



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale-DICEA
Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di studi Laurea Triennale in Ingegneria Civile

INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI SULLE ARGINATURE DEL BASSO CORSO DEL FIUME TAGLIAMENTO

Relatore: Prof. SIMONINI PAOLO

Correlatore: Prof. CECCATO FRANCESCA

Candidato: SAMUELE CHINELLO

Matricola: 1193369

Anno Accademico 2023-2024

INDICE DEI CONTENUTI

INTRODUZIONE.....	4
1 GLI ARGINI.....	6
1.1 Definizione e funzioni degli argini.....	6
1.2 Caratteristiche e componenti degli argini.....	8
1.3 Regimi di filtrazione.....	11
1.4 Meccanismi di rottura arginale.....	13
1.5 Analisi e monitoraggio degli argini.....	17
2 CASO STUDIO: LE ARGINATURE DEL FIUME TAGLIAMENTO.....	18
2.1 Collocazione Geografica.....	18
2.2 Distribuzione dei sondaggi.....	20
2.3 Geometria e stratigrafia degli argini.....	26
3 COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA.....	28
3.1 Considerazioni granulometriche.....	28
3.2 Interpretazione dati del corpo arginale.....	30
3.3 Interpretazione dati della fondazione.....	35
4. ANALISI DELLA RESISTENZA AL TAGLIO.....	39
4.1 Metodologia.....	39
4.2 Risultati analisi meccanica.....	45
5 CONDUCIBILITA' IDRAULICA.....	50
5.1 Metodologia idraulica.....	50
5.2 Risultati analisi idraulica.....	53
6 CONCLUSIONI.....	57
Appendice.....	60
Indice delle figure.....	72
Indice dei grafici.....	73
Indice delle formule.....	74
Bibliografia.....	75

INTRODUZIONE

Nel corso degli anni, la regione del basso corso del fiume Tagliamento ha subito storicamente inondazioni devastanti, causando significativi danni alle comunità residenti nelle sue vicinanze. Pertanto, è stata intrapresa un'analisi approfondita delle condizioni di stabilità degli argini fluviali.

Questo studio è stato affidato al Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Padova, in virtù di un incarico ricevuto dalla Direzione Operativa della Regione Veneto. L'iniziativa si colloca nell'ambito di una convenzione specifica intitolata "Studio preliminare sulle caratteristiche geotecniche e sulle condizioni di stabilità degli argini del Tagliamento nel tratto di pertinenza della Regione Veneto", avviata nel 2019. L'attività di ricerca si è poi evoluta in un successivo "Contratto per lo studio, l'interpretazione dei dati delle indagini e per la redazione del piano di monitoraggio geotecnico degli argini del basso corso del Tagliamento". Tale contratto comprende l'analisi delle arginature sia della sponda destra che di quella sinistra del fiume, estendendosi dalla zona di Malafesta fino alla foce, nei pressi di Bibione. (P.Simonini-F.Ceccato, 6 Dicembre 2021).

Negli studi condotti, sono stati effettuati rilievi topografici, prove in situ e prelievi di campioni, accompagnati da analisi di laboratorio, al fine di identificare le aree più critiche in cui è necessario intervenire per migliorare e consolidare la stabilità degli argini. La presente relazione si propone di analizzare i dati relativi alle arginature del basso corso del fiume Tagliamento. L'approccio metodologico adottato prevede, in primo luogo, un confronto tra i diversi sondaggi eseguiti nel corso degli anni, con l'obiettivo di evidenziare gli aspetti comuni riscontrati lungo le sezioni del fiume e di individuare i fattori geotecnici di maggiore rilevanza. I primi sondaggi considerati in questa analisi risalgono al 2019 e coprono un'area che si estende da Villanova a San Filippo, con particolare attenzione al comune di San Michele al Tagliamento. I sondaggi successivi, realizzati nel 2023, si concentrano nelle zone di San Giorgio al Tagliamento, San Michele al Tagliamento e Bevazzana, località situata nelle vicinanze della foce del fiume. Dall'analisi dei sondaggi, è stata valutata la condizione granulometrica del corpo arginale e delle fondazioni degli argini. In tal modo, è stato possibile considerare tratti e sezioni di corpo arginale e di fondazione con la medesima granulometria come omogenei, ovvero caratterizzati da comportamenti e proprietà simili. Successivamente, è stata valutata la risposta meccanica degli argini, focalizzandosi in particolare sull'analisi del parametro dell'angolo di attrito critico. Questo parametro è stato determinato attraverso due approcci distinti. Il primo metodo prevede il calcolo dell'angolo critico utilizzando una formula basata sull'indice granulometrico del materiale. Il secondo metodo, invece, consiste nell'estrazione diretta dell'angolo critico dall'analisi delle prove di laboratorio sui campioni prelevati. Questi approcci consentono di ottenere una valutazione più accurata e rappresentativa del comportamento degli argini in condizioni meccaniche variabili. (P.Simonini-F.Ceccato, 30 Novembre 2023).

Per quanto concerne l'aspetto idraulico degli argini, è stato utilizzato come parametro la conducibilità idraulica (k), determinata sia mediante prove di laboratorio sia attraverso formule per la stima della permeabilità. Queste formule considerano variabili di carattere granulometrico; in particolare, il parametro fondamentale per il calcolo della conducibilità idraulica è rappresentato dal d_{10} , ottenuto dalle diverse curve granulometriche dei campioni prelevati. In conclusione, attraverso il monitoraggio, il rilievo e la misurazione delle variabili idrauliche e geotecniche, si intende fornire un quadro complessivo delle condizioni degli argini del fiume. Tale analisi permetterà di valutare le

problematiche potenzialmente emergenti e, di conseguenza, di studiare le azioni e le misure di intervento necessarie nelle aree interessate.

1 GLI ARGINI

1.1 Definizione e funzioni degli argini

Gli argini (Fig. 1) rappresentano strutture longitudinali destinate al contenimento delle acque di un corso d'acqua, con l'obiettivo di garantire la sicurezza idraulica dei territori circostanti. La progettazione di tali strutture deve essere effettuata in modo da preservare la loro integrità durante le normali condizioni di esercizio, tenendo conto anche degli eventi di piena, quali le alluvioni, durante i quali la portata del flusso fluviale può aumentare in modo rapido ed esponenziale. Al fine di prevenire inondazioni e straripamenti, è essenziale assicurare che il flusso d'acqua critico rimanga all'interno delle sponde dell'argine, evitando così significativi danni alle popolazioni e ai beni materiali dell'area interessata.



Figura 1-Esempio di Argine

Affinché l'argine mantenga le caratteristiche per cui è stato progettato, ciascuna delle sue componenti deve assolvere specifiche funzioni. Tali funzioni devono essere sistematicamente considerate ogni qualvolta si procede alla pianificazione della realizzazione di un argine. (CIRIA, 2013).

Le maggiori funzioni sono:

- Protezione esterna: L'argine, durante tutta la sua vita utile, sarà esposto continuamente ad agenti esterni. Per tale motivo, è necessario predisporre interventi specifici mirati a prevenire l'erosione del corpo arginale.
- Impermeabilità: Si considera come la funzione principale di un tratto arginale, in quanto si deve limitare il più possibile il flusso di filtrazione attraverso il corpo arginale e nel terreno di fondazione. Questo processo andrebbe a generare delle forze di volume che, nei terreni granulometricamente eterogenei, provocherebbero una erosione interna dell'argine, dovuta ad una separazione delle particelle più fini del terreno da quelle più grosse. L'aumento della permeabilità e la perdita di resistenza dell'argine sono una conseguenza della forza di filtrazione, pertanto si possono utilizzare sistemi di impermeabilizzazione per limitare questo processo.
- Drenaggio: Per prevenire l'erosione interna e i cedimenti derivanti dall'instabilità, è indispensabile implementare sistemi di drenaggio appositamente progettati. Tali sistemi dovranno ridurre le pressioni idriche interne all'argine, orientando il flusso di filtrazione verso aree destinate alla raccolta e, successivamente, all'allontanamento sicuro delle acque.
- Stabilità: Entrambe le componenti dell'argine, ovvero corpo arginale e fondazione, dovranno avere delle determinate caratteristiche meccaniche di resistenza tali da garantire la stabilità sia in condizioni di magra che in condizioni di piena, il tutto è finalizzato a prevenire cedimenti parziali o totali del sistema arginale.

Tutte queste funzioni devono essere strettamente connesse con alcuni fattori, ovvero:

- Si prendono in considerazione le caratteristiche e le tipologie di terreni che saranno impiegati per la realizzazione dell'argine.
- Si effettua un'analisi granulometrica dettagliata del terreno che compone l'argine, al fine di valutare le sue potenziali interazioni con i parametri idraulici del fiume.
- La pianificazione di eventuali interventi durante il ciclo di vita dell'argine, finalizzati al miglioramento delle condizioni meccaniche e della resistenza.
- Il luogo dove andrà realizzato; legato alla presenza di materiale che potrà essere impiegato per la costruzione, alla natura del corso d'acqua e alla presenza di infrastrutture che possono creare un ostacolo al compimento dell'opera.

Il ruolo degli argini nella gestione della sicurezza idrica è frequentemente sottovalutato dalla popolazione, che tende a riconoscerne l'importanza esclusivamente durante i brevi periodi di piena. Questa visione limitata porta a trascurare la loro rilevanza costante nel contesto della protezione dalle inondazioni. È pertanto essenziale prestare particolare attenzione agli argini storici, i quali, a causa delle limitazioni tecnologiche e materiali del passato, potrebbero non soddisfare gli standard contemporanei di progettazione e sicurezza strutturale. La valutazione critica di tali infrastrutture è cruciale per garantire una protezione adeguata e sostenibile nel lungo termine.

1.2 Caratteristiche e componenti degli argini

Dopo aver analizzato le funzioni distintive degli argini, è opportuno procedere con una descrizione delle diverse componenti che li compongono. Ogni argine può essere suddiviso in sezioni omogenee, ciascuna delle quali è destinata a svolgere funzioni specifiche. È possibile, inoltre, distinguere tra diverse tipologie di sezioni arginali, le quali variano in termini di costi e complessità costruttiva. Gli argini sono generalmente realizzati in terra, ma possono includere sovrastrutture, strutture interne e sistemi a pelo d'acqua. Questi elementi aggiuntivi sono progettati per migliorare e ottimizzare la funzionalità complessiva del sistema di protezione idrica.

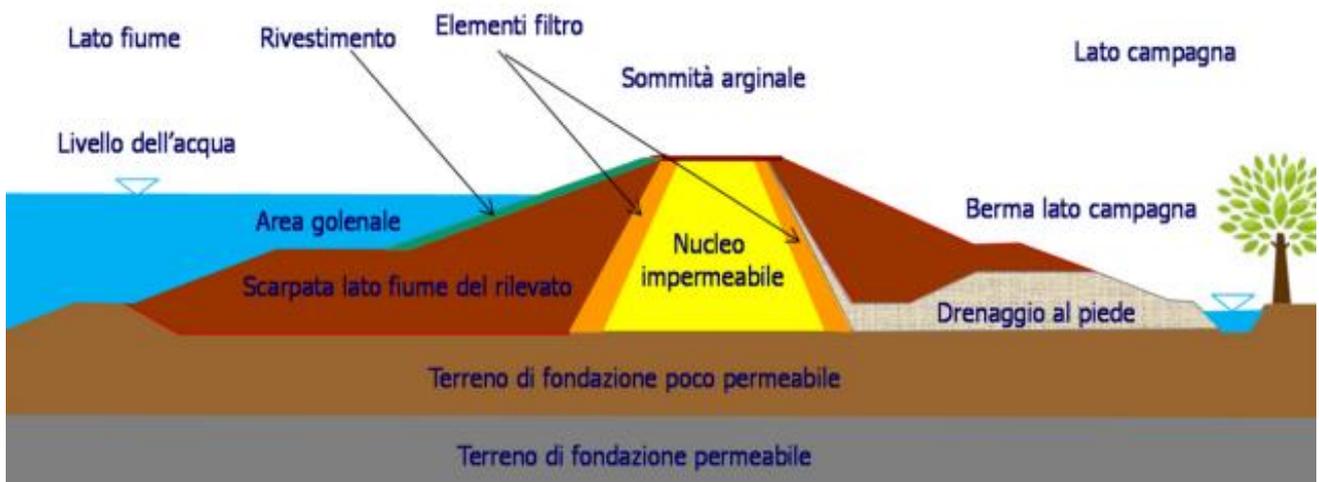


Figura 2-Sezione generica che mostra le componenti di un argine, (CIRIA, 2013)

Nella Figura 2 si possono riconoscere le varie parti della generica sezione che dovranno essere presenti nella progettazione di un argine (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014).

- Terreno di fondazione: Al di sotto del corpo dell'argine, ha il compito di garantire la filtrazione e l'impermeabilità, sostenere il peso e fornire stabilità all'argine.
- Corpo arginale: O anche nucleo, è necessario in assenza dei fianchi del rilevato. Fondamentale per la resistenza all'acqua e ai regimi di filtrazione, deve essere in grado di deformarsi per evitare la formazione di stati fessurativi in caso di cedimenti.
- Fianchi del rilevato arginale: Provvedono alla stabilità e diminuiscono la filtrazione. Sono costituiti da materiali granulari o coesivi, spesso vengono utilizzati i materiali presenti in loco.
- Rivestimento spondales: Garantisce una resistenza alla corrosione, specialmente nel lato fiume. Costituito da erba, rocce e pietrisco è il collegamento tra ambiente esterno ed argine.
- Zone di filtro: Lungo i lati del nucleo impermeabile, in materiale granulare, devono favorire la filtrazione.
- Sistemi di drenaggio: Costituiti da materiali a grana grossa, come le ghiaie, che presentano una permeabilità superiore rispetto al corpo dell'argine, tali materiali consentono una scelta più rapida e agevole del percorso di filtrazione per il fluido. Inseriti dietro il nucleo

impermeabile o vicino al piede dell'argine lato campagna, permettono il convoglio dell'acqua verso l'esterno evitando così un aumento di tensione efficace interno all'argine.

- Barriere impermeabili: Una opzione alternativa al posto dei sistemi di drenaggio, riducono la filtrazione tra il suolo permeabile e l'argine.
- Berme: Estensioni del corpo che aumentano la stabilità della struttura, esse sono realizzate compattando il materiale presente in loco.

Considerando vari fattori, quali il carico da supportare, le caratteristiche del fondale e del materiale di riempimento, l'ambiente circostante e l'altezza del terreno disponibile, la geometria degli argini può assumere diverse configurazioni. In generale, la forma degli argini è di tipo trapezoidale, con la pendenza delle sponde che varia in funzione delle proprietà del terreno costitutivo e con l'altezza definita in relazione al livello dell'acqua previsto.

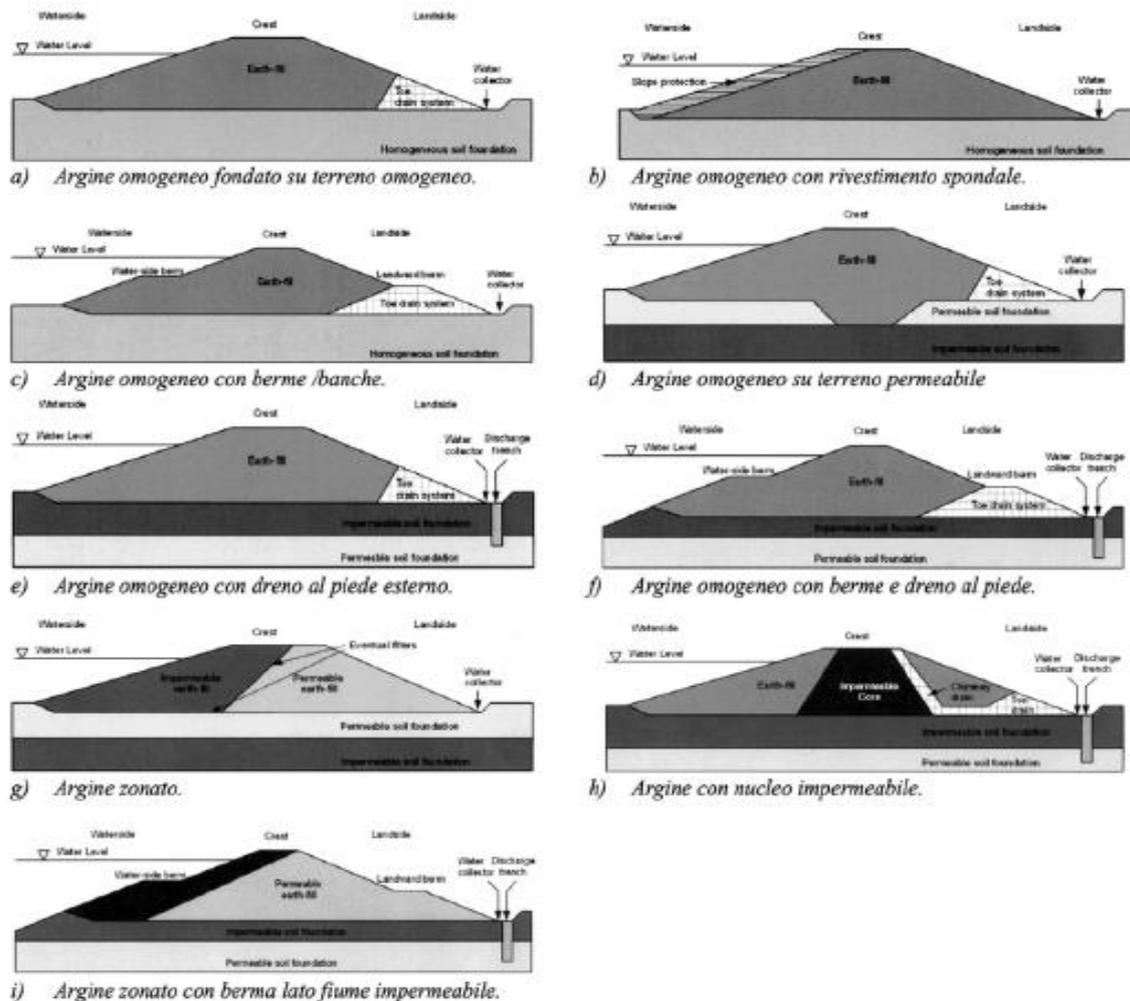


Figura 3-Diverse tipologie di argini a sezione omogenea e zonata

Gli argini zonati (Figure 3g, 3h e 3i) sono formati da una parte di terreno relativamente impermeabile e da una parte di terreno permeabile. Tra essi ci sono gli argini con nucleo impermeabile (Figure 3g e 3h) e quelli con il rivestimento impermeabile (Figura 3i): i primi sono pensabili come dighe in terra che trattengono l'acqua per lunghi periodi temporali; i secondi sono più utilizzati in zone costiere dove i materiali granulari sono più facili da trovare rispetto a quelli coesivi.

Una volta definite le varie componenti dell'argine si possono considerare degli aspetti riguardanti le caratteristiche. In primo luogo, è fondamentale considerare gli studi e le ricerche continuative condotti per analizzare i livelli di prestazione e di sicurezza degli argini. Queste indagini permettono di identificare anticipatamente le zone critiche, consentendo l'attuazione di interventi preventivi prima che si verifichino situazioni di rischio. Tale approccio aumenta l'affidabilità delle sezioni degli argini, garantendo una maggiore sicurezza anche in condizioni gravi. Per quanto riguarda gli studi dobbiamo valutare le proprietà meccaniche e geotecniche dei terreni presi in esame. Il primo passo è stabilire uno storico di tutte le operazioni fatte durante la vita dell'opera, avendo così già una interpretazione dei risultati precedenti utili per un confronto con quelli futuri. Risulterà fondamentale anche uno storico del corso d'acqua che ci porta a conoscere la morfologia dei terreni e a formulare una ipotesi sul comportamento futuro del fiume. Per determinare la granulometria effettiva del terreno, si ricorre all'uso di sondaggi, che consentono di individuare una stratigrafia dettagliata. Questa analisi permette di identificare le criticità presenti e di stabilire gli studi e gli interventi necessari per migliorare la situazione.

Infine, dai carotaggi effettuati si ricavano i valori meccanici e idraulici del terreno. Attraverso l'interpretazione di tali dati con diversi metodi, vengono selezionati i valori più rappresentativi, che consentono di individuare gli interventi più urgenti da adottare.

1.3 Regimi di filtrazione

Prima di esaminare le cause e i meccanismi di collasso degli argini, è fondamentale identificare le condizioni idrauliche più gravose che possono verificarsi in relazione alle caratteristiche di permeabilità dei terreni circostanti. Il fenomeno della filtrazione, che comporta il movimento dell'acqua attraverso l'argine o lo strato di fondazione, può manifestarsi come infiltrazione o sotto-infiltrazione. Per valutare il fenomeno della filtrazione, è essenziale considerare il gradiente di quota piezometrica, il quale indica la direzione del flusso del fluido. Dall'esterno dell'argine, il dislivello tra il livello della piena e il lato campagna provoca fenomeni di filtrazione a causa degli elevati livelli del corso d'acqua. Inoltre, possono verificarsi filtrazioni interne all'argine, generalmente causate da malfunzionamenti o usura di opere idrauliche, come tubazioni, spesso soggette a corrosione e prive di un appropriato materiale isolante. Alcuni fattori che aumentano il rischio di filtrazione sono (CIRIA, 2013):

- Infiltrazioni sotterranee dovute all'uso improprio di materiali permeabili per la realizzazione delle fondazioni degli argini.
- Il pendio presenta delle zone di fessurazione dello strato impermeabile.
- Tane e buche scavate da animali, materiale vegetale in decomposizione all'interno dell'argine, entrambi creano una direzione facilmente percorribile per la filtrazione.
- Durante delle lavorazioni, come scavi e drenaggi, si possono creare delle perforazioni del manto argilloso.

Il moto di filtrazione è governato da una equazione lineare detta Legge di Darcy :

$$v = k i \quad (1)$$

dove:

k è la conducibilità idraulica, legata al tipo di materiale costituente il mezzo poroso; rappresenta la capacità del materiale di consentire il flusso

i è il gradiente idraulico e rappresenta l'energia dissipata per percorso unitario

v è la velocità di flusso di un fluido tra due punti nel suolo

L'erosione, il sifonamento e l'instabilità rappresentano alcuni dei principali problemi ingegneristici che possono compromettere l'integrità degli argini e condurre al loro collasso, essendo questi fenomeni frequentemente causati dalla filtrazione dell'acqua attraverso i materiali porosi. In particolare, i fenomeni di instabilità generati dalla filtrazione si manifestano localmente al piede del lato campagna, noti come "fontanazzi". Questi fenomeni, espandendosi, possono provocare significativi cedimenti delle sponde arginali. Le principali rotture legate alla filtrazione si verificano prevalentemente a causa del sifonamento.(M.Martire, 2015).



Figura 4-Esempio di fontanazzo

Un aspetto cruciale da considerare è che la filtrazione si verifica in zone con diversa permeabilità o in materiali idraulicamente non isotropi, caratterizzati da una permeabilità orizzontale maggiore rispetto a quella verticale. L'analisi del reticolo idrodinamico consente di studiare le interazioni tra i principali elementi del problema, facendo riferimento a soluzioni relativamente semplici. Questo reticolo è costituito da linee equipotenziali e linee di flusso, che sono ortogonali tra loro e relative a uno specifico moto di filtrazione. Tali linee sono utili per determinare le condizioni energetiche e di pressione in ogni punto del campo di moto. Per costruire il reticolo idrodinamico, è fondamentale definire tutti gli aspetti idraulici pertinenti al problema in esame, il che implica la conoscenza delle proprietà del terreno, della tipologia della sezione arginale, della differenza di energia potenziale che genera il moto di filtrazione, della permeabilità del materiale e della differenza di permeabilità nei materiali idraulicamente anisotropi. È altresì importante considerare le condizioni di moto, sia permanenti che variabili, e le caratteristiche di flusso, siano esse confinate o non confinate. Tutte queste proprietà contribuiscono a una notevole differenziazione del reticolo idrodinamico in relazione al caso specifico analizzato. (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014).

Analizzando la linea di saturazione, definita come la superficie libera del moto filtrante, si osserva che essa si sposterà verso il paramento del lato campagna all'aumentare dell'anisotropia tra la permeabilità orizzontale e la permeabilità verticale. Al contrario, un incremento dell'anisotropia tra la permeabilità dell'argine e quella del terreno di fondazione comporta una riduzione della porzione di paramento del lato campagna interessata dalla fuoriuscita d'acqua, a causa di un abbassamento della linea di saturazione. (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014)

La variazione del reticolo idrodinamico si applica anche agli argini omogenei e zonati. Nel caso degli argini zonati, progettati con un nucleo impermeabile e fianchi altamente permeabili, posti su un terreno permeabile, la presenza di regimi di filtrazione solleva preoccupazioni significative. In questo contesto, la linea di saturazione nella porzione del lato campagna tende a variare, alzandosi o abbassandosi, in relazione al rapporto tra i coefficienti di permeabilità della porzione di argine in esame.

1.4 Meccanismi di rottura arginale

La conseguenza dell'incapacità del rilevato di soddisfare le prestazioni per cui è stato progettato è la manifestazione di una rottura o di un collasso. Dal punto di vista temporale, le rotture arginali possono verificarsi durante la fase di costruzione o in fase di esercizio. Nel primo caso, l'instabilità del corpo arginale e del piede di fondazione può essere attribuita a terreni poco permeabili e sovraconsolidati. Nel secondo caso, si può verificare un collasso idraulico o strutturale, che comporta l'incapacità di prevenire inondazioni nel territorio circostante. Il collasso idraulico si manifesta con l'ingresso di acqua nell'argine, causato da un sormonto arginale dovuto a un difetto progettuale nella elevazione della struttura, senza tuttavia arrecare danno al rilevato stesso. Al contrario, il collasso strutturale provoca una perdita di resistenza degli elementi costitutivi dell'argine, comportando una diminuzione delle capacità e delle proprietà prestazionali per le quali l'argine è stato originariamente progettato. (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014).

I due tipi di collasso possono essere interconnessi, in quanto uno può costituire la causa dell'altro. In conformità con l'EC7 del 2004 e le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) del 2018, si distinguono due categorie di rottura: la rottura allo stato limite di esercizio (SLE), che è dovuta a degrado e danneggiamenti derivanti da vari fattori, quali agenti chimici e fisici, variazioni di temperatura e azioni umane, e la rottura allo stato limite ultimo (SLU), associata al degrado di uno o più elementi della struttura arginale. È fondamentale identificare i punti di degrado, come fessure e cavità, per poter intervenire tempestivamente e prevenire il deterioramento o, in casi estremi, il collasso totale (SLU). Tuttavia, durante le fasi di piena, si possono formare canali interni all'argine che favoriscono un collasso rapido e incontrollato. È possibile, pertanto, classificare diverse tipologie di rottura o danno agli argini. (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014):

- *erosione esterna*: dovuta all'azione di correnti, onde e maree contro la superficie del terrapieno, erosione superficiale che può interessare l'alveo e il lato campagna dell'argine. Anche l'azione di vegetali, animali e umani può generare lo spostamento di parte del materiale. L'erosione esterna si verifica quando il materiale non è abbastanza resistente allo sforzo da taglio indotto dal flusso idraulico. L'erosione esterna può essere stimata mediante un'equazione (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014):

$$E_{rf} = K_d (\tau_b - \tau_c)^a \quad (2)$$

dove:

E_{rf} è la velocità di erosione fluviale unitaria.

τ_b la tensione tangenziale esercitata dalla corrente sul contorno.

a è un esponente empirico, pari a 1.0.

K_d e τ_c sono il coefficiente di erodibilità e lo sforzo tangenziale critico, entrambi dipendono dalla natura del terreno.



Figura 5-Erosione esterna lato alveo, (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014)

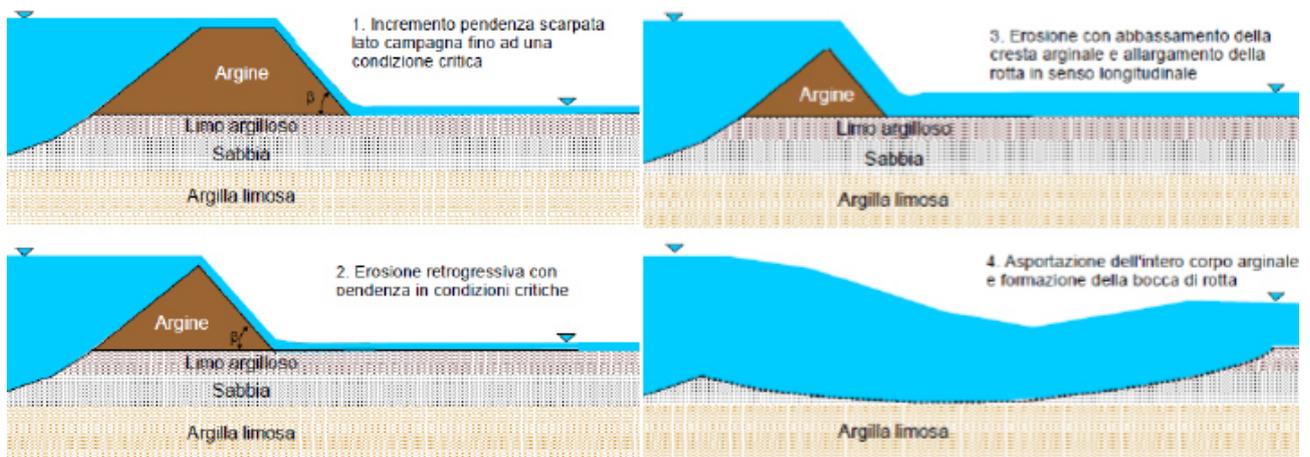


Figura 6-Erosione esterna lato campagna, (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014)

- *erosione interna*: dovuta all'azione dell'acqua, si formano dei cunicoli (spesso scavati dagli animali), nel terreno del rilevato o di fondazione. La filtrazione, ovvero il trasporto e l'allontanamento di particelle di terreno fine attraverso il corpo arginale o la fondazione, deve avere un effetto ridotto per evitare che si inneschi l'erosione della struttura arginale, generando dei condotti dove aumentano le pressioni neutrali e, di conseguenza, i rischi di rottura in caso di infiltrazioni incontrollate. Il fenomeno di filtrazione viene espresso attraverso la forza di filtrazione, descritta dall'equazione:

$$S_f = \rho g i = \gamma_w \quad (3)$$

dove:

ρ è la densità del fluido

g è l'accelerazione di gravità

γ_w è il peso specifico dell'acqua

i è il gradiente idraulico

Inoltre i meccanismi di erosione interna si possono dividere in (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014):

- *Erosione retrogressiva*: Nel punto di uscita del flusso, si verifica l'asportazione retrograda delle particelle. Questo fenomeno si manifesta attraverso un passaggio continuo quando il gradiente idraulico supera il valore di flottazione del terreno.
- *Erosione concentrata*: si sviluppa nelle fessurazioni quando la forza di trascinamento dell'acqua supera il valore critico.
- *Erosione di contatto*: si verifica al contatto tra un terreno a grana fine e uno a grana grossa con forze di filtrazione dirette parallelamente alla stratificazione.
- *Erosione per migrazione*: migrazione delle particelle fini all'interno di terreni instabili.

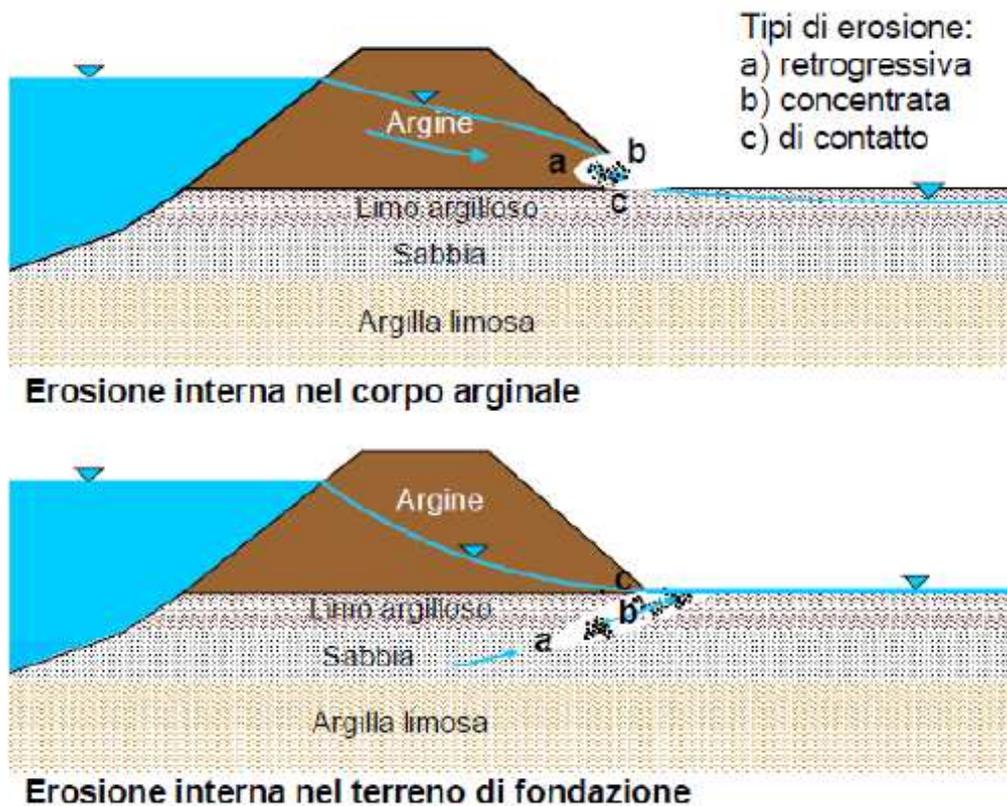


Figura 7-Esempi di erosione interna, (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014)

- *Instabilità del terreno di fondazione e dell'argine*: dovuta alla sottopressione idraulica al piede lato campagna.
- *Instabilità del parametro arginale*: indotta dai regimi di filtrazione, possono rendere labile il parametro interno e/o esterno. Le forze attive del movimento delle particelle del terreno superano le forze resistenti, generando scivolamenti lungo una superficie di taglio della struttura arginale.
- *Instabilità al piede o a campagna per liquefazione statica e sifonamento*: indotta dai regimi di filtrazione.
- *Instabilità per scorrimento*: relativo con materiali coesivi che mostrano scarse caratteristiche meccaniche di resistenza al taglio insufficienti per contrastare la forza dell'acqua.

Il fenomeno di instabilità può manifestarsi in diverse modalità, tra cui scorrimento rotazionale o traslazionale, ribaltamento, sollevamento, assestamento e cicli di congelamento/scongelo o imbibizione/essiccamento, tutti connessi allo stato di fondazione e alla fase di costruzione. Per prevedere il collasso degli argini, è fondamentale considerare non solo le complesse stratigrafie, ma anche la natura transitoria dei fenomeni indotti dalla dinamica fluviale. Tra tali fenomeni si includono il livello di massima piena e la sua durata, il livello di piena ordinaria e la sua durata, il livello di magra, i tempi di svasso e l'influenza dei corsi d'acqua adiacenti.

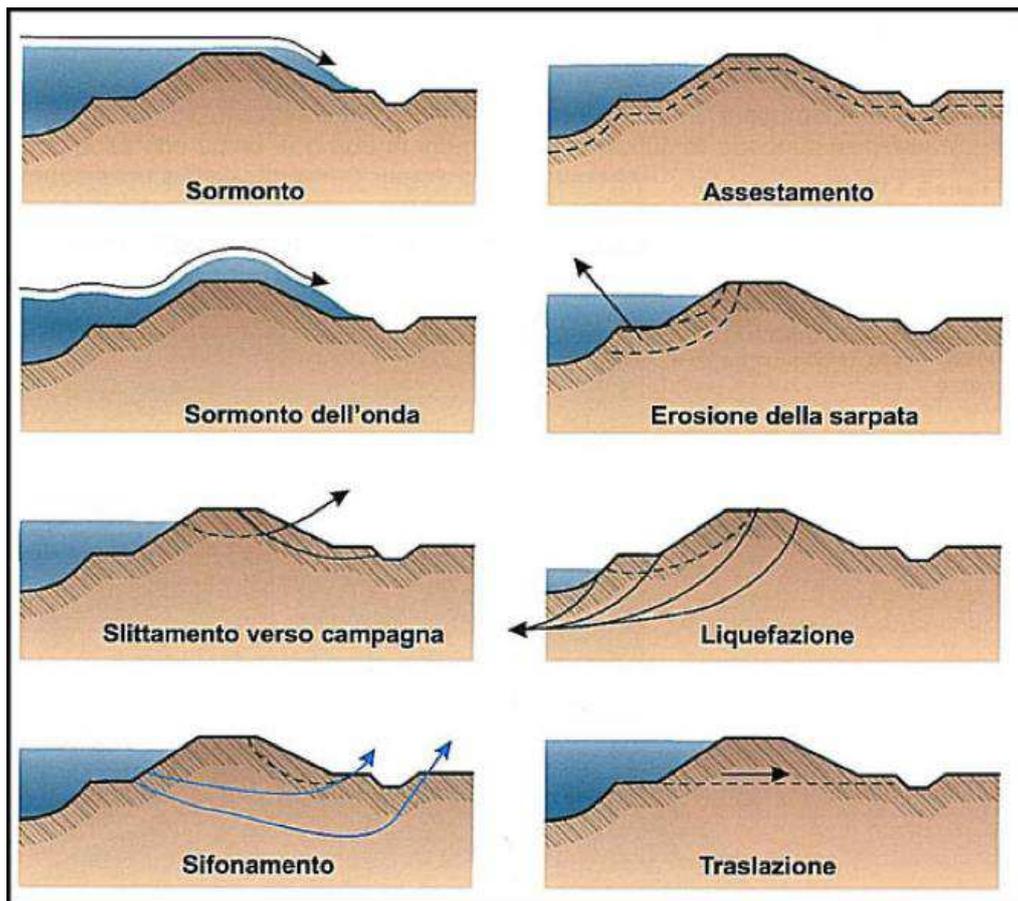


Figura 8-Schema dei principali meccanismi di rottura di un argine, (Minerva)

1.5 Analisi e monitoraggio degli argini

La caratterizzazione e l'analisi degli argini presentano notevoli complessità, principalmente a causa della loro estensione longitudinale e della frequente eterogeneità dei materiali impiegati. Pertanto, è fondamentale realizzare una caratterizzazione il più precisa e realistica possibile, in grado di fornire informazioni dettagliate riguardanti la geometria, la natura, lo stato fisico e le proprietà dei materiali che compongono sia la struttura in elevazione che la fondazione. Considerata la complessità del caso, si tende a semplificare la caratterizzazione attraverso l'adozione di un modello comune, seguendo uno schema di riferimento. L'analisi si propone di articolarsi in tre fasi, integrando diversi metodi di studio e approcci metodologici. (P.Simonini, 1 Marzo 2021).

- *La prima fase:* è la fase dove si raccolgono tutte le informazioni necessarie allo studio. La morfologia e geologia dell'area, la struttura e la storia dell'opera di difesa e dell'evoluzione del corso d'acqua.
- *La seconda fase:* si suddivide la zona di studio in tratti omogenei, attraverso i risultati di sopralluoghi e indagini geofisiche di superficie si possono analizzare lunghi tratti di argine in tempi modesti, infatti queste prove di superficie non richiedono l'introduzione di alcun strumento nel terreno, avendo così una esecuzione molto rapida. In questa fase vengono segnalate la presenza di situazioni particolari o problematiche, dove è necessario uno studio dettagliato per evitare la crisi del sistema di difesa.
- *La terza fase:* attraverso prove geotecniche in sito e in laboratorio e prove geofisiche si analizzano le sezioni più critiche individuate nella seconda fase.

Tenendo conto di un tratto arginale il più possibile omogeneo, individuato con le prove geofisiche, gli obiettivi principali della caratterizzazione sono (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007):

- Le caratteristiche geotecniche dei terreni presenti come permeabilità, resistenza e compressibilità.
- Stato fisico dei depositi come il grado di saturazione, consistenza e addensamento.
- Unità litostratigrafiche omogenee e la loro distribuzione spaziale.

Le indagini geotecniche comprendono un insieme di attività tra cui sondaggi e prove di laboratorio, finalizzate alla classificazione dei materiali e alla misura dei parametri di stato, quali prove di taglio e di permeabilità. Tra le indagini in situ, si distinguono le prove di penetrazione standard (CPT e CPTU), le indagini sismiche su verticali (SCPTU e SDMT) e le prove per la determinazione della permeabilità in sito, come le prove di Lefranc e quelle di pompaggio in regime stazionario. L'obiettivo principale di tali indagini è la definizione di una stratigrafia dettagliata, in grado di evidenziare la presenza di alternanze di terreni con caratteristiche differenti, le quali influenzano le proprietà idrauliche e la resistenza a taglio dei depositi. Secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2018), il monitoraggio ha come scopo la verifica della corrispondenza tra le ipotesi progettuali e i comportamenti effettivamente osservati, nonché il controllo della funzionalità nel tempo delle strutture. È altresì fondamentale accertare che i valori delle grandezze misurate siano compatibili con i requisiti di sicurezza previsti.

2 CASO STUDIO: LE ARGINATURE DEL FIUME TAGLIAMENTO

2.1 Collocazione Geografica

Il fiume Tagliamento si estende per 178 km, originando in provincia di Belluno, nel Veneto, e concludendo il suo percorso nel Friuli Venezia Giulia, dove sfocia nel Golfo di Venezia, tra Lignano Sabbiadoro (UD) e Bibione (VE). Il bacino idrografico del fiume, caratterizzato da una conformazione a imbuto, copre un'area di circa 3000 km², abitata da circa 165.000 persone. I principali centri abitati lungo il corso del fiume includono Latisana e San Michele al Tagliamento. Le risorse idriche del Tagliamento sono prevalentemente destinate agli usi idroelettrici, irrigui e potabili.

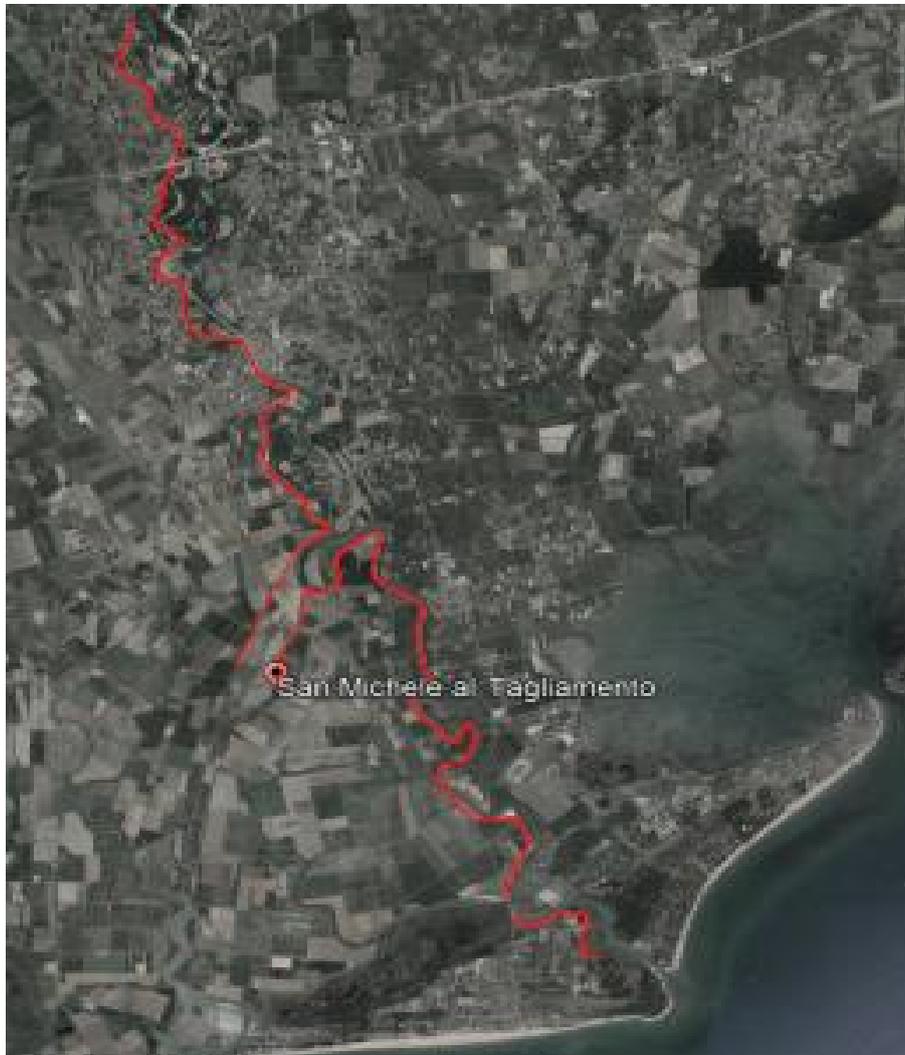


Figura 9-Inquadramento area di progetto, in rosso gli argini in destra orografica,(Google Earth)

Nel tratto montano il fiume presenta un corso a canali intrecciati, con una grande mobilità dei canali tra una piena e l'altra. Con una portata limitata il letto del fiume, generalmente molto ampio e poco profondo, presenta numerosi canali che si intersecano tra di loro, formando rami, isole e barre (Fig.10). Queste isole, spesso sommerse con portate elevate, sono costituite dall'accumulo di sedimenti e si formano senza seguire uno schema comune. I corsi d'acqua intrecciati sono tipici dei rilievi montani, dove la pendenza risulta elevata. Il letto del fiume è costituito da materiali grossolani, un alveo largo, carico di fondo elevato e sponde facilmente erodibili. A volte il letto è completamente asciutto e l'acqua scorre ad una certa profondità tra i depositi ghiaiosi.



Figura 10-Formazione di canali intrecciati del Fiume Tagliamento

Avvicinandosi alla pianura il fiume diminuisce la pendenza, le sabbie e i limi prendono il posto dei detriti grossolani. Non ho più un andamento intrecciato, l'alveo si restringe e ho un unico corso del fiume (Fig.11). La diversa composizione granulometrica dell'alveo non mi garantisce più una elevata filtrazione, come conseguenza avrò un volume d'acqua superiore rispetto al tratto montano. D'ora in poi il fiume sarà costituito da un unico canale con una morfologia a meandri. Il suo percorso varierà lentamente, ma nelle sponde esterne, dove la velocità di flusso è maggiore, avremo una continua modifica dovuta all'erosione. Al contrario, nelle zone interne del fiume dove il flusso tende a rallentare, avremo dei depositi.

Il fiume Tagliamento, a causa delle sue caratteristiche idrologiche, ha provocato nel corso degli anni significativi danni a seguito di inondazioni, in particolare nella città di Latisana. In questa area, è imprescindibile effettuare continui sondaggi e indagini per garantire la tutela del territorio. Tale necessità sottolinea l'importanza della progettazione di interventi idraulici mirati e risolutivi, al fine di mitigare i rischi associati agli eventi di piena.



Figura 11-Tagliamento con morfologia a meandri,(Google Earth)

2.2 Distribuzione dei sondaggi

Prima di analizzare le diverse tipologie di sondaggi condotti lungo il corso del fiume Tagliamento, è opportuno distinguere tra le indagini effettuate nel 2019 e quelle realizzate nel 2023, tenendo conto della loro collocazione geografica. La campagna di indagini del 2019, evidenziata con puntatori rossi nella figura 12, ha avuto luogo lungo le arginature della sponda destra del fiume, interessando i territori dei comuni di Villanova, Malafesta, Biasini, San Mauro al Tagliamento, San Giorgio al Tagliamento, San Michele al Tagliamento, Sant'Anna al Tagliamento e San Filippo al Tagliamento. In contrapposizione, la campagna di indagini del 2023, contrassegnata da quadratini bianchi nella figura 12, ha coinvolto i comuni di San Giorgio al Tagliamento (sondaggio SA1), Gorgo (sondaggio S1) e il tratto terminale del fiume nei pressi di Bevazzana, sia sulla sponda destra che su quella sinistra.

Considerando la distanza dalla foce del fiume Tagliamento, le indagini del 2019 mostrano distanze variabili, da un minimo di 16 km a San Filippo al Tagliamento a un massimo di 65 km a Villanova. Le indagini del 2023, invece, evidenziano distanze comprese tra 6 km a Bevazzana e 24 km a San Giorgio al Tagliamento. È importante notare che lo studio condotto sulla sponda destra è stato realizzato dal Dipartimento ICEA per conto della Regione Veneto, mentre i dati relativi alla sponda sinistra sono stati forniti dalla Regione Friuli Venezia Giulia, i quali documentano in particolare gli interventi effettuati nella zona di Gorgo di Latisana.

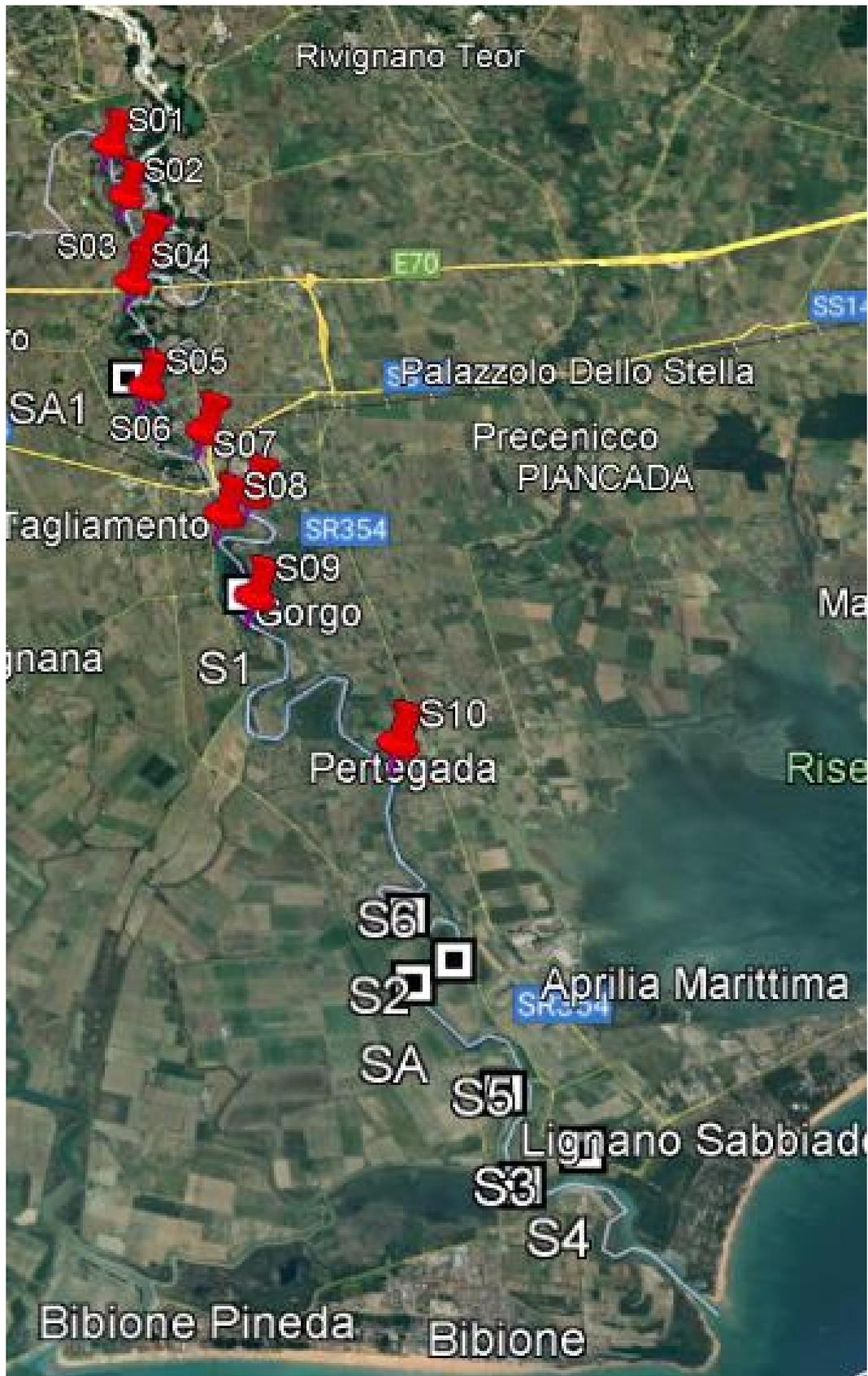


Figura 12- Distribuzione dei sondaggi da Villanova a San Bevazzana,(Google Earth)

Prima di esaminare le diverse tipologie di sondaggi, è fondamentale chiarire l'approccio adottato per la programmazione degli interventi da realizzare. La pianificazione delle indagini si articola in tre fasi. La prima fase è dedicata alla raccolta di tutte le informazioni disponibili riguardanti la morfologia e la geologia dell'area, nonché la struttura e la storia delle opere di difesa. La documentazione pertinente relativa al tratto di argine in esame è custodita presso il Genio Civile. (P.Simonini-F.Ceccato, 6 Dicembre 2021). La seconda fase del processo prevede la suddivisione dell'opera di interesse in tratti omogenei. Questa zonizzazione è il risultato di sopralluoghi e indagini geofisiche superficiali. In questa fase si utilizzano sondaggi non invasivi e rapidi, che consentono di condurre un'indagine estesa in tempi contenuti. L'ultima fase implica la realizzazione di indagini di dettaglio su sezioni rappresentative di ciascun tratto omogeneo, selezionate in base alle indicazioni fornite dallo studio geofisico. Tale analisi è effettuata attraverso prove geotecniche in sito e in laboratorio, le quali vengono confrontate con i profili di resistività derivanti dalle indagini geofisiche. Le analisi di laboratorio su campioni indisturbati e disturbati devono portare alla determinazione di:

- Peso specifico dei grani
- Peso dell'unità del volume
- Contenuto d'acqua
- Limiti di Atterberg

Entrambe le campagne di indagini consistono in sondaggi e prove in-sito come CPT, CPTU, SPT e SCPT.



Figura 13-Esempio di carotiere utilizzato per le prove CPT

La prova CPT (Fig.13) rappresenta un metodo di indagine utile per identificare la successione stratigrafica lungo una verticale, attraverso l'osservazione del contenuto delle carote raccolte, come illustrato nella figura 14. Questo approccio consente di stimare diversi parametri geotecnici, tra cui

l'angolo di attrito e la permeabilità, sia in terreni a grana fine che in terreni a grana grossa, a un costo relativamente contenuto. La prova consiste nell'infissione nel terreno di una punta conica di diametro 35,7 mm e angolo di apertura di 60°, esercitando una pressione mediante un dispositivo di spinta collegato tramite una batteria di tubi. Durante l'esecuzione della prova, si misurano la resistenza di punta e l'attrito laterale opposti dal terreno, in condizioni di rottura determinate dalla penetrazione dello strumento, mantenendo una velocità costante di 2 cm/s. È osservabile che la resistenza di punta nei terreni sabbiosi è significativamente superiore a quella nei terreni argillosi. Pertanto, l'analisi preliminare basata sulla resistenza di punta (q_c) fornisce un primo indicatore della stratigrafia, che può essere successivamente raffinato attraverso la resistenza di attrito laterale (f_s). Per stimare la pressione interstiziale (u), si impiega una prova CPTU. Questo strumento si configura come un penetrometro statico a punta elettrica, dotato di un filtro di ceramica posizionato alla base della punta conica, il quale consente di misurare e registrare in modo accurato le pressioni interstiziali durante la penetrazione. (A. Bruschi, 2012).



Figura 14-Esempio di cassetta, profondità da m 10.00 a m 15.00

Una volta completati tutti i sondaggi, i risultati di ciascun carotaggio vengono aggregati per costruire l'effettiva stratigrafia dell'argine, come illustrato nella figura 15. È fondamentale che la stratigrafia risulti semplice e rappresentativa della composizione dell'argine, in modo da poter essere utilizzata negli studi successivi. Per la sua elaborazione, si può fare riferimento a uno schema di riferimento che guidi la composizione della stratigrafia, come mostrato nella figura 16.

Nel capitolo successivo, verrà analizzato l'insieme delle stratigrafie che compongono l'argine, con un focus iniziale sul corpo arginale e successivamente sulla fondazione, cercando di individuare analogie granulometriche. Pertanto, per tutti i sondaggi effettuati lungo il fiume Tagliamento, si procederà a delineare un profilo comune, utile per determinare un insieme di caratteristiche meccaniche e parametri idraulici.

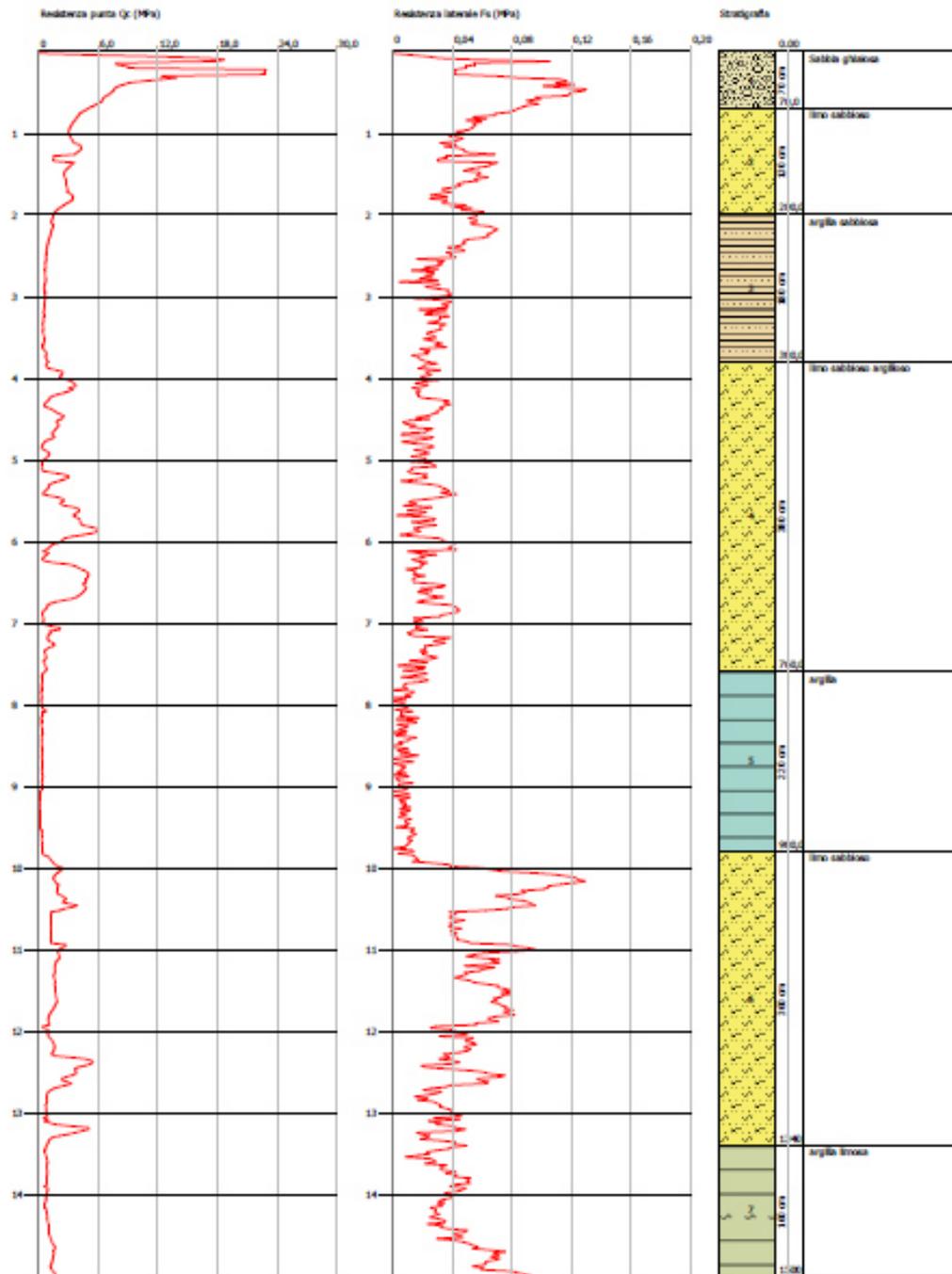


Figura 15-Stratigrafia del sondaggio S1

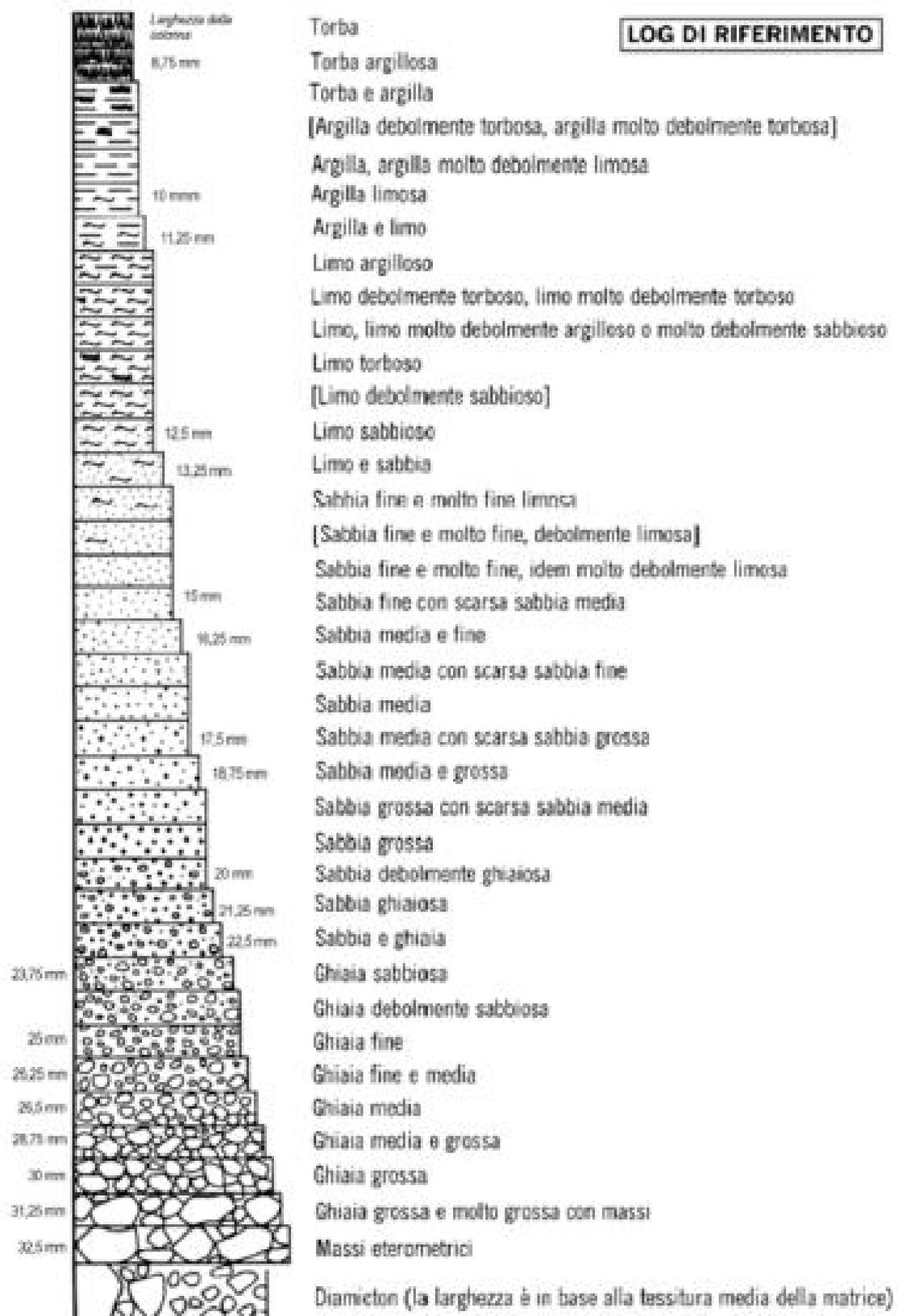


Figura 16-Colonna di riferimento per comporre una stratigrafia

2.3 Geometria e stratigrafia degli argini

La stratigrafia degli argini del fiume Tagliamento è caratterizzata da una complessità sedimentaria che riflette le dinamiche fluviali e le variazioni ambientali nel corso del tempo. Gli strati principali identificabili includono:

- *Sedimenti Alluvionali*: Composti principalmente da sabbia, ghiaia e limo, questi sedimenti vengono depositati durante le piene e sono tipici delle aree immediatamente adiacenti al fiume, mostrando una stratificazione orizzontale che testimonia l'attività fluviale.
- *Terreni di Origine Glaciale*: In alcune sezioni, soprattutto a monte, si possono rinvenire sedimenti di origine glaciale, quali morene e sabbie glaciali, che forniscono indizi sulla storia geomorfologica della regione.
- *Sedimenti di Origine Fluviale*: La variabilità del corso del fiume ha determinato l'accumulo di materiali diversificati, con una predominanza di ghiaia e sabbia nelle zone di maggiore corrente, contribuendo alla complessità stratigrafica degli argini.
- *Sedimenti Organici*: In aree più tranquille e meno soggette a erosione, possono emergere strati di torba o sedimenti ricchi di materia organica, che sono indicativi di ambienti paludosi e contribuiscono alla biodiversità locale.

Questi strati offrono un'importante finestra sulla storia geologica del territorio e rivestono un ruolo cruciale nella gestione delle risorse idriche e nella conservazione degli ecosistemi fluviali. La comprensione della stratigrafia degli argini è quindi fondamentale per analizzare l'evoluzione naturale del fiume e l'impatto delle attività antropiche.

La geometria degli argini del fiume Tagliamento presenta caratteristiche specifiche influenzate da molteplici fattori, tra cui l'andamento del fiume, le dinamiche sedimentarie e l'intervento umano. I principali aspetti geometrico-morfologici includono:

- *Profilo Trasversale*: Gli argini del Tagliamento tendono a manifestare un profilo a forma di V o a U, variabile in base alle zone. Nelle aree di maggiore erosione, gli argini si presentano più ripidi, mentre nelle zone di deposizione si riscontrano forme più dolci.
- *Altezza e Larghezza*: Le dimensioni degli argini, in termini di altezza e larghezza, variano in relazione alle condizioni fluviali e alle modifiche indotte nel tempo. In generale, gli argini possono raggiungere altezze significative, soprattutto in corrispondenza delle confluenze o in aree soggette a piene.

- *Vegetazione*: La presenza di vegetazione lungo gli argini gioca un ruolo fondamentale nella stabilizzazione del suolo, influenzando la geometria e contribuendo a ridurre il fenomeno dell'erosione. Argini più vegetati tendono ad avere forme più arrotondate.
- *Interventi Antropici*: La geometria degli argini è stata modificata da opere di ingegneria idraulica, tra cui la costruzione di argini artificiali, canali e strutture di contenimento, che possono alterare significativamente la morfologia naturale del fiume.
- *Dinamiche Sedimentarie*: La geometria degli argini è influenzata dalle dinamiche di sedimentazione ed erosione. Le piene possono rimuovere materiale dagli argini, mentre i depositi generati durante tali eventi contribuiscono a modificare la forma e l'estensione degli stessi.

La combinazione di questi fattori rende la geometria degli argini del fiume Tagliamento un elemento cruciale per la gestione delle risorse idriche e la conservazione degli ecosistemi fluviali.

Dalla valutazione dei diametri caratteristici, è possibile derivare diversi valori e formule utili per stimare il comportamento meccanico e idraulico dell'argine. I diametri di particolare interesse includono il d_{10} , che rappresenta il diametro corrispondente al 10% in peso del materiale passante; il d_{50} , noto anche come diametro medio, che corrisponde al 50% in peso del passante; il d_{60} , che si riferisce al 60% in peso del passante; e il d_{90} , che rappresenta il 90% in peso del passante. Da questi diametri è possibile calcolare il coefficiente di uniformità (C_u), definito come il rapporto tra il d_{60} e il d_{10} , e l'indice granulometrico (I_{gr}), il quale è utilizzato in successivi modelli per la stima dell'angolo di attrito critico (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007).

$$I_{gr} = (d_{50} * d_{10}) / d_{60}$$

Ora che sono stati presentati i parametri granulometrici utilizzati nella presente analisi, è opportuno descrivere i materiali che compongono i campioni in esame. I materiali oggetto di analisi includono la ghiaia, con particelle aventi un diametro compreso tra 2 e 60 mm; la sabbia, con particelle di diametro variabile tra 0,06 e 2 mm; il limo, le cui particelle presentano un diametro compreso tra 0,002 e 0,06 mm; e l'argilla, caratterizzata da particelle di diametro inferiore a 0,002 mm. La ghiaia e la sabbia sono classificabili come terreni a grana grossa, mentre il limo e l'argilla rientrano nella categoria dei terreni a grana fine. Attraverso l'analisi dei campioni, si ottiene una separazione dei diversi materiali, a ciascuno dei quali viene attribuita una percentuale rispetto al totale. Questo approccio consente di elaborare una stratigrafia dettagliata per ciascun campione analizzato.



Figura 18-Esempio di campione costituito da diversi materiali

3.2 Interpretazione dati del corpo arginale

Prima di intraprendere l'analisi granulometrica relativa ai diversi sondaggi, è opportuno semplificare la struttura di un argine, considerandolo composto unicamente da due elementi: il corpo arginale e la fondazione. Questa semplificazione mira a facilitare l'individuazione di aspetti comuni tra i vari sondaggi, consentendo una valutazione omogenea del corpo arginale e della fondazione. Focalizzandosi sul corpo arginale, si considera la porzione che va dal punto della sponda dell'alveo inciso (o alveo attivo) fino alla quota più elevata. Di norma, si analizzano i primi cinque metri del rilevato, pertanto il corpo arginale è definito in base a sondaggi che non superano questa profondità.

Come primo passo per tutti i sondaggi effettuati, si ricavano dalle prove di laboratorio le analisi granulometriche relative ai primi cinque metri del rilevato arginale. Vengono esaminati i sondaggi condotti da Villanova a San Filippo e quelli realizzati da San Giorgio a Bevazzana. I risultati ottenuti sono presentati in tabelle, al fine di facilitare la comprensione delle informazioni (Tabella 1-2).

La Tabella 1 (si veda Appendice 1) riporta i risultati ottenuti da un sondaggio effettuato a Malafesta, in cui i valori dei materiali costituenti il corpo arginale sono espressi in percentuale. Si osserva una distribuzione di materiali coesivi lungo i cinque metri del corpo arginale, con una predominanza di limo argilloso.

La Tabella 2 (si veda Appendice 2) presenta i risultati di un sondaggio condotto a San Michele, in cui i valori dei materiali del corpo arginale sono anch'essi espressi in percentuale. In questo caso, la distribuzione dei materiali lungo i cinque metri del corpo arginale evidenzia la presenza di limo argilloso e limo sabbioso.

Come evidenziato nelle Tabelle 1 e 2, è di particolare interesse valutare le diverse posizioni in cui sono stati effettuati i sondaggi. Analizzando i sondaggi condotti a circa 65 chilometri dalla foce, si osserva che quelli relativi al corpo arginale sono stati eseguiti da Villanova a San Filippo al Tagliamento, con una significativa concentrazione di sondaggi nei comuni di San Michele al Tagliamento e San Giorgio al Tagliamento. La variabilità della localizzazione dei sondaggi offre, ancor prima dell'analisi delle prove di laboratorio, un'indicazione preliminare sulla granulometria dei rilevati, che dovrà essere successivamente confermata dalle analisi granulometriche. In sintesi, i sondaggi effettuati da Villanova a San Filippo mostrano per il corpo arginale una quasi totale assenza di ghiaia, con una predominanza di limo. Nella zona settentrionale, nelle vicinanze di Malafesta e Biasini, si riscontra la presenza di limo debolmente argilloso. Avvicinandosi alla foce, nelle aree di San Michele al Tagliamento e San Filippo al Tagliamento, l'argilla viene sostituita dalla sabbia. In queste zone, il limo non risulta predominante come nelle aree precedenti; si osserva invece un'alternanza tra sabbia fine e limo, e tra limo e sabbia fine.

Nei sondaggi effettuati tra San Giorgio e Bevazzana non è stata riscontrata la presenza di ghiaia nei campioni analizzati. Tuttavia, a differenza dei sondaggi condotti negli anni precedenti, la granulometria appare significativamente più diversificata. Associato alla predominanza di limo, si registra una presenza non trascurabile sia di sabbia che di argilla. In conclusione, si evidenzia un'alternanza di limo argilloso debolmente sabbioso e di limo sabbioso debolmente argilloso, che compongono il corpo arginale. I risultati ottenuti confermano le previsioni iniziali, evidenziando la prevalenza di materiale coesivo nei comuni situati a 60 km dalla foce, con una maggioranza di limo

rispetto all'argilla. Si osserva inoltre una presenza non trascurabile di materiale granulare, in particolare sabbia fine (sebbene non sia stata riscontrata ghiaia), nei pressi di Bevazzana, a 8 km dalla foce del fiume.

Attraverso l'utilizzo di un software, sono stati realizzati grafici triangolari, in cui ciascun asse rappresenta un materiale granulometrico: sull'asse x è riportata la sabbia, sull'asse y il limo e sull'asse z l'argilla. Poiché la presenza di materiale ghiaioso è minima, tale componente non è stata considerata nella costruzione del grafico. I punti all'interno del grafico sono determinati mediante l'interpolazione di tre valori differenti, consentendo così di identificare facilmente le componenti granulometriche predominanti (Grafico 1). Inoltre, nel Grafico 2 vengono definiti i diametri notevoli d_{10} e d_{50} in funzione della distanza dalla foce del fiume. Sull'asse y sono rappresentati i valori dei diametri notevoli calcolati attraverso le analisi granulometriche, mentre sull'asse x è indicata la distanza, espressa in chilometri, dei sondaggi effettuati dalla foce. Il Grafico 3 illustra la composizione percentuale dei materiali del corpo arginale in relazione alla distanza dalla foce, espressa in chilometri, per i sondaggi compiuti da Villanova a Bevazzana. Questi grafici offrono un'importante visione della possibile composizione granulometrica del corpo arginale.

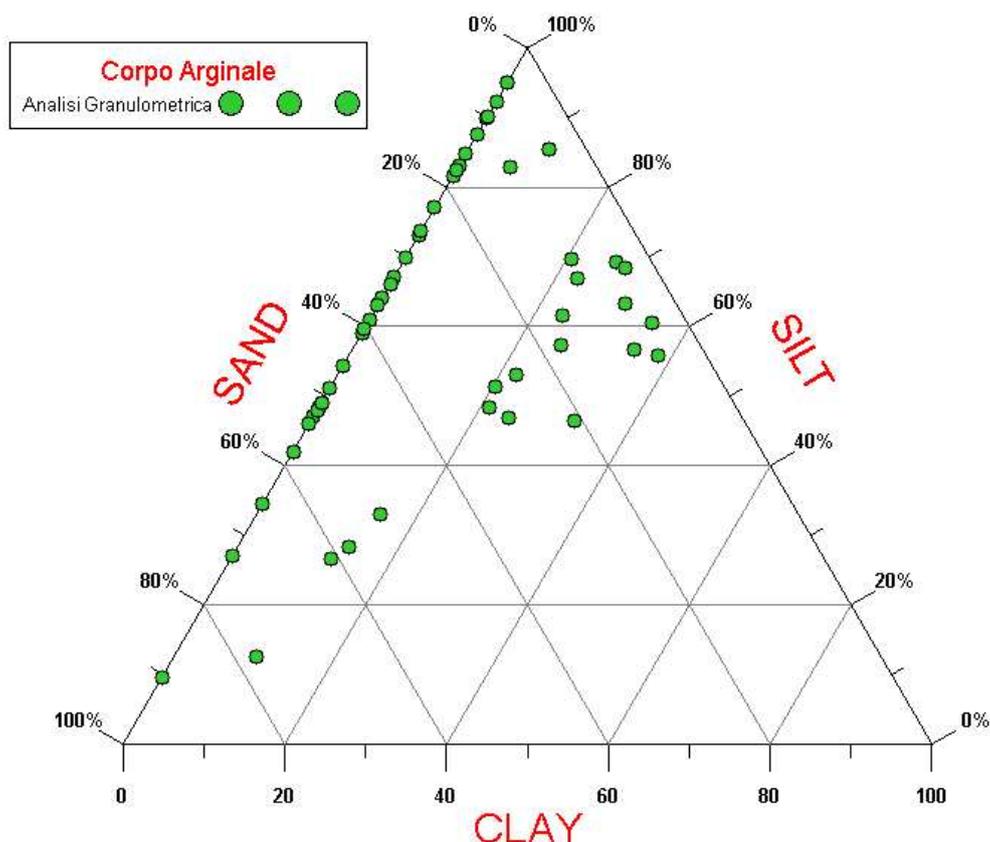


Grafico 1- Corpo arginale dei sondaggi fatti da Vilanova e Bevazzana

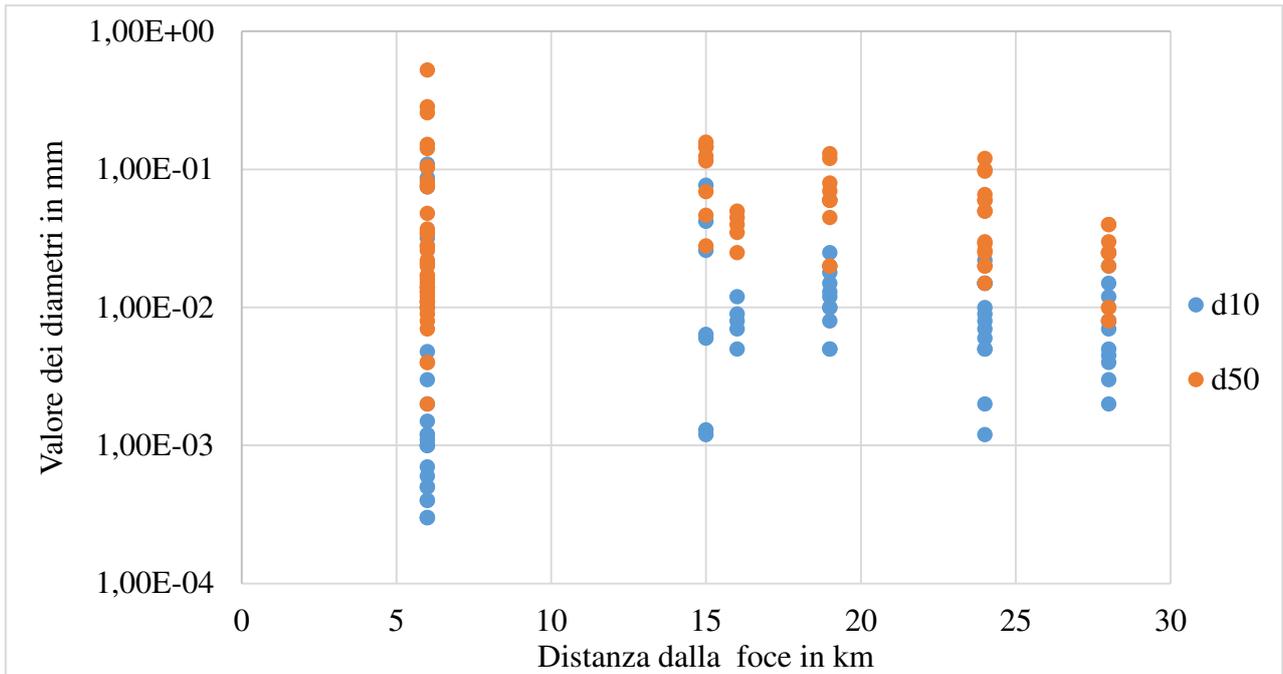


Grafico 2- d_{10} e d_{50} del corpo arginale in funzione della distanza dalla foce, sondaggi da Villanova a Bevazzana

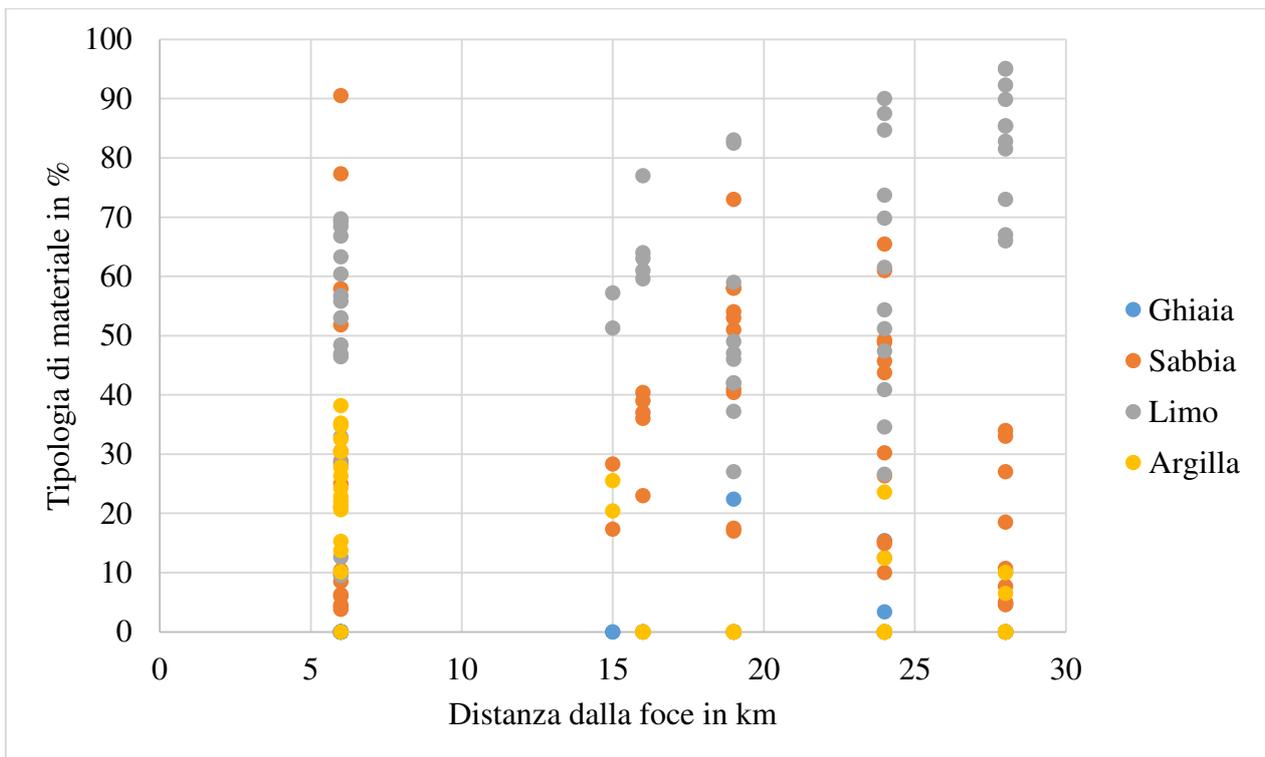


Grafico 3- Tipologia di materiale del corpo arginale (%) in funzione della distanza dalla foce in km

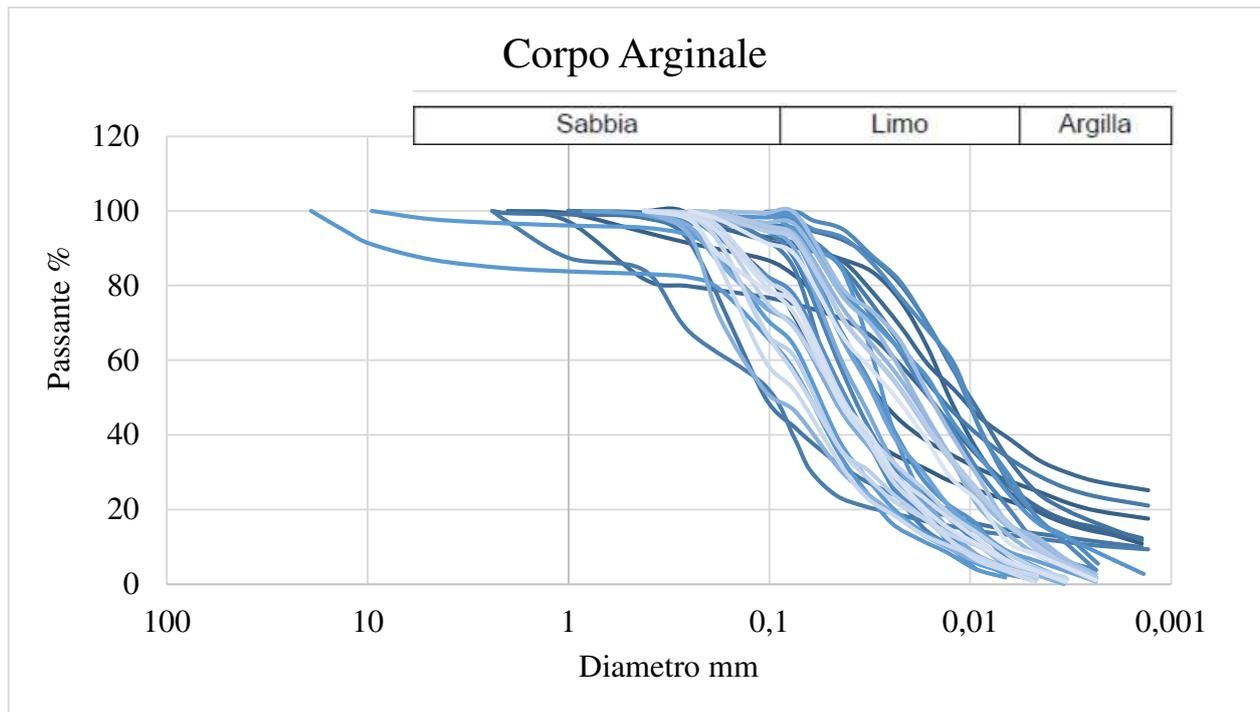


Grafico 4- Fuso di curve granulometriche del Corpo Arginale

Il Grafico 4 illustra il fuso delle curve granulometriche relative al Corpo Arginale, derivanti dai sondaggi condotti tra Villanova e Bevazzana. Questo grafico ha lo scopo di aggregare le curve granulometriche rappresentative di tutti i sondaggi effettuati nei primi cinque metri di argine. Attraverso diverse tonalità di blu si rappresentano le curve granulometriche e i relativi livelli stratigrafici. Analizzando il fuso delle curve granulometriche, è possibile derivare diverse caratteristiche significative. Questa interpretazione consente di evidenziare le proprietà fisiche e strutturali dei materiali in esame, contribuendo a una migliore comprensione delle dinamiche sedimentologiche e delle implicazioni ingegneristiche associate. Queste caratteristiche sono:

-Uniformità: Curve che mostrano una distribuzione simile delle dimensioni indicano materiali con caratteristiche di omogeneità. Inversamente, una grande variabilità tra le curve può indicare materiali con diverse proprietà. Nell'appendice 3 si mostra graficamente la relazione che intercorre tra il coefficiente di Uniformità C_u e la distanza dalla foce espressa in chilometri. Una curva molto ripida indica una distribuzione uniforme, mentre una curva più piatta suggerisce una maggiore varietà nelle dimensioni delle particelle. Nell'appendice 4 sono presentati in tabella i valori del coefficiente di uniformità C_u ottenuti per il corpo arginale, evidenziando come i risultati variano in funzione della distanza dalla foce. Si osserva che i valori più elevati di C_u si riscontrano a circa 6 km dalla foce, con un picco massimo di 129. A mano a mano che ci si allontana dalla foce, in particolare tra i 16 e i 28 km, il valore del coefficiente di uniformità tende a stabilizzarsi all'interno di un intervallo compreso tra 0 e 20.

In particolare, a 6 km dalla foce, $C_u \gg 1$, indicando una distribuzione fortemente disomogenea del materiale, caratterizzata dalla predominanza di particelle di dimensioni variabili. In questa zona, il materiale è descritto come una sabbia limosa debolmente argillosa. Al contrario, a distanze comprese tra i 16 e i 28 km dalla foce, i valori di C_u sono superiori a 1, suggerendo una distribuzione granulometrica non uniforme, ma relativamente ben distribuita. In queste aree, il materiale è identificato come un limo argilloso debolmente sabbioso.

Nel complesso, i valori elevati di C_u rispecchiano la non uniformità dei materiali analizzati, indicativa di distribuzioni granulometriche disomogenee. È importante sottolineare che valori di $C_u \approx 1$, che corrisponderebbero a una distribuzione uniforme con particelle di dimensioni simili, non sono stati riscontrati nei dati analizzati, confermando così la prevalenza di materiali con una granulometria non omogenea e variabile lungo la distanza dalla foce.

-Posizionamento delle Curve: Curve che si sovrappongono o si avvicinano possono indicare materiali simili, mentre curve distanti possono rappresentare materiali con proprietà diverse.

Nel presente studio, il fuso di curve granulometriche è di tipo fine, presentando una pendenza ripida iniziale e comprendendo particelle di dimensioni ridotte. Inoltre, le curve evidenziano una distribuzione simile delle dimensioni, suggerendo una certa omogeneità dei materiali (si riscontra la presenza di limo argilloso e di limo sabbioso). Tale omogeneità è ulteriormente attestata dalla sovrapposizione e dalla vicinanza delle diverse curve granulometriche analizzate. Si nota, inoltre, che il fuso avrà una ampiezza compresa tra i diametri di 0,01mm e 0,001mm.

3.3 Interpretazione dati della fondazione

Come precedentemente indicato, la struttura arginale si suddivide in due componenti principali: il corpo arginale e la fondazione. Il primo passo consiste nel determinare la composizione granulometrica della fondazione, che si estende dall'alveo inciso (o alveo attivo) fino alla porzione terminale dell'argine, dove è presente il terreno di fondazione. Nel presente studio, si considera come riferimento la fine del corpo arginale a cinque metri; tuttavia, a seconda della profondità dei carotaggi, la misura può variare. Nei sondaggi analizzati, la profondità dei carotaggi, effettuati mediante prove in situ CPT e SPT, raggiunge fino a diciotto metri.

Per tutti i sondaggi condotti, sono state ottenute dalle prove di laboratorio le analisi granulometriche relative alla fondazione arginale. Si esaminano i sondaggi effettuati da Villanova a Bevazzana e i risultati sono riportati in tabelle, al fine di facilitarne la comprensione (Tabella 3-4).

La Tabella 3 (si veda Appendice 5) riporta il contenuto della fondazione di un sondaggio effettuato a San Giorgio al Tagliamento, con i valori dei materiali espressi in percentuale. Anche per la fondazione, si considera la composizione dei materiali, evidenziando la presenza di materiali coesivi (limi argillosi e limi contenenti sabbia fine) e di materiali granulari (sabbia fine).

La Tabella 4 (si veda Appendice 6) presenta il contenuto della fondazione di un sondaggio realizzato a Bevazzana, con i valori anch'essi espressi in percentuale. In questo caso, si osserva la presenza di tutti e tre i materiali: limo argilloso debolmente sabbioso, sabbia debolmente limosa e sabbia limosa debolmente argillosa.

Per quanto riguarda la fondazione, si dispone di un numero significativamente maggiore di dati rilevati dai campioni rispetto a quelli del corpo arginale, a causa della maggiore estensione longitudinale degli sondaggi. Si passa infatti da una analisi di cinque metri per il corpo arginale a tredici metri per la fondazione. Esaminando la granulometria della fondazione nei sondaggi che vanno da Villanova a San Filippo, si osserva l'assenza di materiale ghiaioso, con una predominanza di materiali coesivi, in cui il limo è presente in maggioranza rispetto all'argilla. Con l'aumento della profondità, ci si attende un incremento dei valori coesivi. I sondaggi effettuati a Malafesta e Biasini mostrano terreni prevalentemente composti da argilla limosa o limo argilloso, con una presenza di sabbia quasi trascurabile. Nei sondaggi realizzati da San Giorgio a Bevazzana si riscontra invece una grande variabilità di materiali. In queste aree, la presenza di materiale coesivo si accompagna a quella di materiale granulare, con una leggera prevalenza di limo rispetto all'argilla nei materiali coesivi, mentre la sabbia è l'unico materiale considerato per i materiali granulari. Dai valori ottenuti emerge una maggiore presenza di sabbie nei sondaggi condotti nelle vicinanze della foce, rispetto a quelli effettuati a nord di San Michele al Tagliamento. Si desidera ora focalizzare l'attenzione sulla zona di San Michele al Tagliamento, storicamente critica dal punto di vista idraulico e meccanico, che rappresenta un punto di riferimento fondamentale per i nostri sondaggi.

L'analisi granulometrica delle indagini rivela risultati significativi dal punto di vista geotecnico. Considerando i sondaggi S07 (2019) e S1 (2023), si osserva un'insolita presenza di sabbia fine, sia nel corpo arginale sia nella fondazione, in particolare nelle zone più profonde dell'argine, dove si trova il terreno di fondazione. Questo dato rappresenta una problematica non trascurabile, poiché potrebbe comportare una spinta del fluido superiore alla resistenza meccanica, causando un'instabilità dell'argine.

Il materiale granulare non garantisce una buona impermeabilità dell'argine; al contrario, favorisce l'insorgere di forze di filtrazione e presenta una resistenza all'erosione insufficiente, soprattutto durante i periodi di piena. Qualora tali fattori non siano adeguatamente gestiti, l'argine rischia di compromettere le proprie caratteristiche fisiche, idrauliche e meccaniche.

Attraverso l'utilizzo di un software, sono stati elaborati grafici triangolari, in cui ciascun asse corrisponde a un materiale granulometrico: l'asse x rappresenta la sabbia, l'asse y il limo e l'asse z l'argilla. Rispetto al grafico relativo al corpo arginale, nel grafico della fondazione si osservano valori più elevati per quanto concerne l'argilla, con una distribuzione più ampia dei punti all'interno del Grafico 5. Questo risultato tiene conto dell'analisi della fondazione derivante dai sondaggi condotti da Villanova a Bevazzana. L'elevato numero di punti riflette la maggiore estensione dei sondaggi analizzati rispetto a quelli relativi al corpo arginale. Il Grafico 6 illustra i valori dei diametri notevoli in funzione della distanza dalla foce del fiume. Sull'asse y sono rappresentati i valori dei diametri notevoli ricavati dalle analisi granulometriche, mentre sull'asse x è indicata la distanza in chilometri dalla foce per i diversi sondaggi effettuati. Infine, il Grafico 7 mostra la composizione percentuale dei materiali della fondazione in relazione alla distanza dalla foce, espressa in chilometri, per i sondaggi effettuati da Villanova a Bevazzana. Inoltre vengono inseriti nell'appendice 6 dei grafici che mi legano la profondità dei sondaggi (per il corpo arginale e per la fondazione) lungo l'asse y e i diametri notevoli d_{10} e d_{50} lungo l'asse x. A seconda della distanza tra le due curve si può capire la diversa gradazione di materiali del campione analizzato. Con distanze elevate tra le curve avremo campioni ben gradati, al contrario con curve molto vicine avremo campioni poco gradati. Questi grafici forniscono una panoramica utile sulla possibile composizione granulometrica della fondazione.

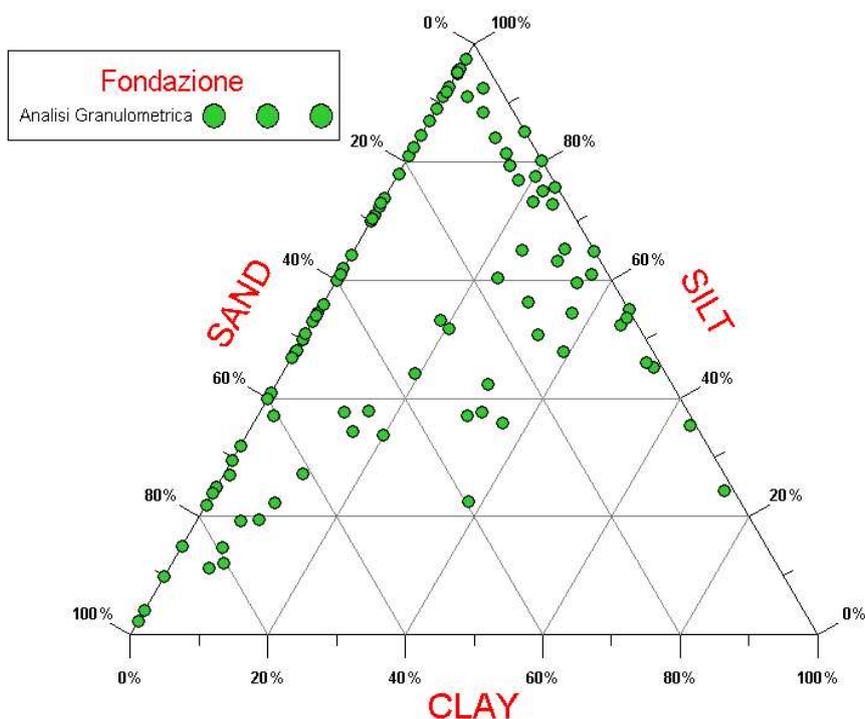


Grafico 5-Fondazione dei sondaggi fatti da Villanova a Bevazzana

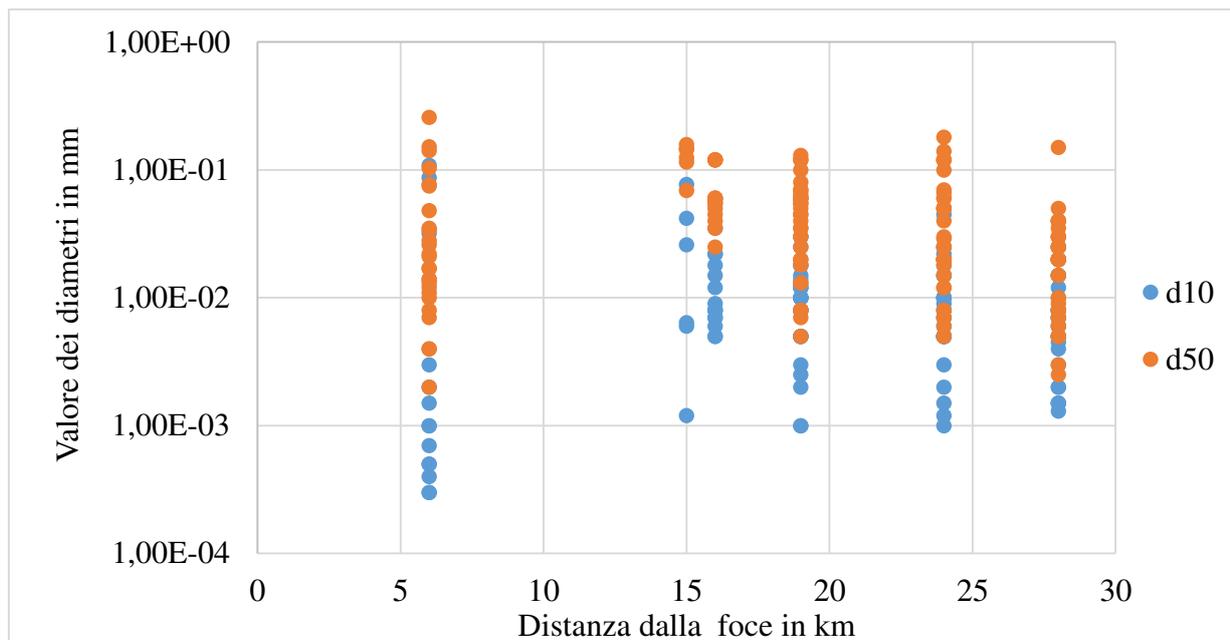


Grafico 6- d_{10} e d_{50} della fondazione in funzione della distanza dalla foce, sondaggi da Villanova a Bevazzana

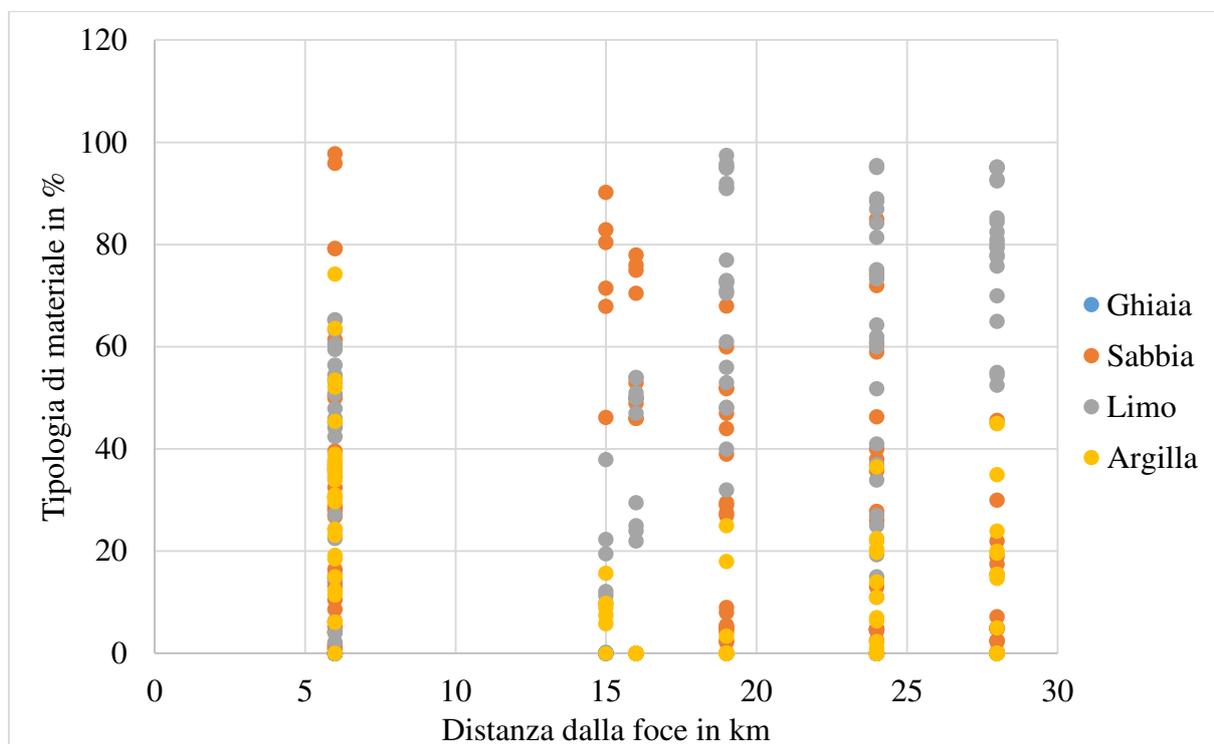


Grafico 7- Tipologia di materiale della fondazione(%) in funzione della distanza dalla foce in km

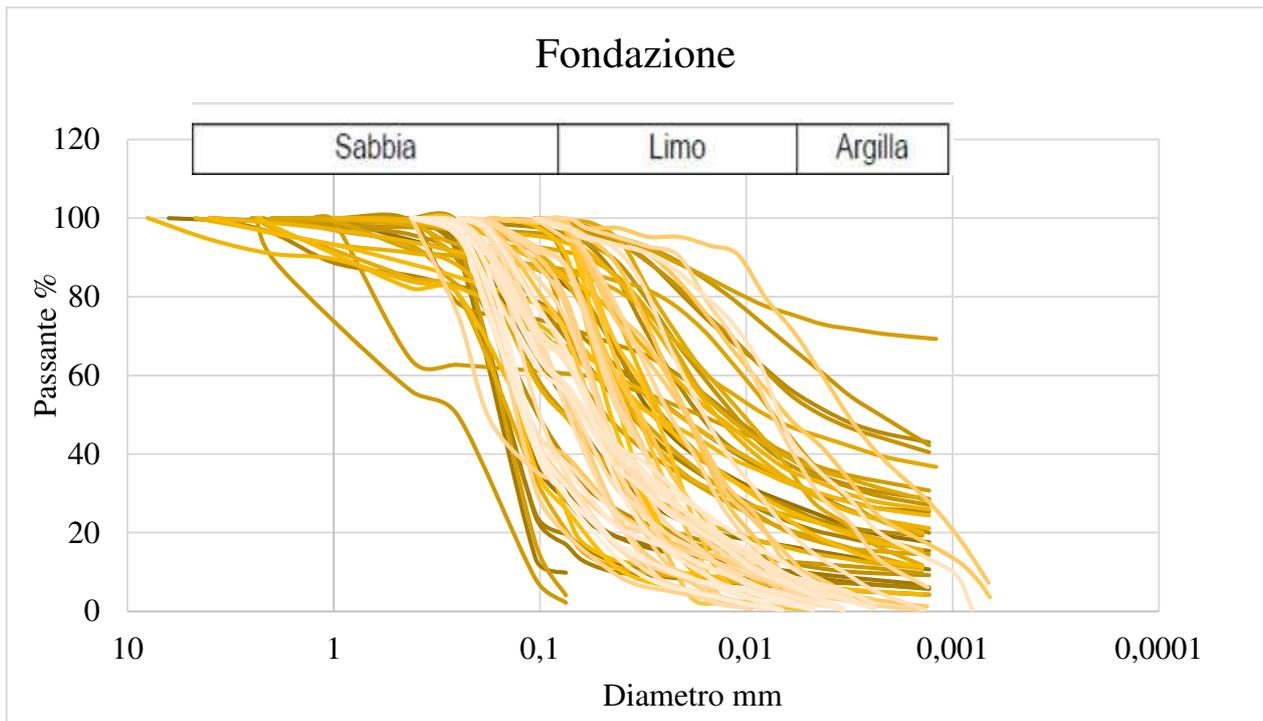


Grafico 8- Fusione di curve granulometriche della fondazione

Il Grafico 8 illustra il fuso delle curve granulometriche relative alla Fondazione, derivanti dai sondaggi condotti tra Villanova e Bevazzana. Questo grafico ha lo scopo di aggregare le curve granulometriche rappresentative di tutti i sondaggi effettuati dai cinque metri fino ai diciotto metri di fondazione dell'argine. Attraverso diverse tonalità di arancione si rappresentano le curve granulometriche e i relativi livelli stratigrafici.

Nel presente studio, è stato ottenuto un fuso granulometrico più ampio rispetto a quello del corpo arginale, a causa dell'intervallo di terreno più esteso su cui sono stati condotti i sondaggi (nel corpo arginale, l'estensione da analizzare è limitata a cinque metri, mentre nella fondazione si estende a tredici metri). Questa differenza di profondità consente una valutazione più ampia e dettagliata delle caratteristiche geologiche e granulometriche nella fondazione rispetto al corpo arginale. Di conseguenza, è stato possibile raccogliere un numero elevato di curve granulometriche da confrontare tra loro, contribuendo a una comprensione più approfondita della variabilità dei materiali analizzati.

Nel delineare le caratteristiche del fuso di curve granulometriche, si osserva una serie di curve che iniziano con una pendenza ripida, per poi assestarsi su una pendenza più moderata nella zona centrale del fuso. L'analisi dell'andamento del fuso rivela una non perfetta omogeneità tra le curve granulometriche, evidenziando una sovrapposizione imperfetta all'interno dell'insieme di curve analizzate. Di conseguenza, si ottiene una varietà di materiali costituiti da particelle di dimensioni ridotte, quali argille, limi sabbiosi e argillosi, sabbie fini e sabbie limose. Questa diversità è anche il risultato dell'elevato numero di sondaggi condotti. L'ampiezza del fuso si colloca in un intervallo compreso tra 0,1 mm e 0,001 mm.

4. ANALISI DELLA RESISTENZA AL TAGLIO

4.1 Metodologia

Come precedentemente menzionato, prima di procedere con l'analisi meccanica, è fondamentale valutare tutti i parametri impiegati nella ricerca. In questo contesto, l'indagine inizia con l'analisi dei risultati delle prove effettuate in sito. La prova triassiale consente di ottenere i valori della coesione e dell'angolo di attrito interno del materiale.

Tuttavia, frequentemente la prova triassiale viene sostituita dalla prova a taglio diretto, che risulta essere più rapida ed economica rispetto alla precedente, per la determinazione dell'angolo di attrito e della coesione. Durante la prova a taglio diretto, viene applicato un carico verticale durante il processo di taglio, e si misurano, oltre alla resistenza, anche lo spostamento orizzontale (definito come deformazione orizzontale) e il cedimento del provino, corrispondente alla deformazione verticale (Grafico 9-10). (S.Cianci-M.Parente, 2023).

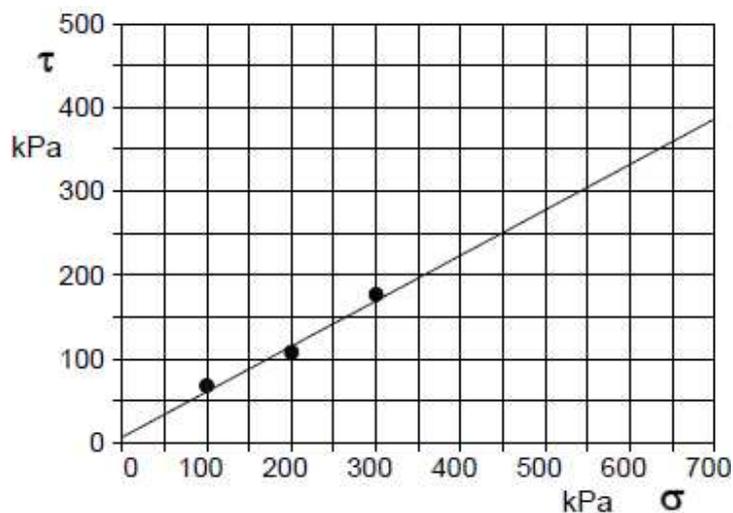


Grafico 9- Diagramma Tensione-Pressione verticale per 3 σ diverse, (Tecnostudio, 2023)

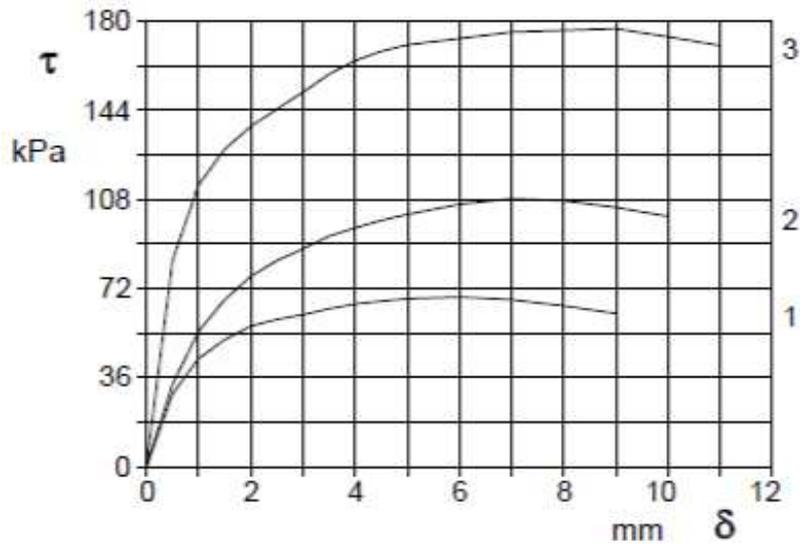


Grafico 10-Diagramma Tensione-Deformazione orizzontale per 3 σ diverse, (Tecnostudio, 2023)

Secondo la normativa, la prova triassiale viene eseguita su tre provini, i quali vengono consolidati a diverse pressioni e successivamente sottoposti alla fase di taglio utilizzando le stesse pressioni. Questo approccio consente di tracciare un grafico su assi cartesiani (Fig. 19), dal quale è possibile determinare il valore della coesione c e l'angolo di attrito φ . Tali parametri permettono di calcolare, attraverso l'equazione di Coulomb, la tensione tangenziale di rottura. Per i terreni coerenti, l'equazione di scorrimento di Coulomb viene formulata nella seguente forma:

$$\tau = c + \sigma * \operatorname{tg} \varphi \quad (4)$$

c rappresenta la coesione, σ la tensione normale, $\operatorname{tg} \varphi$ il coefficiente d'attrito e τ rappresenta il valore di rottura a taglio.

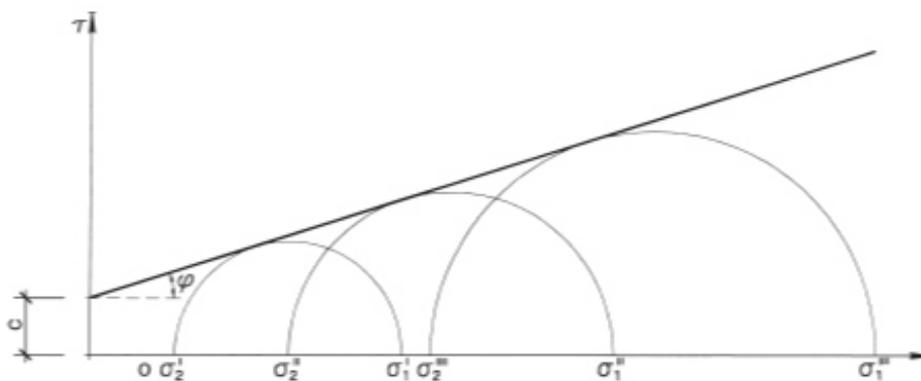


Figura 19- c e φ da rottura per due diverse σ principali (U.Alasia-M.Pugno, 2011)

La coesione c (si veda Appendice 8) rappresenta la forza di adesione tra i granuli di terra, ed è indipendente dalle forze che agiscono perpendicolarmente alla superficie di contatto. Insieme all'attrito interno, definito come la resistenza allo scorrimento tra le particelle di terra, la coesione contribuisce a contrastare le forze che tendono a far muovere le particelle l'una rispetto all'altra. Sebbene l'intensità delle forze di attrito e coesione coesista, è importante sottolineare che esse sono tra loro indipendenti. Ad esempio, le sabbie presentano un elevato attrito interno ma una coesione nulla, mentre le argille mostrano bassi valori di attrito e una buona coesione.

Considerando un granulo superficiale di terra situato sulla superficie piana di un terreno inclinato di un angolo α rispetto all'orizzontale (Fig. 20), si può definire la sollecitazione di compressione P_n associata a una tensione normale σ , e la sollecitazione di taglio P_t rappresentata dalla tensione tangenziale τ . La componente P_t tende a far scivolare la particella verso il basso, ma questo movimento è contrastato dall'azione della forza di attrito.

Nel momento immediatamente precedente all'inizio del movimento del granulo di terra, si verifica una condizione di equilibrio che corrisponde a un certo valore dell'angolo α , variabile a seconda delle caratteristiche del terreno, noto come angolo di attrito φ . Questo angolo è strettamente correlato alle proprietà di composizione dei terreni e dipende anche dal grado di umidità (si veda Appendice 9).

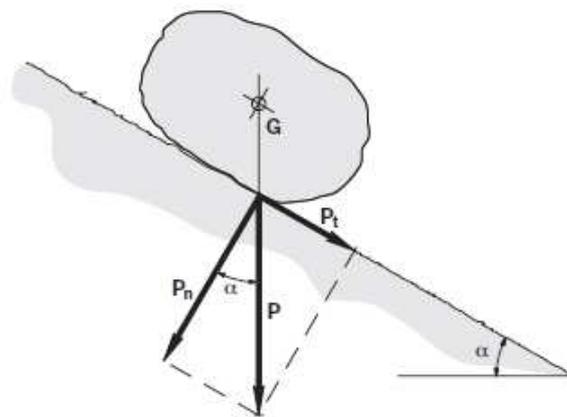


Figura 20-Forze sviluppate da un grano su superficie laterale, (U.Alasia-M.Pugno, 2011)

Prima di procedere allo sviluppo delle diverse operazioni eseguite mediante prove a taglio diretto, è opportuno fare una distinzione tra l'angolo di attrito critico e l'angolo di attrito di picco (Grafico 11).

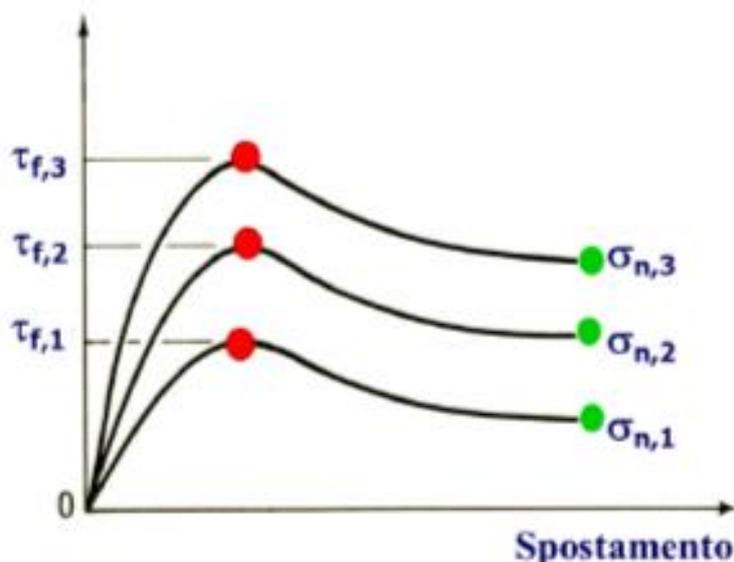


Grafico 11- Differenza tra angolo di attrito di picco e angolo di attrito critico

L'angolo di attrito di picco (indicato dal puntino rosso nel Grafico 11) è variabile e dipende dalla densità relativa e dallo stato tensionale applicato. Esso rappresenta la somma del contributo derivante esclusivamente dall'attrito tra i granuli (nella condizione di stato critico) e quello associato all'energia spesa sotto forma di dilatanza, necessaria a superare il mutuo incastro tra i grani. Al contrario, l'angolo di attrito critico è indipendente dalla densità relativa e dallo stato tensionale. Questo angolo rappresenta la resistenza al taglio nella condizione di stato critico, corrispondente alla quale ulteriori deformazioni avvengono senza variazione di volume, ed è principalmente influenzato dalla forma, dimensione e mineralogia dei granuli. (A. Bruschi, 2012).

Dall'analisi dei campioni effettuata mediante la prova di taglio diretto, si ottiene un valore che rappresenta l'angolo di attrito critico calcolato in laboratorio. A partire da questo punto, si prenderà in considerazione esclusivamente l'angolo di attrito critico per le successive analisi.

L'obiettivo del presente studio è valutare il valore dell'angolo critico attraverso diverse modalità. Il primo approccio consiste nell'impiegare equazioni già esistenti, esaminando i vari parametri che compongono tali equazioni. Il secondo approccio prevede l'analisi del grafico tensioni-deformazioni orizzontali (si veda, ad esempio, il Grafico 10), cercando di fornire un'interpretazione geotecnica della curva al fine di estrarre parametri da utilizzare in una formula. Una volta determinati tutti i valori, si procederà a un confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi di laboratorio e quelli derivanti dai processi di calcolo e osservazione.

Considerando il primo modo per ottenere l'angolo di attrito critico, si valuta una equazione che sia in funzione dell'Indice granulometrico I_{gr} (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007). L'equazione riportata

nella Formula numero 5 assume valori differenti a seconda delle caratteristiche del terreno e della tipologia di prova, drenata o non drenata. In generale, gli angoli critici più elevati si riscontrano nelle sabbie, con valori compresi tra 34° e 39°. Al contrario, le argille limose presentano valori più bassi, oscillanti tra 30° e 34°. I limi, invece, mostrano un ampio intervallo di valori, talvolta superando anche quelli delle sabbie. (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007).

$$\varphi_{cr}(^{\circ}) = (38.0 \pm 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr} \quad (5)$$

Per ciascun sondaggio, si procede alla determinazione dei valori dei diametri notevoli. Una volta identificati, si calcola l'indice granulometrico, che sarà successivamente utilizzato per calcolare l'angolo critico. Per questa formula, l'indice granulometrico deve rientrare all'interno di due valori specifici, determinando così il seguente intervallo (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007):

$$8 \cdot 10^{-5} \leq I_{gr} \leq 0,12 \quad (6)$$

Per i valori di indice granulometrico calcolati nella tabella 7(vedi appendice 10), si riportano nella tabella 8(vedi appendice 11) i corrispondenti valori di angolo critico calcolati attraverso la formula 5 (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007).

A questo punto, il primo metodo per calcolare l'angolo critico può considerarsi concluso. Si passa ora alla seconda metodologia per derivare l'angolo critico, facendo riferimento alla formula di scorrimento di Coulomb (Formula 7). In questa fase, la coesione viene inizialmente valutata come nulla ($c=0$) nel contesto del taglio diretto. Per ottenere l'angolo critico dalla formula di Coulomb, è necessario determinare i valori della pressione verticale σ e della tensione a rottura τ attraverso l'analisi del grafico tensione-deformazione orizzontale (si veda il Grafico 10).

$$\varphi_{cr}(^{\circ}) = \arctg(\tau / \sigma) \quad (7)$$

I valori di tensione di rottura ottenuti non saranno mai così precisi come quelli derivanti dalle analisi di laboratorio, poiché sono estratti direttamente dalla curva del grafico. Per ciascun provino, vengono impiegate tre pressioni verticali distinte e crescenti (100 kPa, 200 kPa e 300 kPa), producendo così tre curve. Riprendendo la definizione di angolo critico, inteso come il valore minimo di resistenza a tensione a volume costante, si procede a valutarlo considerando l'andamento della curva tensioni-deformazioni orizzontali come lineare. Nel punto in cui la curva mostra un comportamento costante e lineare, si determina la tensione critica di rottura per la specifica pressione verticale.

Una volta determinate le tensioni critiche di rottura per i tre provini, ciascuna associata a una pressione verticale specifica, si considera il grafico 9, che rappresenta la relazione tra tensioni e pressioni verticali. Per ogni sondaggio, si analizza l'andamento della retta che passa attraverso i tre punti, ognuno corrispondente a una pressione verticale nota.

Per definire l'angolo di attrito critico, è necessario che la retta passi per l'origine e che tutti e tre i punti siano allineati su di essa. Pertanto, si procederà a valutare il grafico 9 costruendo una retta che attraversi i tre punti ottenuti in ciascun sondaggio.

Dall'analisi dei valori dell'angolo di attrito critico calcolati utilizzando la formula 7 e valutando il grafico 9, si riscontra che le rette ottenute non passano per l'origine. Di conseguenza, i valori così ottenuti risulteranno certamente superiori rispetto al valore reale dell'angolo critico. Questo perché tali valori incorporano una coesione non nulla, dato che la retta non attraversa l'origine degli assi.

Si procede ora a ricavare nuovamente le tensioni tangenziali critiche dal grafico tensioni-deformazioni orizzontali per le corrispondenti pressioni verticali. Si inseriscono nel grafico 9 i valori di τ e σ che si correlano, valutando l'andamento della retta che passa attraverso i punti ottenuti. Affinché la retta possa passare per l'origine, è necessario prestare particolare attenzione nella determinazione delle tensioni critiche, evitando approssimazioni eccessive.

A questo punto, è possibile calcolare i valori dell'angolo di attrito critico con una coesione praticamente nulla e confrontarli con quelli calcolati in precedenza. I dati ottenuti mostrano valori di angolo di attrito critico inferiori rispetto ai precedenti, con una differenza di circa 2 gradi, come evidenziato nella tabella 9 (si veda l'Appendice 12). Inoltre, i valori dell'angolo di attrito critico risultano inferiori rispetto all'angolo di attrito di picco.

4.2 Risultati analisi meccanica

In questo capitolo si raccolgono tutte le informazioni derivanti dall'analisi meccanica dell'angolo di attrito critico. Come descritto in precedenza, per stimare l'angolo di attrito critico si utilizzano due equazioni. La prima (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007) è correlata alle condizioni granulometriche della sezione arginale, in particolare all'indice granulometrico. La seconda equazione si basa sulla definizione di angolo di attrito ed è in funzione della tensione e della pressione verticale applicata al provino. Dopo aver esposto le equazioni impiegate nell'analisi, si procederà all'interpretazione dei risultati ottenuti.

Per iniziare l'interpretazione dell'angolo di attrito critico calcolato con la formula 5, è necessario, in primo luogo, determinare l'indice granulometrico. Una volta ottenuti tutti i diametri notevoli dalla curva granulometrica, è possibile calcolare l'indice granulometrico. Riferendosi alla tabella 7, si osserva come l'indice I_{gr} sia rappresentato (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007) e come sia soddisfatto all'interno dell'intervallo (formula 6). Questo primo risultato consente di proseguire con il calcolo dell'angolo critico. Infatti, una volta inserito l'indice granulometrico nella formula, è possibile determinare l'angolo di attrito critico. Il fatto che la formula dipenda dalla granulometria del sistema permette di individuare intervalli di riferimento per le diverse tipologie di materiali. Per le sabbie, i valori da rispettare oscillano tra 34° e 39° , mentre per le argille limose i valori sono inferiori, compresi tra 30° e 34° . Per quanto riguarda i limi, si riscontra un ampio intervallo di valori, talvolta superando anche quelli delle sabbie (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007)

Analizzando la stratigrafia complessiva dei sondaggi effettuati da San Giorgio a Bevazzana, si osserva una predominanza di limi sabbiosi, limi argillosi e sabbie limose. Una volta identificati i materiali costituenti il sistema, è possibile confrontare i valori dell'angolo di attrito critico ottenuti con quelli prefissati negli intervalli di riferimento. In conclusione, a seguito di questo confronto, si può affermare di aver ottenuto valori coerenti con le caratteristiche dei materiali presenti nei sondaggi

Considerando ora la seconda modalità di calcolo dell'angolo di attrito critico, rappresentata dalla formula 7, il punto di partenza è costituito dalla prova di taglio diretto. Dopo aver effettuato questa prova, si ottiene il grafico 10, che presenta tre curve corrispondenti all'impiego di tre provini differenti, ciascuno sottoposto a pressioni verticali crescenti.

Per applicare la formula 7, è necessario ricercare il valore della tensione all'interno del grafico 10. A tal fine, si considera l'andamento critico della curva, ipotizzando che, per un determinato valore della tensione, la curva raggiunga una fase costante e lineare. Questo processo verrà eseguito senza l'ausilio di alcuna formula, basandosi esclusivamente sull'osservazione dell'andamento della curva. È importante sottolineare che, in questo modo, si dovrà tener conto della potenziale alterazione del valore nel calcolo dell'angolo di attrito critico.

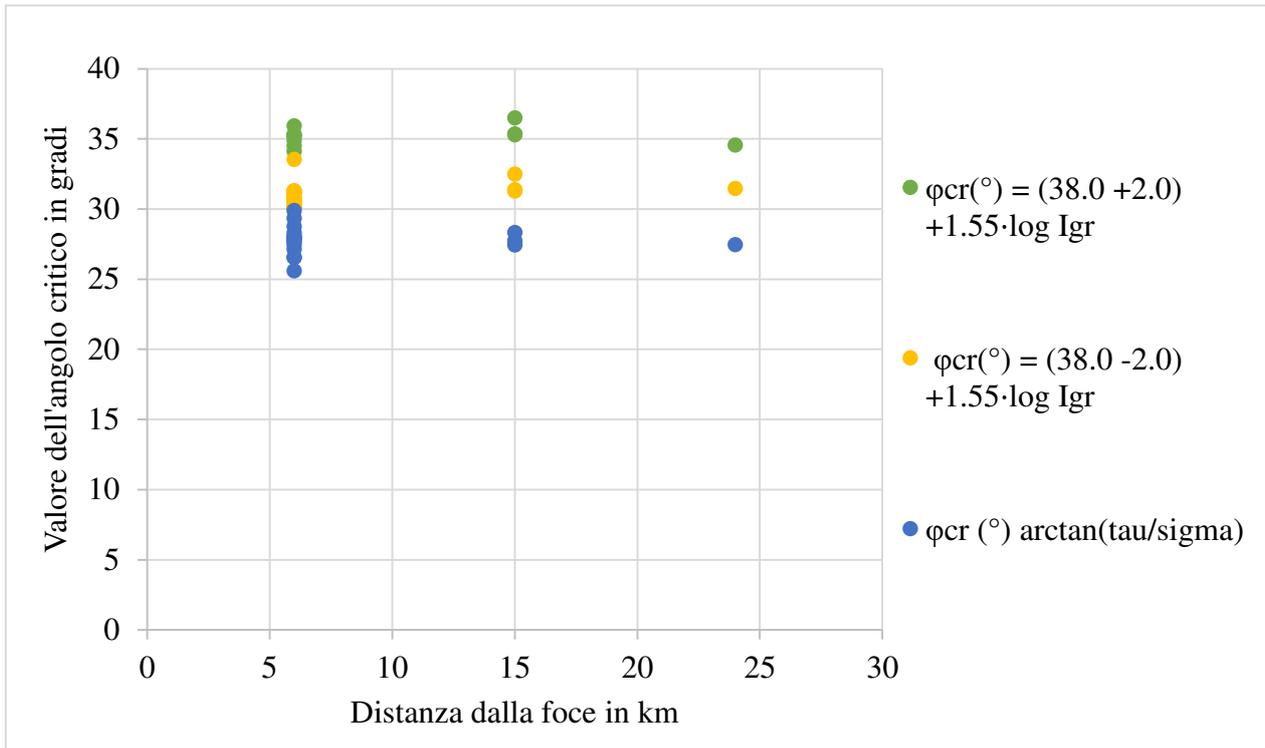


Grafico 12-Confronto di φ_{cr} ricavato dalle formule (6) e (8)

Una volta individuata la tensione corrispondente a un determinato carico verticale, è possibile determinare un nuovo valore dell'angolo di attrito critico utilizzando la formula 7, valutando l'andamento della retta che passa per l'origine nel grafico $\tau-\sigma$. Gli angoli ottenuti da questo calcolo presentano valori significativamente più bassi rispetto a quelli calcolati con la formula 5 (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007).

Come illustrato nel grafico 12, in cui l'asse x rappresenta la distanza dalla foce del fiume Tagliamento e l'asse y rappresenta l'angolo di attrito critico, si osserva che l'angolo di attrito critico è funzione della distanza dalla foce. I sondaggi sono stati eseguiti a San Giorgio al Tagliamento, a 24 chilometri dalla foce, a Gorgo, a 15 chilometri, e a Bevazzana, a 6 chilometri dalla foce. Inoltre, si nota che maggiore è la distanza tra i punti di campionamento, maggiore sarà la differenza di valore tra i due angoli. Questo risultato è riconducibile al fatto che, nel primo caso, si utilizzano formule empiriche definite da specifici intervalli di valori, mentre nel secondo caso non si fa ricorso a equazioni per determinare il valore della tensione, ma si basa esclusivamente su deduzioni grafiche. La tabella 11 riporta i valori dell'angolo di attrito critico calcolati con le due diverse metodologie descritte.

Sondaggio	$\varphi_{cr}(\text{°}) = \arctan(\tau/\sigma)$	$\varphi_{cr}(\text{°})$	$\varphi_{cr}(\text{°})$
		$= (38.0 + 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$	$= (38.0 - 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$
S1	28,34	35,38	31,38
	27,75	35,29	31,29
	27,45	36,5	32,5
S2	26,56	35,32	31,32
	27,98	34,14	30,14
	27,77	34,91	30,91
S3	27,15	34,25	30,25
S4	28,76	35,2	31,2
	29,36	34,52	30,52
S5	28,06	35,3	31,3
	27,47	34,58	30,58
S6	28,31	35,21	31,21
	27,92	35,2	31,2
	25,61	37,56	33,56
SA	29,9	34,8	30,8
	27,7	34,68	30,68
	26,57	34,21	30,21
	27,92	34,29	30,29
SA1	27,47	35,48	31,48

Tabella 1-Valori di φ_{cr} ottenuti dalle due modalità di calcolo, sondaggi da Latisana a Bevazzana

Un ulteriore metodo per valutare l'affidabilità dei risultati ottenuti è attraverso il calcolo dell'errore quadratico medio radice (RMSE). Questa metrica è ampiamente utilizzata per misurare l'accuratezza di un modello di previsione. Il processo di calcolo dell'RMSE inizia con la determinazione delle differenze quadrate tra i valori osservati e quelli previsti per ciascuna osservazione. In seguito, si procede alla somma di queste differenze quadrate, che viene poi divisa per il numero totale di osservazioni. Infine, si estrae la radice quadrata del risultato ottenuto, così da ottenere il valore dell'RMSE. Lo scarto quadratico medio rappresenta una misura dell'errore assoluto, in cui gli errori sono elevati al quadrato per evitare che le differenze positive e negative si annullino a vicenda. L'RMSE fornisce un valore singolo che riflette le prestazioni complessive del modello, facilitando il confronto tra diverse metodologie di previsione o modelli.

Valori di RMSE più bassi sono indicativi di prestazioni superiori del modello di previsione. Un RMSE ridotto implica che le previsioni generate dal modello si avvicinano maggiormente ai valori osservati, suggerendo così una maggiore precisione. È importante notare che non esiste un valore "buono" o "cattivo" di RMSE in termini assoluti; la valutazione dipende dal contesto specifico e dal dominio di applicazione. È opportuno confrontare l'RMSE con l'intervallo dei valori target per una valutazione più significativa. In sintesi, l'RMSE si configura come una metrica fondamentale per l'analisi dell'accuratezza dei modelli di previsione, poiché fornisce un valore singolo che rappresenta l'entità media delle differenze tra i valori previsti e quelli osservati. Nelle appendici 13-14 si riportano i procedimenti e il valore dell'RMSE per la formula 5. Analizzando l'interpretazione dei valori di RMSE, si osserva che i risultati ottenuti non sono particolarmente soddisfacenti, poiché il valore dell'RMSE non si presenta significativamente basso. In particolare, si osservano valori di RMSE pari a 9,131016373 nel caso della formula del grafico 13 e un valore di 5,915181316 nel caso della formula del grafico 14. In generale, si riscontrano performance migliori quando i valori di φ critico calcolati sono inferiori. I grafici 13-14 evidenziano i risultati ottenuti dall'RMSE, con i valori di angolo critico calcolato che si discostano dalla diagonale del grafico, ovvero dai punti migliori del problema.

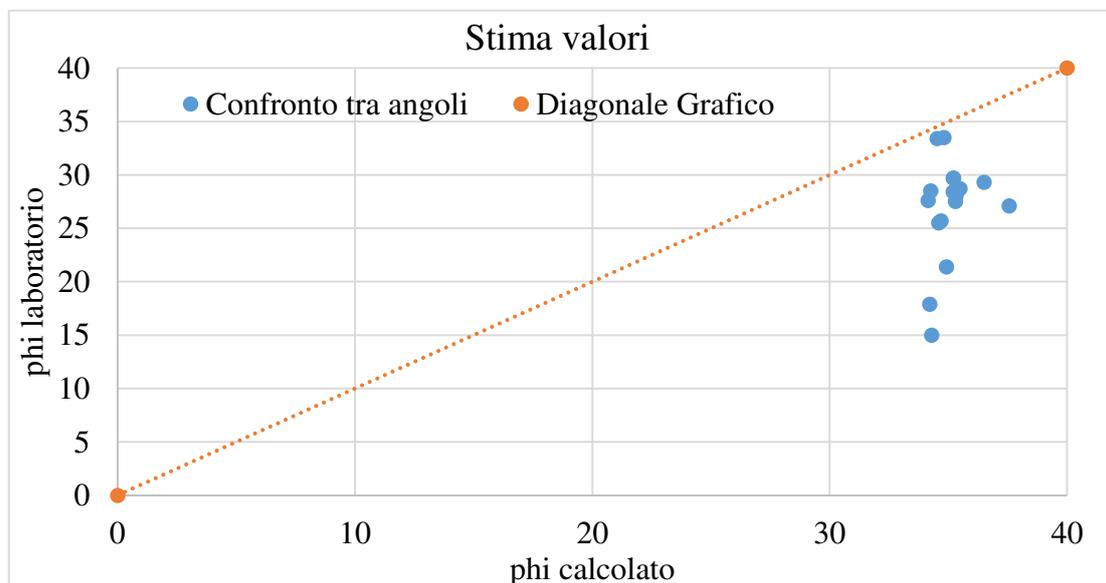


Grafico 13- Confronto tra angolo critico di laboratorio e angolo critico calcolato per $\varphi_{cr}(\text{°}) = (38.0 + 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$

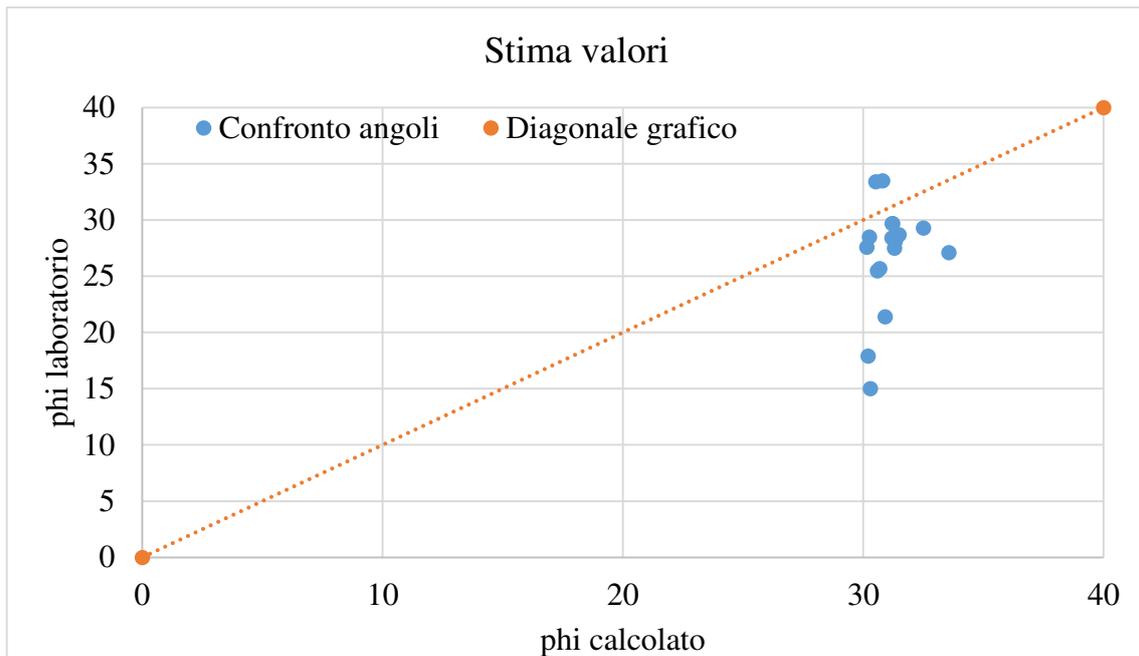


Grafico 14- Confronto tra angolo critico di laboratorio e angolo critico calcolato per $\varphi_{cr}(\text{°}) = (38.0 - 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$

Il grafico 15 illustra la linea di tendenza lineare accompagnata dalla rispettiva equazione (formula 8). Il nuovo coefficiente angolare $m=2,3294$ della retta risulta maggiore al coefficiente angolare $m=1,55$ della retta associata alla formula 5 (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007). Un'analogia osservazione si applica al termine costante q , il quale è inferiore in entrambe le equazioni (ad esempio, $34,418 < 40$ e $34,418 < 36$). L'equazione della retta ottenuta stabilisce una relazione tra i valori di angolo critico calcolati e quelli misurati in laboratorio.

$$y = 2,3294x + 34,418 \quad (8)$$

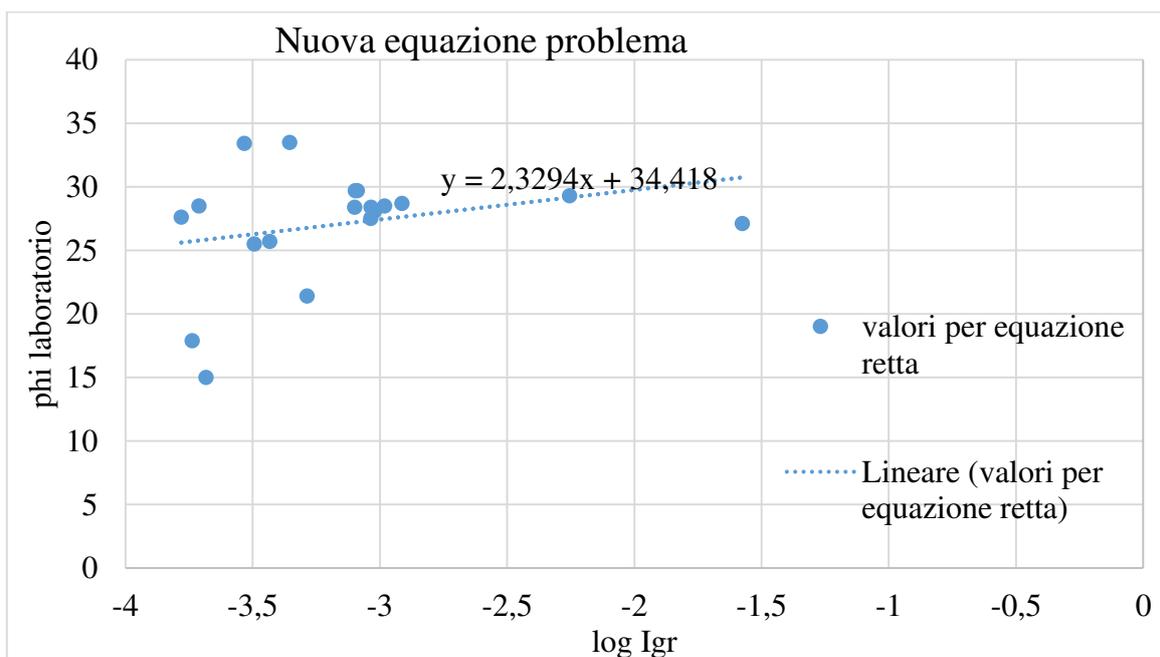


Grafico 15-Determinazione nuova equazione del problema meccanico

5 CONDUCEBILITA' IDRAULICA

5.1 Metodologia idraulica

Anche in questo caso, si procederà alla valutazione di tutti i parametri idraulici ricavati dall'analisi dei campioni prelevati in situ prima di stimare la permeabilità. Per quanto riguarda le terre coerenti, il contenuto d'acqua, definito come il rapporto percentuale tra il peso dell'acqua presente nei pori e il peso secco del terreno, determina specifici stati fisici. Il passaggio da uno stato all'altro è stabilito attraverso i limiti di consistenza, noti anche come limiti di Atterberg.

Il parametro fondamentale per il presente studio è indubbiamente la permeabilità, definita dalla conducibilità idraulica k . Questo valore rappresenta la resistenza frizionale e viscosa alla filtrazione di un fluido all'interno di un mezzo poroso e dipende da diverse variabili, tra cui le proprietà del fluido stesso, come la viscosità e la densità, e le caratteristiche del mezzo poroso. Nei terreni grossolani, la conducibilità idraulica k è influenzata dalla granulometria, dall'indice dei vuoti e dalla densità relativa. Per quanto riguarda i terreni coesivi, invece, k è determinato dalla composizione mineralogica (in relazione ai limiti di Atterberg) e dal tipo di struttura delle particelle, che può essere dispersa o flocculata.

La misura sperimentale della conducibilità idraulica può essere eseguita in più modi:

- Tramite correlazioni di letteratura, per terreni a grana grossa.
- Prove in laboratorio, come il permeametro a carico costante o variabile e la prova edometrica.
- Prove in sito, come le prove di pompaggio o emungimento, in pozzetto superficiale e in foro di sondaggio.

Nell'appendice 15 si mostrano diversi valori della conducibilità idraulica k per i rispettivi materiali.

Per affrontare la stima della conducibilità idraulica k , è necessario selezionare la modalità di calcolo appropriata. Esistono diverse equazioni, ciascuna caratterizzata da specifici intervalli di applicabilità e da parametri granulometrici. Nel presente studio, si opta per due formule: l'equazione di Alyamani (1993) e l'equazione di Breyer (1964). La conducibilità idraulica stimata tramite queste due equazioni sarà successivamente confrontata con i valori di permeabilità ottenuti attraverso le prove di laboratorio. (J.Rosas-O.Lopez-T.M.Missimer-K.M.Coulibaly-A.H.A. Dehwah-K.Sesler-L.R.Lujan-D.Mantilla, 2014).

La prima da analizzare è la formula di Alyamani (1993), (J.Rosas-O.Lopez-T.M.Missimer-K.M.Coulibaly-A.H.A. Dehwah-K.Sesler-L.R.Lujan-D.Mantilla, 2014):

$$k = \beta * (I_0 + 0,025 * (d_{50}-d_{10}))^2 \quad (\text{m/day}) \quad (9)$$

Andando a valutare i fattori che compongono l'espressione:

k = conducibilità idraulica stimata con Alyamani (1993)

β = coefficiente adimensionale. Viene utilizzato per collegare diverse grandezze, come indici di proprietà del suolo, senza introdurre unità fisiche. Ha un valore di 1300, legato a diversi fattori e a condizioni specifiche del suolo, come:

-Tipo di suolo: Le caratteristiche fisiche e meccaniche del suolo, come sabbia, argilla o ghiaia, influenzano il valore di β .

-Struttura del suolo: La distribuzione e l'orientamento delle particelle possono alterare la resistenza e il comportamento del suolo sotto carico.

d_{50} e d_{10} = diametri notevoli calcolati durante la fase granulometrica

I_0 = è l'intercetta in mm della linea formata da d_{50} e d_{10} con l'asse

Il primo obiettivo consiste nell'individuare il valore di I_0 attraverso l'analisi della curva granulometrica. In questo caso, la stima del valore non avviene in modo empirico, ma si basa sull'osservazione di un grafico. Poiché i valori in questione sono molto piccoli, la precisione della stima risulta complessa. Inoltre, non sempre sono disponibili tutti i parametri granulometrici necessari, come ad esempio i diametri notevoli; pertanto, tali diametri dovranno essere ricavati direttamente dalla curva granulometrica, introducendo un ulteriore margine di errore nella stima.

Una volta definito I_0 , questo viene inserito nella formula, insieme ai diametri notevoli, per calcolare il valore della conducibilità idraulica secondo l'equazione di Alyamani (1993). Sebbene l'unità di misura standard per la conducibilità idraulica sia espressa in metri al giorno, per semplificare i calcoli,

si considererà k in metri al secondo, ottenendo tale valore dividendo per 86.400, il numero di secondi in un giorno.

La seconda formulazione è quella di Breyer (1964), (J.Rosas-O.Lopez-T.M.Missimer-K.M.Coulibaly-A.H.A. Dehwah-K.Sesler-L.R.Lujan-D.Mantilla, 2014):

$$k = g/v * C_b * d_{10}^2 \quad (\text{m/s}) \quad (10)$$

Anche in questo caso andiamo ad approfondire i vari parametri della formula:

k = conducibilità idraulica stimato con Breyer (1964)

g = accelerazione di gravità (m / s^2)

v = coefficiente di viscosità (mm^2 / s), lo si considera uguale a 1

$C_b = 6\text{E-}4 * \log (500/ C_u)$ è una costante che utilizza il coefficiente di uniformità del terreno C_u dato dal rapporto tra il d_{60} e il d_{10} .

Gli intervalli da rispettare sono $0,06 \text{ mm} < d_{10} < 0,6\text{mm}$ per il d_{10} , mentre ho $1 < C_u < 20$ per il coefficiente di uniformità.

Il primo passo nel processo analitico consiste nel calcolare la costante C_b , attraverso la determinazione del coefficiente di uniformità per ciascun campione granulometrico. È importante notare che, in numerosi casi, il valore del diametro corrispondente al 10% del passante (d_{10}) non è fornito. Pertanto, tale valore viene ricavato direttamente dalla curva granulometrica, il che può introdurre un errore di stima significativo. Una volta calcolato il coefficiente di uniformità, è possibile utilizzarlo nella formula di Breyer (1964) per stimare la conducibilità idraulica del suolo.

Nell'appendice 16 si mostrano tutti i valori di I_o e C_b ottenuti e poi applicati nelle equazioni per determinare la conducibilità idraulica k .

5.2 Risultati analisi idraulica

Nel presente paragrafo verranno analizzati i vari aspetti relativi al comportamento idraulico della struttura arginale, sulla base dei risultati dei sondaggi condotti a Villanova e Bevazzana. Per esaminare il comportamento idraulico, si considerano due equazioni ricavate da una pubblicazione scientifica (J.Rosas-O.Lopez-T.M.Missimer-K.M.Coulibaly-A.H.A. Dehwah-K.Sesler-L.R.Lujan-D.Mantilla, 2014). Entrambe le formule dipendono dalla granulometria dei materiali e prevedono specifici intervalli da rispettare per i parametri granulometrici. Una volta definiti i valori dei parametri granulometrici e la struttura delle equazioni pertinenti, si procederà alla valutazione e interpretazione dei dati ottenuti.

Riprendendo la formula di Alyamani (1993, formula 9), si valutano due aspetti fondamentali per il calcolo della conducibilità idraulica k . I punti chiave di questa formula sono rappresentati dai diametri notevoli d_{10} e d_{50} , nonché dall'intercetta I_0 della linea tracciata tra i diametri d_{10} e d_{50} sull'asse. Entrambi i fattori sono identificabili all'interno della curva granulometrica, ottenuta per ciascun sondaggio mediante l'analisi dei carotaggi.

Considerando il valore estremamente ridotto dei diametri notevoli d_{10} e d_{50} , imputabile alla presenza di materiali coesivi nelle stratigrafie, e il valore approssimato dell'intercetta I_0 , ricavato in modo non empirico dall'osservazione della curva granulometrica, è ragionevole attendersi che i valori di permeabilità ottenuti siano poco affidabili. In effetti, la presenza di limi argillosi e argille limose comporta una valutazione della permeabilità che si discosta significativamente dai risultati di laboratorio, con valori che possono differire anche di un fattore di 10^2 rispetto ai riferimenti stabiliti. In alcune aree, come San Giorgio e San Michele, si riscontra la presenza di sabbie fini e sabbie limose. L'applicazione della formula di Alyamani consentirà di ottenere valori di conducibilità idraulica migliori in queste zone rispetto a quelle caratterizzate da materiali coesivi.

Nel contesto della formula di Breyer (1964, formula 10), si considera la costante C_b , la quale è strettamente legata alla granulometria del materiale rilevato. La costante C_b dipende dal coefficiente di uniformità C_u , definito come il rapporto tra d_{60} e d_{10} . Pertanto, è necessario analizzare la stratigrafia dei campioni per determinarne la composizione granulare.

Come precedentemente evidenziato, il valore del diametro notevole d_{10} risulta particolarmente ridotto e di difficile interpretazione mediante l'analisi granulometrica. Di conseguenza, in molti sondaggi, gli intervalli di confronto stabiliti, ossia $0,06 \text{ mm} < d_{10} < 0,6 \text{ mm}$ e $1 < C_u < 20$, non vengono rispettati. Pertanto, ancor prima di procedere con il calcolo della conducibilità idraulica k , ci si attende che i valori ottenuti non siano particolarmente validi. Anche in questo caso otteniamo valori migliori nelle zone granulari rispetto a quelle coesive.

I valori ottenuti dalle verifiche condotte (tabella 12) non destano particolare sorpresa, poiché si era già ipotizzato che i risultati si discostassero dalla permeabilità calcolata in laboratorio. Nel presente studio, selezionando equazioni legate alla granulometria, si deve considerare il rischio di errori nella stima del diametro notevole d_{10} e degli altri parametri granulometrici. Le due formule impiegate, in definitiva, evidenziano valori di conducibilità idraulica che risultano quasi sempre simili, nelle aree caratterizzate da materiali granulari (sabbie) e inferiori, nelle aree caratterizzate da una predominanza di materiali coesivi, rispetto alla conducibilità idraulica k calcolata in laboratorio.

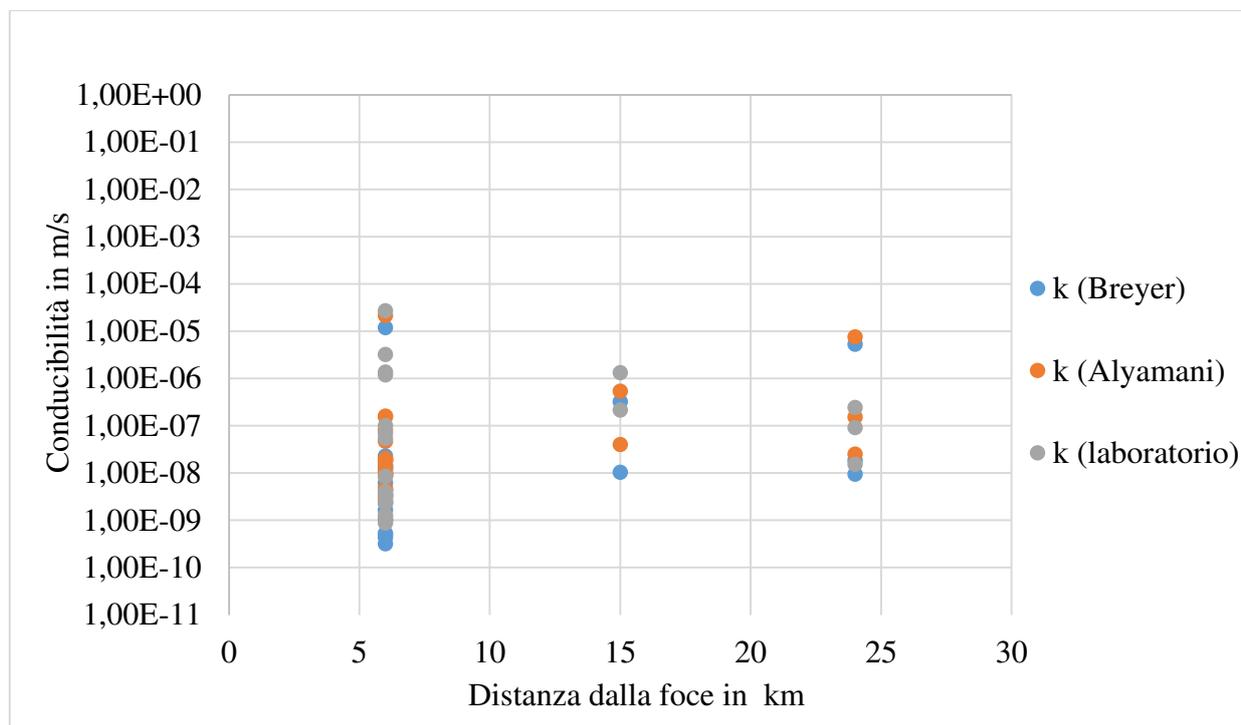


Grafico 16- Confronto delle conducibilità idrauliche k calcolate con diverse metodologie

Analizzando i risultati presentati nel grafico 16, relativi sia al corpo arginale che alla fondazione, in cui l'asse x rappresenta la distanza dalla foce in chilometri e l'asse y indica la conducibilità idraulica, è possibile ottenere ulteriori informazioni riguardo a questo parametro. I punti arancioni corrispondono alla permeabilità calcolata utilizzando la formula di Alyamani (1993), i punti blu a quella di Breyer (1964), mentre i punti grigi rappresentano la permeabilità misurata attraverso prove di laboratorio.

Confrontando le distanze tra i tre punti, ciascuno dei quali riflette un metodo di calcolo della permeabilità, si osserva che vi è una significativa separazione verticale tra il punto grigio e i punti arancioni e blu, con questi ultimi due che si avvicinano tra loro. Questo scenario è tipico dei materiali coesivi. Al contrario, quando tutti e tre i punti risultano ravvicinati, si ottengono valori di permeabilità decisamente più affidabili. Ad esempio, nel sondaggio SA condotto a Bevazzana, si riscontra una significativa presenza di materiale sabbioso. Pertanto, le equazioni derivate dai formulari geotecnici sono più efficaci nell'analizzare i materiali granulari, producendo valori accettabili in tali condizioni.

Sondaggio	k (laboratorio)m/s	k (Alyamani)m/s	k (Breyer)m/s
S1	2,14E-07	4,02E-08	1,04E-08
	1,33E-06	5,35E-07	3,25E-07
S2	4,1E-09	1,01E-08	3,16E-10
	1,28E-09	9,81E-09	3,41E-09
S3	6,9E-08	4,85E-09	5,01E-10
	2,73E-05	8,13E-08	2,3E-08
S4	1E-07	1,72E-08	1,18E-08
	3,27E-09	1,6E-07	1,06E-09
S5	3,2E-06	4,67E-08	1,39E-08
	5,39E-08	1,27E-08	1,41E-08
S6	1,2E-09	1,95E-08	9,91E-10
	1,19E-06	1,9E-08	8,96E-09
SA	8,42E-09	1,54E-07	3,46E-09
	8,78E-10	1,99E-08	6,21E-09
SA1	1,36E-06	2,14E-05	1,19E-05
	8,67E-09	4,31E-09	2,54E-09
SA1	2,31E-09	4,35E-09	1,65E-09
	2,31E-09	2,95E-09	4,31E-10
SA1	2,31E-09	9,39E-09	5,36E-10
	9,15E-08	1,52E-07	1,88E-08
SA1	1,53E-08	2,52E-08	9,45E-09
	2,42E-07	7,58E-06	5,29E-06

Tabella 2- Conducibilità k ottenuta con le formule (10) e (11), sondaggi da Latisana a Bevazzana

Anche in questo caso si utilizzano degli indicatori per valutare l'affidabilità dei valori ottenuti. Analizzando l'interpretazione dei valori di RMSE, si osserva che i risultati ottenuti non sono particolarmente soddisfacenti, poiché il valore dell'RMSE non si presenta significativamente basso. In generale, si riscontrano due valori quasi identici dell'RMSE (10^{-6}), sia per la conducibilità idraulica calcolata mediante il metodo di Alyamani (1993) sia per quella ottenuta con il metodo di Breyer (1964). Il Grafico 17 illustra la comparazione tra la conducibilità idraulica calcolata e quella determinata in laboratorio, evidenziando un certo scostamento rispetto alla diagonale del grafico. In generale, si riscontra una maggiore incidenza di valori sovrastimati nel caso della metodologia di Breyer (1964) e una maggiore incidenza di valori sottostimati per quanto riguarda la metodologia di Alyamani (1993).

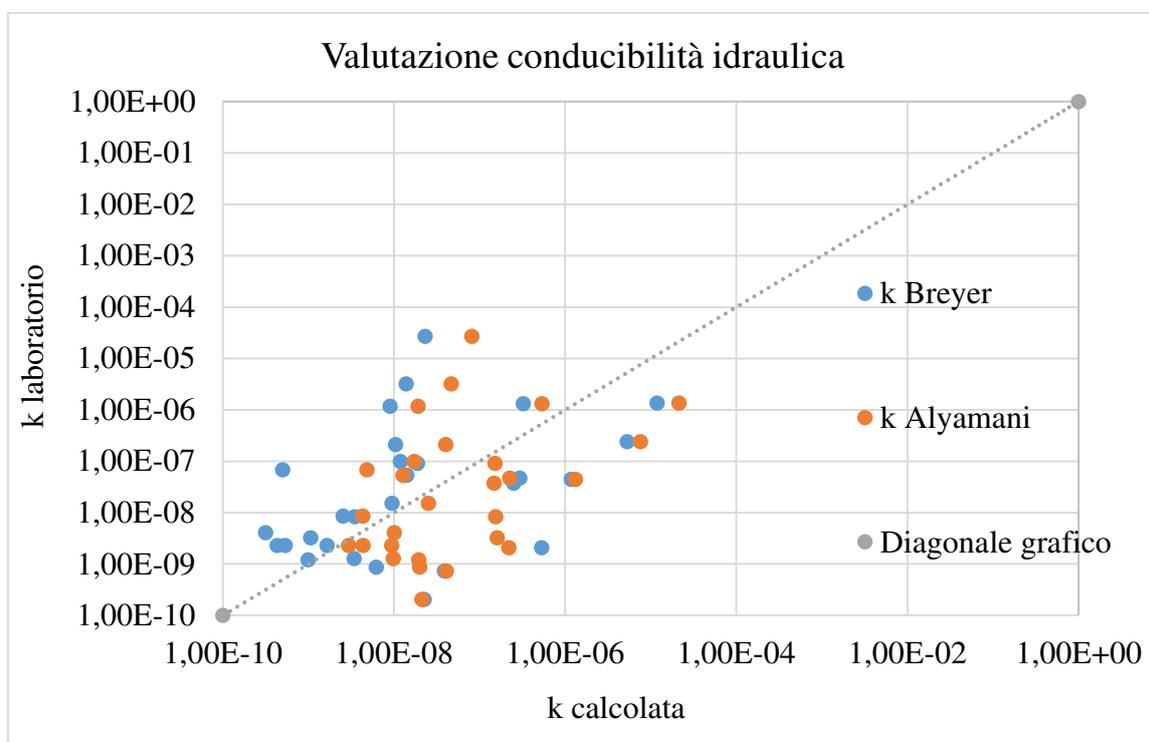


Grafico 17- Valutazione conducibilità idraulica tra Breyer(1964) e Alyamani(1993)

6 CONCLUSIONI

Il presente studio si propone di definire le arginature del basso corso del fiume Tagliamento da una prospettiva geotecnica, analizzando le indagini condotte nel corso degli anni. Attraverso l'analisi di questi sondaggi, è possibile determinare le caratteristiche meccaniche e idrauliche della struttura arginale.

A tal fine, è stata effettuata una serie di prove sia in sito che in laboratorio, mirate a fornire una stima dei valori più vicina alla realtà. Per ciascun parametro calcolato, sono stati previsti più metodi, consentendo così di confrontare i risultati ottenuti attraverso diverse tecniche.

Dopo aver delineato le diverse stratigrafie, si procede a un'analisi della struttura arginale in relazione alle sue componenti. A tal fine, si fanno riferimento sia ai sondaggi condotti da Villanova a San Filippo, situati a 70 km dalla foce del fiume, sia ai sondaggi effettuati a San Giorgio a Bevazzana, a pochi chilometri dalla foce. Lo studio è incentrato sull'analisi dei terreni costituenti il corpo arginale e la fondazione. Per quanto riguarda il corpo arginale, si prendono in considerazione i primi cinque metri del rilevato, che vanno dall'alveo attivo fino alla quota più elevata. La fondazione, invece, comprende la zona dell'alveo attivo fino a profondità di circa 20 metri dalla cresta, con una lunghezza che varia in base alla profondità dei carotaggi. Per entrambe le sezioni, si ottiene una composizione variabile di materiali, caratterizzata da una prevalenza di materiali coesivi, influenzata dalle diverse aree in cui sono stati condotti i sondaggi. I risultati ottenuti vengono poi confrontati, e queste composizioni permettono di formulare ipotesi riguardo ai possibili comportamenti meccanici e idraulici della struttura arginale.

Sfruttando i parametri granulometrici ottenuti dai sondaggi, si procede a sviluppare un'analisi meccanica del rilevato. L'aspetto principale di tale analisi consiste nella valutazione del valore dell'angolo di attrito critico, utilizzando due metodi distinti. Il primo metodo consiste nella determinazione dell'angolo critico tramite un'equazione. Questa formula è espressa in funzione dell'indice granulometrico I_{gr} (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007), quindi si dovrà ricavare i diametri notevoli d_{10} , d_{50} e d_{60} dalla curva granulometrica. Considerando la prevalenza di materiali coesivi riscontrati in precedenza nel corpo arginale e nella fondazione, si osserva che i valori dei diametri notevoli, in particolare d_{10} , risultano molto piccoli e di difficile interpretazione. Il secondo metodo per determinare l'angolo di attrito critico si basa sull'applicazione della formula inversa di Coulomb, assumendo una coesione nulla. Il processo per il calcolo dell'angolo di attrito critico inizia con la determinazione del valore di tensione dal diagramma tensione-deformazione orizzontale. Si dovrà identificare il valore di tensione che consente alla curva di deformazione di mantenere un comportamento costante e lineare. Una volta ottenuta la tensione, si procede al calcolo dell'angolo di attrito critico per diverse pressioni verticali di riferimento (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa) utilizzando la formula inversa di Coulomb.

Nell'ultima parte del lavoro, si procede a un'analisi focalizzata sulle caratteristiche idrauliche dell'argine. Anche in questo caso, si impiegano due formule per calcolare la conducibilità idraulica. Una volta ottenute le due diverse stime di permeabilità, queste vengono confrontate con i valori derivati dalle analisi di laboratorio. Entrambe le equazioni utilizzate sono legate alla granulometria del terreno e fanno uso di parametri che includono i diametri notevoli. La prima equazione è quella di Alyamani (1993), mentre la seconda è quella di Breyer (1964). Queste due formule forniscono risultati soddisfacenti per materiali grossolani, ma tendono a offrire stime meno valide per i materiali

coesivi. Nel nostro caso, caratterizzato da una prevalenza di limi-argille e da valori di d_{10} , d_{50} e d_{60} estremamente ridotti, si ottengono risultati di permeabilità che risultano poco affidabili.

Ripercorrendo i risultati ottenuti nell'elaborato, si può concludere che, per quanto concerne l'analisi granulometrica, il corpo arginale e la fondazione sono costituiti da materiali coesivi, in particolare limi argillosi e limi sabbiosi, e da materiali granulari, come le sabbie fini e le sabbie limose. Tali materiali coesivi contribuiscono a prevenire il fenomeno della filtrazione, conferendo impermeabilità all'argine. Al contrario, i materiali granulari, come la sabbia, favoriscono una maggiore filtrazione rispetto ai materiali coesivi, generando percorsi preferenziali all'interno dell'argine e compromettendo così la stabilità della struttura. In generale, le composizioni stratigrafiche evidenziano potenziali punti critici, che richiedono attenzione e intervento, nelle aree caratterizzate da una maggiore permeabilità, in particolare nei pressi del comune di San Michele al Tagliamento. A una distanza di circa 6 km dalla foce, nei pressi di Bevazzana, i risultati dei sondaggi evidenziano una chiara differenziazione nei materiali che compongono il corpo arginale e la fondazione. Il corpo arginale è principalmente costituito da limo argilloso, con una quantità debole di sabbia presente in modo subordinato. In particolare, nei primi 5 metri di profondità, la predominanza di materiali coesivi, come il limo argilloso, risulta evidente. Per quanto riguarda la fondazione, essa presenta una composizione più eterogenea. È costituita da una miscela di limo argilloso e sabbia limosa, con una significativa presenza di sabbia lungo i 13 metri di profondità esaminati. In particolare, la fondazione mostra una combinazione di materiali coesivi, come il limo argilloso, e materiali granulari, come la sabbia, che risultano presenti in modo costante su tutta la profondità sondato. Queste osservazioni suggeriscono una struttura stratificata e non omogenea della fondazione, caratterizzata dalla coesistenza di materiali coesivi e granulari, con una tendenza alla predominanza di materiali coesivi nel corpo arginale. A circa 25 km dalla foce, sia il corpo arginale che la fondazione presentano una distribuzione dei materiali non omogenea, caratterizzata dalla coesistenza di materiali coesivi, come il limo, e materiali granulari, come la sabbia. La principale differenza osservata riguarda la presenza di argilla lungo la fondazione, un materiale che non è stato riscontrato nei primi cinque metri del corpo arginale. I risultati ottenuti alle diverse distanze dalla foce evidenziano alcune similitudini, in particolare per quanto riguarda la composizione della fondazione, che risulta essere costituita sia da materiali granulari che da materiali coesivi in entrambe le distanze considerate. Tuttavia, si osservano differenze significative nella composizione del corpo arginale: a 25 km dalla foce, il corpo arginale è formato da una miscela di materiali coesivi e granulari, mentre vicino alla foce il corpo arginale è prevalentemente costituito da materiali coesivi, in particolare limo argilloso. Questa configurazione riflette una tendenza generale dei terreni più prossimi alla foce a essere caratterizzati da sedimenti più fini. Infatti, man mano che il fiume si avvicina alla foce, la capacità di trasporto dei sedimenti diminuisce, favorendo il deposito di particelle più fini, come sedimenti limosi e argillosi.

La permeabilità è strettamente legata alla granulometria del materiale. Essa descrive la distribuzione delle dimensioni delle particelle in un campione di terreno e influisce significativamente sulla capacità del fluido di muoversi attraverso il materiale. In generale, materiali con particelle più grandi, come sabbia e ghiaia, tendono a presentare una conducibilità idraulica maggiore rispetto a materiali con particelle più piccole, come argilla o limo. Nel contesto dei terreni arginali vicino alla foce, i valori di permeabilità sono influenzati dalla composizione granulometrica del suolo. A distanze molto ravvicinate alla foce, dove predominano i materiali coesivi (come limo argilloso), i valori di permeabilità sono generalmente bassi, con valori che possono scendere anche sotto 10^{-9} m/s in caso di terreni dominati da argilla. Più lontano dalla foce, dove la percentuale di materiali granulari aumenta (come sabbia), la permeabilità tende ad aumentare, avvicinandosi a valori che possono essere di 10^{-6} m/s. I valori di conducibilità idraulica ottenuti mediante l'applicazione delle formule di

Alyamani (1993) e Breyer (1964) presentano un errore rispetto a quelli calcolati in laboratorio, con una discrepanza nell'ordine di grandezza compreso tra 10^{-1} e 10^{-2} per i sondaggi effettuati a brevi distanze dalla foce. Tale errore può essere attribuito alla presenza di materiali coesivi (come argilla e limo) nelle zone più prossime alla foce, i quali influenzano la stima della conducibilità idraulica. Dalla nostra analisi emergono valori non affidabili per i materiali coesivi, mentre i valori risultano validi per i materiali granulari. Questo comportamento è attribuibile all'impiego di equazioni basate su numerosi parametri granulometrici. I risultati ottenuti confermano l'ipotesi formulata inizialmente, evidenziando la produzione di valori insoddisfacenti. Questo fenomeno è chiaramente evidenziato nel Grafico 17, che mostra il confronto tra i valori di conducibilità idraulica stimati e i valori ottenuti in laboratorio. Dal confronto tra le due metodologie di calcolo, emerge che la formula di Breyer (1964) tende a sovrastimare più valori di conducibilità di laboratorio rispetto alla formula di Alyamani (1993), e di conseguenza, la formula di Alyamani (1993) presenta una sottostima più marcata dei valori di laboratorio rispetto alla formula di Breyer (1964).

Nel contesto della discussione sull'aspetto meccanico, si osserva come la stratigrafia caratteristica dell'argine consista in una composizione eterogenea di materiali con proprietà differenti. Di conseguenza, l'angolo di attrito critico di maggior interesse per il nostro studio si colloca nell'intervallo compreso tra 25° e 35° , in conformità con le proprietà dei materiali granulari e coesivi che costituiscono il substrato arginale. Considerando l'equazione 6 (P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola, 2007), si osserva che i risultati migliori, ovvero all'interno del range considerato, si ottengono quando viene utilizzato il segno negativo nella formula. Tale conclusione è confermata dall'analisi del valore di RMSE (Root Mean Square Error), che risulta essere inferiore quando si applica la versione della formula con il segno negativo, rispetto a quella con il segno positivo. Anche utilizzando la formula 8, i valori ottenuti (vedi Appendice 12) rientrano all'interno del range considerato, confermando la coerenza dei risultati con le aspettative. Infine, mediante l'applicazione di una retta di tendenza lineare (vedi Grafico 15), è stata derivata la nuova equazione che descrive il problema (formula 8), rappresentando in modo diretto i diversi dati trattati.

In conclusione, la conoscenza approfondita del sito, sotto i profili granulometrico, stratigrafico, meccanico e idraulico, si rivela utile per future analisi di stabilità e condizioni operative dell'argine. Per prevenire il verificarsi di situazioni critiche, è fondamentale comprendere il comportamento dell'argine e predisporre interventi efficaci prima di raggiungere condizioni pericolose per la popolazione e per l'economia del territorio.

Appendice

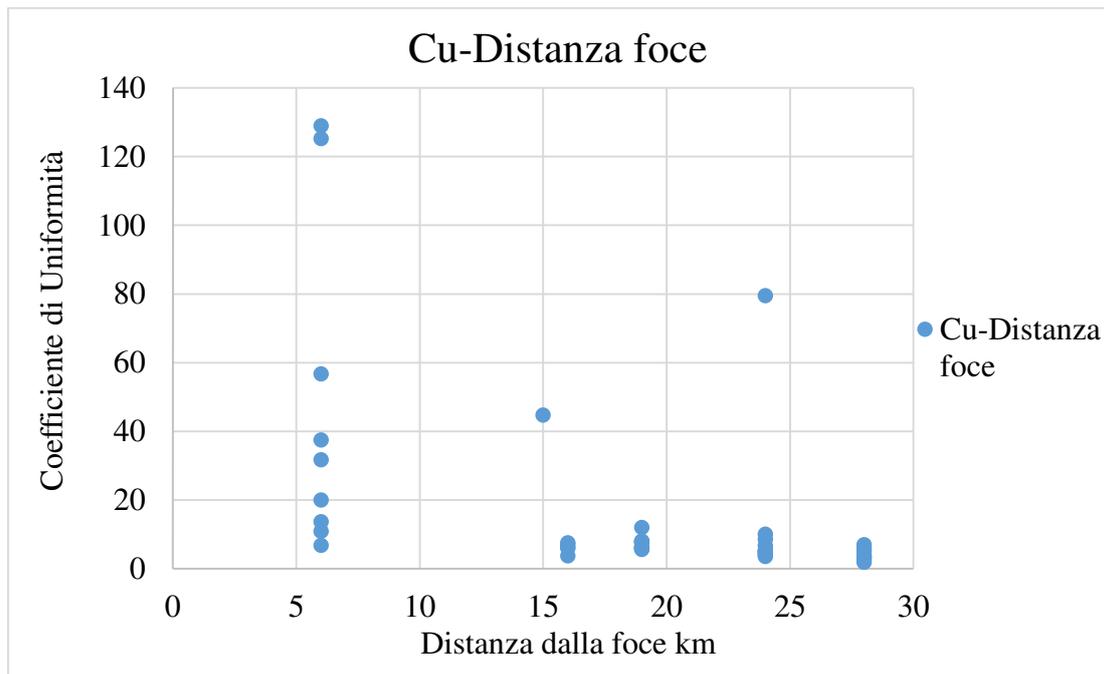
Appendice 1 - *Analisi granulometrica del corpo arginale di un sondaggio a Malafesta, tabella 1*

Sondaggio	Profondità(m)	Materiale	Ghiaia(%)	Sabbia(%)	Limo(%)	Argilla(%)
S02	0.5-0.6	Limo con sabbia fine	0	33,00	67,00	0,00
	1.5-1.6	Limo debolmente argilloso	0	27,00	73,00	0,00
	2.5-2.6	Limo argilloso	0	7,70	92,30	0,00
	3.0-3.5	Argilla debolmente limosa	0	4,60	85,40	10,00
	3.5-3.6	Limo argilloso	0	4,60	85,40	10,00
	4.7-4.8	Limo argilloso	0	5,00	95,00	0,00

Appendice 2 - *Analisi granulometrica del corpo arginale di un sondaggio a S.Michele, tabella 2*

Sondaggio	Profondità(m)	Materiale	Ghiaia(%)	Sabbia(%)	Limo(%)	Argilla(%)
S1	2,5	Limo sabbioso e argilloso	0	28,3	51,3	20,4
	5	Limo argilloso debolmente sabbioso	0	17,3	57,2	25,5

Appendice 3- *Relazione tra Coefficiente Di Uniformità e distanza dalla foce in chilometri*



Appendice 4- *Valori del coefficiente di Uniformità in relazione alla distanza dalla foce in km*

d_{10}	d_{60}	Distanza dalla foce in km	C_u
0,0013	0,05817	15	44,74615
0,0011	0,015	6	13,63636
0,0003	0,017	6	56,66667
0,0012	0,024	6	20
0,075	0,506	6	6,746667
0,0048	0,601	6	125,2083
0,0004	0,015	6	37,5
0,0012	0,013	6	10,83333
0,001	0,129	6	129
0,0006	0,019	6	31,66667
0,002	0,159	24	79,5
0,02	0,06	28	2,75

0,01	0,05	28	5,625
0,01	0,04	28	7
0,01	0,04	28	3,333333
0,01	0,04	28	5
0,02	0,03	28	1,866667
0,01	0,03	28	3,75
0,02	0,08	24	5,333333
0,02	0,07	24	4,666667
0,01	0,06	24	8,571429
0,01	0,04	24	5
0,01	0,04	24	3,5
0,009	0,06	24	6,666667
0,02	0,15	24	10
0,006	0,03	24	4,166667
0,01	0,03	24	5
0,005	0,02	24	4
0,018	0,10	19	5,555556
0,025	0,16	19	6,4
0,01	0,08	19	8
0,005	0,03	19	6
0,005	0,03	19	6
0,015	0,18	19	12
0,012	0,07	19	5,833333
0,01	0,06	19	7,5
0,01	0,08	19	8

0,013	0,10	19	7,692308
0,012	0,05	16	3,75
0,008	0,06	16	7,5
0,009	0,06	16	6,111111
0,005	0,03	16	6
0,007	0,05	16	7,142857

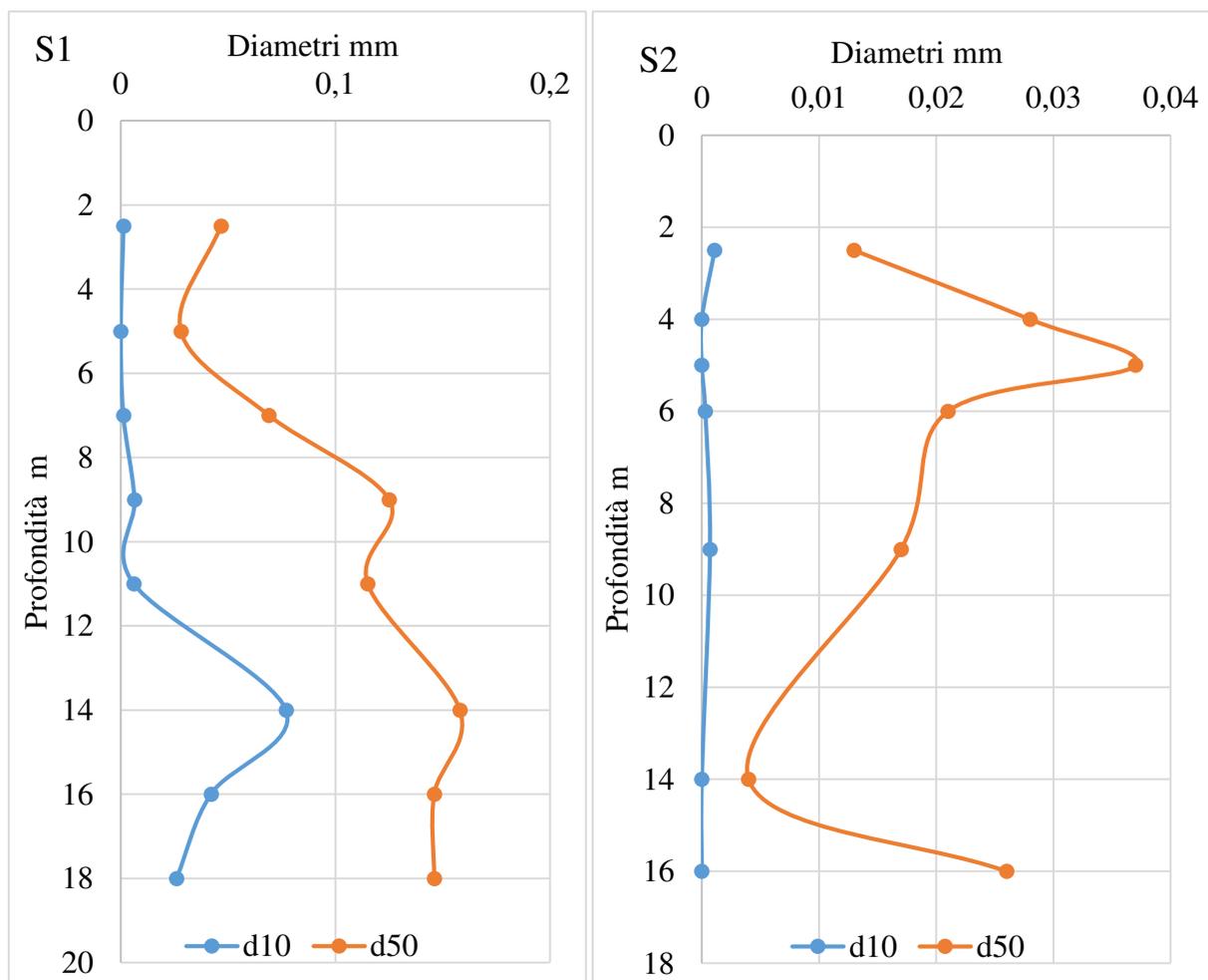
Appendice 5-Analisi granulometrica della fondazione in un sondaggio a San Giorgio, tabella 3

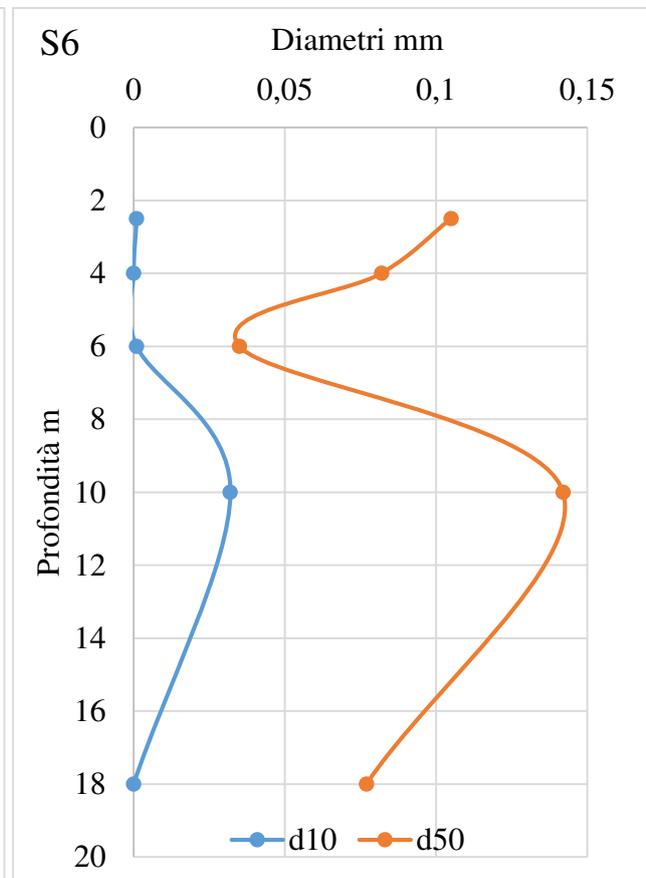
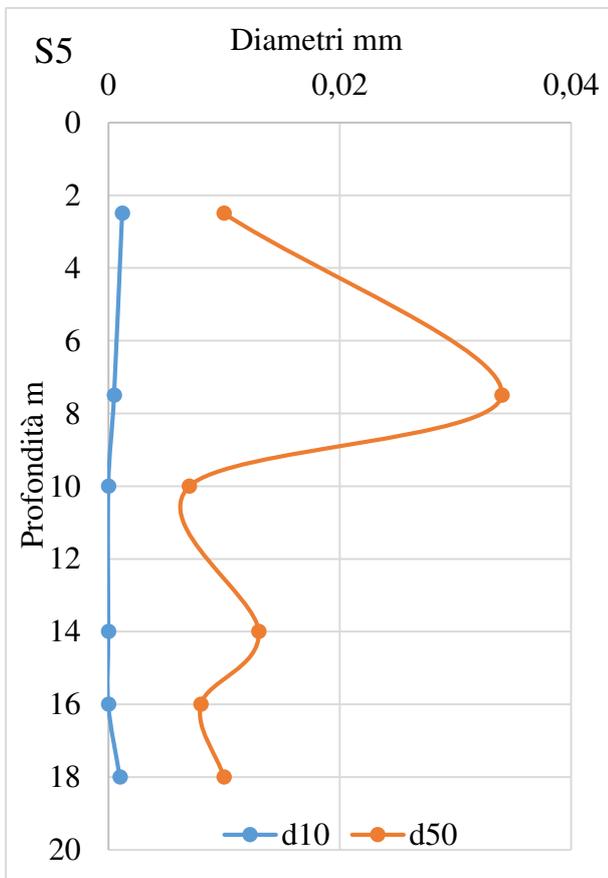
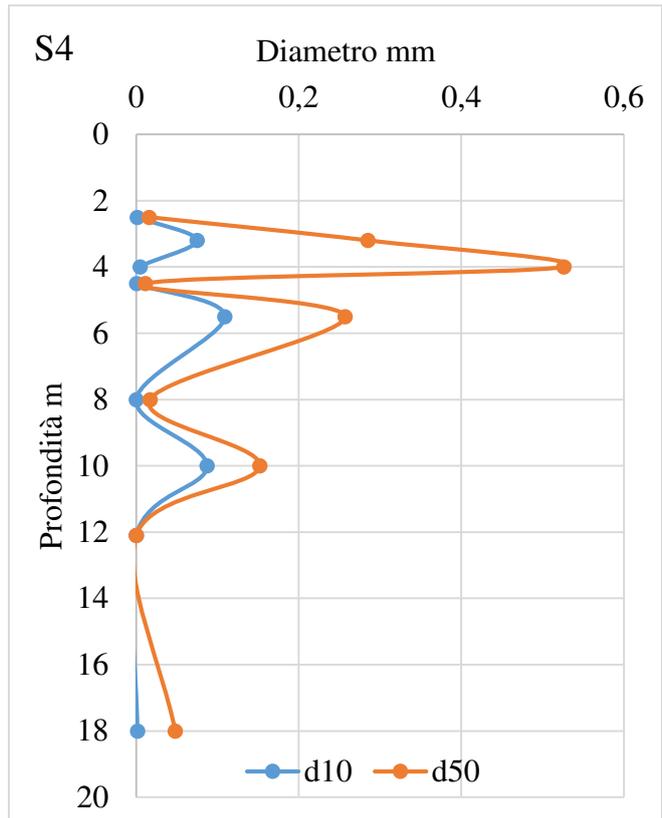
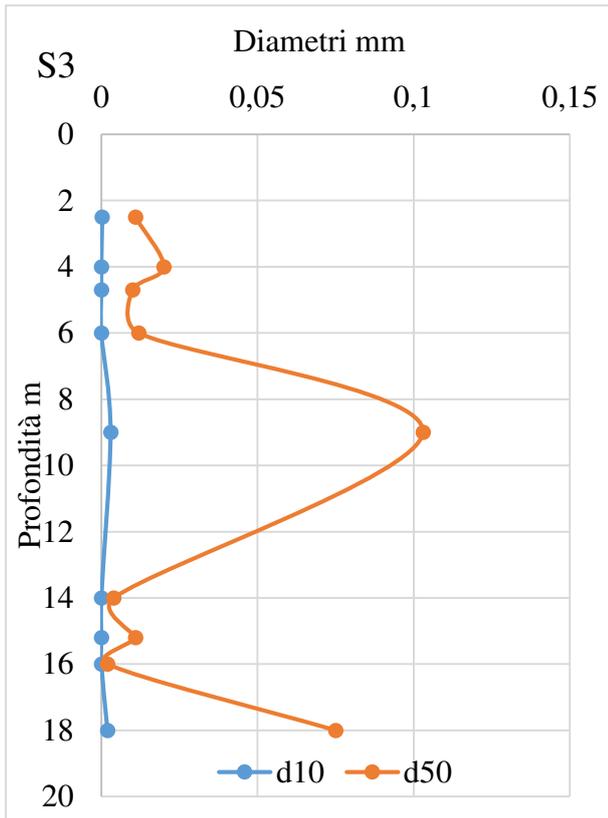
Sondaggio	Profondità(m)	Materiale	Ghiaia(%)	Sabbia(%)	Limo(%)	Argilla(%)
S05	5.5-5.6	Limo con tracce di sabbia fine	0,00	11,00	89,00	0,00
	6.5-6.6	Limo argilloso	0,00	4,50	95,50	0,00
	7.2-7.7	Limo argilloso	0,00	13,00	87,00	0,00
	8.5-8.6	Limo con presenza di sabbia fine	0,00	26,00	74,00	0,00
	9.7-9.8	Sabbia fine con limo	0,00	59,00	41,00	0,00
	10.3-10.4	Limo con sabbia fine	0,00	38,00	62,00	0,00
	11.5-11.6	Limo con sabbia fine	0,00	40,00	60,00	0,00
	12.5-12.6	Sabbia fine	0,00	85,00	15,00	0,00
	13.5-13.6	Sabbia fine	0,00	75,00	25,00	0,00
	14.4-14.5	Sabbia media con sabbia fine e limo	0,00	72,00	27,00	1,00

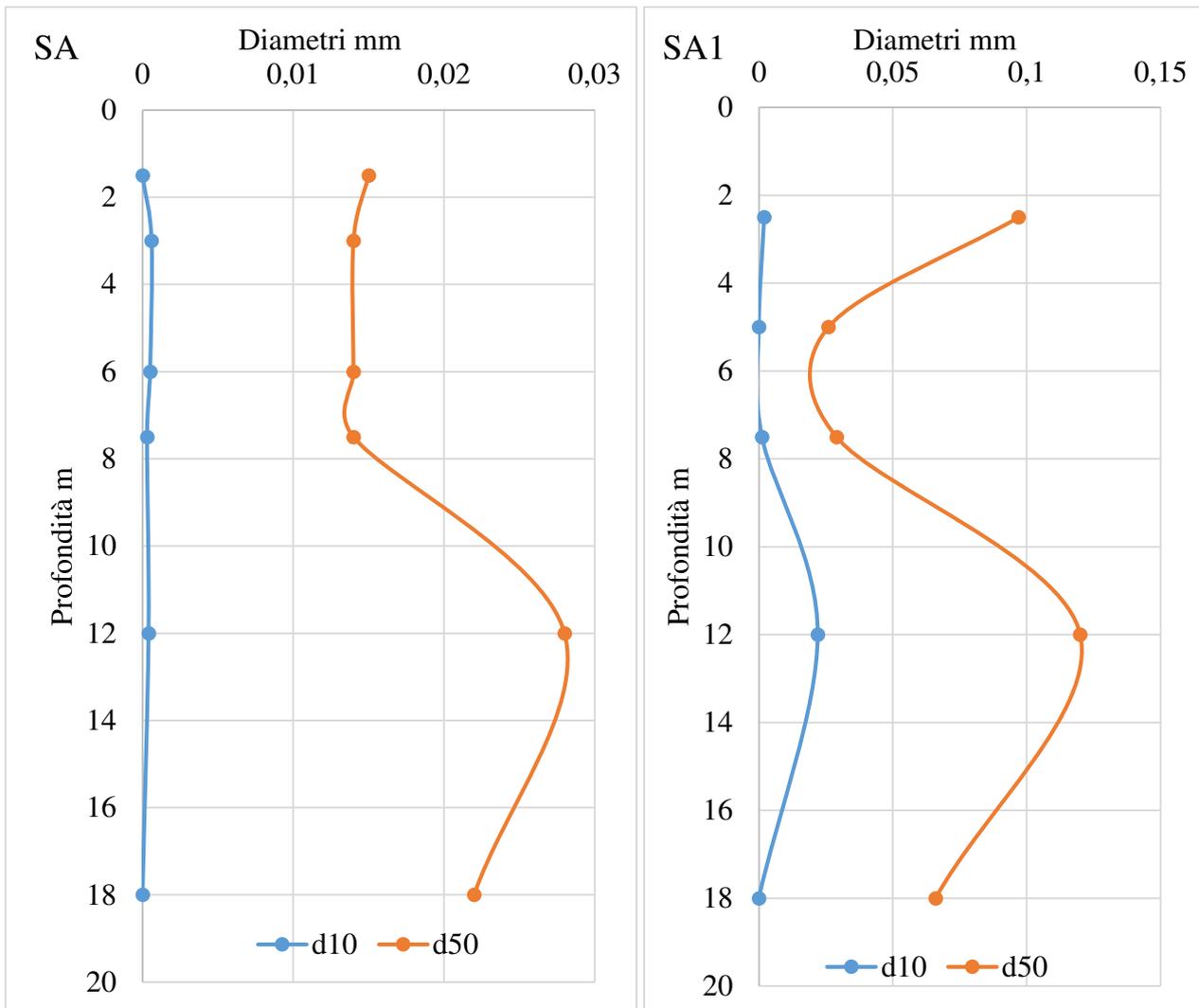
Appendice 6-Analisi granulometrica della fondazione in un sondaggio a Bevazzana, tabella 4

Sondaggio	Profondità(m)	Materiale	Ghiaia(%)	Sabbia(%)	Limo(%)	Argilla(%)
S6	6	Limo argilloso debolmente sabbioso	0	16,4	60,5	23,1
	10	Sabbia debolmente limosa	0	79,2	14,7	6,1
	18	Sabbia limosa debolmente argillosa	0	50,5	34,5	15

Appendice 7- Grafici diametri notevoli d_{10} e d_{50} in relazione alla profondità dei sondaggi







Appendice 8- Valori di massima della coesione c , (U.Alasia-M.Pugno, 2011)

Tipo di terreno	c (N/mm ²)	Tipo di terreno	c (N/mm ²)
Argilla grassa	0,050	Ghiaia umida	0,0
Argilla magra	0,010	Limo compatto	0,010
Argilla sabbiosa	0,002	Sabbia umida compatta	0,001
Argilla secca	0,025	Terra vegetale compatta	0,0
Argilla umida	0,030	Terreni sciolti	$\frac{2}{3} \cdot c$

Appendice 9 - Valori dell'angolo di attrito interno φ , (U.Alasia-M.Pugno, 2011)

Tipo di terreno	φ	Tipo di terreno	φ
Argilla bagnata	20° ÷ 25°	Limo compatto	25° ÷ 30°
Argilla secca compatta	50°	Limo sciolto	20° ÷ 22°
Argilla secca sabbiosa	30° ÷ 45°	Marna grassa	16° ÷ 22°
Argilla umida	15° ÷ 25°	Marna sabbiosa	22° ÷ 29°
Ghiaia compatta	35° ÷ 37°	Pietrame	40° ÷ 45°
Ghiaia media	40° ÷ 55°	Sabbia compatta	35° ÷ 45°
Ghiaia sabbiosa	35° ÷ 50°	Sabbia sciolta	28° ÷ 34°
Ghiaia sciolta	34° ÷ 35°	Sabbia umida	40°
Ghiaia umida	25°	Terra vegetale compatta	35°

Appendice 10 - Diametri notevoli con il corrispondente indice granulometrico per il sondaggio S1

$d_{10}(\text{mm})$	$d_{50}(\text{mm})$	$d_{60}(\text{mm})$	$I_{gr} = (d_{50} \cdot d_{10} / d_{60})$
0,0013	0,0467	0,05817	0,001044
0	0,028	0,037	0
0,0012	0,069	0,09	0,00092
0,0064	0,125	0,144	0,005556
0,006	0,115	0,135	0,005111
0,077	0,158	0,176	0,069125
0,042	0,146	0,166	0,03694
0,026	0,146	0,167	0,022731

Appendice 11 - Valori dell'angolo critico per il sondaggio S1 con i rispettivi diametri notevoli

$d_{10}(\text{mm})$	$d_{50}(\text{mm})$	$d_{60}(\text{mm})$	$\varphi_{cr}(\text{°}) = (38.0 + 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$
0,0013	0,0467	0,05817	35,4
0,0012	0,069	0,09	35,3
0,0064	0,125	0,144	36,5
0,006	0,115	0,135	36,4
0,077	0,158	0,176	38,2
0,042	0,146	0,166	37,8
0,026	0,146	0,167	37,5

Appendice 12 – *Differenza di valori dell'angolo di attrito critico*

φ_{cr} (°) con c	φ_{cr} (°) con c = 0
28,96	27,77
29,25	28,37
29,54	27,92
28,37	26,56
29,36	27,13
29,25	27,77
29,25	27,15
30,96	28,76
30,43	29,36
29,54	27,02
29,68	27,47
30,11	26,10
30,96	27,24
27,92	25,61
32,01	28,9
29,05	27,7
28,07	26,57
29,54	27,92
28,37	27,47

Appendice 13-Passaggi per ottenere il valore RMSE per $\varphi_{cr}(\circ) = (38.0 + 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$

φ lab	$\varphi_{cr}(\circ) +$	Residuo (φ lab – φ cr)	Quadrato residuo
28,5	35,37877	-6,87877	47,31747
27,5	35,29387	-7,79387	60,74443
29,3	36,50433	-7,20433	51,90234
28,1	35,31783	-7,21783	52,09706
27,6	34,14031	-6,54031	42,7757
21,4	34,90642	-13,5064	182,4234
28,5	34,2465	-5,7465	33,02227
29,7	35,19979	-5,49979	30,24768
33,4	34,52441	-1,12441	1,264298
28,4	35,29612	-6,89612	47,55645
25,5	34,58457	-9,08457	82,52938
29,7	35,21143	-5,51143	30,37585
28,4	35,19595	-6,79595	46,18499
27,1	37,55789	-10,4579	109,3674
33,5	34,80056	-1,30056	1,691469
25,7	34,67783	-8,97783	80,6015
17,9	34,20536	-16,3054	265,8647
15	34,29108	-19,2911	372,1457
28,7	35,48393	-6,78393	46,02167

Appendice 14-*Passaggi per ottenere il valore RMSE per $\varphi_{cr}(\text{°}) = (38.0 - 2.0) + 1.55 \cdot \log I_{gr}$*

φ lab	$\varphi_{cr}(\text{°}) -$	Residuo (φ lab – φ cr)	Quadrato residuo
28,5	31,37877	-2,87877	8,287316
27,5	31,29387	-3,79387	14,39346
29,3	32,50433	-3,20433	10,26772
28,1	31,31783	-3,21783	10,35443
27,6	30,14031	-2,54031	6,453192
21,4	30,90642	-9,50642	90,37201
28,5	30,2465	-1,7465	3,050265
29,7	31,19979	-1,49979	2,249368
33,4	30,52441	2,87559	8,269017
28,4	31,29612	-2,89612	8,387504
25,5	30,58457	-5,08457	25,85283
29,7	31,21143	-1,51143	2,284419
28,4	31,19595	-2,79595	7,817358
27,1	33,55789	-6,45789	41,70428
33,5	30,80056	2,699435	7,28695
25,7	30,67783	-4,97783	24,77883
17,9	30,20536	-12,3054	151,4218
15	30,29108	-15,2911	233,8171
28,7	31,48393	-2,78393	7,75025

Appendice 15 - Valori attesi di permeabilità per diversi materiali

TIPO DI TERRENO	k (m/s)
Ghiaia pulita	$10^{-2} - 1$
Sabbia pulita, sabbia e ghiaia	$10^{-5} - 10^{-2}$
Sabbia molto fine	$10^{-6} - 10^{-4}$
Limo e sabbia argillosa	$10^{-9} - 10^{-5}$
Limo	$10^{-8} - 10^{-6}$
Argilla omogenea sotto falda	$< 10^{-9}$
Argilla sovraconsolidata fessurata	$10^{-8} - 10^{-4}$
Roccia non fessurata	$10^{-12} - 10^{-10}$

Appendice 16- Insieme di valori ottenuti dal calcolo delle costanti I_o e C_b

I_o	C_b
0,0005	0,000629
0,003	0,000808
0,0003	0,000358
0,0004	0,000709
0,0003	0,000567
0,0005	0,000639
0,0007	0,000587

Indice delle figure

Figura 1-Esempio di Argine.....	6
Figura 2-Sezione generica che mostra le componenti di un argine, (CIRIA, 2013).....	8
Figura 3-Diverse tipologie di argini a sezione omogenea e zonata	9
Figura 4-Esempio di fontanazzo	12
Figura 5-Erosione esterna lato alveo, (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014)	14
Figura 6-Erosione esterna lato campagna, (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014).....	14
Figura 7-Esempi di erosione interna, (P.Simonini-S.Cola-S.Bersan, 2014).....	15
Figura 8-Schema dei principali meccanismi di rottura di un argine, (Minerva).....	16
Figura 9-Inquadramento area di progetto, in rosso gli argini in destra orografica,(Google Earth) ...	18
Figura 10-Formazione di canali intrecciati del Fiume Tagliamento	19
Figura 11-Tagliamento con morfologia a meandri,(Google Earth)	20
Figura 12- Distribuzione dei sondaggi da Villanova a San Bevazzana,(Google Earth)	21
Figura 13-Esempio di carotiere utilizzato per le prove CPT	22
Figura 14-Esempio di cassetta, profondità da m 10.00 a m 15.00	23
Figura 15-Stratigrafia del sondaggio S1	24
Figura 16-Colonna di riferimento per comporre una stratigrafia.....	25
Figura 17-Curva granulometrica ricavata dal sondaggio S1	28
Figura 18-Esempio di campione costituito da diversi materiali	29
Figura 19-c e ϕ da rottura per due diverse σ principali (U.Alasia-M.Pugno, 2011).....	40
Figura 20-Forze sviluppate da un grano su superficie laterale, (U.Alasia-M.Pugno, 2011)	41

Indice dei grafici

Grafico 1- Corpo arginale dei sondaggi fatti da Villanova e Bevazzana.....	31
Grafico 2- d_{10} e d_{50} del corpo arginale in funzione della distanza dalla foce, sondaggi da Villanova a Bevazzana	32
Grafico 3- Tipologia di materiale del corpo arginale (%) in funzione della distanza dalla foce in km	32
Grafico 4- Fusso di curve granulometriche del Corpo Arginale	33
Grafico 5-Fondazione dei sondaggi fatti da Villanova a Bevazzana	36
Grafico 6- d_{10} e d_{50} della fondazione in funzione della distanza dalla foce, sondaggi da Villanova a Bevazzana	37
Grafico 7- Tipologia di materiale della fondazione(%) in funzione della distanza dalla foce in km	37
Grafico 8- Fusso di curve granulometriche della fondazione.....	38
Grafico 9- Diagramma Tensione-Pressione verticale per 3 σ diverse, (Tecnostudio, 2023).....	39
Grafico 10-Diagramma Tensione-Deformazione orizzontale per 3 σ diverse, (Tecnostudio, 2023)	40
Grafico 11- Differenza tra angolo di attrito di picco e angolo di attrito critico.....	42
Grafico 12-Confronto di φ_{cr} ricavato dalle formule (6) e (8).....	46
Grafico 13- Confronto tra angolo critico di laboratorio e angolo critico calcolato per $\varphi_{cr}(^\circ)$ $= (38.0+ 2.0) +1.55 \cdot \log I_{gr}$	48
Grafico 14- Confronto tra angolo critico di laboratorio e angolo critico calcolato per $\varphi_{cr}(^\circ) = (38.0- 2.0) +1.55 \cdot \log I_{gr}$	49
Grafico 15-Determinazione nuova equazione del problema meccanico	49
Grafico 16- Confronto delle conducibilità idrauliche k calcolate con diverse metodologie	54
Grafico 17- Valutazione conducibilità idraulica tra Breyer(1964) e Alyamani(1993).....	56

Indice delle formule

Legge di Darcy(1)	11
Erosione esterna(2)	13
Forza di filtrazione(3)	14
Formula di Coulomb(4)	40
$\varphi_{cr}(\text{°})$ da relazione(5).....	43
Intervallo indice granulometrico(6)	43
$\varphi_{cr}(\text{°})$ da interpretazione grafica(7)	43
Nuova equazione del problema (8)	49
k da Alyamani (9)	51
k da Breyer(10)	52

Bibliografia

1. A. Bruschi., Prove Geotecniche in situ, parte 3-un approfondimento sulle prove dinamiche e statiche meccaniche (2012)
2. CIRIA., Ministry of Ecology of United Kingdom, The International levee handbook. London. (2013)
3. J.Rosas-O.Lopez-T.M.Missimer-K.M.Coulibaly-A.H.A. Dehwah-K.Sesler-L.R.Lujan-D.Mantilla, Determination of Hydraulic Conductivity from Grain-Size Distribution for Different Depositional Environments. (2014)
4. K.Uromovic., Hydrology and Earth System Sciences, The effective porosity and grain size relations in permeability functions. (2014)
5. L.Carmignani., Appunti di Geologia Applicata, Secondo Volume, Università degli studi di Siena.
6. M.C.Magno-L.Bergamin-G.Pierfranceschi-F.Venti-E.Romano.. Metodologie e strumentazioni per l'analisi granulometrica dei sedimenti. (2016)
7. M.Martire.Analisi tridimensionale di fenomeni di filtrazione attraverso rilevati arginali in presenza di alterazioni. Tesi Magistrale in Ingegneria Civile, Università degli studi di Padova. (2015)
8. Minerva. Associazione di Divulgazione Scientifica.
9. P.Simonini., Studio preliminare sulle caratteristiche geotecniche e sulle condizioni di stabilità degli argini del fiume Tagliamento nel tratto di pertinenza della Regione Veneto. (1 Marzo 2021)
10. P.Simonini-F.Ceccato., Interpretazioni delle indagini geotecniche sugli argini del basso corso del fiume Tagliamento. Padova. (30 Novembre 2023)
11. P.Simonini-F.Ceccato. Analisi della documentazione inerente gli argini del basso corso del fiume Tagliamento. Padova. (6 Dicembre 2021)
12. P.Simonini-G.Ricceri-S.Cola., Geotechnical characterization and properties of Venice lagoon heterogeneous silts. Department of Hydraulic, Maritime, Environmental and Geotechnical Engineering, University of Padua.(2007)
13. P.Simonini-S.Cola-S.Bersan., Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio delle arginature. Atti del xxv convegno Italiano. (2014)
14. R.Bellotti-G.Selleri., Correlazione tra le caratteristiche geotecniche di alcuni terreni di fondazione e confronto tra i risultati ottenibili con l'applicazione di diversi metodi di calcolo del carico ammissibile.
15. S.Cianci-M.Parente., Il certificato di laboratorio geotecnico: il taglio diretto (2023)
16. Tecnostudio, Implementazione di una campagna di monitoraggio, rilievo e misura delle variabili idrauliche e geotecniche atte a caratterizzare lo stato delle arginature. (2023)

17. U.Alasia-M.Pugno., Corso di Costruzioni, Caratteristiche meccaniche delle terre e indagini di laboratorio (2011)