della prova "Q0d_000_y0", lo scostamento registrato risulta minimo, poiché il valore di F_x è pressoché nullo, coincidendo di fatto con la condizione di quiete. Tuttavia, per garantire il massimo rigore analitico, tale scostamento è stato comunque tenuto in considerazione ai fini del calcolo.

Rispetto alle prove del 5 e del 12 marzo, i vincoli geometrici del canale non hanno permesso di eseguire le stesse tipologie di prove in assenza di sedimento intorno alla pila, che permettevano di avere a disposizione i valori di forza depurati della reazione del terreno. Pertanto, al fine di determinare l'effettiva forza di Drag al netto del valore iniziale nelle prove in configurazione di scavo sviluppato, la correzione è stata eseguita sottraendo il valore di F_x registrato durante il test di riferimento "Q0d_000_y0" ai dati acquisiti in tutte le prove condotte alle diverse velocità. In questo modo, è stato possibile elidere l'errore sistematico (offset) iniziale.

Per quanto riguarda invece le configurazioni a scavo nullo, si è stabilito che il valore di forza di Drag relativo alla prima portata di 20 l/s coincidesse con il corrispondente valore misurato alla medesima portata nel caso di scavo libero.

prova	$F_x(N)$	$F_d_cella(N)$
Q0d_000_y0	0,0304	
Q0d_000_2cm	3,0611	
Q20d_000_s0	3,0285	2,8995
Q25d_000_s0	2,4390	2,3101
Q30d_000_s0	2,1172	1,9883
Q35d_000_s0	1,9542	1,8253
Q40d_000_s0	2,0676	1,9387
Q45d_000_s0	2,3325	2,2036
Q50d_000_s0	2,6048	2,4758
Q20d_000_scavo	2,9300	2,8995
Q25d_000_scavo	2,6216	2,5912
Q30d_000_scavo	2,3307	2,3003
Q35d_000_scavo	2,3033	2,2729
Q40d_000_scavo	2,6203	2,5898
Q45d_000_scavo	3,0064	2,9760
Q50d_000_scavo	3,4592	3,4288

Tabella 18: Valore forza di Drag da cella di carico.

Come scritto in precedenza, il calcolo della forza di Drag è stato eseguito anche a partire dai dati misurati dai trasduttori di pressione. Come già descritto nel paragrafo 7.6, i sensori 1-3-4 sono collocati sul lato di monte dell'impalcato, mentre il sensore 8 è posizionato sulla faccia posteriore. Ai fini del calcolo della forza di Drag non è stato utilizzato il sensore 2 posto sulla faccia lato monte del ponte perché non aveva un tirante d'acqua sufficiente nella maggior parte delle prove. Si fa notare che la forza di Drag ricavata dalla cella di carico tiene conto della forza complessiva che agisce sull'impalcato e sulla pila del ponte, mentre la forza misurata dall'integrale delle pressioni considera soltanto la forza agente sulla sovrastruttura del ponte. Tuttavia, le due forze si ritengono confrontabili in quanto l'area d'impatto dell'impalcato è notevolmente maggiore rispetto a quella della pila; di conseguenza, anche la forza di Drag sarà dovuta prevalentemente alla presenza dell'impalcato.

Anche le letture dei sensori di pressione sono state corrette dello “zero” di riferimento. Tale valore è stato calcolato come differenza tra la pressione misurata dal sensore nelle prove ad acqua ferma e la pressione statica teorica.

La pressione teorica gravante sul sensore in condizioni statiche è stata calcolata mediante la formula discussa nel paragrafo 3.8:

$$P_{statica} = \rho \cdot g \cdot \eta$$

I valori di pressione corretti del valore di riferimento sono riportati in Tabella 19.

prova	P1corr(mbar)	P3corr(mbar)	P4corr(mbar)	P8corr(mbar)
Q0d_000_y0				
Q0d_000_2cm				
Q20d_000_s0	0,4228	0,8981	0,1078	0,6757
Q25d_000_s0	0,3844	0,8535	0,0836	0,6895
Q30d_000_s0	0,6390	1,7872	0,5447	0,6914
Q35d_000_s0	1,5561	3,0314	1,5538	1,1282
Q40d_000_s0	2,6568	3,9307	2,6636	1,9008
Q45d_000_s0	3,7084	4,7908	3,5494	2,5525
Q50d_000_s0	4,6582	5,6579	10,2625	3,2669
Q20d_000_scavo	0,8581	0,8217	2,3435	1,1638
Q25d_000_scavo	0,7560	0,9267	3,6742	1,2818
Q30d_000_scavo	0,7347	1,8719	3,2936	1,3066
Q35d_000_scavo	1,7144	2,8434	2,0064	1,4227
Q40d_000_scavo	2,6584	3,7740	3,5519	2,0948
Q45d_000_scavo	3,6534	4,6404	3,6649	2,7351
Q50d_000_scavo	4,5924	5,4963	4,5425	3,4023

Tabella 19: Valori pressione corretti (P1, P3, P4, P8).

La misura dei sensori risulta essere comprensiva del contributo idrostatico e idrodinamico. Per isolare il contributo dinamico, con il quale si calcola la forza di Drag, si sottrae alla misura del sensore il contributo idrostatico, calcolato come:

$$P_{statica} = \rho \cdot g \cdot \eta$$

Dove:

Il parametro η esprime la sommergezza del sensore, determinata in funzione della misura di livello L4. Tale scelta operativa è dettata dal fatto che l'innalzamento del pelo libero a monte dell'impalcato viene computato come un contributo di natura dinamica. Nello specifico, il valore L4 è rilevato a valle del ponte e identifica la condizione di deflusso indisturbato.

prova	P1stat (mbar)	P3stat (mbar)	P4stat (mbar)	P8stat (mbar)	P1din (mbar)	P3din (mbar)	P4din (mbar)	P8din (mbar)
Q0d_000_y0								
Q0d_000_2cm								
Q20d_000_s0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q25d_000_s0	0,0000	0,5271	0,0000	0,0000	0,0000	0,3264	0,0000	0,0000
Q30d_000_s0	0,4773	1,4579	0,4773	0,4773	0,1617	0,3293	0,0674	0,2141
Q35d_000_s0	1,4054	2,3860	1,4054	1,4054	0,1507	0,6453	0,1484	-0,2772
Q40d_000_s0	2,2281	3,2087	2,2281	2,2281	0,4287	0,7220	0,4356	-0,3273
Q45d_000_s0	3,0017	3,9823	3,0017	3,0017	0,7067	0,8085	0,5477	-0,4492
Q50d_000_s0	3,7655	4,7461	3,7655	3,7655	0,8927	0,9119	0,8763	-0,4986
Q20d_000_scavo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q25d_000_scavo	0,0000	0,5189	0,0000	0,0000	0,0000	0,4078	0,0000	0,0000
Q30d_000_scavo	0,4698	1,4504	0,4698	0,4698	0,2649	0,4215	2,8238	0,8368
Q35d_000_scavo	1,3534	2,3340	1,3534	1,3534	0,3610	0,5094	0,6530	0,0693
Q40d_000_scavo	2,1669	3,1475	2,1669	2,1669	0,4915	0,6265	0,4915	-0,0722
Q45d_000_scavo	2,9590	3,9396	2,9590	2,9590	0,6943	0,7008	0,7059	-0,2239
Q50d_000_scavo	3,7182	4,6988	3,7182	3,7182	0,8743	0,7975	0,8243	-0,3159

Tabella 20: Contributo statico e dinamico della misura di pressione.

Si definiscono ora le aree di influenza di ciascun sensore collocato sull'impalcato, definite in base alle caratteristiche geometriche del modello e in base al tirante idrico sui sensori. Per i sensori frontali (1, 3 e 4) il tirante è stato calcolato dal livello misurato a monte dell'impalcato (L2) mentre per il sensore posteriore (8) il tirante è calcolato dal livello misurato sulla faccia lato valle (L3).

prova	Area P1(m2)	Area P3(m2)	Area P4(m2)	Area P8(m2)
Q0d_000_y0				
Q0d_000_2cm				
Q20d_000_s0	0,0020	0,0014	0,0031	0,0058
Q25d_000_s0	0,0041	0,0029	0,0066	0,0122
Q30d_000_s0	0,0055	0,0039	0,0088	0,0164
Q35d_000_s0	0,0073	0,0051	0,0116	0,0205
Q40d_000_s0	0,0090	0,0064	0,0144	0,0248
Q45d_000_s0	0,0108	0,0076	0,0171	0,0290
Q50d_000_s0	0,0123	0,0087	0,0195	0,0330
Q20d_000_scavo	0,0006	0,0004	0,0009	0,0058
Q25d_000_scavo	0,0040	0,0028	0,0064	0,0121
Q30d_000_scavo	0,0055	0,0039	0,0088	0,0166
Q35d_000_scavo	0,0072	0,0051	0,0114	0,0200
Q40d_000_scavo	0,0089	0,0063	0,0142	0,0247
Q45d_000_scavo	0,0106	0,0075	0,0169	0,0292
Q50d_000_scavo	0,0122	0,0086	0,0194	0,0333

Tabella 21: Area influenza sensori di pressione.

La pressione viene considerata costante in ciascuna delle aree di influenza. In Tabella 22 si riportano i contributi di forza dinamica calcolati per ciascun sensore a partire dai rispettivi valori di pressione dinamica e dalle relative aree di influenza.

prova	F1(N)	F3(N)	F4(N)	F8(N)	Fd_press(N)
Q0d_000_y0					
Q0d_000_2cm					
Q20d_000_s0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q25d_000_s0	0,0000	0,0959	0,0000	0,0000	0,0959
Q30d_000_s0	0,0899	0,1293	0,0595	0,3518	0,6305
Q35d_000_s0	0,1102	0,3332	0,1724	-0,5683	0,0474
Q40d_000_s0	0,3893	0,4627	0,6281	-0,8139	0,6662
Q45d_000_s0	0,7634	0,6165	0,9398	-1,3052	1,0145
Q50d_000_s0	1,1013	0,7940	1,7170	-1,6501	1,9621
Q20d_000_scavo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q25d_000_scavo	0,0000	0,1177	0,0000	0,0000	0,1177
Q30d_000_scavo	0,1476	0,1658	2,4995	1,3927	4,2057
Q35d_000_scavo	0,2610	0,2600	0,7500	0,1393	1,4103
Q40d_000_scavo	0,4395	0,3954	0,6980	-0,1788	1,3541
Q45d_000_scavo	0,7410	0,5279	1,1964	-0,6546	1,8108
Q50d_000_scavo	1,0685	0,6880	1,6000	-1,0546	2,3018

Tabella 22: Forze di pressione dinamica parziale e totale.

Come si evince dalla tabella soprastante, il sensore 8 registra valori negativi poiché il suo verso di misura è opposto rispetto a quello dei trasduttori installati a monte dell'impalcato.

Fd_press è stata ricavata sommando i contributi di forza dei diversi sensori:

$$Fd_{press} = F1 + F3 + F4 + F8$$

Il grafico mostra la Forza di Drag determinata mediante i sensori di pressione Fd_press e quella misurata dalla cella di carico Fd_cella, distinguendo tra le due differenti configurazioni: a fondo fisso (“ns”) e a scavo libero (“cs”).

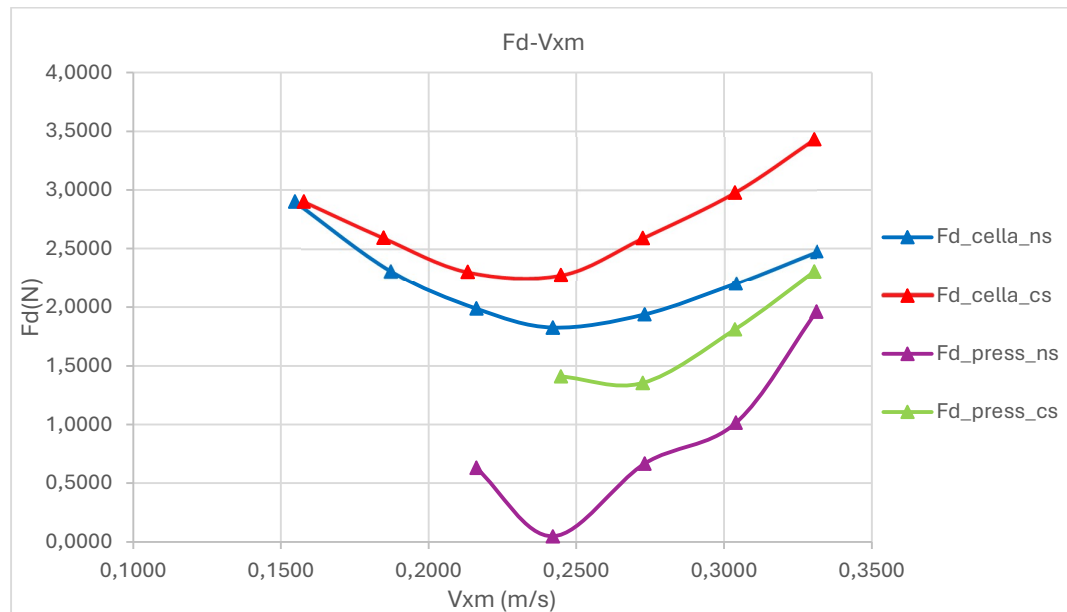


Figura 48: Confronto forze ricavate dalla cella di carico e dai sensori.

I grafici evidenziano alcune dinamiche di particolare rilievo. Innanzitutto, l'andamento delle forze in funzione della velocità presenta un comportamento non monotono: nel primo tratto della curva i valori tendono a diminuire al crescere della velocità, per poi invertire la tendenza e aumentare in modo progressivo. È inoltre opportuno precisare che, per i test condotti alle portate più basse, non sono stati rappresentati i valori di forza derivati dai sensori di pressione (Fd_press); in tali condizioni idrodinamiche, infatti, la mancata e completa sommersione dei trasduttori ha generato misurazioni inattendibili e sfalsate.

Procedendo al confronto complessivo, emerge uno scostamento quantitativo tra le letture della cella di carico e i dati estrapolati dai sensori di pressione. Tuttavia, ambedue gli strumenti confermano che le sollecitazioni nella configurazione a scavo libero risultano superiori rispetto allo scenario a fondo fisso, coerentemente con le prove in deflusso libero del 5 e 12 marzo. La divergenza tra i risultati delle due strumentazioni è

presumibilmente imputabile a molteplici fattori: in primo luogo, alle correzioni introdotte sulle misure della cella di carico, dove è stata imposta l'uguaglianza dei valori dei due test alla portata di 20 l/s. In secondo luogo, la stima derivante dai sensori di pressione si basa su soli quattro punti di misurazione, approssimando la pressione come costante all'interno delle rispettive aree di influenza e omettendo del tutto il contributo fluidodinamico esercitato dalla pila.

Coefficiente di Drag

Il coefficiente di Drag viene stimato applicando la formula seguente, a partire dalla velocità indisturbata a monte dell'impalcato e dalla forza idrodinamica misurata dalla cella di carico:

$$C_D = \frac{2 \cdot F_D}{\rho \cdot A \cdot V_0^2}$$

Il coefficiente di Drag è graficato in funzione dell'*inundation ratio* h^* . Tale parametro è calcolato come:

$$h^* = \frac{\text{Altezza livello acqua dall'intradosso dell'impalcato}}{\text{Altezza dell'impalcato}}$$

prova	Fd_corr(N)	Vxm*(m/s)	Area(m2)	Cd(-)	h*(-)
Q0d_000_y0					
Q0d_000_2cm					
Q20d_000_s0	2,8995				
Q25d_000_s0	2,3101	0,2079	0,0137	7,7922	0,2041
Q30d_000_s0	1,9883	0,2502	0,0183	3,4675	0,2726
Q35d_000_s0	1,8253	0,2914	0,0241	1,7847	0,3585
Q40d_000_s0	1,9387	0,3404	0,0299	1,1189	0,4451
Q45d_000_s0	2,2036	0,3908	0,0356	0,8107	0,5296
Q50d_000_s0	2,4758	0,4395	0,0406	0,6309	0,6047
Q20d_000_scavo	2,8995				
Q25d_000_scavo	2,5912	0,2047	0,0135	9,1783	0,2004
Q30d_000_scavo	2,3003	0,2465	0,0184	4,1232	0,2732
Q35d_000_scavo	2,2729	0,2940	0,0238	2,2073	0,3545
Q40d_000_scavo	2,5898	0,3389	0,0295	1,5310	0,4383
Q45d_000_scavo	2,9760	0,3899	0,0352	1,1136	0,5231
Q50d_000_scavo	3,4288	0,4372	0,0403	0,8910	0,5991

Tabella 23: Coefficiente di Drag e h^* .

La scelta di adottare il parametro (h^* = inundation ratio) è in linea con la metodologia proposta da Kabir et al. (2022) e consente di confrontare i risultati con i dati disponibili in letteratura.

La comparazione tra i risultati del presente studio e quelli presenti in letteratura risulta significativa nonostante le differenze morfologiche. Nello specifico, l'articolo di riferimento analizza impalcati composti da 4 e 6 travi, discostandosi dalla geometria a sezione rettangolare qui impiegata. Il confronto diretto tra queste diverse configurazioni è tuttavia reso possibile dall'uso del coefficiente di drag (C_d): la sua natura adimensionale consente infatti di superare le discrepanze legate alle specifiche forme o alle scale idrauliche dei test, slegandosi dall'entità assoluta delle forze agenti.

La Figura 49 mostra il coefficiente di Drag in funzione di h^* per la prova a fondo fisso (“ns”) e a fondo mobile (“cs”) mentre in Figura 50 i risultati sono confrontati con i risultati di Kabir et al. (2022) e della FHWA (2009).

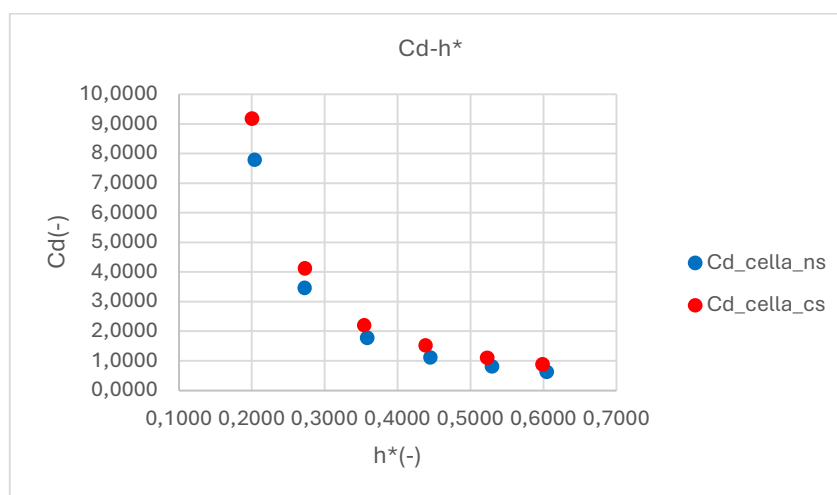


Figura 49: Rappresentazione C_d in funzione di h^* .

In Figura 49 risulta evidente che il coefficiente di Drag diminuisce all’aumentare di h^* ed è maggiore nel caso di fondo mobile rispetto al caso di fondo fisso.

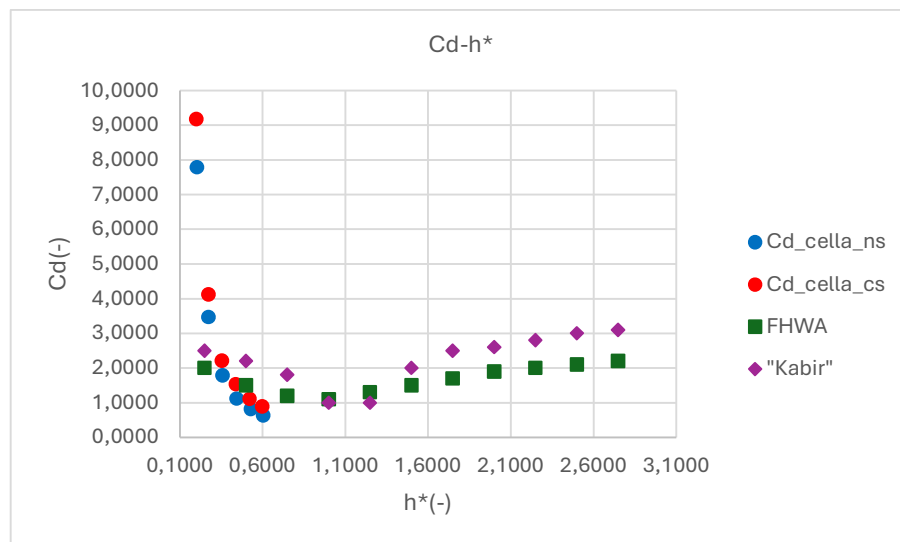


Figura 50: Confronto Cd con risultati di letteratura.

I risultati del presente studio valgono per valori di h^* compresi tra 0,2 e 0,6, quindi sempre minori di 1 poiché il tirante idrico non supera mai l'estradosso dell'impalcato. All'interno di questo intervallo, i valori ottenuti, ad eccezione di quelli riscontrati per valori molto bassi di h^* , mostrano un buon accordo con i risultati di letteratura.

Per completezza si riporta anche l'andamento del coefficiente drag in funzione del numero di Reynolds e del numero di Froude.

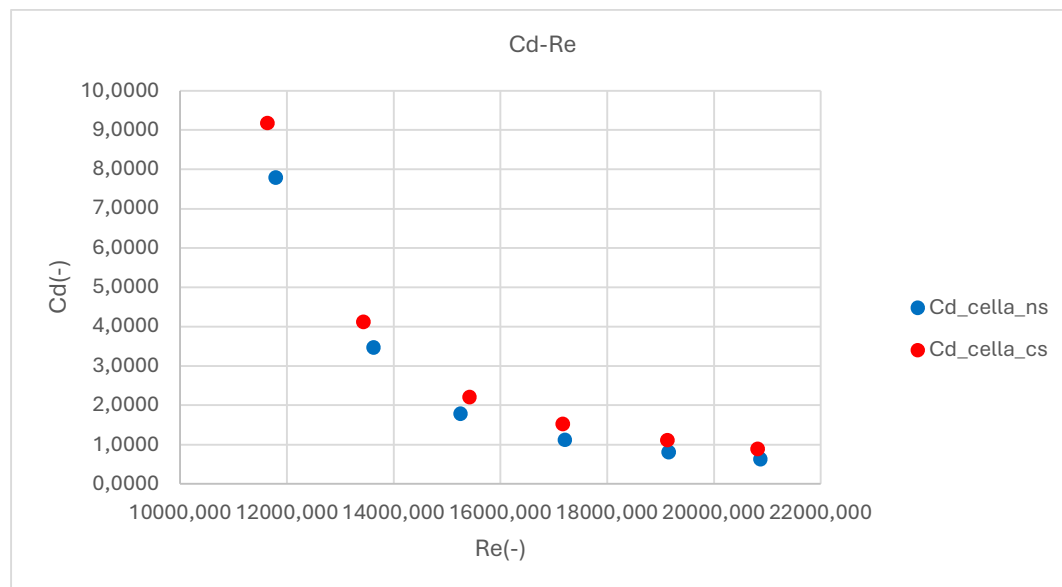


Figura 51: Rappresentazione Cd in funzione del numero di Reynolds.

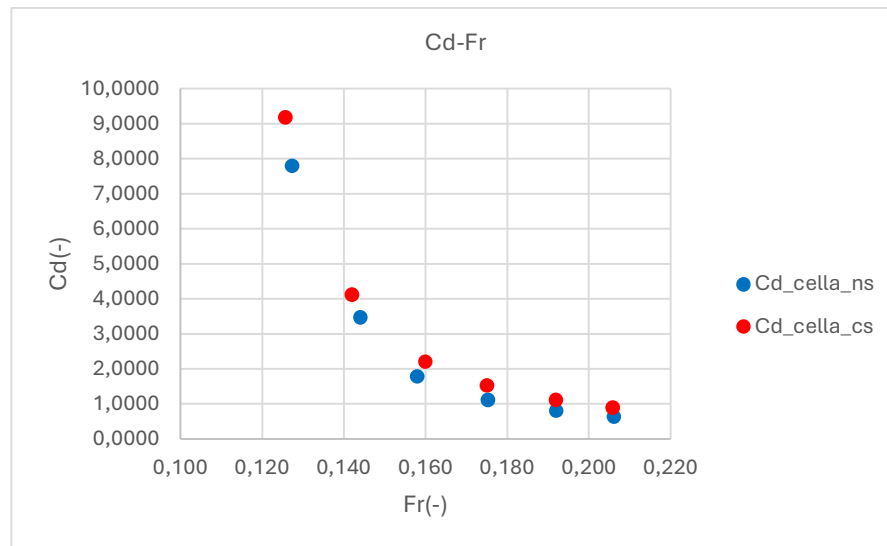


Figura 52: Rappresentazione Cd in funzione del numero di Froude.

Come si evince dalle Figure 51 e 52, il coefficiente di resistenza idrodinamica (C_d) assume valori sistematicamente maggiori nella configurazione a fondo mobile rispetto a quella a fondo fisso. Si osserva, inoltre, una marcata diminuzione del parametro all'aumentare dei numeri di Reynolds e di Froude; nello specifico, il coefficiente subisce una drastica riduzione, passando da un valore iniziale pari a 9 a valori inferiori all'unità.

Forza di Lift

Analogamente a quanto riscontrato per la forza di Drag, i valori della forza F_y misurati dalla cella di carico vanno corretti del valore di riferimento dello zero. Per depurare i dati da questa componente, i valori delle forze registrati in condizioni idrodinamiche sono stati corretti utilizzando i risultati dei test idrostatici. Nello specifico, le prove a fondo fisso sono state corrette tramite il valore di riferimento della prova “Q0d_000_2cm”, eseguita nelle stesse condizioni con il fondo protetto dai tappeti in gomma, mentre i test a scavo libero sono stati corretti mediante la prova “Q0d_000_y0”, dove i tappeti erano stati rimossi. Per le prove a fondo mobile, il valore della forza misurata in direzione y è stato corretto anche dell'incremento di forza (in direzione positiva) dovuto alla rimozione di terreno alla base della pila per effetto dello scavo.

Per quantificare la profondità di scavo da impiegare nei calcoli, il parametro ds_{medio} è stato determinato calcolando la media aritmetica delle tre misurazioni puntuali registrate durante ogni singola prova, ovvero all'inizio, a metà e alla fine del test.

Prova	Fy(N)	FL_corr(N)
Q0d_000_y0	-0,0587	
Q0d_000_2cm	-16,8430	
Q20d_000_s0	-11,1527	5,6903
Q25d_000_s0	3,6793	20,5223
Q30d_000_s0	14,8178	31,6608
Q35d_000_s0	26,0610	42,9040
Q40d_000_s0	35,6712	52,5143
Q45d_000_s0	44,7120	61,5550
Q50d_000_s0	51,7033	68,5463
Q20d_000_scavo	-3,0215	-2,9629
Q25d_000_scavo	7,8820	7,9406
Q30d_000_scavo	19,2775	19,3361
Q35d_000_scavo	30,5009	30,5595
Q40d_000_scavo	40,8941	40,9527
Q45d_000_scavo	51,1819	51,2406
Q50d_000_scavo	62,6026	62,6612

Tabella 24: Valore corretto della forza di Lift.

Come precisato nel Paragrafo 4.3, poiché la forza di lift è generata unicamente dalla componente dinamica, i dati acquisiti dalla cella di carico necessitano di essere depurati dalla spinta idrostatica di Archimede.

$$F_B = f (Vol_{dis}, \rho)$$

Questa componente di galleggiamento è stata valutata considerando un livello idrico pari alla media dei valori misurati a monte e a valle dell'impalcato, rilevati rispettivamente mediante i sensori L_2 e L_3 .

prova	Fy_corr(N)	Vimp(m3)	Vpila(m)	FB(N)	dmedio(m)	Pterrscavato(N)	FL_cella(N)
Q0d_000_y0							
Q0d_000_2cm							
Q20d_000_s0	5,6903	0,0014	0,0005	19,1436			-13,4533
Q25d_000_s0	20,5223	0,0033	0,0005	37,7780			-17,2558
Q30d_000_s0	31,6608	0,0049	0,0005	52,8947			-21,2339
Q35d_000_s0	42,9040	0,0064	0,0005	67,9675			-25,0635
Q40d_000_s0	52,5143	0,0078	0,0005	81,3274			-28,8131
Q45d_000_s0	61,5550	0,0090	0,0005	93,8911			-32,3361
Q50d_000_s0	68,5463	0,0103	0,0005	106,2949			-37,7486
Q20d_000_scavo	-2,9629	0,0014	0,0006	20,1053	0,0120	2,1502	-25,2184
Q25d_000_scavo	7,9406	0,0033	0,0006	38,4282	0,0210	3,7628	-34,2504
Q30d_000_scavo	19,3361	0,0048	0,0006	53,5556	0,0360	6,4505	-40,6699
Q35d_000_scavo	30,5595	0,0063	0,0006	67,9051	0,0545	9,7653	-47,1110
Q40d_000_scavo	40,9527	0,0076	0,0006	81,1167	0,0720	12,9010	-53,0650
Q45d_000_scavo	51,2406	0,0090	0,0006	93,9804	0,0900	16,1263	-58,8661
Q50d_000_scavo	62,6612	0,0102	0,0006	106,3092	0,1060	18,9932	-62,6411

Tabella 25: Forza di Lift da cella di carico.

In Figura 53 si riporta il confronto tra il caso di scavo libero (“cs”) e il caso di fondo fisso (“ns”).

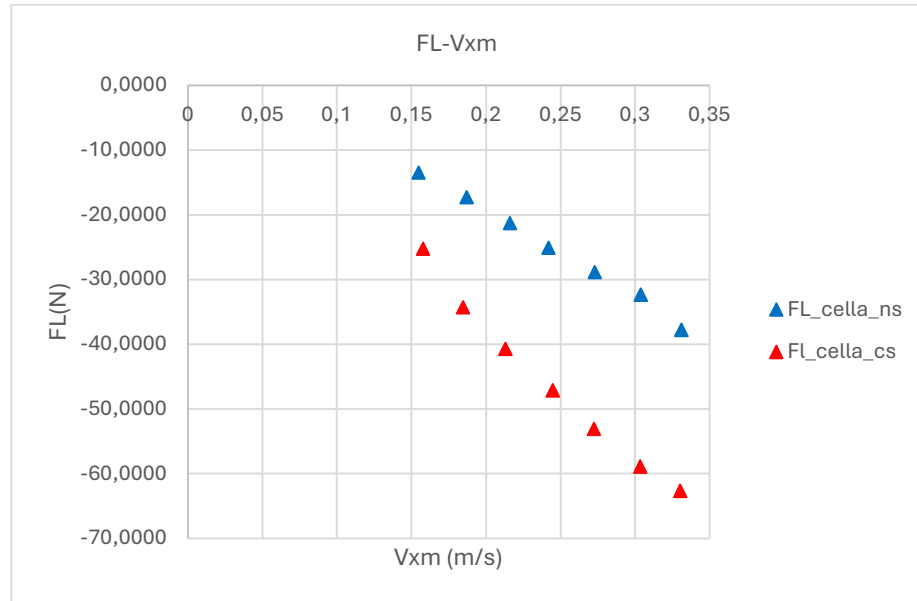


Figura 53: Confronto FL con e senza scavo.

In entrambe le configurazioni la forza di Lift risulta negativa e nella configurazione a scavo libero mostra valori inferiori rispetto al caso a fondo fisso.

Come anticipato in precedenza, la forza di Lift viene stimata anche a partire dalle letture dei sensori di pressione (5-6-7) installati sull'intradosso dell'impalcato. Anche per tali strumenti si rende necessaria la depurazione dell'offset iniziale; la correzione viene calcolata come la differenza tra la pressione idrostatica teorica e quella misurata durante i test ad acqua ferma.

prova	P5corr(mbar)	P6corr(mbar)	P7corr(mbar)
Q0d_000_y0			
Q0d_000_2cm			
Q20d_000_s0	0,9288	1,0597	1,0317
Q25d_000_s0	1,8804	2,1001	1,9587
Q30d_000_s0	2,6773	2,8180	2,6589
Q35d_000_s0	3,4287	3,6354	3,4402
Q40d_000_s0	4,0265	4,3941	4,1667
Q45d_000_s0	4,6036	5,0629	4,9485
Q50d_000_s0	5,1682	5,7014	5,6820
Q20d_000_scavo	1,0559	1,1744	0,8386
Q25d_000_scavo	2,0782	2,1605	1,7659
Q30d_000_scavo	2,8633	3,0179	2,6286
Q35d_000_scavo	3,5425	3,7967	3,4503
Q40d_000_scavo	4,1915	4,5171	4,2320
Q45d_000_scavo	4,8260	5,1613	4,9993
Q50d_000_scavo	5,4566	5,7891	5,9006

Tabella 26: Valori di pressione corretti.

La valutazione della sola componente dinamica, necessaria per determinare l'entità della forza di Lift, si ottiene sottraendo alla pressione totale misurata la componente idrostatica calcolata con il livello medio a monte e a valle dell'impalcato (ovvero il medesimo tirante idrico con cui si è calcolata la forza di galleggiamento). Quest'ultima risulta identica per tutti i trasduttori, essendo essi installati alla medesima quota geometrica sull'impalcato.

prova	P5-P6-P7stat	P5din	P6din	P7din
Q0d_000_y0				
Q0d_000_2cm				
Q20d_000_s0	1,0908	-0,1619	-0,0311	-0,0591
Q25d_000_s0	2,2747	-0,3943	-0,1747	-0,3161
Q30d_000_s0	3,0427	-0,3654	-0,2247	-0,3838
Q35d_000_s0	3,9043	-0,4757	-0,2689	-0,4641
Q40d_000_s0	4,7959	-0,7693	-0,4018	-0,6292
Q45d_000_s0	5,6597	-1,0561	-0,5968	-0,7112
Q50d_000_s0	6,4557	-1,2875	-0,7543	-0,7737
Q20d_000_scavo	0,6865	0,3693	0,4879	0,1521
Q25d_000_scavo	2,2400	-0,1618	-0,0795	-0,4741
Q30d_000_scavo	3,0646	-0,2013	-0,0467	-0,4360
Q35d_000_scavo	3,8449	-0,3024	-0,0481	-0,3946
Q40d_000_scavo	4,7487	-0,5571	-0,2316	-0,5167
Q45d_000_scavo	5,6373	-0,8114	-0,4761	-0,6380
Q50d_000_scavo	6,4481	-0,9915	-0,6590	-0,5476

Tabella 27: Componente idrostatica e idrodinamica della pressione.

L'area di influenza di ciascun sensore, necessaria al calcolo della forza di Lift, si mantiene costante in tutte le prove sperimentali. A differenza di quanto avviene per la forza di Drag, infatti, tale parametro è indipendente dalle variazioni del tirante idrico perché dipende dalla larghezza dell'impalcato e dalla distanza tra i sensori in direzione x.

prova	AreaP7(m2)	FL_press(N)
Q0d_000_y0	0,0546	
Q0d_000_2cm		
	AreaP6(m2)	
Q20d_000_s0	0,0532	-1,3723139
Q25d_000_s0		-4,8080323
Q30d_000_s0	AreaP5(m2)	-5,2858662
Q35d_000_s0	0,0546	-6,5620421
Q40d_000_s0		-9,7732914
Q45d_000_s0		-12,824999
Q50d_000_s0		-15,266832
Q20d_000_scavo		5,44253045
Q25d_000_scavo		-3,8953383
Q30d_000_scavo		-3,7280066
Q35d_000_scavo		-4,0618791
Q40d_000_scavo		-7,0953361
Q45d_000_scavo		-10,446665
Q50d_000_scavo		-11,909249

Tabella 28: Area influenza e forza di Lift.

In Figura 54 viene mostrato il confronto tra i valori della forza di Lift ricavati dalle misurazioni della cella di carico e quelli ottenuti tramite i sensori di pressione.

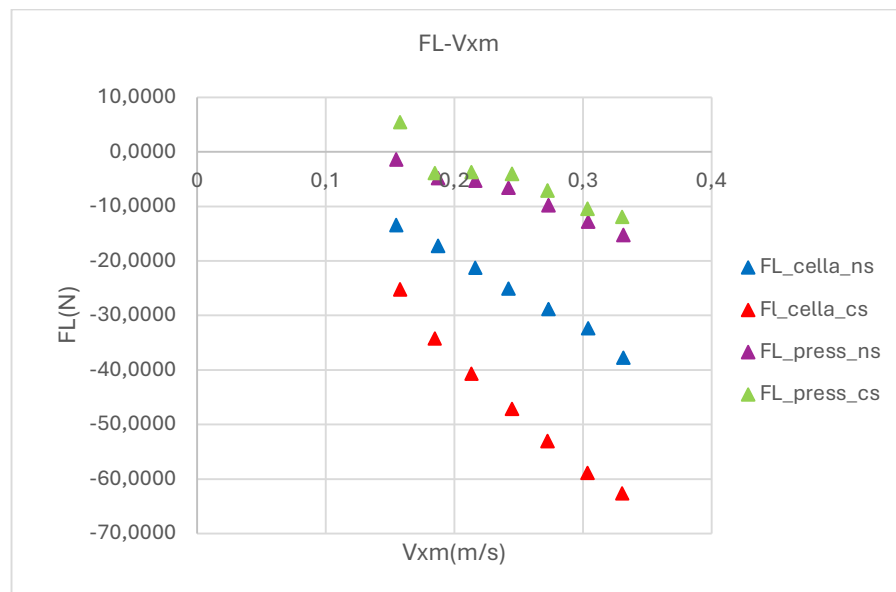


Figura 54: Confronto FL da cella di carico e sensori di pressione.

I dati acquisiti tramite le due differenti metodologie di indagine evidenziano uno scostamento significativo; in particolare, le forze stimate mediante i sensori di pressione presentano valori assoluti nettamente inferiori. In stretta analogia con le misurazioni della cella di carico, anche i dati restituiti dai sensori di pressione si mantengono pressoché costantemente in campo negativo. Tali misurazioni confermano inoltre la tendenza già osservata: la configurazione a scavo libero è associata a valori algebricamente inferiori (e dunque maggiori in modulo) rispetto allo scenario a fondo fisso.

Coefficiente di Lift

Il coefficiente di Lift viene stimato applicando la formula successiva, a partire dalla velocità indisturbata misurata a monte dell'impalcato e dalla forza idrodinamica misurata dai sensori di pressione, perché ritenuta più affidabile:

$$C_L = \frac{2 \cdot F_L}{\rho \cdot A \cdot V_0^2}$$

Il coefficiente di Lift è stato graficato in funzione dell'*inundation ratio* h^* :

$$h^* = \frac{\text{Altezza livello acqua dall'intradosso dell'impalcato}}{\text{Altezza dell'impalcato}}$$

prova	FL_press	Vxm*(m/s)	CL(-)	h*(-)
Q0d_000_y0				
Q0d_000_2cm				
Q20d_000_s0	-1,3723			0,0984
Q25d_000_s0	-4,8080	0,2079	-0,1397	0,2041
Q30d_000_s0	-5,2859	0,2502	-0,1060	0,2726
Q35d_000_s0	-6,5620	0,2914	-0,0971	0,3585
Q40d_000_s0	-9,7733	0,3404	-0,1059	0,4451
Q45d_000_s0	-12,8250	0,3908	-0,1054	0,5296
Q50d_000_s0	-15,2668	0,4395	-0,0993	0,6047
Q20d_000_scavo	5,4425			0,0296
Q25d_000_scavo	-3,8953	0,2047	-0,1167	0,2004
Q30d_000_scavo	-3,7280	0,2465	-0,0770	0,2732
Q35d_000_scavo	-4,0619	0,2940	-0,0590	0,3545
Q40d_000_scavo	-7,0953	0,3389	-0,0776	0,4383
Q45d_000_scavo	-10,4467	0,3899	-0,0863	0,5231
Q50d_000_scavo	-11,9092	0,4372	-0,0782	0,5991

Tabella 29: Coefficiente di Lift e h^* .

In Figura 55 il coefficiente di Lift è plottato in funzione di h^* mentre in Figura 56 i valori ottenuti vengono confrontati con i dati di letteratura di Kabir et al. (2022) e della FHWA (2009).

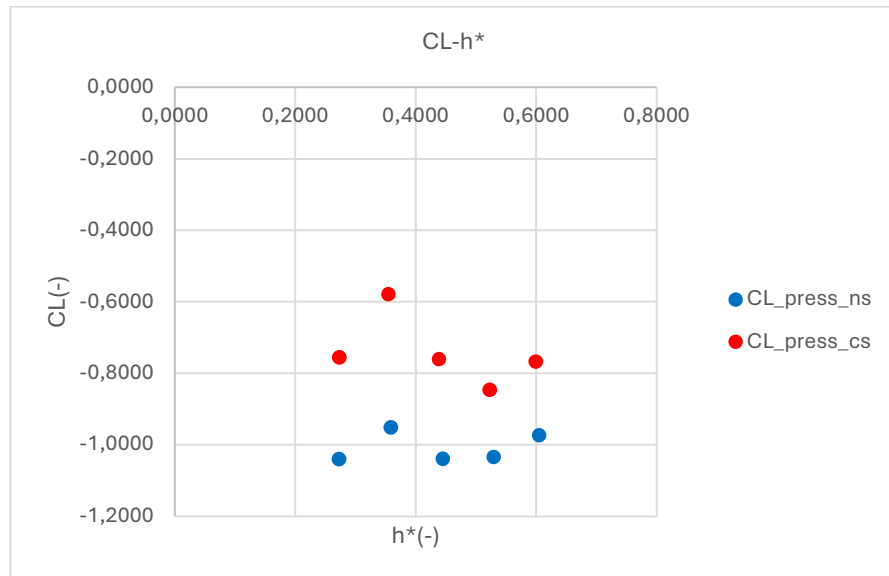


Figura 55: CL in condizione di fondo fisso ("ns") e scavo libero ("cs").

Il coefficiente di Lift risulta sempre negativo ed è maggiore nel caso di scavo libero rispetto al caso di fondo fisso.

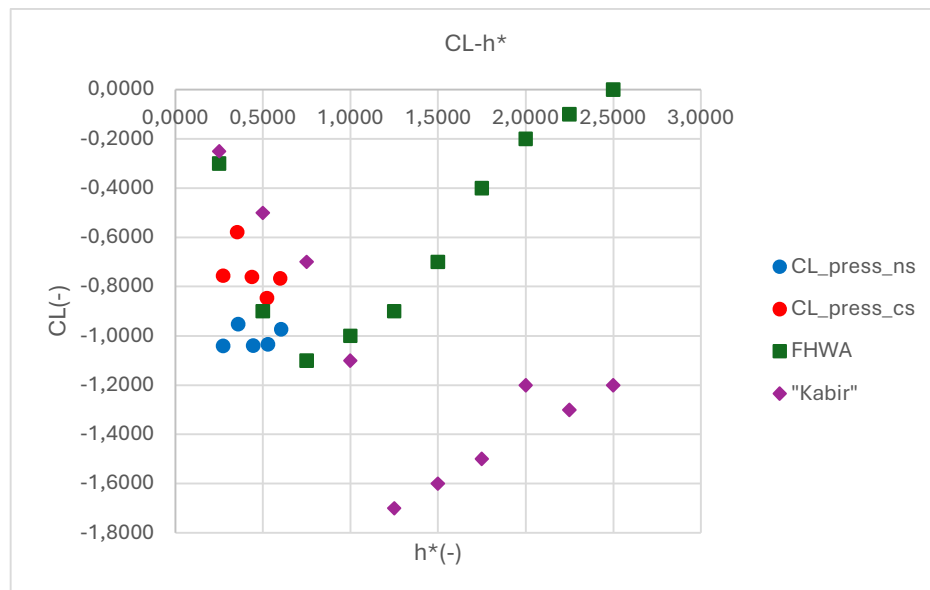


Figura 56: Confronto CL con risultati di letteratura.

Come riscontrato per il coefficiente di resistenza (Drag), l'analisi del coefficiente di portanza (Lift) ha evidenziato un lieve scostamento rispetto ai risultati riportati nello studio di Kabir et al. (2022). È tuttavia interessante notare come gli stessi dati di Kabir et al. (2022) si discostino dai valori presentati nelle linee guida della FHWA (Federal Highway Administration).

In conclusione, si riporta anche l'andamento del coefficiente Lift in funzione del numero di Reynolds e del numero di Froude.

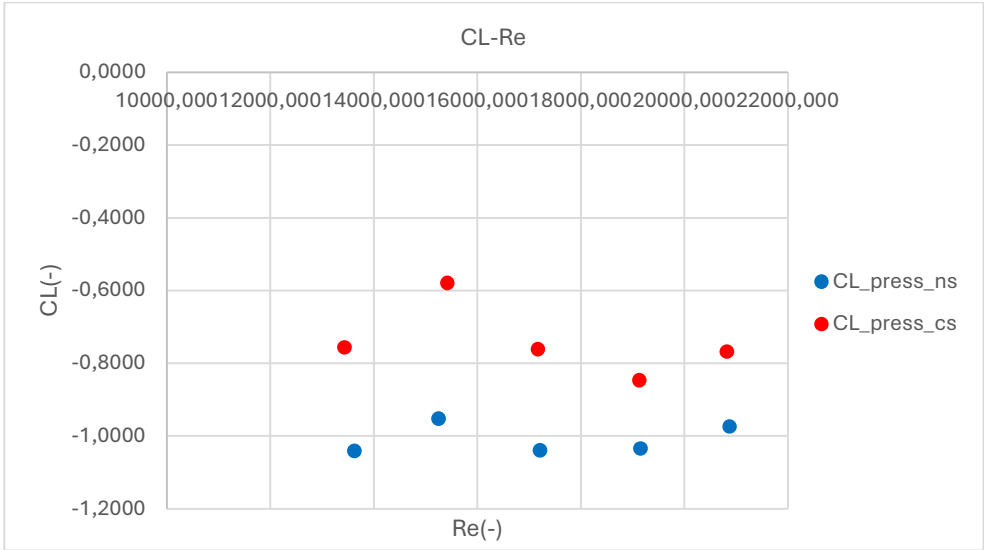


Figura 57: Rappresentazione CL in funzione del numero di Reynolds.

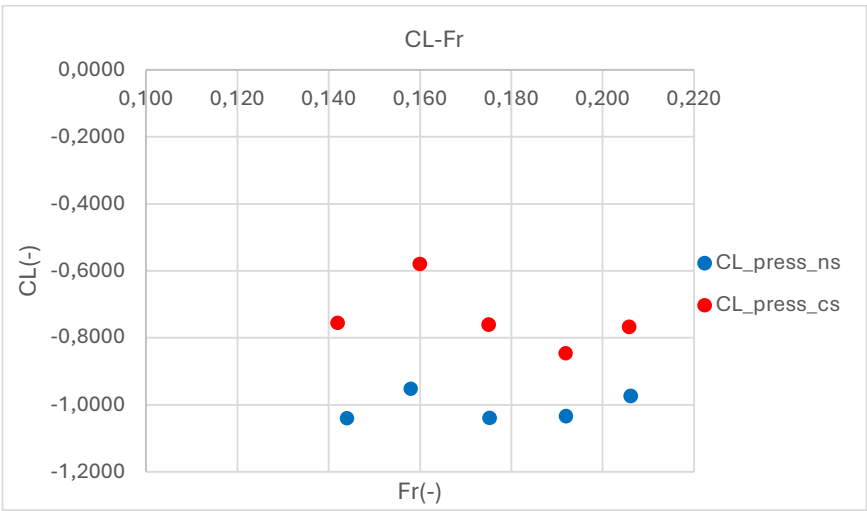


Figura 58: Rappresentazione CL in funzione del numero di Froude.

Come si evince dalle Figure 57 e 58, il coefficiente di portanza (CL) varia all'interno dell'intervallo compreso tra -0,6 e -1,1. In particolare, dall'analisi dei grafici in funzione dei numeri di Reynolds e di Froude, emerge che tale parametro assume sistematicamente valori maggiori (ossia minori in modulo) nella configurazione a fondo mobile rispetto a quella a fondo fisso.

9.7 Analisi prove del 26.03.2026

Le prove del 26 marzo prevedevano una configurazione a ponte in pressione, con paratoia di valle di altezza 0,358 m (prove indicate con “c”); tali condizioni al contorno garantiscono velocità longitudinali maggiori rispetto alle prove del 19 marzo descritte al paragrafo 9.6.

Le prove prevedevano due differenti configurazioni: una prima serie di acquisizioni effettuate a fondo fisso (configurazione indicata come “s0”), seguita da una seconda serie di prove a scavo libero (configurazione “scavo”).

Come già evidenziato per le prove precedenti, l'impossibilità di stabilire a priori i coefficienti di portanza (Lift) e di resistenza (Drag) ha precluso un confronto diretto tra i valori misurati e quelli teorici. Per aumentare l'affidabilità e la robustezza dei risultati sperimentali, la forza di drag e la forza di lift sono state determinate mediante due metodologie di misura indipendenti: una misura diretta tramite cella di carico e una misura indiretta ricavata dai sensori di pressione. Il confronto tra i valori ottenuti con entrambe le tecniche ha consentito di verificare la coerenza delle misure e di incrementare la confidenza nei risultati sperimentali.

Le grandezze misurate durante le varie prove sono riportate In Tabella 30.

prova	Q(l/s)	L1(m)	L0(m)	L2(m)	L3(m)	L4(m)	Vxm(m/s)	Fx(N)	Fy(N)
Q0c_000_y0	0,0226	0,7002	0,6920	0,2973	0,2985	0,6933	-0,0039	0,8385	1,6032
Q0c_000_y0_tapp	0,0229	-0,0005	-0,0004	0,0000	-0,0003	0,0005	-0,0067	1,1625	-3,3750
Q0c_000_y1	0,0226	0,1174	0,1167	0,1182	0,1180	0,1165	-0,0035	1,1454	-1,8504
Q0c_000_y2	0,0224	0,2653	0,2630	0,2645	0,2641	0,2630	-0,0088	-1,7101	71,9126
Q25c_000_s0	24,9369	0,2002	0,1982	0,2012	0,1996	0,1976	0,2057	3,1845	-10,0230
Q30c_000_s0	30,0542	0,2110	0,2086	0,2127	0,2090	0,2077	0,2384	2,7288	-0,9404
Q35c_000_s0	34,9556	0,2203	0,2178	0,2227	0,2174	0,2164	0,2692	2,4184	8,1523
Q40c_000_s0	40,0907	0,2300	0,2272	0,2312	0,2252	0,2250	0,2995	2,2573	16,6078
Q45c_000_s0	45,0569	0,2389	0,2360	0,2399	0,2309	0,2329	0,3305	2,3666	24,2286
Q50c_000_s0	49,8842	0,2472	0,2442	0,2494	0,2360	0,2401	0,3512	2,5324	30,4985
Q55c_000_s0	55,0979	0,2563	0,2533	0,2589	0,2428	0,2477	0,3801	2,8975	38,4020
Q60c_000_s0	59,8617	0,2644	0,2612	0,2692	0,2489	0,2543	0,4017	3,4821	44,0562
Q65c_000_s0	64,7587	0,2730	0,2695	0,2757	0,2554	0,2612	0,4209	4,2543	50,8630
Q0c_000_y3	0,0227	0,1253	0,1244	0,1262	0,1262	0,1243	0,0042	2,3086	-13,6684
Q25c_000_scavo	24,7909	0,2002	0,1980	0,2014	0,1997	0,1972	0,2096	2,6056	-12,2438
Q30c_000_scavo	30,0010	0,2103	0,2081	0,2124	0,2093	0,2069	0,2393	2,3474	-3,4287
Q35c_000_scavo	34,8901	0,2202	0,2175	0,2226	0,2182	0,2161	0,2715	2,1421	6,6810
Q40c_000_scavo	40,0061	0,2295	0,2270	0,2309	0,2260	0,2248	0,2993	2,1466	16,0957
Q45c_000_scavo	44,9334	0,2381	0,2355	0,2393	0,2316	0,2325	0,3298	2,2665	25,5105
Q50c_000_scavo	49,8314	0,2466	0,2438	0,2487	0,2375	0,2401	0,3587	2,5540	35,7242
Q55c_000_scavo	55,0433	0,2551	0,2521	0,2579	0,2449	0,2476	0,3807	3,0625	46,0867
Q60c_000_scavo	59,8674	0,2628	0,2597	0,2681	0,2544	0,2544	0,4053	3,6039	56,4428
Q65c_000_scavo	64,8207	0,2707	0,2674	0,2752	0,2600	0,2611	0,4285	4,0813	67,0582
Q0c_000_y4	0,0231	0,1253	0,1245	0,1267	0,1264	0,1246	-0,0099	3,2764	-14,4110

prova	P1(mbar)	P2(mbar)	P3(mbar)	P4(mbar)	P5(mbar)	P6(mbar)	P7(mbar)	P8(mbar)
Q0c_000_y0	1,0841	11,2543	19,5137	0,9094	0,5222	0,0104	-0,1174	-0,3711
Q0c_000_y0_tapp	0,9713	11,2014	19,5682	0,9616	0,4846	-0,0125	-0,0821	-0,3410
Q0c_000_y1	1,0294	11,3253	19,4904	0,9462	0,4209	0,0271	-0,0689	-0,3985
Q0c_000_y2	4,4099	12,9224	23,5924	4,5779	7,0749	6,4855	6,4960	2,9446
Q25c_000_s0	0,9785	11,2447	19,5124	0,9445	1,0173	0,3921	0,0209	0,0862
Q30c_000_s0	0,9769	11,2493	19,4952	0,9511	1,9330	0,9763	0,7319	0,0938
Q35c_000_s0	0,9756	11,2575	19,4747	0,9481	2,6579	1,6025	1,4060	0,1001
Q40c_000_s0	1,1276	11,2750	20,3889	1,2139	3,1437	2,3236	2,2018	0,1082
Q45c_000_s0	2,0391	11,2658	21,2435	2,1521	3,6049	2,9971	2,8958	0,0680
Q50c_000_s0	3,0138	11,5655	22,0762	3,0349	4,0548	3,6391	3,5839	0,4008
Q55c_000_s0	4,0386	12,4982	23,0126	4,0693	4,5946	4,3491	4,4189	1,0549
Q60c_000_s0	4,8605	13,3454	23,7972	4,9507	5,0323	4,8871	4,9271	1,5778
Q65c_000_s0	5,7009	14,1875	24,5984	5,8441	5,4855	5,4484	5,5625	2,1434
Q0c_000_y3	1,4656	11,2474	19,8625	1,2564	0,4994	-0,0042	0,5819	-0,3438
Q25c_000_scavo	1,4240	11,2345	19,9425	1,2890	0,8552	0,4907	0,2889	-0,3387
Q30c_000_scavo	1,4088	11,2745	19,9507	1,3308	1,6863	1,3140	1,1139	-0,3643
Q35c_000_scavo	1,3851	11,2928	19,8040	1,2958	2,4203	2,0640	1,9011	-0,3693
Q40c_000_scavo	1,2161	11,3067	20,5887	1,3873	2,9816	2,8358	2,6941	-0,3831
Q45c_000_scavo	2,0948	11,2852	21,4204	2,2014	3,5145	3,5229	3,4144	-0,3809
Q50c_000_scavo	3,0099	11,5377	22,2293	3,0543	4,0852	4,1491	4,1473	0,3121
Q55c_000_scavo	3,9591	12,4676	23,0740	3,9857	4,6967	4,7768	4,8824	1,0413
Q60c_000_scavo	4,8238	13,2351	23,8302	4,8215	5,2868	5,3257	5,5769	1,7265
Q65c_000_scavo	5,6533	14,0480	24,5815	5,6505	5,9025	5,8775	6,2612	2,4320
Q0c_000_y4	1,2674	11,2430	19,7133	1,1357	1,0181	0,0007	-0,0390	0,0308

Tabella 30: Valori misurati prova del 26.03.2026

Forza di Drag

In analogia alla prova del 19 marzo, i valori della componente di forza F_x , dai quali si ricava l'effettiva forza di drag, misurati dalla cella di carico necessitano di una correzione basata sul valore di riferimento acquisito in condizioni statiche.

Al fine di determinare l'effettiva forza di Drag al netto del valore iniziale nelle prove in configurazione di scavo nullo, la correzione è stata eseguita sottraendo il valore di F_x registrato durante il test di riferimento "Q0d_000_y1" ai dati acquisiti in tutte le prove condotte alle diverse velocità. In questo modo, è stato possibile elidere l'errore sistematico (offset) iniziale.

Per quanto riguarda invece le configurazioni a scavo sviluppato, si è stabilito che il valore di forza di Drag relativo alla prima portata di 25 l/s coincidesse con il corrispondente valore misurato alla medesima portata nel caso di scavo nullo.

prova	$F_x(N)$	$F_d_cella(N)$
Q0c_000_y0	1,6033	
Q0c_000_y0_tapp	-3,3751	
Q0c_000_y1	-1,8505	
Q0c_000_y2	71,9127	
Q25c_000_s0	-10,0230	2,0391
Q30c_000_s0	-0,9404	1,5833
Q35c_000_s0	8,1524	1,2729
Q40c_000_s0	16,6079	1,1119
Q45c_000_s0	24,2286	1,2212
Q50c_000_s0	30,4985	1,3870
Q55c_000_s0	38,4020	1,7521
Q60c_000_s0	44,0562	2,3366
Q65c_000_s0	50,8631	3,1089
Q0c_000_y3	-13,6685	
Q25c_000_scavo	-12,2438	2,0391
Q30c_000_scavo	-3,4287	1,7810
Q35c_000_scavo	6,6810	1,5757
Q40c_000_scavo	16,0957	1,5802
Q45c_000_scavo	25,5106	1,7000
Q50c_000_scavo	35,7243	1,9876
Q55c_000_scavo	46,0868	2,4961
Q60c_000_scavo	56,4429	3,0375
Q65c_000_scavo	67,0583	3,5149

Tabella 31: Valore forza di Drag da cella di carico.

In conformità con quanto fatto precedentemente per la prova del 19 marzo, la determinazione della forza di resistenza (Drag) è stata effettuata anche a partire dai

dati misurati dai trasduttori di pressione. Anche per i sensori di pressione, i valori misurati durante le prove sono stati corretti dell'offset di zero.

Tale correzione è stata fatta seguendo la stessa procedura adottata nella sezione 9.6 relativa alle prove del 19 marzo.

prova	P1corr (mbar)	P3corr (mbar)	P4corr (mbar)	P8corr (mbar)
Q0c_000_y0				
Q0c_000_y0_tapp				
Q0c_000_y1				
Q0c_000_y2	3,8732	4,8538	3,8732	3,8370
Q25c_000_s0	0,4418	0,7738	0,2398	0,9786
Q30c_000_s0	0,4402	0,7566	0,2464	0,9861
Q35c_000_s0	0,4389	0,7361	0,2434	0,9925
Q40c_000_s0	0,5909	1,6504	0,5092	1,0005
Q45c_000_s0	1,5024	2,5049	1,4475	0,9603
Q50c_000_s0	2,4771	3,3377	2,3302	1,2932
Q55c_000_s0	3,5019	4,2740	3,3646	1,9472
Q60c_000_s0	4,3238	5,0586	4,2460	2,4702
Q65c_000_s0	5,1642	5,8598	5,1394	3,0358
Q0c_000_y3				
Q25c_000_scavo	0,8873	1,2039	0,5843	0,5536
Q30c_000_scavo	0,8721	1,2121	0,6262	0,5281
Q35c_000_scavo	0,8484	1,0654	0,5911	0,5231
Q40c_000_scavo	0,6794	1,8501	0,6826	0,5092
Q45c_000_scavo	1,5581	2,6818	1,4968	0,5115
Q50c_000_scavo	2,4732	3,4908	2,3496	1,2044
Q55c_000_scavo	3,4224	4,3354	3,2810	1,9336
Q60c_000_scavo	4,2871	5,0916	4,1168	2,6189
Q65c_000_scavo	5,1166	5,8429	4,9458	3,3244

Tabella 32: Valori pressioni corretti dell'errore iniziale.

La valutazione della componente dinamica di pressione, utile al calcolo del coefficiente di Drag, viene effettuata sottraendo al valore di pressione totale misurato il contributo della pressione idrostatica calcolata sulla base del livello L4.

In Tabella 33, i valori di pressione dei sensori P1, P4 e P8 per le portate da 25 a 40 l/s sono stati omessi in quanto, per le portate più basse, i sensori avevano un tirante idrico praticamente nullo e si ritiene che tali misure di pressione non siano affidabili. Il calcolo della forza di Drag dalle pressioni è stato quindi eseguito solo per le portate da 45 a 65 l/s.

prova	P1stat (mbar)	P3stat (mbar)	P4stat (mbar)	P8stat (mbar)	P1din (mbar)	P3din (mbar)	P4din (mbar)	P8din (mbar)
Q0c_000_y0								
Q0c_000_y0_tapp								
Q0c_000_y1								
Q0c_000_y2	3,8732	4,8538	3,8732	3,8370	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q25c_000_s0								
Q30c_000_s0								
Q35c_000_s0		0,1330				0,6031		
Q40c_000_s0		0,9803				0,6701		
Q45c_000_s0	0,7704	1,7510	0,7704	0,7704	0,7320	0,7539	0,6770	0,1899
Q50c_000_s0	1,4761	2,4567	1,4761	1,4761	1,0010	0,8809	0,8541	-0,1829
Q55c_000_s0	2,2258	3,2064	2,2258	2,2258	1,2762	1,0676	1,1389	-0,2785
Q60c_000_s0	2,8739	3,8545	2,8739	2,8739	1,4498	1,2041	1,3721	-0,4038
Q65c_000_s0	3,5460	4,5266	3,5460	3,5460	1,6182	1,3332	1,5934	-0,5103
Q0c_000_y3								
Q25c_000_scavo								
Q30c_000_scavo								
Q35c_000_scavo		0,1108				0,9546		
Q40c_000_scavo		0,9655				0,8846		
Q45c_000_scavo	0,7392	1,7198	0,7392	0,7392	0,8189	0,9620	0,7575	-0,2278
Q50c_000_scavo	1,4837	2,4643	1,4837	1,4837	0,9896	1,0265	0,8659	-0,2793
Q55c_000_scavo	2,2206	3,2012	2,2206	2,2206	1,2018	1,1342	1,0604	-0,2870
Q60c_000_scavo	2,8867	3,8673	2,8867	2,8867	1,4004	1,2243	1,2301	-0,2679
Q65c_000_scavo	3,5367	4,5173	3,5367	3,5367	1,5799	1,3256	1,4091	-0,2123

Tabella 33: Componente idrostatica e idrodinamica della pressione misurata.

La determinazione della forza di resistenza (Drag) a partire dalle letture dei trasduttori di pressione richiede la definizione preliminare dell'area di influenza associata a ciascun sensore; su tale superficie, la pressione dinamica viene assunta come uniformemente distribuita.

Il calcolo delle aree di influenza è analogo a quello applicato alle prove del 19 marzo. In Tabella 34 sono riportati i contributi di forza dinamica relativi a ciascun sensore, calcolati moltiplicando l'area di influenza per la pressione dinamica. Dalla somma dei 4 contributi si ottiene la forza di Drag risultante F_{d_press} .

prova	F1din(N)	F3din(N)	F4din(N)	F8din(N)	Fd_press(N)
Q25c_000_s0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q30c_000_s0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q35c_000_s0	0,0000	0,1643	0,0000	0,0000	0,1643
Q40c_000_s0	0,0000	0,2512	0,0000	0,0000	0,2512
Q45c_000_s0	0,4962	0,3607	0,7289	0,3282	1,9140
Q50c_000_s0	0,8411	0,5225	1,1398	-0,3690	2,1344
Q55c_000_s0	1,2776	0,7545	1,8108	-0,6668	3,1761
Q60c_000_s0	1,7061	1,0002	2,5643	-1,1056	4,1649
Q65c_000_s0	2,0830	1,2114	3,2576	-1,5818	4,9703
Q0c_000_y3					
Q25c_000_scavo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q30c_000_scavo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Q35c_000_scavo	0,0000	0,2583	0,0000	0,0000	0,2583
Q40c_000_scavo	0,0000	0,3284	0,0000	0,0000	0,3284
Q45c_000_scavo	0,5475	0,4540	0,8045	-0,4031	1,4030
Q50c_000_scavo	0,8201	0,6005	1,1397	-0,5859	1,9744
Q55c_000_scavo	1,1838	0,7886	1,6589	-0,7215	2,9097
Q60c_000_scavo	1,6212	1,0005	2,2618	-0,8166	4,0670
Q65c_000_scavo	2,0184	1,1954	2,8592	-0,7128	5,3601

Tabella 34: Valori forza di Drag da sensori di pressione.

Il grafico in Figura 59 mostra il confronto tra la forza di Drag determinata mediante i sensori di pressione Fd_press con quella rilevata dalla cella di carico Fd_cella , distinguendo tra le due differenti configurazioni d'indagine: a fondo fisso e a scavo libero.

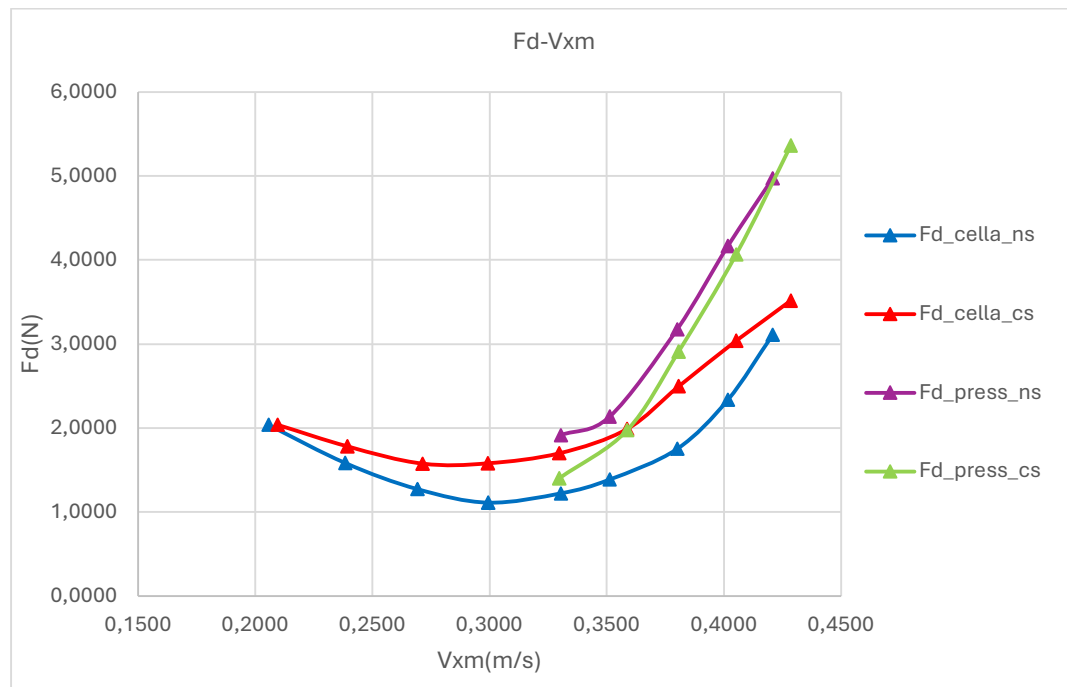


Figura 59: Confronto Fd , da cella di carico e da sensori, con e senza scavo.

I risultati ottenuti dalle misure della cella di carico mostrano un buon accordo con quelli desunti dai trasduttori di pressione, soprattutto per le portate di 45 e 50 l/s.

Analizzando le misure dirette effettuate con la cella di carico, gli andamenti delle curve per le configurazioni con e senza scavo hanno un andamento simile a quello osservato per la sessione del 19 marzo: per le portate più basse i valori di forza diminuiscono all'aumentare della velocità fino a raggiungere un valore minimo, per portate maggiori la forza di Drag aumenta con la velocità. Inoltre, come visto nelle prove del 19 marzo, la forza assume valori maggiori nella condizione di scavo libero.

Per quanto concerne invece le curve ricavate per via indiretta dai sensori di pressione, si riscontra un comportamento parzialmente dissimile in quanto la forza risulta maggiore nel caso di fondo fisso rispetto al caso di fondo mobile; all'aumentare della portata idrica, la distanza tra le due curve diminuisce.

Coefficiente di Drag

Il coefficiente di Drag viene stimato analogamente alle analisi descritte ai paragrafi precedenti, dai valori di forza di Drag ottenuti dalla cella di carico. È stato calcolato inoltre il valore di h^* , utile per rappresentare C_d e confrontarlo anche in questo caso con i valori ricavati da Kabir et al. (2022).

prova	Fd_cella(N)	Vxm*(m/s)	Area(m2)	Cd(-)	h*(-)
Q25c_000_s0	2,0391				
Q30c_000_s0	1,5833				
Q35c_000_s0	1,2729	0,2943	0,0127	2,3121	0,1891
Q40c_000_s0	1,1119	0,3408	0,0175	1,0945	0,2603
Q45c_000_s0	1,2212	0,3895	0,0223	0,7210	0,3323
Q50c_000_s0	1,3870	0,4272	0,0277	0,5492	0,4119
Q55c_000_s0	1,7521	0,4778	0,0330	0,4654	0,4907
Q60c_000_s0	2,3366	0,5191	0,0388	0,4473	0,5768
Q65c_000_s0	3,1089	0,5604	0,0424	0,4670	0,6310
Q0c_000_y3					
Q25c_000_scavo	2,0391				
Q30c_000_scavo	1,7810				
Q35c_000_scavo	1,5757	0,2966	0,0126	2,8363	0,1879
Q40c_000_scavo	1,5802	0,3400	0,0173	1,5783	0,2578
Q45c_000_scavo	1,7000	0,3875	0,0220	1,0279	0,3278
Q50c_000_scavo	1,9876	0,4352	0,0273	0,7689	0,4062
Q55c_000_scavo	2,4961	0,4764	0,0324	0,6780	0,4828
Q60c_000_scavo	3,0375	0,5208	0,0381	0,5873	0,5675
Q65c_000_scavo	3,5149	0,5657	0,0421	0,5219	0,6263

Tabella 35: Calcolo coefficiente di Drag.

I valori delle prove con portata di 25 e 30 l/s sono stati omessi in quanto fornivano valori elevati del coefficiente di Drag, i quali avrebbero reso difficile la lettura del grafico in Figura 61.

Il grafico in Figura 60 riporta i valori del coefficiente di Drag in funzione di h^* per le prove a fondo fisso ("ns") e per le prove a scavo libero ("cs").

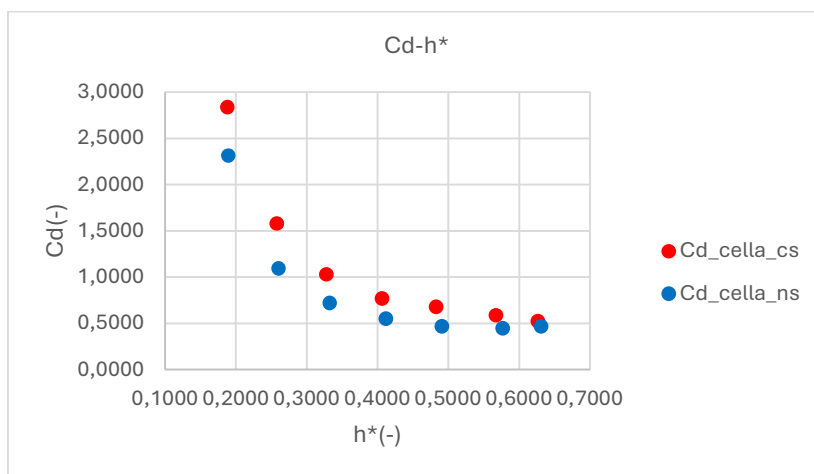


Figura 60: Confronto C_d con e senza scavo.

In Figura 60 risulta evidente che il coefficiente di Drag diminuisce all'aumentare di h^* ed è maggiore nel caso di fondo mobile rispetto al caso di fondo fisso. Tale andamento fornisce un'ulteriore conferma sperimentale a quanto già dedotto e descritto all'interno del precedente paragrafo 9.6.

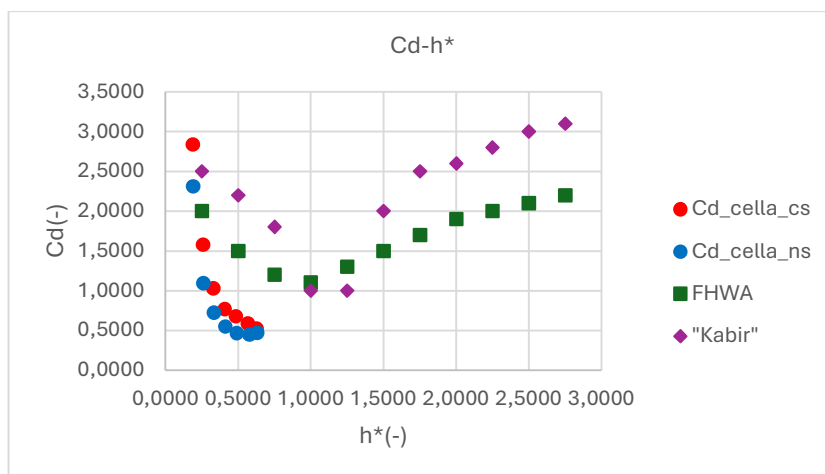


Figura 61: Confronto C_d con risultati di letteratura.

Il grafico in Figura 61 evidenzia che i valori ottenuti nel presente lavoro sperimentale risultano inferiori rispetto a quelli documentati sia nelle linee guida della FHWA (2009), sia nelle ricerche condotte da Kabir et al. (2022). Ciononostante, il coefficiente di Drag tende a diminuire in funzione di h^* in analogia con gli andamenti descritti nella letteratura per valori di h^* inferiori a 1 (assenza di sormonto). La discrepanza con i valori di letteratura può essere ragionevolmente attribuita alle procedure di correzione applicate inizialmente sui dati grezzi per compensare l'offset di zero.

A completamento dell'indagine sperimentale e per esaustività di trattazione, viene infine riportato l'andamento del coefficiente di resistenza (Drag, C_d) diagrammato in funzione del numero di Reynolds (Re) e del numero di Froude (Fr).

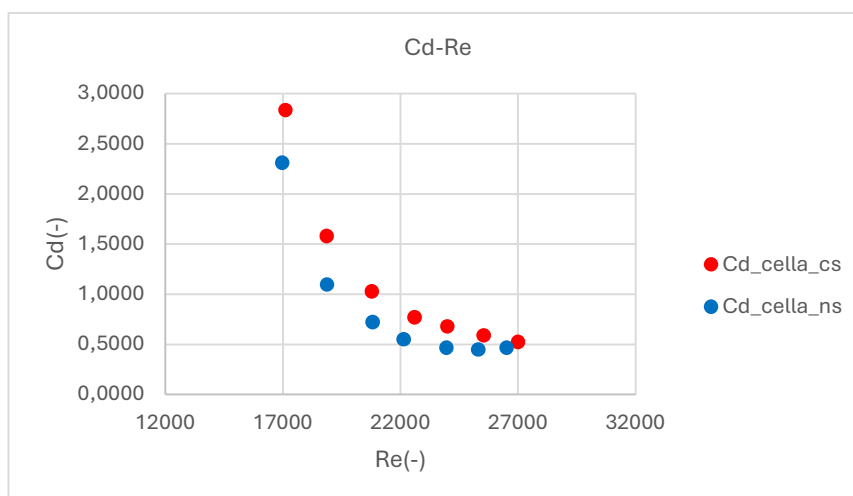


Figura 62: Coefficiente di Drag in funzione del numero di Reynolds.

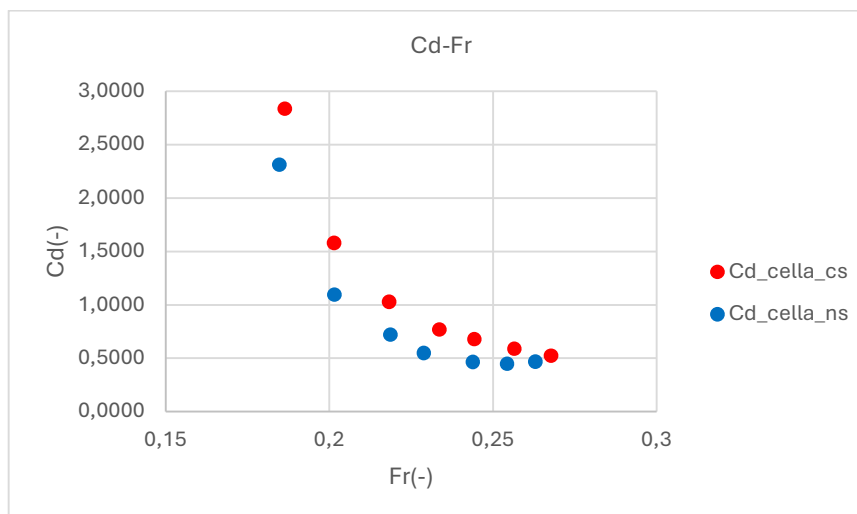


Figura 63: Coefficiente di Drag in funzione del numero di Froude.

Nelle figure 62 e 63 è evidente come il coefficiente di Drag è maggiore nel caso di fondo mobile rispetto al caso di fondo fisso. Inoltre, si ha una riduzione di C_d all'aumentare del numero di Reynolds e del numero di Froude.

Forza di Lift

La componente verticale della forza misurata dalla cella di carico non restituisce direttamente l'effettivo valore dell'azione idrodinamica di portanza (Lift). Tale grandezza deve essere, in prima istanza, depurata dagli errori sistematici di zero della strumentazione, i quali vengono dedotti dalle prove condotte in condizioni idrostatiche. Il valore di forza depurato del valore di riferimento dello zero è indicato in Tabella 36 come FL_{corr} .

Successivamente, per isolare la forza di Lift (la quale, per definizione, computa il solo contributo dinamico della corrente) è necessario sottrarre al valore registrato l'aliquota statica associata alla spinta di Archimede F_B , calcolata considerando il valore medio del tirante idrico a monte e a valle dell'impalcato (L2 e L4).

Nelle prove con scavo, il valore della forza è stato corretto anche del contributo di forza in direzione positiva dovuto alla rimozione di terreno alla base della pila per effetto dello scavo. Per quantificare tale correzione il peso del terreno scavato $P_{terrscavato}$ è stato calcolato utilizzando la profondità di scavo d_{medio} , assunta come la media dei valori registrati all'inizio, a metà e alla fine di ciascuna prova. L'applicazione dei suddetti criteri correttivi è analoga alla procedura già dettagliata all'interno del paragrafo 9.6. La forza di lift, corretta dei vari contributi, è indicata in Tabella 36 come FL_{cella} .

prova	Fy(N)	FL_corr(N)	FB(N)	dmedio(m)	Pterrscavato(N)	FL_cella(N)
Q0c_000_y0	1,6033					
Q0c_000_y0_tapp	-3,3751					
Q0c_000_y1	-1,8505					
Q0c_000_y2	71,9127					
Q25c_000_s0	-10,0230	-6,6479	2,3474			-8,9954
Q30c_000_s0	-0,9404	2,4347	18,3220			-15,8873
Q35c_000_s0	8,1524	11,5275	32,1610			-20,6335
Q40c_000_s0	16,6079	19,9830	45,9210			-25,9381
Q45c_000_s0	24,2286	27,6037	58,4374			-30,8337
Q50c_000_s0	30,4985	33,8736	69,8982			-36,0245
Q55c_000_s0	38,4020	41,7771	82,0723			-40,2953
Q60c_000_s0	44,0562	47,4313	92,5987			-45,1674
Q65c_000_s0	50,8631	54,2382	103,5136			-49,2754
Q0c_000_y3	-13,6685			0,0125		
Q25c_000_scavo	-12,2438	1,4247	-2,1348	0,0255	2,3293	1,2301
Q30c_000_scavo	-3,4287	10,2397	13,2767	0,0220	1,7022	-4,7392
Q35c_000_scavo	6,6810	20,3495	27,9997	0,0350	4,0316	-11,6818
Q40c_000_scavo	16,0957	29,7642	41,8806	0,0530	7,2568	-19,3732
Q45c_000_scavo	25,5106	39,1791	54,1301	0,0685	10,0341	-24,9852
Q50c_000_scavo	35,7243	49,3927	66,2198	0,0855	13,0802	-29,9073
Q55c_000_scavo	46,0868	59,7552	78,1875	0,1025	16,1263	-34,5585
Q60c_000_scavo	56,4429	70,1113	89,0053	0,1190	19,0827	-37,9767
Q65c_000_scavo	67,0583	80,7268	99,5611	0,1335	21,6809	-40,5152

Tabella 36: Grandezze utili per ricavare il valore della forza di Lift.

Si riportano i risultati ottenuti su il seguente grafico in funzione della velocità indisturbata V_{xm} , differenziando il caso di presenza e assenza di scavo attorno alla pila.

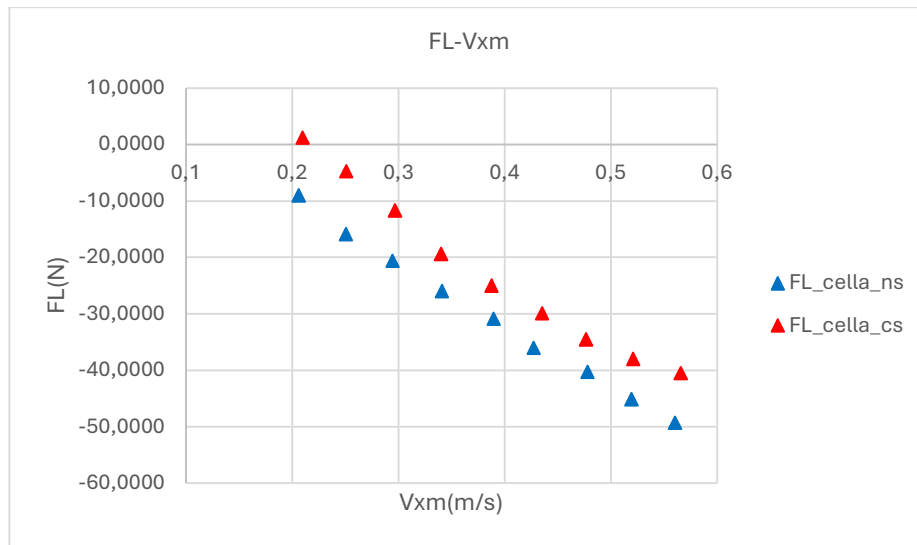


Figura 64: Confronto FL con e senza scavo in funzione della velocità V_{xm} .

Dalla Figura 58 si nota come i valori di forza di Lift risultano essere maggiori (minori in valore assoluto) nel caso di scavo sviluppato.

In analogia con la metodologia riportata nel paragrafo 9.6, la determinazione della forza di portanza (Lift) dai sensori di pressione 5, 6 e 7 ha richiesto una preventiva elaborazione dei segnali acquisiti dai sensori. Nello specifico, i valori di pressione misurati sono stati preliminarmente corretti dall'errore di zero (offset iniziale strumentale), calcolato come la differenza tra la pressione misurata e la pressione statica teorica nelle prove ad acqua ferma.

Successivamente, si è provveduto a isolare il contributo della sola componente dinamica della pressione, scorporando l'aliquota statica dalla pressione totale; tale aliquota dinamica è stata utilizzata per il successivo computo della forza di Lift.

In Tabella 37 sono riportati i valori di pressione dinamica così ottenuti.

prova	P5din(mbar)	P6din(mbar)	P7din(mbar)
Q25c_000_s0	0,4809	0,4451	0,0634
Q30c_000_s0	0,4129	0,0456	-0,2093
Q35c_000_s0	0,2857	-0,1804	-0,3873
Q40c_000_s0	-0,0758	-0,3065	-0,4388
Q45c_000_s0	-0,3853	-0,4037	-0,5156
Q50c_000_s0	-0,6411	-0,4675	-0,5331
Q55c_000_s0	-0,8510	-0,5071	-0,4478
Q60c_000_s0	-1,0614	-0,6173	-0,5878
Q65c_000_s0	-1,2804	-0,7281	-0,6244
Q0c_000_y3			
Q25c_000_scavo	0,3607	0,5856	0,3734
Q30c_000_scavo	0,2429	0,4599	0,2494
Q35c_000_scavo	0,0702	0,3033	0,1300
Q40c_000_scavo	-0,2232	0,2204	0,0682
Q45c_000_scavo	-0,4446	0,1532	0,0342
Q50c_000_scavo	-0,6183	0,0350	0,0226
Q55c_000_scavo	-0,7438	-0,0742	0,0209
Q60c_000_scavo	-0,8197	-0,1914	0,0493
Q65c_000_scavo	-0,8541	-0,2896	0,0836

Tabella 37: Contributo dinamico della pressione misurata dai sensori.

L'area di influenza di ciascun sensore (calcolata considerando la metà dell'interasse dei sensori), necessaria al calcolo della forza di Lift, si mantiene costante in tutte le prove sperimentali. A differenza di quanto avviene per la forza di Drag, infatti, tale parametro è indipendente dalle variazioni del tirante idrico, dipendendo dalle dimensioni in pianta dell'impalcato. La forza di Lift associata a ciascun sensore è stata calcolata moltiplicando

la relativa area di influenza per la pressione dinamica. La forza di Lift totale agente sull'impalcato FL_press è data dalla somma dei contributi di forza associati ai tre sensori.

Prova	AreaP5(m2)	FL_press(N)
	0,0546	
Q25c_000_s0	AreaP6(m2)	5,339298
Q30c_000_s0	0,0532	1,354161
Q35c_000_s0	AreaP7(m2)	-1,51475
Q40c_000_s0	0,0546	-4,44074
Q45c_000_s0		-7,06669
Q50c_000_s0		-8,89861
Q55c_000_s0		-9,78937
Q60c_000_s0		-12,2886
Q65c_000_s0		-14,2739
Q0c_000_y3		
Q25c_000_scavo		7,123441
Q30c_000_scavo		5,134401
Q35c_000_scavo		2,706572
Q40c_000_scavo		0,326386
Q45c_000_scavo		-1,42545
Q50c_000_scavo		-3,06579
Q55c_000_scavo		-4,34174
Q60c_000_scavo		-5,2253
Q65c_000_scavo		-5,74784

Tabella 38: Valore forza Lift da sensori di pressione.

Nella Figura 65, si riporta il confronto delle forze di Lift calcolate a partire dai risultati della cella di carico e dai sensori di pressione, nelle diverse condizioni di fondo fisso (“ns”) e con scavo (“cs”).

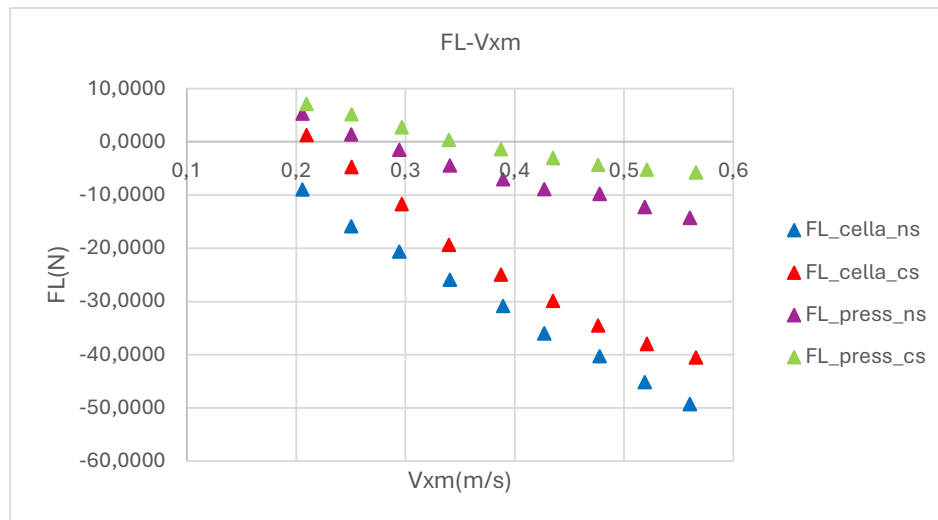


Figura 65: Confronto FL da cella di carico e da sensori, con e senza scavo.

Anche in questo caso, come per le prove del 19 marzo, il grafico evidenzia una sensibile differenza tra i valori registrati dalla cella di carico e quelli dedotti mediante i trasduttori di pressione. Tale scostamento è verosimilmente imputabile all'incertezza introdotta dalle correzioni preliminari applicate ai segnali grezzi in fase di post-processing per entrambe le misure, in particolare per quelle associate alla cella di carico.

Nonostante ciò, la rappresentazione mette in luce come gli andamenti risultino coerenti nei due casi: indipendentemente dallo strumento utilizzato, le curve relative alla configurazione di scavo libero sono traslate verso l'alto rispetto a quelle con fondo fisso.

È interessante osservare che, in entrambe le configurazioni analizzate, la forza di portanza (Lift) agisce prevalentemente verso il basso, assumendo valori per lo più negativi. Tuttavia, nella configurazione con scavo, l'intensità di tale forza risulta inferiore in modulo.

Coefficiente di Lift

In analogia alle analisi del 19 marzo, il coefficiente di Lift viene stimato a partire dalle misure ricavate dai sensori di pressione, omettendo il calcolo per le misure della cella di carico, perché considerate meno attendibili per la componente verticale della forza.

prova	FL_press(N)	Vxm*(m/s)	CL_press(-)	h*(-)
Q25c_000_s0	5,3393	0,2058	1,5519	0,0099
Q30c_000_s0	1,3542	0,2505	0,2658	0,1054
Q35c_000_s0	-1,5148	0,2943	-0,2153	0,1891
Q40c_000_s0	-4,4407	0,3408	-0,4709	0,2603
Q45c_000_s0	-7,0667	0,3895	-0,5736	0,3323
Q50c_000_s0	-8,8986	0,4272	-0,6006	0,4119
Q55c_000_s0	-9,7894	0,4778	-0,5280	0,4907
Q60c_000_s0	-12,2886	0,5191	-0,5615	0,5768
Q65c_000_s0	-14,2739	0,5604	-0,5598	0,6310
Q0c_000_y3				
Q25c_000_scavo	7,1234	0,2098	1,9938	0,0113
Q30c_000_scavo	5,1344	0,2506	1,0067	0,1032
Q35c_000_scavo	2,7066	0,2966	0,3789	0,1879
Q40c_000_scavo	0,3264	0,3400	0,0348	0,2578
Q45c_000_scavo	-1,4254	0,3875	-0,1169	0,3278
Q50c_000_scavo	-3,0658	0,4352	-0,1994	0,4062
Q55c_000_scavo	-4,3417	0,4764	-0,2356	0,4828
Q60c_000_scavo	-5,2253	0,5208	-0,2372	0,5675
Q65c_000_scavo	-5,7478	0,5657	-0,2212	0,6263

Tabella 39: Calcolo coefficiente Lift da sensori di pressione.

Si riporta il grafico del coefficiente di Lift in funzione del parametro h^* .

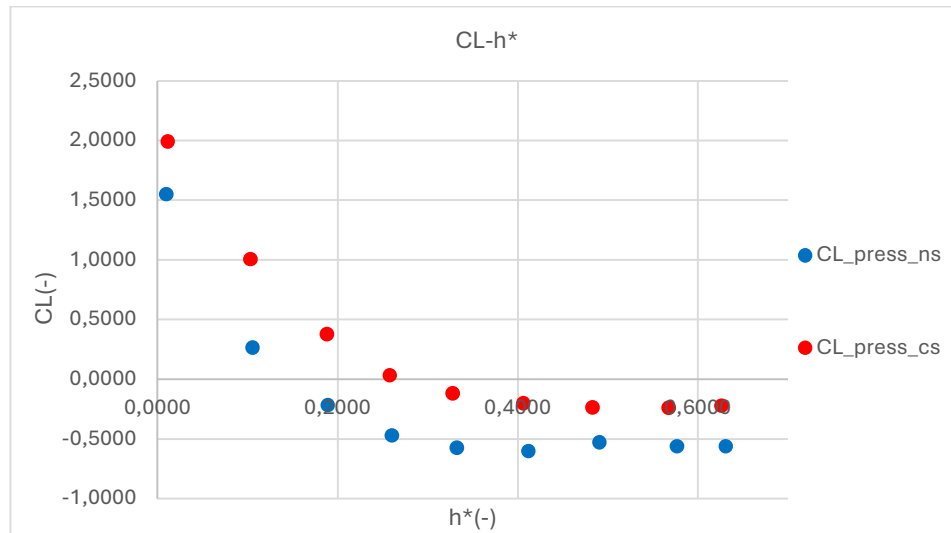


Figura 66: Andamento coefficiente di Lift con e senza scavo.

I risultati esposti nella Figura 66 evidenziano, anche in questo caso, che i valori del coefficiente di Lift in condizione di fondo mobile risultano essere maggiori rispetto alla

condizione di fondo fisso. Inoltre, in entrambe le condizioni, si ha una riduzione di C_d all'aumentare del valore di h^* .

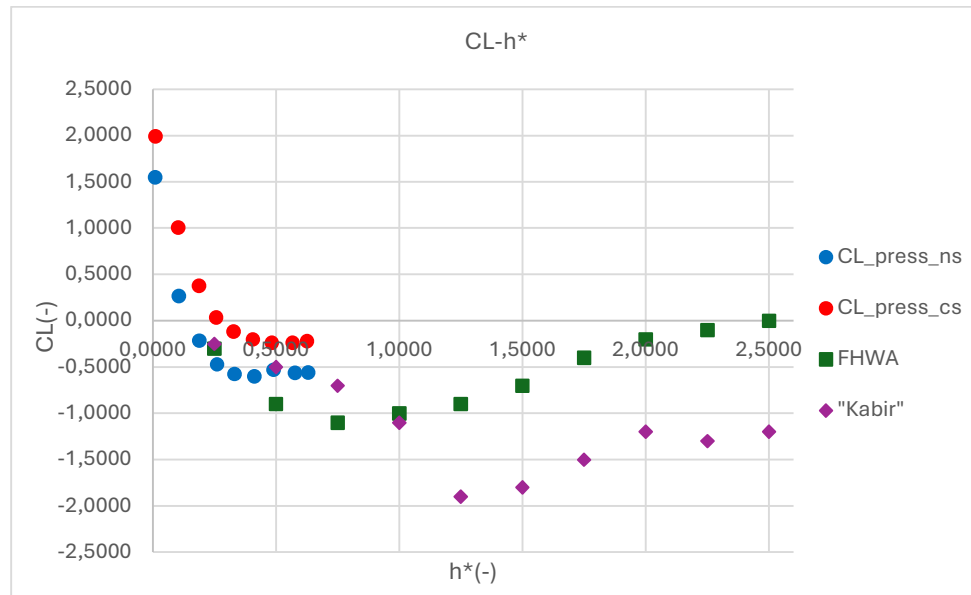


Figura 67: Confronto coefficiente Lift con risultati di letteratura.

Dall'analisi del grafico di Figura 67 emerge che i valori misurati nel presente studio sperimentale sono coerenti con quelli riportati in letteratura da Kabir et al. (2022) e dalla FHWA (2009) per valori di $h^* < 0.7$, ovvero per la condizione in cui il tirante idrico non supera l'estradosso dell'impalcato.

Si riporta di seguito nelle Figure 68 e 69 la rappresentazione di CL al variare del numero di Reynolds e del numero di Froude.

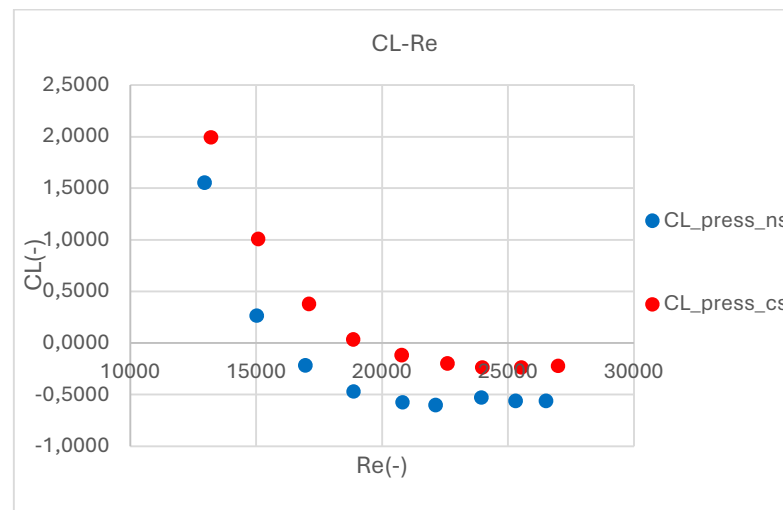


Figura 68: Rappresentazione coefficiente Lift in funzione del numero di Reynolds.

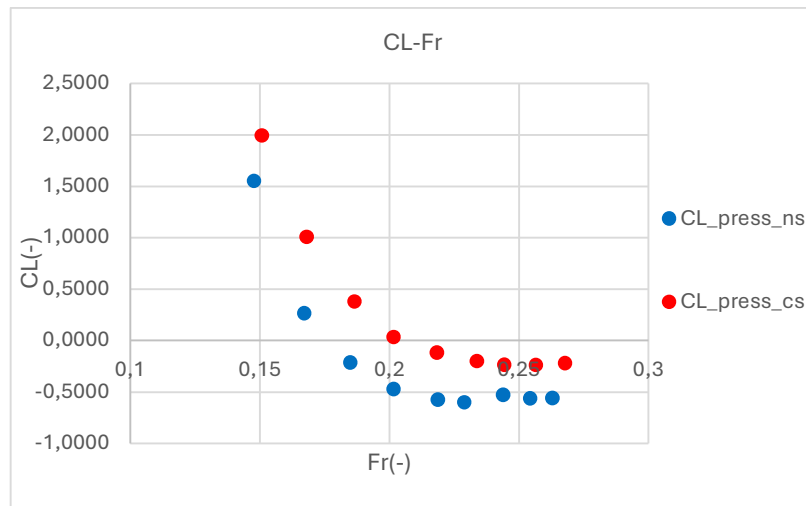


Figura 69: Rappresentazione coefficiente Lift in funzione del numero di Froude.

A differenza delle prove del 19 marzo, il coefficiente di Lift assume valori sia negativi che positivi con un evidente andamento decrescente all'aumentare del numero di Reynolds e del numero di Froude. Inoltre, come già notato nella Figura 66 il coefficiente CL risulta essere sempre maggiore nella condizione di fondo mobile rispetto alla condizione di fondo fisso.

9.8 Analisi prove con dinamometro e cella di carico

Le prove descritte nel presente paragrafo sono state eseguite con l'obiettivo di determinare il contributo dovuto alla reazione del terreno rispetto al valore complessivo della forza in direzione x misurata dalla cella di carico.

La configurazione sperimentale adottata per questa prova è illustrata nella figura 70:



Figura 70: Dinamometro collegato alla pila dell'impalcato.

Come si può notare in Figura 70 il dinamometro è collegato alla pila dell'impalcato tramite degli anelli che ne impediscono il movimento relativo durante l'esecuzione dei test.

La prova è stata condotta applicando manualmente un'azione di spinta e di trazione mediante il dinamometro, dotato di un sistema integrato per registrare l'intensità della forza istantanea impressa al sistema.

Contestualmente, sono stati acquisiti i valori di forza tramite la cella di carico; correlando le due misurazioni è stato possibile isolare, per differenza, il contributo di reazione offerto dal terreno. L'estrapolazione di tale componente si è resa necessaria al fine di definire un termine di correzione, da applicare successivamente ai dati misurati dalle prove in condizioni idrodinamiche.

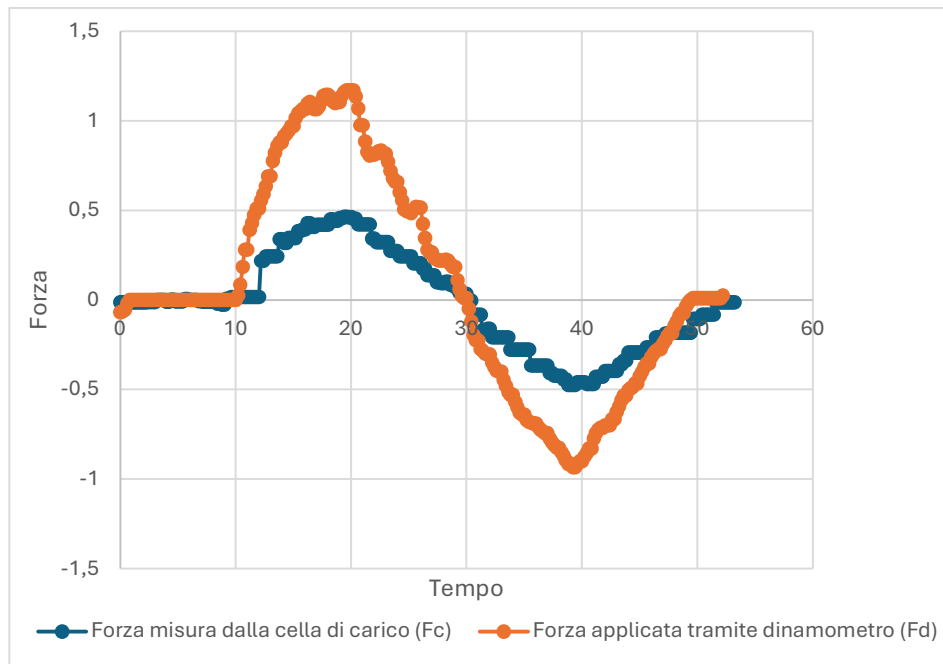


Figura 71: Confronto forze cella di carico e dinamometro di una generica prova.

Per limitazioni di natura tecnico-pratica, questa fase di calibrazione è stata eseguita con il fondo in condizioni completamente asciutte. Tale assunzione, inizialmente ritenuta accettabile, è stata successivamente riconsiderata: l'analisi delle prove idrodinamiche ha infatti evidenziato come la reazione del terreno in condizioni sature sia in realtà molto minore rispetto allo stato asciutto.

L'analisi descritta nel presente paragrafo si basa su diverse configurazioni di prova, durante le quali il punto di applicazione della forza è stato posto a diverse distanze dal fondo alveo (e di conseguenza a diversi bracci di applicazione della forza rispetto alla cella di carico) e sono state indagate differenti profondità di scavo.

Le differenti distanze dal fondo, indicate con D_f , presentano una correlazione inversa rispetto al braccio della forza agente sulla cella di carico; pertanto, a una riduzione di D_f corrisponde un incremento del braccio, e viceversa.

Nei grafici seguenti viene illustrata la correlazione tra la forza rilevata dalla cella di carico (F_c) e l'azione impressa mediante il dinamometro (F_d). Ogni diagramma si riferisce a una specifica profondità di scavo indagata e riporta al suo interno un fascio di rette, ciascuna rappresentativa di una diversa distanza D_f .

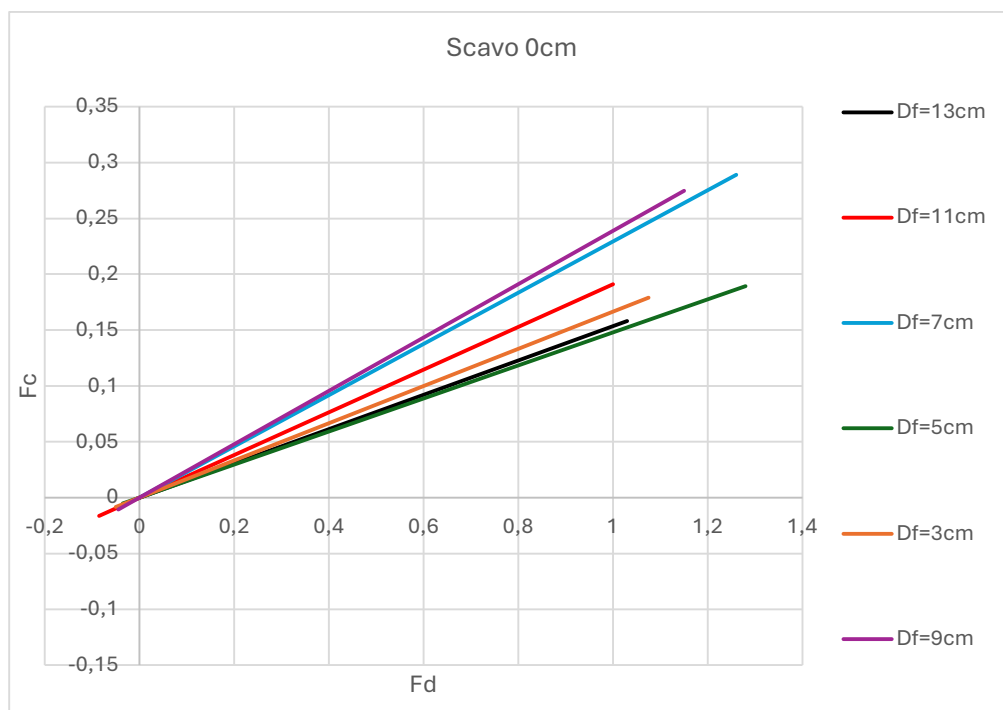


Figura 72: F_c - F_d per scavo nullo.

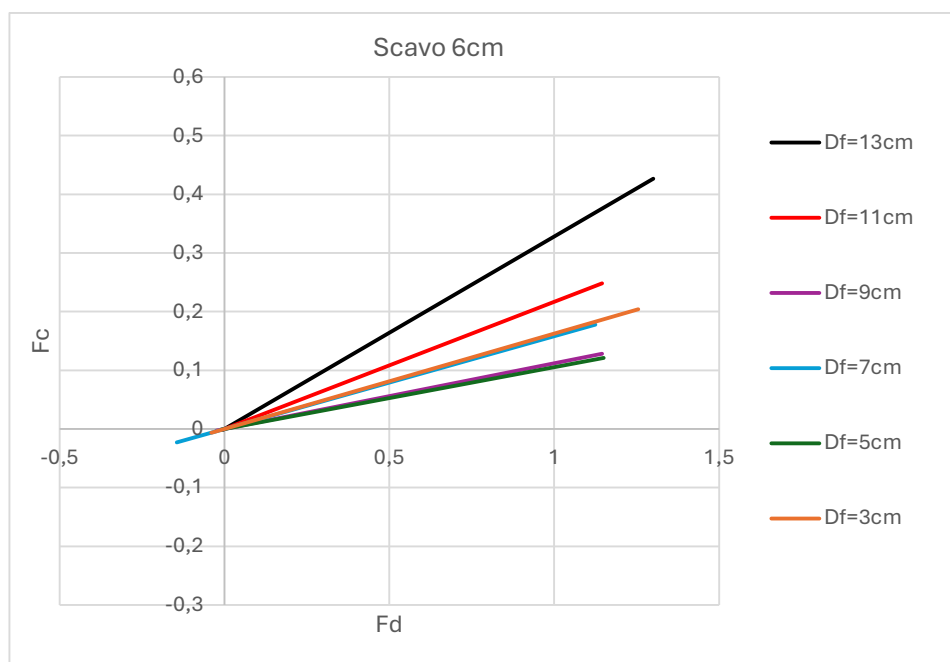


Figura 73: F_c - F_d per scavo 6cm.

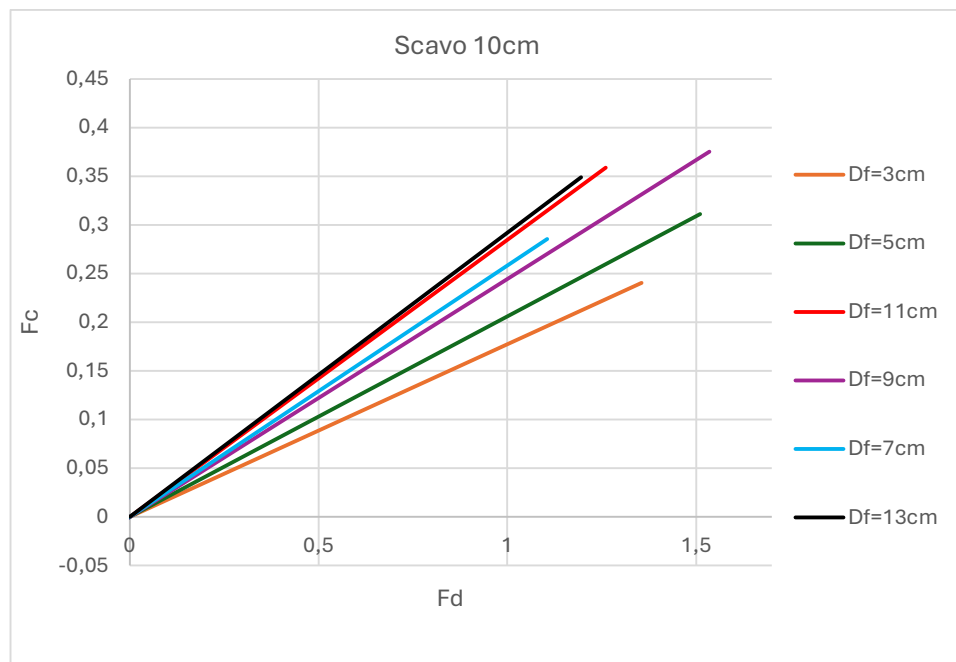


Figura 74: Fc-Fd per scavo 10cm.

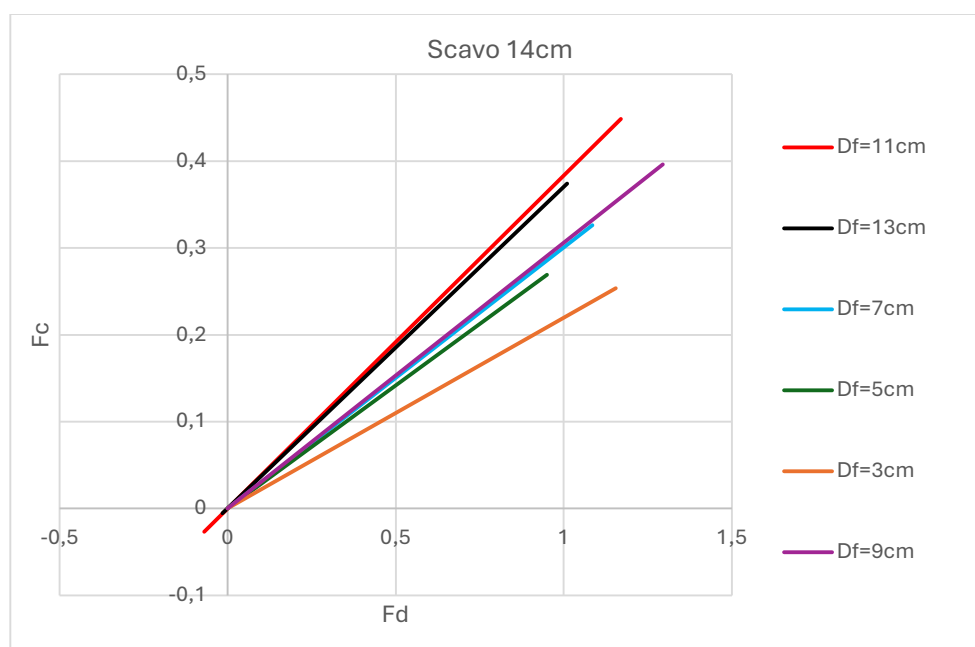


Figura 75: Fc-Fd per scavo 14cm.

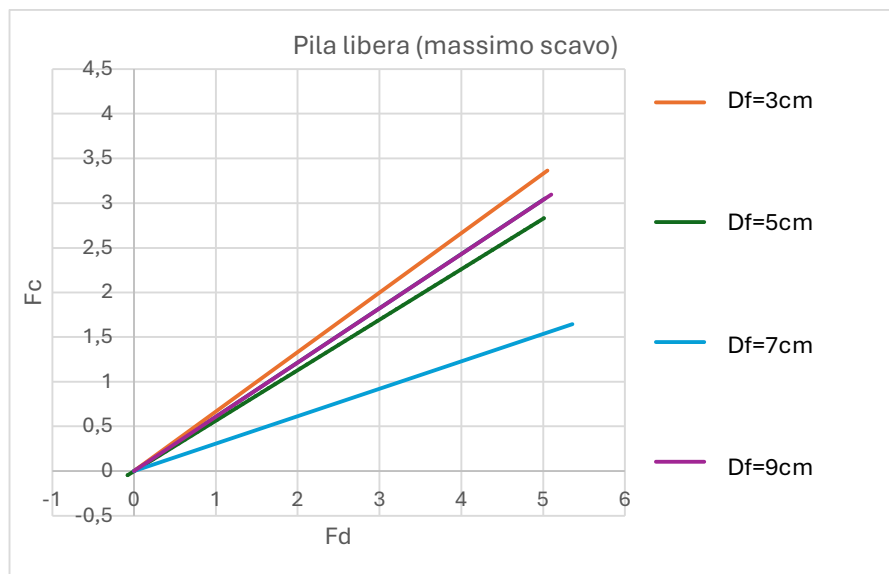


Figura 76: Fc-Fd per pila libera.

Dall'analisi dei grafici precedenti emerge una scarsa attendibilità dei risultati sperimentali. Nella maggior parte dei casi, infatti, le pendenze delle curve non mostrano valori crescenti all'aumentare di D_f (ovvero al diminuire del braccio) come ci si aspettava o presentano andamenti irregolari.

Sulla base delle prove con dinamometro, si sono ricavate delle curve che forniscono il rapporto F_d/F_c in funzione della profondità di scavo, per diversi punti di applicazione della forza. Nelle prove idrodinamiche con deflusso a pelo libero descritte nei capitoli precedenti, la distanza tra il punto di applicazione della forza di Drag (ipotizzata costante sulla colonna d'acqua) ed il fondo alveo oscilla in un intervallo compreso tra 4 e 9 cm, dipendendo dal tirante idrico della corrente. Coerentemente con tale intervallo di variabilità, nella successiva trattazione grafica sono state selezionate e tracciate unicamente le curve corrispondenti ai valori di D_f pari a 5, 7 e 9 cm, assunti come rappresentativi delle distanze indagate nelle prove.

In Tabella 40 sono riportate le leggi polinomiali che meglio approssimano le curve del grafico in Figura 77.

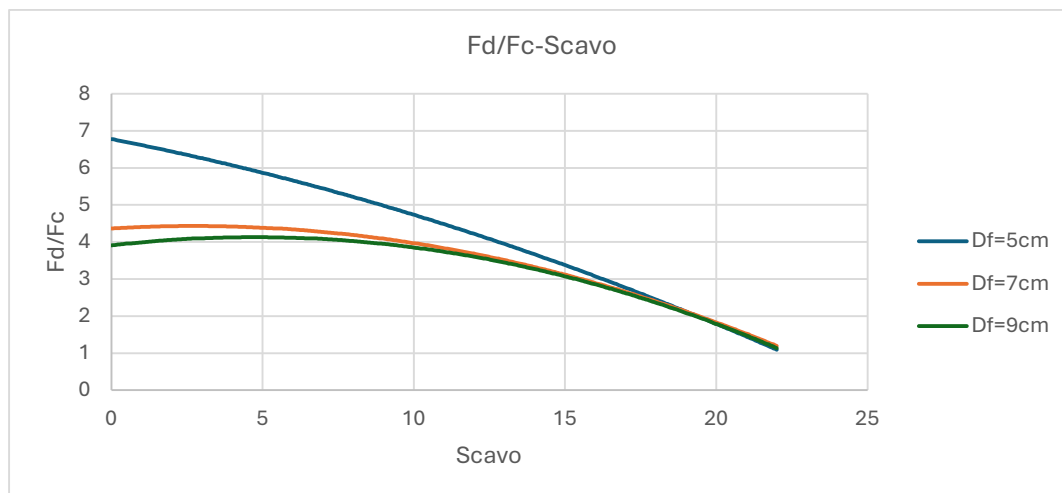


Figura 77: Rapporto F_d/F_c al variare dello scavo e per diversi valori di D_f .

D_f	Equazione
5	$y = -0,0045x^2 - 0,1592x + 6,7757$
7	$y = -0,0087x^2 + 0,0471x + 4,3668$
9	$y = -0,01x^2 - 0,0949x + 3,9063$

Tabella 40: Equazioni curve F_d/F_c al variare dello scavo.

La costruzione delle curve del grafico di Figura 70 è stata eseguita tramite interpolazione dei punti ricavati dai grafici che relazionano F_c con F_d , escludendo alcuni dati ritenuti anomali.

Il rapporto F_d/F_c tende ad aumentare al ridursi della profondità di scavo, fino a raggiungere valori che variano tra 4 e 7 per scavo nullo. Questo comportamento evidenzia una significativa influenza del terreno sulle misurazioni della cella di carico; al contrario, nella configurazione in assenza di terreno (scavo pari a 22 cm, cioè pila libera), i valori registrati dalla cella coincidono con i carichi applicati dal dinamometro ($F_d/F_c \approx 1$), al netto di contributi trascurabili derivanti dal momento flettente indotto dal braccio di applicazione del carico.

A conclusione di quanto esposto nel presente paragrafo, i risultati ottenuti in condizioni di terreno asciutto dimostrano che l'azione resistente del terreno comporta una marcata attenuazione della forza orizzontale misurata dalla cella di carico. Si evince, di conseguenza, l'impatto tutt'altro che trascurabile di tale effetto ai fini della misurazione. Tuttavia, nell'ambito delle prove idrodinamiche descritte ai paragrafi precedenti, si è scelto di non computare tale riduzione. In condizioni di terreno saturo, infatti, la discrepanza tra la forza applicata e quella registrata dalla cella di carico risulta

decisamente inferiore; tale comportamento trova peraltro conferma nelle prove comparative eseguite posizionando la pila sollevata al di sopra del piano di campagna.

10. CONCLUSIONI

La campagna sperimentale ha consentito di caratterizzare in dettaglio le forze idrodinamiche di Drag e di Lift, nonché i relativi coefficienti, agenti su una struttura da ponte (comprensiva di impalcato e pila) soggetta a diverse condizioni di flusso.

L'analisi si è concentrata sul confronto tra due condizioni principali: quella a fondo fisso e quella a fondo mobile, che comportava la generazione di erosione localizzata (scavo) attorno alla pila. Per le due configurazioni, sono state quindi studiate diverse condizioni idrodinamiche, ottenute variando la portata e l'altezza della paratoia di valle all'interno di un canale fluviale in scala di laboratorio.

Le prove condotte nei giorni 5 e 12 marzo erano relative alla condizione di deflusso libero, ovvero con corrente che interessa la sola pila, mentre quelle del 19 e 26 marzo indagavano la condizione di flusso in pressione. Le prove del 2 e 14 aprile, unitamente ai test volti a definire la correlazione tra il dinamometro e la cella di carico, hanno svolto una funzione propedeutica; esse hanno infatti permesso di definire gli accorgimenti metodologici necessari a validare e ottimizzare le acquisizioni delle prove principali.

Entrando nel merito delle procedure di calibrazione, le misurazioni del 2 e del 14 aprile, effettuate a pila libera, sono state impiegate come riferimento per le prove con ponte non in pressione, rendendo possibile l'azzeramento dell'offset iniziale della strumentazione. L'esecuzione di test analoghi per la configurazione di ponte in pressione è stata invece preclusa dai vincoli geometrici della canaletta idraulica.

Le prove del 5 e del 12 marzo hanno dimostrato che lo scavo locale accentua la forza di Drag sulla pila, fenomeno ampiamente giustificato dall'incremento della superficie d'impatto investita dal flusso (nel caso di fondo fisso l'area esposta rimane invariata per tutte le prove). Le forze di Drag ottenute sperimentalmente sono state confrontate con i valori teorici calcolati considerando un coefficiente di Drag pari a 0,7. Piccole differenze tra la formula teorica e i risultati di laboratorio potrebbero essere dovute anche a una parziale imprecisione nella correzione dell'offset iniziale dello strumento.

Le analisi sperimentali condotte nei giorni 19 e 26 marzo si sono focalizzate sia sulla forza di Drag che su quella di Lift, unitamente ai rispettivi coefficienti, estendendo lo studio al caso di ponte in pressione (condizione in cui il pelo libero

raggiunge l'intradosso dell'impalcato senza sormontarlo). Non essendo noti a priori i coefficienti di Drag e di Lift da applicare alla geometria studiata, non è stato possibile confrontare i risultati con formule teoriche. L'affidabilità dei dati è stata tuttavia verificata attraverso il confronto incrociato delle forze misurate tramite due differenti metodologie: in maniera indiretta come integrale delle pressioni misurate dai trasduttori di pressione posti sull'impalcato e in maniera diretta tramite le misure della cella di carico.

Per quanto concerne l'azione di Drag, le due tecniche hanno restituito risultati concordi, confermando che, anche per il caso di ponte in pressione, la spinta idrodinamica risulta maggiore in presenza di scavo rispetto alla configurazione a fondo fisso, a causa dell'incremento della superficie esposta al flusso per effetto dell'erosione alla base della pila. Per la forza di Lift, sia i sensori di pressione sia la cella di carico hanno registrato valori negativi (deportanza) in entrambe le sessioni di prova. Tale fenomeno potrebbe essere spiegato fisicamente tramite il teorema di Bernoulli: la contrazione della sezione fluida immediatamente a monte dell'impalcato provoca un incremento locale della velocità della corrente e una conseguente caduta di pressione all'intradosso del ponte, generando un effetto di aspirazione verso il basso. In presenza di scavo formato, i valori della forza di Lift risultano maggiori (ovvero minori in valore assoluto) rispetto al caso a fondo fisso. L'evoluzione della fossa di erosione, infatti, comporta un ampliamento della sezione idraulica in prossimità della pila; la conseguente riduzione della velocità locale determina un incremento della pressione e, di riflesso, un'attenuazione dell'effetto di deportanza sotto l'impalcato.

I risultati delle prove comparative condotte con il dinamometro, volte a quantificare la resistenza del terreno e quindi la riduzione dei valori di forza orizzontale misurati dalla cella di carico, non sono stati integrati nell'analisi finale. Infatti, i valori delle forze idrodinamiche misurati dalla cella di carico omettendo tale correzione si sono rivelati pienamente coerenti sia con i modelli teorici sia con i dati indipendenti acquisiti dai sensori di pressione. L'analisi dei test eseguiti con il dinamometro ha infatti mostrato una sovrastima della reazione dovuta al terreno. Tale sovrastima è riconducibile a due fattori principali. In primo luogo, i test effettuati con l'utilizzo del dinamometro sono stati effettuati su terreno asciutto, mentre durante le prove idrodinamiche il sedimento si trovava in condizioni di completa saturazione, scenario in cui la resistenza al taglio del mezzo granulare si riduce drasticamente. In secondo luogo, l'applicazione manuale della

forza tramite dinamometro potrebbe aver introdotto una componente di forza non perfettamente orizzontale; di conseguenza, l'effettiva aliquota di carico in direzione x risultava inferiore rispetto a quella letta dal dinamometro.

Lo studio sperimentale condotto nel presente lavoro di tesi dimostra come l'erosione localizzata al piede dell'opera, indotta dall'azione della corrente (sia in regime di live-bed che di clear-water) determini una sostanziale variazione delle sollecitazioni agenti sulla struttura, alterandone significativamente la risposta statica e dinamica. Una particolare attenzione va rivolta all'incremento della forza di Drag: lo sviluppo della fossa di scavo comporta infatti una marcata intensificazione della spinta orizzontale sul sistema. L'incremento della forza dinamica a causa dello scavo in fondazione comporta un aumento del rischio di collasso dell'infrastruttura, qualora le sollecitazioni idrodinamiche arrivino a superare la capacità di resistenza orizzontale del ponte stesso.

11. BIBLIOGRAFIA

- Armerio, V. Analisi dimensionale e modelli. Università di Trieste.
- Balletti, M. (2022). Valutazione del rischio idraulico di ponti esistenti per effetto dello scavo intorno alle pile (Tesi di laurea magistrale, Università Politecnica delle Marche). Relatore: Ing. S. Corvaro.
- Brath, A., & Montanari, A. (2000). Vulnerabilità idraulica dei ponti. Associazione Idrotecnica Italiana.
- Brocchini, M. (2025). Dispense del corso di Idraulica. Università Politecnica delle Marche.
- Carletti, E. (2024). Analisi sperimentale dell'idromorfodinamica intorno alla pila di un ponte (Tesi di laurea magistrale, Università Politecnica delle Marche). Relatori: S. Corvaro, S. Rocchi.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2010). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (pp. 291-292). McGraw Hill.
- Chiew, Y. M., & Melville, B. W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.
- Cognini, L. (2024). Analisi sperimentale idrodinamica e morfodinamica intorno alla pila di un ponte (Tesi di laurea magistrale, Università Politecnica delle Marche). Relatori: S. Corvaro, S. Rocchi.
- Darvini, G. (2025). Dispense del corso di Costruzioni Idrauliche (Materiale didattico). Università Politecnica delle Marche.
- Ettema, R. (1980). Scour at bridge piers (Report No. 216). University of Auckland.
- Ettema, R., Kirkil, G., & Muste, M. (2006). Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1188-1198.
- FHWA (2009). Hydrodynamic Forces on Inundated Bridge Decks (Report No. FHWA-HRT-09-028). Federal Highway Administration.
- FHWA (2012). Hydraulic Engineering Circular n. 18: Evaluating Scour at Bridges (5th ed., Report No. FHWA-HIF-12-003). Federal Highway Administration.

- FHWA (Federal Highway Administration) (2009). Bridges, Structures, and Hydraulics. 23 CFR 650, subpart C.
- Franzetti, S., Malavasi, S., & Piccinin, C. (1994). Sull'erosione alla base delle pile di ponte in acque chiare. Atti del XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Vol. II, Napoli.
- Jempson, M. A. (2003). Flood and debris loads on bridges (Tesi di dottorato, The University of Queensland).
- Kabir, S. M. I., Ahmari e Dean (2022). Experimental study to investigate the effects of bridge geometry and flow condition on hydrodynamic forces (Tesi di dottorato, The University of Texas at Arlington).
- Lorenzoni, C. (2026). Dispense del corso di Ingegneria costiera. Università Politecnica delle Marche.
- Montanari, A. (1999a). Modelli idraulici in scala ridotta. UNIBO Magazine, Università di Bologna.
- Montanari, A. (1999b). Richiami di meccanica dei fluidi. UNIBO Magazine, Università di Bologna.
- Sammarco, P. Analisi dimensionale e Similitudine. Università degli Studi di Roma Tor Vergata.
- Viozzi, D. Valutazione sperimentale del comportamento di una pila da ponte in alveo: progettazione della campagna e primi risultati (Tesi di laurea, Università Politecnica delle Marche). Relatore: Prof. S. Carbonari.