

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile

**Analisi semplificata di sicurezza degli argini
in sponda sinistra del basso corso del fiume
Tagliamento**

Laureando: Matteo Daminato

Relatrice: Dott. Francesca Ceccato

Anno accademico 2021-2022

RINGRAZIAMENTI

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale. In primis un sentito grazie alla Dott. Francesca Ceccato, relatrice di quest'elaborato, per la sua disponibilità e tempestività nel rispondere ad ogni mia richiesta e per avermi fornito abbondante materiale utile alla stesura del documento. Ringrazio poi le persone a me più care: la mia fidanzata Vittoria, mia sorella Alessia, mamma Marina e papà Pietro per avermi supportato ed essermi stato vicino in questi tre anni che ricordo sia nei momenti di gioia e di festa ma anche in quelli di tristezza e sconforto. Un particolare grazie va alla nonna Mirella e alla zia Raffy, le mie più grandi sostenitrici che non si fanno mancare nessuna chiamata prima e dopo ogni esame. Ringrazio i miei quattro compagni di viaggio Francesco, Gabriele, Nicola e Andrea per aver condiviso con me questi tre intensi anni e per aver gioito e festeggiato insieme i traguardi raggiunti. Un grande grazie a tutti gli amici di Villatora con i quali condivido sempre bellissimi momenti di svago e divertimento che mi aiutano a trovare nuove energie e stimoli per raggiungere gli obiettivi prefissati. Infine ringrazio tutti i componenti della Geodata, luogo ormai a me caro, per aver migliorato le mie conoscenze in campo geotecnico, le mie abilità di sperimentatore e per aver arricchito la mia esperienza lavorativa.

INDICE

RINGRAZIAMENTI.....	I
1. OBIETTIVI E METODOLOGIE	1
1.1. RIFERIMENTI NORMATIVI.....	2
2. INTRODUZIONE	7
2.1. FORMA E FUNZIONE DEGLI ELEMENTI DI UN RILEVATO ARGINALE	7
2.2. REGIMI DI FILTRAZIONE E MECCANISMI DI COLLASSO	10
3. BREVE STORIA DEL CORSO D'ACQUA OGGETTO DI ANALISI.....	15
3.1. INTERVENTI E OPERE DI MIGLIORAMENTO DEGLI ARGINI DEL FIUME TAGLIAMENTO	16
4. METODI E PROCESSO D'ANALISI.....	23
4.1. QGIS	23
4.2. CRITERIO GRAFICO E APPLICAZIONE.....	25
4.3. ANALISI DI FILTRAZIONE DEL RILEVATO ARGINALE	29
4.4. ANALISI DI STABILITA' DEL RILEVATO ARGINALE	35
4.4.1 METODO DI MORGESTERN-PRICE	37
5. RISULTATI	43
5.1. CRITERIO GRAFICO: RISULTATI DELL'ANALISI	44
5.2. SEZIONE 4 : RISULTATI DELL'ANALISI DI FILTRAZIONE E STABILITA'	47
5.3. SEZIONE 13 : RISULTATI DELL'ANALISI DI FILTRAZIONE E STABILITA'	52
5.4. SEZIONE 21 : RISULTATI DELL'ANALISI DI FILTRAZIONE E STABILITA'	55
6. CONCLUSIONI.....	57

INDICE DELLE FIGURE.....	59
INDICE DEI GRAFICI	61
INDICE DELLE TABELLE	62
BIBLIOGRAFIA	63

1. OBIETTIVI E METODOLOGIE

La presente relazione si propone di illustrare le metodologie utilizzate e i risultati ottenuti nel corso di un'analisi semplificata sulla sicurezza dell'argine in sinistra orografica del basso corso del fiume Tagliamento. Il tratto oggetto di studio è di pertinenza della Regione Friuli-Venezia Giulia e si estende a partire dal paese di Latisana fino alla foce del fiume nei pressi di Bibione per una lunghezza complessiva di circa 20 km. La Fig.1 riporta la mappa da satellite, estratta da Google Earth, con traccia in rosso del tratto arginale oggetto di ricerca.

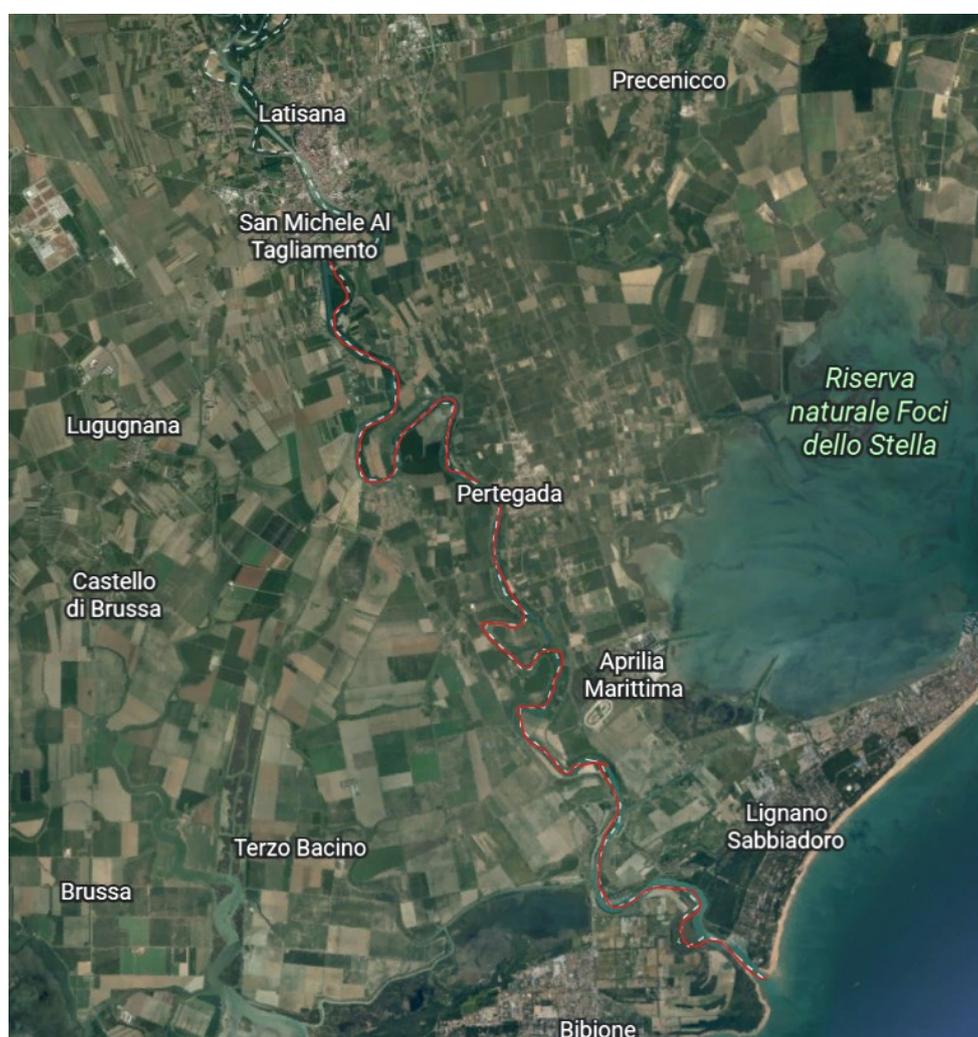


Figura 1: Estratto mappa da Google Earth con evidenziata in rosso il tratto arginale oggetto di studio.

È bene ricordare che il presente studio ha lo scopo di condurre un'analisi di sicurezza preliminare del tratto arginale considerato, prendendo come riferimento un recente studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell'Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini. In particolare da tale studio sono stati ricavati i parametri geotecnici per la modellazione degli argini oggetto di analisi, dato che su di essi non sono state effettuate indagini geotecniche nel recente passato.

Lo studio si articola in 3 fasi:

- 1) Estrapolazione dei rilievi topografici dei rilevati arginali e di una porzione sufficientemente estesa a campagna e golena dai file DTM forniti dalla Regione Friuli-Venezia Giulia mediante l'utilizzo del software QGIS.
- 2) Verifica preliminare di sicurezza dei rilevati arginali con l'utilizzo di un criterio grafico particolarmente prudenziale e non regolato dal quadro normativo che trae spunto dall'esperienza pregressa.
- 3) Verifiche di stato limite ultimo dei rilevati arginali aventi coefficienti di sicurezza minori. Esse consistono in un'analisi di filtrazione e di equilibrio limite condotte con il software Geoslope [GEO-SLOPE, 2012].

L'obiettivo finale è quindi individuare le zone dell'argine per le quali è opportuno considerare interventi di miglioramento e rinforzo.

1.1. RIFERIMENTI NORMATIVI

Le verifiche di sicurezza dei rilevati arginali vengono condotte nel rispetto delle Norme tecniche per le Costruzioni [NTC, 2018] definite nel decreto ministeriale 17 Gennaio 2018. In particolare nel seguente studio si fa riferimento al Cap. 6.2.4 "Verifiche della Sicurezza e delle Prestazioni" e Cap. 6.8 "Opere di materiali sciolti e fronti di scavo per le verifiche di sicurezza degli argini, in quanto riconducibili a tale categoria".

La verifica dello stato limite ultimo viene soddisfatta qualora il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione E_d è minore del valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico R_d :

$$E_d \leq R_d$$

Essi sono definiti dalle relazioni:

$$E_d = E \left[\gamma_F F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right]$$

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left[F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right]$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot R \left[\gamma_F F_K; \frac{X_K}{\gamma_M}; a_d \right]$$

Dove compaiono i valori di progetto di azioni, parametri geotecnici e geometrici, ovvero valori caratteristici, contrassegnati dal pedice k, moltiplicati per i coefficienti parziali di sicurezza γ_i . I coefficienti parziali vengono specificati nei diversi Approcci progettuali che verranno specificati nel seguito. La prima equazione sopra citata nel caso di verifica di stabilità globale si traduce nel calcolo del Fattore di Sicurezza FS:

$$FS = \frac{R_d}{E_d} > 1$$

che viene automaticamente calcolato dal software adottato nel presente studio, Geoslope [GEO-SLOPE, 2012], sulla base del metodo all'equilibrio limite (LEM). Tale fattore di sicurezza viene calcolato in diverse situazioni progettuali che possano rappresentare un pericolo per la stabilità dell'argine. Al capitolo 6.8 delle NTC non vengono precisate tali situazioni, ma si rimanda a normativa specifica per gli sbarramenti di ritenuta idraulica di materiali sciolti, ovvero il Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 26 giugno 2014 recante Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse) [MIT, 2014]. Il decreto ha per oggetto le dighe, sia di materiali sciolti sia

di calcestruzzo, ma è cautelativo fare riferimento a situazioni progettuali simili in sede di verifica di un argine fluviale, in quanto considerano nello specifico la sollecitazione del fluido sull'opera di ritenuta. Si riporta per completezza l'elenco delle situazioni; nel nostro caso si farà riferimento al solo punto 4, in quanto viene valutata un'opera esistente.

1. in fase costruttiva;
2. a termine costruzione e a serbatoio vuoto;
3. a serbatoio pieno con il livello alla massima regolazione e, quando sia significativo, anche a livelli intermedi;
4. a serbatoio pieno con il livello al massimo invaso;
5. a seguito di rapida vuotatura del serbatoio dal livello massimo di regolazione al livello di minimo invaso e quando sia significativo, anche a livelli intermedi;
6. in presenza di sisma, con il livello alla quota massima di regolazione e, quando sia significativo, anche a livelli intermedi, nonché a serbatoio vuoto.

Per le dighe di materiali sciolti si richiede che le verifiche vengano svolte con il solo Approccio 1, con riferimento alla combinazione 2 dei coefficienti di sicurezza parziali previsti dalle NTC; nelle verifiche, si deve porre $\gamma_r = 1.1$ nelle fasi costruttive e nelle condizioni di svasso rapido, e $\gamma_r = 1.2$ nelle condizioni di serbatoio pieno. Quest'ultimo fattore è più vincolante rispetto al fattore prescritto nelle NCT. Infatti al capitolo 6.8.2 si richiede che le verifiche agli stati limite ultimi (SLU) siano condotte secondo la Combinazione 2(A2+M2+R2) dell'Approccio 1. Si riportano le tabelle dei coefficienti parziali di riferimento che verranno adottati durante le verifiche eseguite nel presente studio.

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni – Tab. 6.2.1

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F o (γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti G_2	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno – Tab. 6.2.2

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente Parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \phi'_k$	γ_ϕ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_r	γ_r	1,0	1,0

Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e fronti di scavo – Tab. 6.8.1

Coefficiente	R2
γ_R	1.1

In sintesi il fattore di sicurezza FS, calcolato automaticamente dal software di calcolo, viene confrontato con il coefficiente γ_r globale pari ad 1.1 nel caso di NTC2018 per la progettazione geotecnica e pari a 1.2 secondo il DMIT per le opere di ritenuta. Ai fini della valutazione finale si è scelto di seguire l'approccio più prudentiale e confrontare quindi il coefficiente FS di calcolo con il valore soglia pari a 1,2 secondo il DMIT.

2. INTRODUZIONE

Le frequenti inondazioni di aree interessate da alvei fluviali continuano a generare, in ogni parte del mondo, perdite di vite umane e ingenti danni economici: in Europa le inondazioni avvenute tra il 1998 e il 2009, hanno causato oltre 1100 morti, lo sfollamento di mezzo milione di persone e almeno 52 miliardi di Euro di danni economici (European Environment Agency, 2011). Il fenomeno è in rapido aumento a causa sia della progressiva urbanizzazione e concentrazione della popolazione in aree spesso particolarmente vulnerabili alle inondazioni, sia delle mutazioni climatiche globali, che comportano una modifica progressiva dei regimi idrologici e della capacità di deflusso dei corsi d'acqua. A fronte di ciò, gli investimenti nelle opere di difesa fluviale tendono purtroppo a essere, in ogni parte del mondo, relativamente limitati rispetto ad altre opere idrauliche, quali, ad esempio, le opere di regolazione per usi irrigui o per produzione di energia, che appaiono più vantaggiose perché presentano un ritorno economico dell'investimento quantificabile a priori. Inoltre la limitata attenzione alla sicurezza arginale è legata, principalmente, al fatto che queste opere sono sollecitate dalle piene per intervalli di tempo relativamente brevi: di conseguenza, gli abitanti perdono la percezione del ruolo degli argini come elementi essenziali alla sicurezza idraulica del territorio. Tale percezione sta tuttavia cambiando, a seguito dei sempre più frequenti fenomeni di inondazione conseguenti all'inadeguatezza delle attuali strutture arginali.

2.1. FORMA E FUNZIONE DEGLI ELEMENTI DI UN RILEVATO ARGINALE

Per tratto arginale si definisce una porzione di argine alla quale è assegnata una specifica funzione nel sistema di difesa complessivo e che presenta una sezione trasversale omogenea. La sezione è l'insieme di diversi elementi, ciascuno con una particolare funzione per il mantenimento dell'integrità dell'intero tratto arginale. Le principali funzioni da considerare sono:

- **Impermeabilità:** è la funzione primaria di un tratto arginale, che deve limitare il flusso di filtrazione attraverso il corpo arginale e nel terreno di fondazione.

- **Drenaggio:** come gli elementi d'impermeabilizzazione, i sistemi di drenaggio hanno lo scopo di limitare le pressioni dell'acqua nella zona lato campagna per evitare crolli locali ed erosione interna. Agiscono indirizzando il moto di filtrazione verso zone dove l'acqua può essere raccolta e allontanata senza danni.

- **Stabilità:** l'instabilità meccanica del sistema arginale può verificarsi con crolli parziali più o meno profondi. Deve essere evitata in tutte le condizioni di esercizio.

- **Protezione esterna:** gli argini sono esposti a vari tipi di azioni esterne (impatto delle onde e dei filoni di corrente, azione degli animali, attività umane ecc.) che generano effetti meccanici e/o idraulici che, a loro volta, possono causare l'erosione del corpo arginale. Al fine di evitare tali effetti è importante mettere in opera interventi di difesa sulla superficie esterna.

La progettazione degli argini e delle singole componenti dipende da molteplici fattori tra i quali il regime idraulico del fiume, l'altezza dell'argine in relazione alle esigenze di sicurezza idraulica ed eventuali vincoli di carattere geometrico o idraulico.

La Fig. 2 (CIRIA et al., 2013) mostra una generica sezione arginale con evidenziati gli elementi principali:

1. il terreno di fondazione;
2. il corpo e i fianchi del rilevato arginale;
3. il rivestimento spondale;
4. le zone di transizione/filtri;
5. i sistemi di drenaggio;
6. le barriere impermeabili.

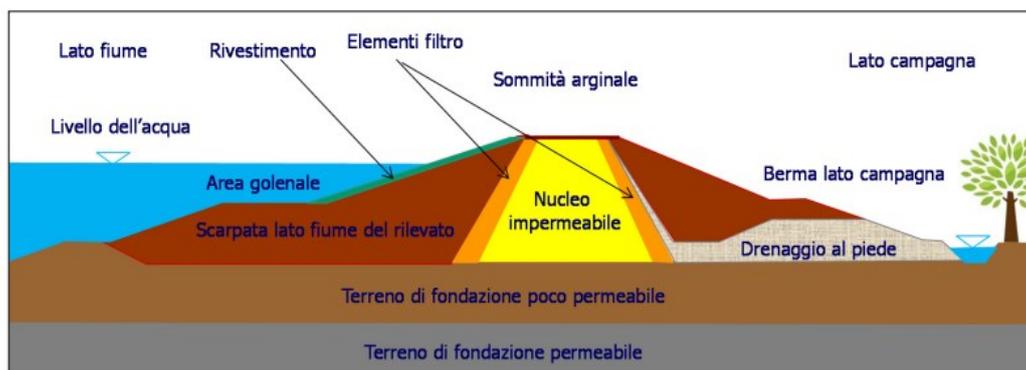


Figura 2 : Sezione arginale con definizione degli elementi che la compongono (CIRIA et al., 2013)

Lo schema di Fig.2 rappresenta una tipologia di argine del tutto generale che, in molti casi, non rappresenta la situazione nel territorio nazionale. Il corpo arginale deve garantire sufficienti caratteristiche di impermeabilità e allo stesso tempo deve essere relativamente deformabile per non dare luogo a rilevanti stati fessurativi in caso di cedimenti. Nei casi in cui il terreno, che forma il corpo e le sponde, non sia sufficientemente impermeabile, si ricorre alla realizzazione di nuclei poco permeabili (argini zonati) o alla installazione di rivestimenti impermeabili. Le berme, cioè le estensioni in terra dal lato fiume o lato campagna, sono realizzate ricorrendo a riporti di terreno compattato in loco. Hanno lo scopo di stabilizzare il rilevato sui due lati riducendone la pendenza media, ridurre l'azione erosiva in caso di sormonto della cresta dell'argine, allungare i percorsi di filtrazione in fondazione e contenere la linea di saturazione del corpo arginale. I sistemi di drenaggio, atti a raccogliere le acque di filtrazione e incrementare così lo stato tensionale efficace, possono essere materassi drenanti inseriti nella zona al piede lato campagna (Fig. 2), se si devono intercettare le acque che filtrano nel corpo arginale, o linee di pozzi disposti parallelamente all'argine per captare le acque di filtrazione nei terreni di fondazione. Un'alternativa ai sistemi di drenaggio sono le barriere impermeabili, quali porzioni interne all'argine costituite da terreno poco permeabile se previste in fase di progetto o diaframmi che si estendono dalla sommità arginale o dall'unghia arginale in profondità nel terreno di fondazione, se eseguiti a posteriore su un argine esistente.

Infine a seconda della combinazione impiegata per i materiali che formano il corpo del rilevato, le tipologie arginali appartengono a due grandi categorie: argini omogenei e argini zonati. La tipologia più comune è quella omogenea, con argini costituiti in genere da terreni miscelati con una componente prevalente di materiale a bassa permeabilità (argille e limi); gli argini zonati sono impiegati quando si ha poca disponibilità di terreni idonei e grande abbondanza di materiali poco idonei (sabbia e ghiaia).

2.2. REGIMI DI FILTRAZIONE E MECCANISMI DI COLLASSO

Il fenomeno di filtrazione può aver luogo in diverse condizioni. In passato, la consuetudine progettuale considerava per lo più condizioni di moto permanente in forma disaccoppiata mentre al giorno d'oggi gli strumenti dell'analisi numerica permettono di studiare facilmente situazioni di moto sia permanente che vario. In ogni caso alla base di una corretta analisi dev'esserci una corretta schematizzazione delle caratteristiche del terreno in relazione alla permeabilità, necessità che risulta dalle seguenti considerazioni ed esemplificazioni.

Da un punto di vista concettuale, per capire meglio il legame tra i principali elementi del problema si può far riferimento a soluzioni relativamente semplici, fornite in termini di reticolo idrodinamico, disponibili per condizioni di moto permanente, con diverse condizioni al contorno e diverse caratteristiche di permeabilità dei materiali.

Ad esempio, la Fig. 3 mostra alcuni casi di rilevato permeabile poggiante su terreno di fondazione impermeabile, in situazione di argine omogeneo, argine omogeneo con dreno orizzontale e, infine, argine omogeneo con dreno al piede di valle.

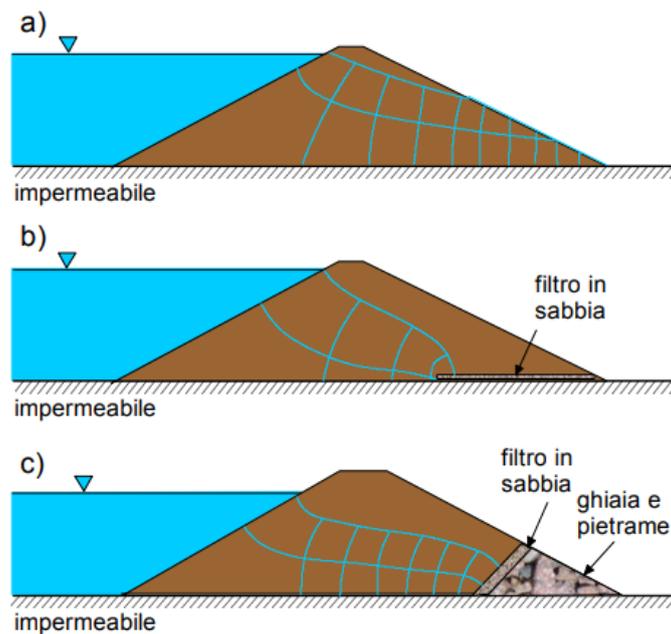


Figura 3 : Reticolo idrodinamico per argine su terreno impermeabile e per a) argine omogeneo, b) argine con filtro orizzontale, c) argine con dreno al piede di valle.

Come è possibile osservare il reticolo idrodinamico cambia notevolmente nei tre casi esaminati. Se poi si considera anche un'anisotropia della permeabilità con coefficiente in direzione orizzontale K_h diverso da quello verticale K_v il reticolo idrodinamico può modificarsi ulteriormente, come dimostrano i reticoli di Fig.4, tracciati per argine omogeneo su fondazione impermeabile nel caso di un rapporto di anisotropia del terreno dell'argine pari a 4 e 9.

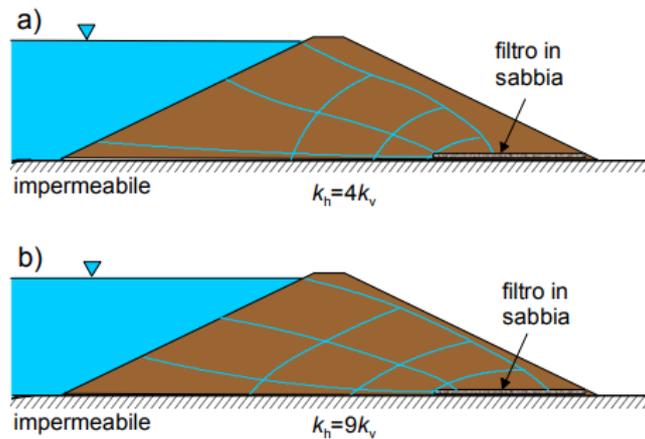


Figura 4 : Reticolo idrodinamico per argine su terreno impermeabile e per a) terreno anisotropo con $K_h=4K_v$, b) terreno fortemente anisotropo con $K_h=9K_v$.

Rispetto al caso di Fig.3, si può notare che al crescere dell'anisotropia la linea di saturazione si sposta verso il lato campagna arrivando molto vicina al paramento, fatto che richiederebbe di allungare il dreno verso il centro dell'argine, al fine di evitare il possibile raggiungimento del paramento arginale da parte della linea di saturazione.

I regimi di filtrazione appena descritti e illustrati sono in stretta relazione con i meccanismi di collasso arginale. Le rotture dei corpi arginali si possono manifestare sia in fase di costruzione che in fase di esercizio, le seconde più rilevanti rispetto alle prime poiché hanno conseguenze drammatiche perché accompagnate dall'inondazione del territorio circostante. In tale caso, per collasso arginale si intende l'incapacità di impedire l'inondazione di una determinata area. In relazione a ciò è conveniente distinguere:

- **Inondazione senza danno per la struttura arginale** (rottura idraulica), dovuta ad esempio al sormonto arginale per un difetto progettuale di elevazione della struttura arginale;
- **Inondazione per effettiva perdita di resistenza di uno o più elementi che compongono la struttura arginale** (collasso strutturale) o il terreno di fondazione.

I due tipi di rottura possono anche essere correlati, dal momento che possono essere una causa dell'altro.

Il collasso per SLU è raggiunto, molto spesso, per degrado e danneggiamento nel tempo di uno o più elementi che formano il sistema arginale. Il danneggiamento e degrado sono attivati da azioni di vario tipo, di carattere fisico o chimico, quali l'azione ciclica del flusso idraulico in alveo e subalveo, del vento, della temperatura, degli apporti meteorici, l'effetto della vegetazione, l'azione umana e degli animali e altri ancora. In generale, un collasso arginale è attivato da un'azione precisa, quale può essere un sovraccarico, un livello dell'acqua eccessivo o una rapida variazione dello stesso, la forza di filtrazione o un'anormale crescita del flusso idraulico. Queste azioni possono agire su un singolo elemento o su più elementi arginali, anche in forma ripetuta fino alla rottura totale.

A questo punto è conveniente riassumere e inquadrare le possibili tipologie d'instabilità, legate alle rotture del corpo arginale, le quali sono causate dai regimi

di filtrazione e alle pressioni neutrali che si sviluppano nel corpo arginale e nel terreno di fondazione durante le diverse fasi degli eventi di piena. Per quanto riguarda l'identificazione delle rotture o del danno arginale, è possibile individuare alcune categorie:

- **Erosione esterna dovuta all'azione dell'acqua:** erosione spondale lato fiume dovuta alla corrente in alveo, erosione per sormonto, erosione dovuta al moto ondoso;
- **Erosione interna dovuta all'azione dell'acqua:** formazione di condotti nel terreno del rilevato o nel terreno di fondazione (a tale tipo di erosione possono contribuire anche gli animali scavando tane all'interno o al piede del rilevato);
- **Instabilità del paramento arginale interno ed esterno** indotta dal regime di filtrazione;
- **Instabilità al piede o a campagna per liquefazione statica e sifonamento** indotta dal regime di filtrazione nel terreno di fondazione.
- **Instabilità del terreno di fondazione e dell'argine** per sottopressione idraulica al piede lato campagna;

Un aspetto molto importante nella previsione delle rotture arginali è legato al carattere transitorio dei fenomeni indotti dalla dinamica fluviale, in particolare gli elementi idraulici da considerare sono il livello di massima piena e la sua durata, il livello di piena ordinaria e la sua durata, il livello di magra e l'influenza dei corsi d'acqua in adiacenza.

3. BREVE STORIA DEL CORSO D'ACQUA OGGETTO DI ANALISI

Il fiume Tagliamento nasce nei pressi del Passo della Mauria nel comune di Lorenzago di Cadore, in provincia di Belluno (Veneto). Nel primissimo tratto scorre nella regione storica del Cadore, per poi attraversare da ovest a est tutta la Carnia. Nel tratto medio-basso costituisce il confine tra le province di Pordenone ed Udine e, in seguito, fra il Friuli-Venezia Giulia ed il Veneto per poi sfociare, infine, nel Golfo di Venezia tra Lignano Sabbiadoro (UD) e Bibione (VE).

Oggetto di analisi è il basso corso del fiume Tagliamento, il cui inizio lo possiamo localizzare dal ponte autostradale presso Ronchis; l'andamento diviene meandriforme e il flusso d'acqua è incanalato in argini artificiali e si trova ad un livello superiore rispetto alla pianura circostante. Nel corso della sua storia, il fiume ha più volte cambiato posizione lungo la sua conoide alluvionale che va a formare la bassa pianura: in epoca romana esistevano due rami chiamati Tiliaventum maius (maggiore) e minus (minore). Solamente a partire dal V secolo d.C. si venne costituendo l'attuale percorso Belgrado - Madrisio - Varmo - Latisana - mare, la cui foce a delta è posta fra le spiagge di Lignano Sabbiadoro e Bibione. In Fig.5 è riportato un estratto mappa da Google Earth in cui si evidenzia il corso del fiume e i paesi che esso attraversa.

Il fiume Tagliamento è caratterizzato da un regime assai irregolare con una differenza di portata fra magra e piena che raggiunge i due ordini di grandezza. Per questo motivo viene classificato fra i fiumi a carattere torrentizio. Tre differenti idrometri situati a Venzone, Pinzano e alla foce ci forniscono misure sulla portata media annua, rispettivamente di 68,8 m³/s, 92 m³/s e 70 m³/s. Il massimo storico del Tagliamento è stato registrato fra i 4.000 e i 4.500 m³/s a Pinzano, durante la disastrosa piena del 4 novembre 1966 che provocò il crollo di un ponte stradale. Durante i periodi di magra, invece, a causa sia dello sfruttamento idrico che della fortissima permeabilità del suo letto, in alcuni tratti si può presentare completamente in secca.

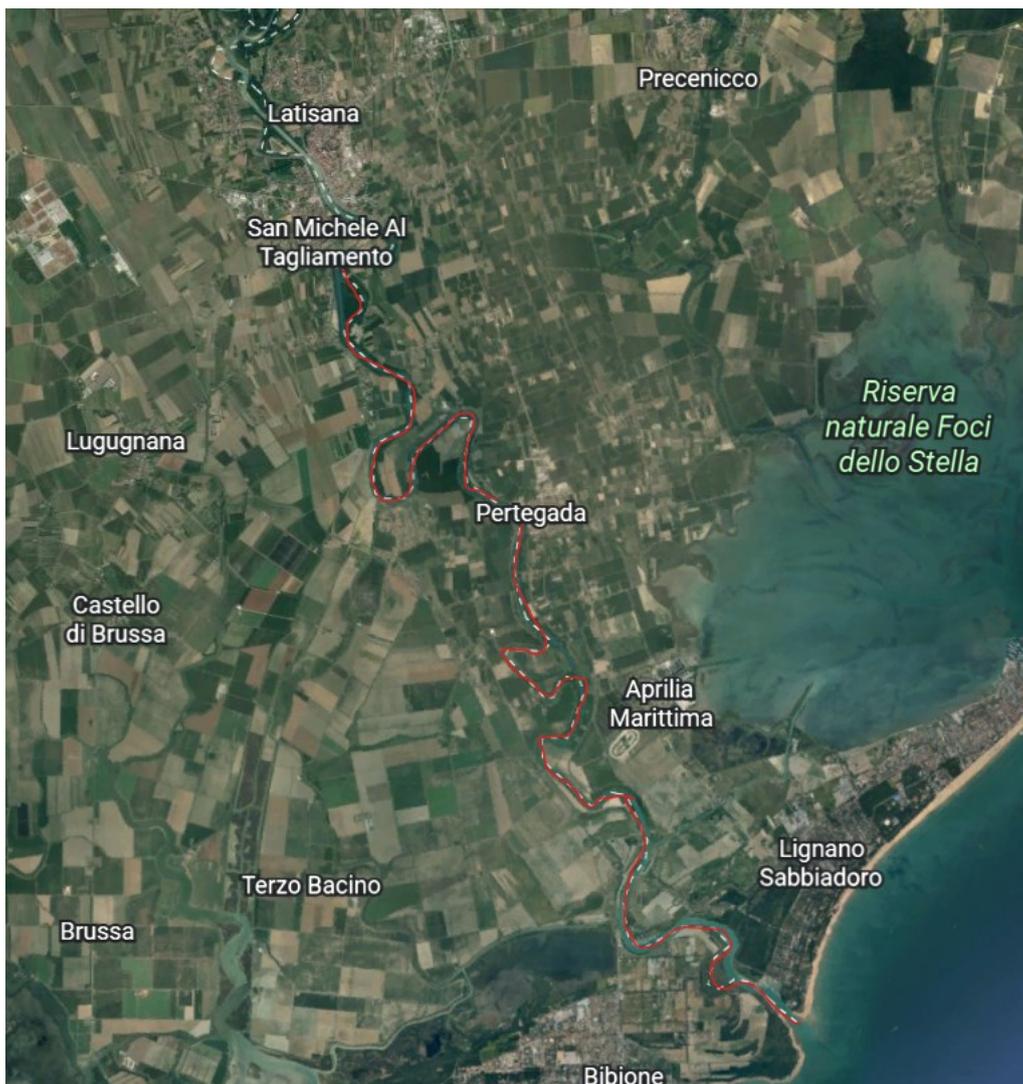


Figura 5 : estratto mappa da Google Earth con evidenziato il basso corso del fiume Tagliamento.

3.1. INTERVENTI E OPERE DI MIGLIORAMENTO DEGLI ARGINI DEL FIUME TAGLIAMENTO

Note le caratteristiche di pericolosità idraulica del bacino del Tagliamento, causata soprattutto dal regime torrentizio e dalla strettezza della sezione nel basso corso del fiume, sono state eseguite nel corso degli anni opere rilevanti ai fini della messa in sicurezza del bacino e della campagna circostante. Una delle opere maggiormente rilevanti è il canale scolmatore Cavrato, che ha il suo incile col Tagliamento poco

a monte dell'abitato di Cesarolo (Comune di San Michele al Tagliamento), entra nella sua funzione di intercettore delle acque di piena del Tagliamento quando queste superano la portata di circa 1000 m³/s. La sua entrata in funzione consente così di abbattere le portate di piena nel tratto terminale del Tagliamento la cui sezione attuale di deflusso non risulta sufficiente a far transitare piene superiori ai 1500-1600 m³/s senza che si vengano a determinare problemi di insicurezza idraulica per i sottesi territori veneti (Comune di San Michele al Tagliamento) e della bassa friulana (Comune di Latisana). Nel corso degli anni si sono susseguite varie proposte di laminazione, come lo sbarramento di Pinzano. L'obiettivo da raggiungere era quello di limitare la portata massima a valle dell'opera a 3500 m³/s, considerata la massima portata esitabile a Latisana a quell'epoca.

La diga in progetto doveva essere dotata di luci libere di fondo che, grazie alla particolare conformazione degli scarichi, all'aumentare del carico idraulico comportavano una diminuzione del coefficiente di portata, facendo iniziare il rigurgito a monte della diga quando la portata in arrivo raggiungeva valori di una certa entità. Questi scarichi erano stati progettati con l'ausilio di prove su modello fisico. Tuttavia il progetto, che raggiunse lo stadio esecutivo, non fu mai realizzato e si preferì andare a migliorare le arginature e lo scolmatore Cavrato già esistente. Un'altra proposta di notevole importanza fu quella di laminare le piene del Tagliamento con casse di espansione da realizzarsi a valle della stretta di Pinzano, in golena destra, tra Pinzano e Spilimbergo. La proposta prevedeva la realizzazione di sei casse d'espansione, collegate in cascata attraverso sfioratori superficiali, per una superficie complessiva pari a circa 1570 ettari ed un volume utile di circa 37 milioni di metri cubi. La realizzazione delle casse avrebbe portato alla restrizione dell'alveo attivo del Tagliamento a circa 800 m. L'opera di presa era costituita da una soglia fissa posta a quota alveo, normale alla corrente, larga circa 120 m, e da una soglia mobile che attraverso quattro paratoie a settore immetteva direttamente nella prima cassa. L'insieme di opere avrebbe consentito di laminare le onde di piena con tempo di ritorno di 500 anni, a 4.500 m³/s. Tuttavia tale soluzione non fu presa in considerazione in quanto la Commissione ritenne "che le casse di espansione proposte non costituissero una valida alternativa allo sbarramento di Pinzano" optando invece per un rinforzo e un miglioramento delle arginature

esistenti. Ponendo l'attenzione sul tratto d'argine in sinistra orografica, ossia quello oggetto di analisi, si può constatare che esso è stato oggetto di numerosi interventi di miglioramento e rinforzo a partire dagli anni '60. Dal ponte dell'autostrada verso valle, fino a oltre il centro di Latisana gli argini sono stati rinforzati con diaframmi in calcestruzzo armato o jet-grouting realizzati in asse argine, diaframmi al piede e rivestimenti spondali. In Tabella 1 si riassume brevemente quanto dedotto dalla documentazione acquisita, facendo riferimento alle Fig. 6, 7, 8, 9 per l'identificazione dei tratti considerati.

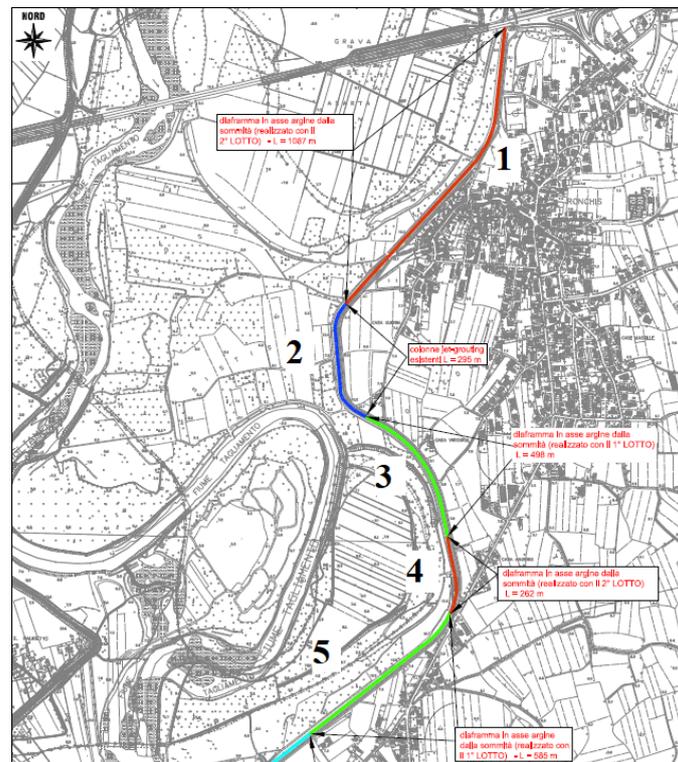


Figura 6 : ID tratti rinforzati sponda sinistra

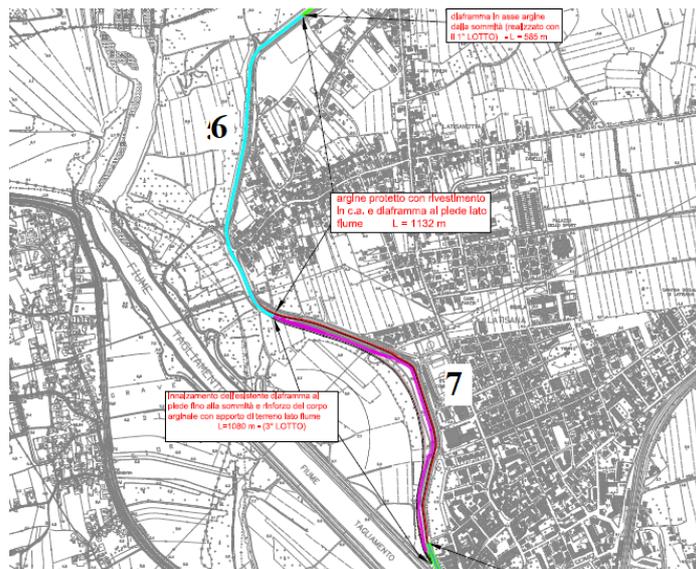


Figura 7 : ID tratti rinforzati sponda SX

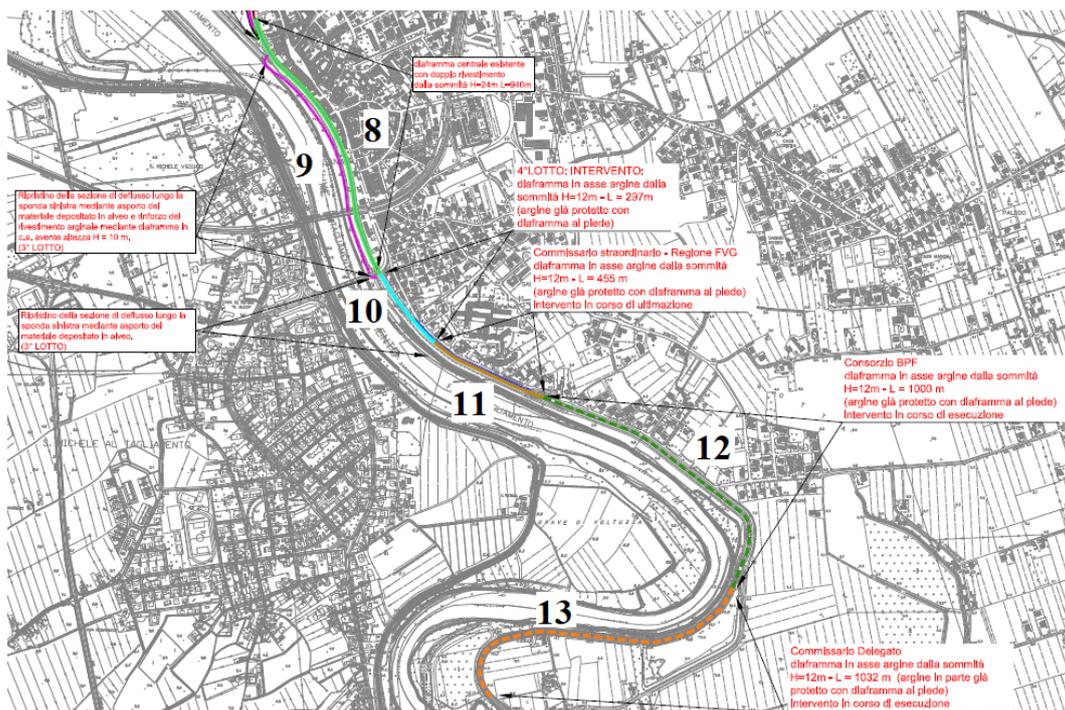


Figura 8 : ID tratti rinforzati sponda SX



Figura 9 : ID tratti rinforzati sponda SX

Tabella 1 : Interventi eseguiti in sponda sinistra

ID	INTERVENTO	SPECIFICHE TECNICHE	REALI ZZ.	EPOCA
1	Diaframma in asse, dalla sommità	Setto in c.a., dettagli tecnici incompleti	Eseguito	1990
2	Colonne in jet- gouting	Dettagli assenti	Eseguito	Ignota
3	Diaframma in asse, dalla sommità	Dettagli assenti	Eseguito	Anni '80
4	Diaframma in asse, dalla sommità	Setto in c.a., dettagli tecnici incompleti	Eseguito	1990

5	Diaframma in asse, dalla sommità	Dettagli assenti	Eseguito	Ignota
6	Diaframma al piede, rivestimento spondale	Dettagli assenti	Eseguito	Ignota
7	Diaframma nel corpo arginale	Era già presente un diaframma al piede (L=15m), probabilmente realizzato negli anni '70, che è stato poi innalzato con muro in calcestruzzo (H=5m, s=60cm), rinforzando anche il corpo arginale.	Eseguito	2010
8	Diaframma in asse, dalla sommità	Diaframma con doppio rivestimento, collegato al muro. Epoca di realizzazione non chiara	Eseguito	Ignota
9	Diaframma al piede, rivestimento spondale	Ripristino della sezione di deflusso e nuovo diaframma al piede in c.a.	Eseguito	2010
10	Diaframma in asse, dalla sommità.	Già presente rivestimento in cls e un diaframma al piede di cui non si hanno dettagli di progetto. Realizzato diaframma in asse (L=12m s=60cm) in c.a.	Eseguito	2019
11	Diaframma piede+Diaframma in asse, dalla sommità	Già presente rivestimento in cls e un diaframma al piede (L=15m) di cui non si hanno dettagli di progetto. Realizzato diaframma in asse (L=12m s=60cm) in c.a.	Eseguito	2020
12	Diaframma piede+Diaframma in asse, dalla sommità	Già presente rivestimento in cls e un diaframma al piede (L=15m) di cui non si hanno dettagli di progetto. Realizzato diaframma in asse (L=12m s=60cm) in c.a.	Eseguito	2020
13	Diaframma in asse, dalla sommità	Già presente rivestimento in cls e un diaframma al piede (L=15m) di cui non si hanno dettagli di progetto. Realizzato diaframma in asse (L=12m s=60cm) in c.a.	In corso	2020

14	Diaframma in asse, dalla sommità	Diaframma in c.a.(L=12m) dalla sommità	Progettat o	2022
15	Diaframma in asse, dalla sommità	probabile presenza di diaframma al piede	Ipotizzat o	Ignota

4. METODI E PROCESSO D'ANALISI

4.1. QGIS

Ai fini di condurre un'analisi di sicurezza degli argini del basso corso del fiume Tagliamento risulta necessario disporre dei rilievi topografici delle sezioni arginali oggetto di studio. Essendo questa un'indagine preliminare non accompagnata da rilievi topografici e indagini geotecniche in sito, la soluzione adottata è stata quella di utilizzare il software QGIS per ricavare l'altimetria delle sezioni d'argine d'interesse. In particolare sono stati utilizzati i file DTM forniti dalla Regione Friuli-Venezia Giulia, ossia delle mappe a curve di livello in formato digitale, dalle quali si può ricavare l'altimetria del luogo. Come si può visualizzare in Fig.10, l'area di lavoro è stata impostata sovrapponendo i file DTM georeferenziati a un layer Google Maps, georeferenziato anch'esso, così da avere la percezione del luogo oggetto di analisi, dato che i file DTM graficamente si presentano in scala di grigi. In realtà questa è un'impostazione di default del software, infatti i colori sono modificabili, tuttavia l'ambiente di lavoro così configurato è risultato ottimale per svolgere il lavoro descritto di seguito.

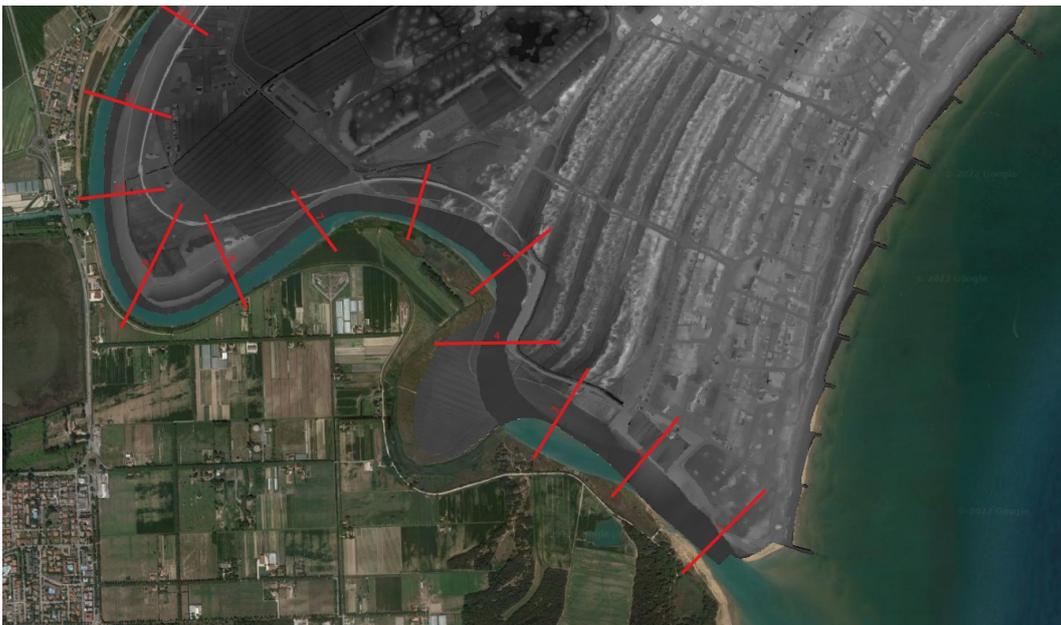


Figura 10 : Impostazione del foglio di lavoro in ambiente QGIS: in scala di grigi i file DTM sovrapposti ad un foglio Google Maps. Le linee in rosso indicano le sezioni oggetto di studio.

Si è scelto di ricavare una sezione arginale ogni 500 m circa, per un tratto che, come già affermato nei capitoli precedenti, si estende per circa 20 km dalla foce a delta del fiume fino a sud del paese di Latisana, dando luogo a 45 sezioni oggetto di studio. Per ciascuna sezione, com'è visibile in Fig.11, è stata calcolata la quota progressiva espressa in metri e la quota di massima piena con Tempo di Ritorno pari a 100 anni espressa in centimetri. Quest'ultimo dato è stato ricavato da un'analisi idrometrica eseguita nel corso di un recente studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell'Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini.

	id	QUOTA PROG	A.I.100
1			
2	1	0	172
3	10	4247	290
4	11	4692	307
5	12	5178	315
6	13	5684	332
7	14	6114	353
8	15	6558	361
9	16	7045	369
10	17	7538	377

Figura 11 : Quota progressiva e altezza idrometrica con tempo di ritorno $T_r = 100$ anni espresse rispettivamente in metri e in centimetri.

Per ricavare graficamente le sezioni d'argine d'interesse risulta necessario "leggere" i file DTM. Il software QGIS dispone di un'estensione scaricabile gratuitamente, denominata "Profile Tool", che permette all'utente di ricavare un profilo altimetrico semplicemente tracciando una linea retta tale da intersecare i file DTM. In Fig.12 è possibile osservare il risultato finale di questa procedura.

Il software, una volta ricavato il profilo altimetrico, consente di salvare il file in diversi formati, quali JPEG, PNG o DXF. In quest'ultimo formato sono stati salvati i profili delle sezioni identificate in modo da poter procedere con il successivo stadio dell'analisi.

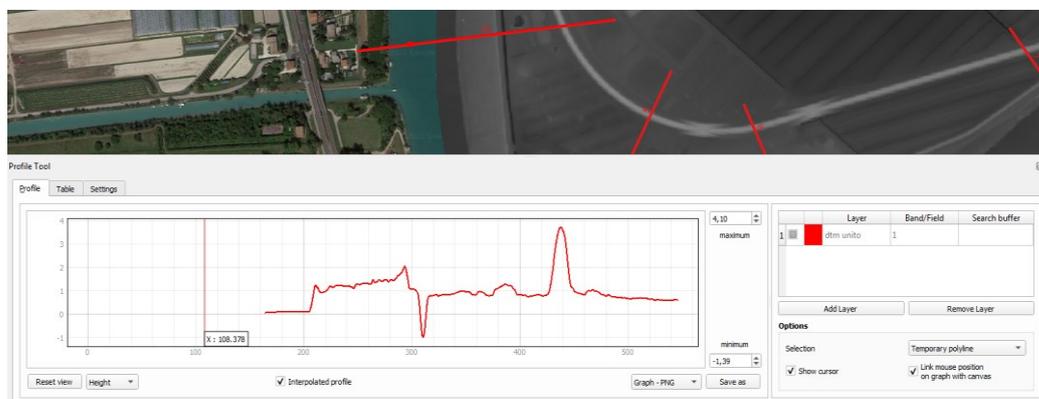


Figura 12 : Interfaccia di lavoro dell'estensione "Profile Tool" all'interno dell'ambiente QGIS con visualizzazione grafica dell'altimetria lungo la sezione 10.

4.2. CRITERIO GRAFICO E APPLICAZIONE

Al fine di valutare con un criterio di massima, particolarmente prudentiale e non considerato dal quadro normativo, le condizioni di sicurezza delle sezioni oggetto d'indagine stabilendo quali di esse necessitano di uno studio più approfondito, si è applicato quest'approccio grafico e semplificato spiegato di seguito.

Esso trae spunto dall'esperienza pregressa nella messa in sicurezza degli argini del fiume Po e di altri corsi d'acqua. Ad esempio, nel caso del fiume Po, le arginature sono state rinforzate con la realizzazione, dove possibile, di banche a campagna in modo tale che una ipotetica cadente piezometrica con pendenza 1:6 tracciata a partire dalla quota di massima piena fosse contenuta entro la sezione arginale. Come già osservato tale criterio è particolarmente prudentiale, tuttavia gli argini del Po rinforzati in questo modo hanno resistito alle piene che si sono verificate fino alla data del presente studio. Un approccio simile ma meno restrittivo è quello che applica il medesimo criterio ma con una pendenza della cadente piezometrica pari a 1:4, come mostrato in Fig. 13. Il motivo dell'applicazione di questo criterio

empirico è da ricercarsi sugli effetti che la filtrazione può generare nei rilevati arginali. Infatti al fine di non temere fenomeni di permeazione lungo il paramento a campagna, con le conseguenti cause di instabilità per l'innescarsi di fenomeni erosivi, occorre evitare che la linea di saturazione, ossia la linea lungo la quale le pressioni neutre sono pari a quella atmosferica, tagli il paramento a campagna. La sezione trasversale del rilevato arginale, quindi, dovrà essere tale da "contenere" la suddetta linea d'infiltrazione.

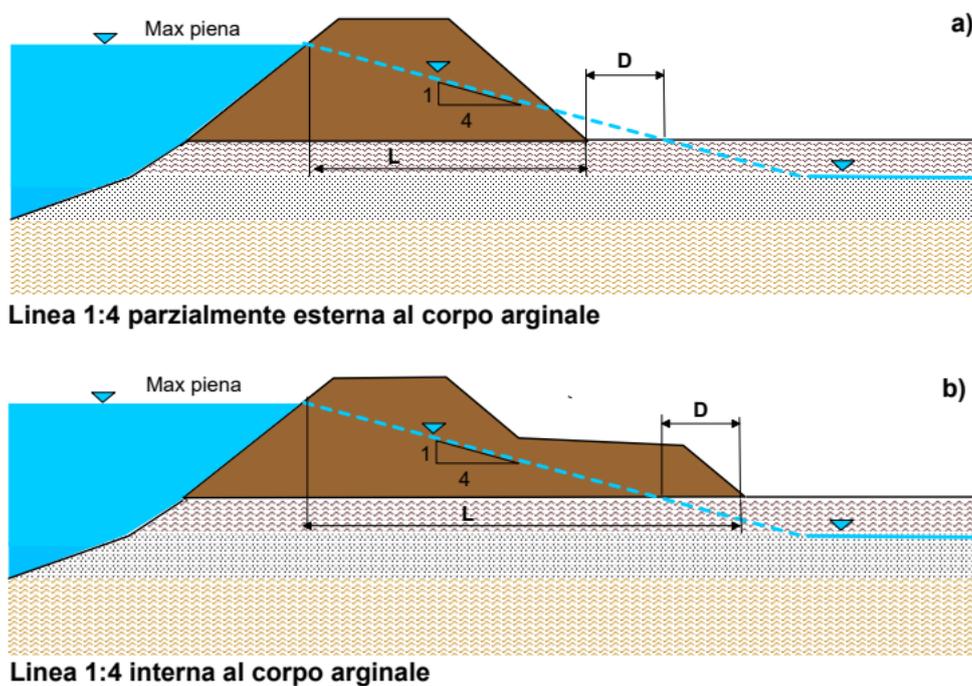


Figura 13 : Applicazione del criterio grafico ad un rilevato arginale con evidenziato il tracciamento della linea di saturazione di pendenza 1:4 e le grandezze "L" e "D".

Tale criterio quindi è stato applicato a tutte le 45 sezioni oggetto d'indagine e per esse si sono valutate, come visualizzabile in Tabella 2:

- La distanza orizzontale L tra punto di contatto della linea con pendenza 1:4 con il paramento lato fiume e il piede dall'argine lato campagna;
- La distanza $\pm D$ dell'intersezione della linea con pendenza 1:4 con la retta orizzontale per la base dell'argine ($D > 0$ intersezione esterna, $D < 0$ intersezione interna).

Per una maggiore comprensione del significato di tali lunghezze si consulti la Fig.13. L'applicazione del criterio grafico si conclude valutando il rapporto

$r^*=(L\pm D)/L$: valori di tale rapporto minori o uguali all'unità indicano che la linea 1:4 ricade interamente all'interno del rilevato arginale (situazione di sicurezza), mentre valori superiori all'unità mostrano che l'intersezione della linea 1:4 con la base dell'argine è esterna all'argine stesso (situazione di insicurezza). Il coefficiente di sicurezza r^* ci fornisce un valore numerico dall'interpretazione immediata per una prima valutazione di sicurezza e come si può osservare in Tabella 2, in nessuna delle 45 sezioni esaminate l'indice supera il valore d'unità, situazione, almeno in primo luogo, rassicurante. Inoltre è da sottolineare il fatto che in corrispondenza della sezione 5, utilizzando i dati raccolti, si ha un'ipotetica situazione di sormonto. Tuttavia tale situazione sarà da analizzare più nel dettaglio nel corso di studi successivi maggiormente approfonditi, ponendo l'attenzione sul corretto rilievo dell'argine in tale tratto. In conclusione si riporta nelle Fig. 14, 15, 16 la modellazione grafica del rilevato arginale e la successiva applicazione del criterio appena descritto per le sezioni 4, 13, 21. Si è scelto di rappresentare proprio queste sezioni perchè risultano avere un coefficiente $r^*>0,75$; soglia che si è utilizzata nel presente studio per individuare una possibile situazione di insicurezza del rilevato arginale. Per questa ragione tali sezioni sono state anche state considerate per uno studio di filtrazione e stabilità maggiormente approfondito descritto nei paragrafi successivi.

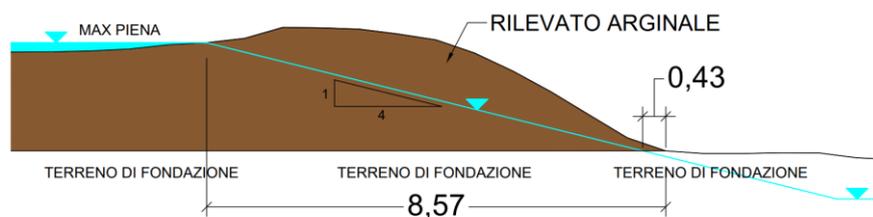


Figura 14 : Applicazione del criterio grafico alla sezione 4 in ambiente AutoCad.

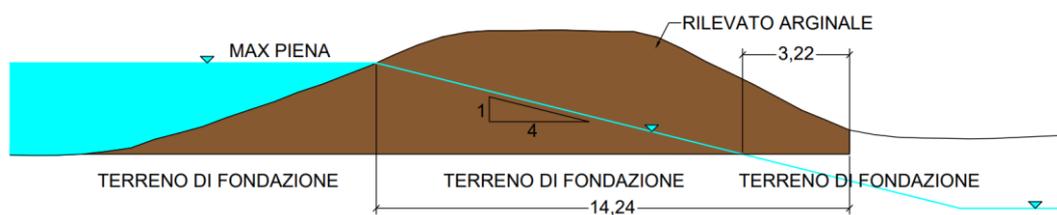


Figura 15 : Applicazione del criterio grafico alla sezione 13 in ambiente AutoCad.

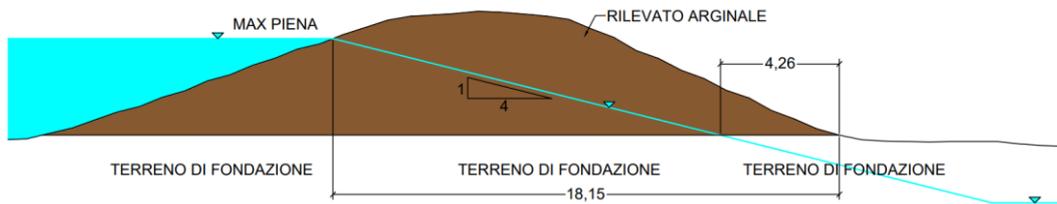


Figura 16 : Applicazione del criterio grafico alla sezione 21 in ambiente AutoCad.

Tabella 2 : Calcolo del rapporto r^* nelle 45 sezioni oggetto di studio

VALUTAZIONE DEL RAPPORTO r^*				
SEZIONE	L	D	L*	r^*
1	21,05	-14,17	6,88	0,33
2	NON CONSIDERATA			
3	17,03	-14,9	2,13	0,13
4	8,58	-0,43	8,15	0,95
5	HO SORMONTO			
6	16,02	-9,98	6,04	0,38
7	14,46	-7,72	6,74	0,47
8	13,75	-6,88	6,87	0,50
9	12,14	-6,52	5,62	0,46
10	13,16	-6,09	7,07	0,54
11	14,79	-5,48	9,31	0,63
12	13,22	-4,04	9,18	0,69
13	14,24	-3,22	11,02	0,77
14	13,59	-5,91	7,68	0,57
15	16,54	-7,47	9,07	0,55
16	18,68	-7,43	11,25	0,60
17	16,65	-6,07	10,58	0,64
18	20,52	-9,2	11,32	0,55
19	NON CONSIDERATA			
20	NON CONSIDERATA			
21	18,15	-4,26	13,89	0,77
22	16,42	-5,32	11,1	0,68
23	25,21	-11,49	13,72	0,54
24	25,15	-16,42	8,73	0,35
25	21,61	-9,71	11,9	0,55
26	20,31	-10,97	9,34	0,46
27	19,91	-10,48	9,43	0,47
28	18,77	-9,92	8,85	0,47

29	17,59	-12,25	5,34	0,30
30	19,2	-10,39	8,81	0,46
31	18,12	-10,1	8,02	0,44
32	18,29	-10,63	7,66	0,42
33	20,77	-10,23	10,54	0,51
34	36,83	-29,33	7,5	0,20
35	12,21	-3,44	8,77	0,72
36	12,95	-4,72	8,23	0,64
37	10,29	-2,87	7,42	0,72
38	18,77	-10,66	8,11	0,43
39	20,43	-10,91	9,52	0,47
40	20,07	-9,65	10,42	0,52
41	21,96	-13,62	8,34	0,38
42	43,15	-33,19	9,96	0,23
43	32,07	-27,57	4,5	0,14
44	31,69	-28,66	3,03	0,10
45	39,73	-34,53	5,2	0,13

4.3. ANALISI DI FILTRAZIONE DEL RILEVATO ARGINALE

Al fine di condurre le verifiche di sicurezza in accordo con la normativa vigente si è andati ad approfondire le caratteristiche di filtrazione e stabilità rispettivamente delle sezioni 4, 13, 21 con l'ausilio del software Geoslope [GEO-SLOPE, 2012]. Il motivo per cui è stato scelto di condurre l'analisi su tali sezioni è dovuto al fatto che il valore del coefficiente r^* risulta essere maggiore di 0,75, rilevando così una potenziale situazione di insicurezza del rilevato arginale. Le analisi di filtrazione prevedono una simulazione in condizioni stazionarie o transitorie (successivamente si spiegherà il motivo per cui si è scelto di eseguire l'una o l'altra) e sono state eseguite con un modello numerico bidimensionale agli elementi finiti. A tale scopo viene utilizzato il pacchetto SEEP/W del software Geoslope [GEO-SLOPE, 2012]. La geometria delle sezioni viene direttamente ricavata dai modelli precedentemente ottenuti dai file DTM e già utilizzati nell'applicazione del criterio grafico: a partire da essi si sono ricavate le sezioni bidimensionali dei rilevati arginali che si estendono dal lato golena fino alla sponda, mentre a lato campagna si estendono per circa 10 m dal piede del rilevato arginale. Il corpo arginale viene ipotizzato come

un mezzo omogeneo, il quale poggia su un ipotetico strato di fondazione, anch'esso omogeneo, avente una profondità di 3 m. Da sottolineare il fatto che, non essendosi svolte indagini in sito e prove di laboratorio, la modellazione geotecnica del materiale costituente il rilevato arginale e il terreno di fondazione, è stata eseguita considerando come riferimento la sezione “San Filippo” del precedente studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell’Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini, pubblicato nel Marzo 2021. A tal proposito si riportano in Tabella 3 i parametri geotecnici della “Sabbia limosa 1” e della “Sabbia limosa 2” assegnate rispettivamente al rilevato arginale e al terreno di fondazione per condurre l’analisi di filtrazione. Inoltre è opportuno specificare che vengono assegnate permeabilità isotrope $K_h = K_v$, ricavate da prove in sito eseguite nel corso della campagna indagini del precedente studio e un discorso analogo è possibile farlo per i valori di compressibilità, forniti dalle prove dilatometriche precedentemente eseguite.

Tabella 3 : Parametri geotecnici dei materiali utilizzati per la modellazione delle sezioni arginali su GeoStudio necessarie all’analisi di filtrazione.

PARAMETRI GEOTECNICI PER ANALISI DI FILTRAZIONE		
MATERIALE	COMPRESSIBILITA' [1/kPa]	PERMEABILITA' [m/s]
SABBIA LIMOSA 1	2,35679E-05	2,00E-07
SABBIA LIMOSA 2	3,45734E-05	4,00E-06

Successivamente ad ogni sezione vengono applicate delle idonee condizioni al contorno idrauliche necessarie al completamento del modello di filtrazione:

- **Condizione lato fiume lungo il bordo dell’area golenale fino al punto d’intersezione tra il livello di massima piena e il rilevato arginale:** condizione di carico idraulico totale, espresso in [m] e corrispondente al livello del fiume. Tale condizione può assumere un valore costante se si effettua una verifica in condizioni stazionarie

o un valore variabile secondo una funzione specificabile dall'utente se si esegue una simulazione in transitorio.

- **Condizione a lato campagna lungo la superficie topografica dell'argine a partire dall'inizio della scarpata lato campagna e proseguendo fino al confine verticale del modello:** è una condizione di drenaggio o detta "seepage face" la quale permette la naturale emergenza della superficie freatica e quindi un valore pari alla pressione atmosferica in quel punto.
- **Condizione a lato campagna lungo il bordo d'estremità del terreno di fondazione:** è una condizione che stabilisce l'altezza della superficie fratica a lato campagna, informazione indispensabile per generare un corretto modello di filtrazione. Tale altezza è stata ottenuta ipotizzando che la falda abbia una quota corrispondente al livello medio mare (ipotesi non così distante dalla realtà essendo un'analisi su sezioni arginali limitrofe alla foce del fiume) mentre la quota del piano campagna è stata ricavata dal rilievo ottenuto in ambiente QGIS come spiegato nel paragrafo 4.1. La differenza tra questi due valori rappresenta la condizione al contorno cercata, la quale è stata assegnata con segno rispetto al sistema di riferimento adottato nella modellazione in ambiente Geoslope, la cui origine non corrisponde al livello medio mare, ma al piano campagna come visibile nelle Fig. 17, 18, 19.
- **Bordo inferiore impermeabile;**

Inoltre si trascura, a favore della sicurezza, la condizione di parziale saturazione del rilevato arginale. In tutti i modelli è necessario implementare una mesh di calcolo atta alla risoluzione delle equazioni di governo ai nodi della stessa. Di conseguenza viene adottata una mesh con elementi finiti di forma triangolare di lato pari a 0,75 m. Tale dimensione degli elementi costituenti la mesh di calcolo fornisce una buona approssimazione della soluzione del problema di filtrazione. Al fine di eseguire una trattazione completa di tale problema risulta necessario andare a specificare quali sono le equazioni che governano lo stesso e che vengono risolte dal software con

l'utilizzo di metodi numerici. L'equazione differenziale generale che regola il processo di filtrazione bi-dimensionale in un mezzo poroso è espressa come:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

dove:

- H = carico totale, somma di altezza geodetica e carico piezometrico,
- k_x = permeabilità in direzione x,
- k_y = permeabilità in direzione y,
- Q = il flusso applicato al contorno del mezzo poroso,
- θ = il contenuto volumetrico d'acqua all'interno del mezzo poroso
- t = tempo

Con riferimento ad un volume infinitesimo di terreno, tale equazione afferma che la differenza tra il flusso in entrata e in uscita, espressi in termini di variazione lungo una direzione, sommata all'eventuale flusso applicato al contorno è uguale alla variazione della quantità d'acqua contenuta all'interno del mezzo poroso nel tempo. Se invece le condizioni del problema di filtrazione sono stazionarie, il volume che entra ed esce da un elemento infinitesimo di terreno è lo stesso ad ogni istante temporale, di conseguenza qualsiasi variazione rispetto alla variabile tempo si annulla e l'equazione del problema diventa:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0$$

Tali equazioni di flusso governanti il problema di filtrazione (la prima nel caso transitorio, la seconda in quello stazionario) vengono risolte con l'utilizzo di metodi numerici i quali determinano per ogni punto costituente la mesh di calcolo una soluzione approssimata dell'equazione, determinando il valore di H dal quale è ricavabile l'andamento delle pressioni interstiziali, e quindi, il modello di filtrazione. Nelle Fig. 17, 18, 19 è possibile osservare la modellazione delle tre sezioni oggetto di analisi con evidenziati tutti gli aspetti sopra citati, dalla geometria agli elementi finiti costituenti la mesh di calcolo. In particolare si vuol far notare le

prime tre condizioni al contorno descritte, rappresentate rispettivamente in colore blu, viola e rosso.

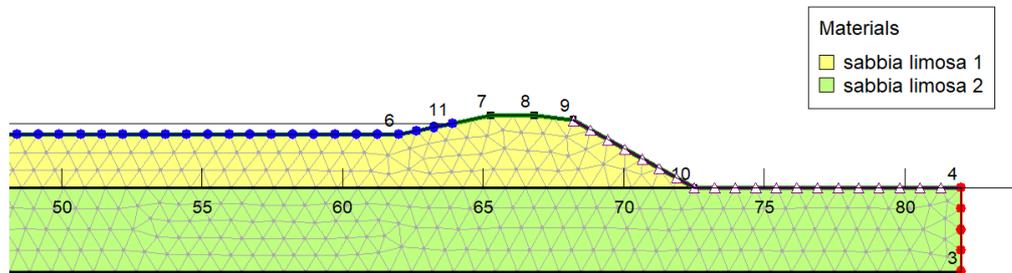


Figura 17 : Modellazione della sezione 4 su GeoStudio

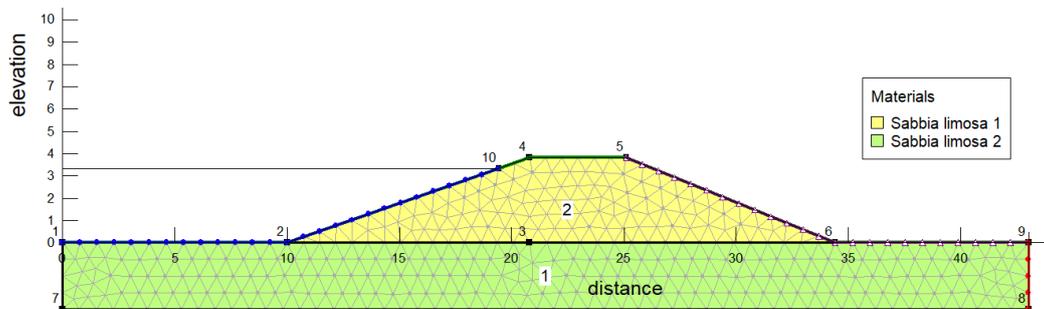


Figura 18 : Modellazione della sezione 13 su GeoStudio

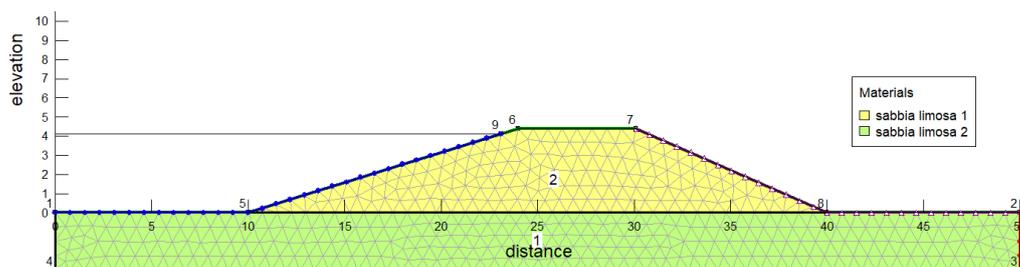


Figura 19 : Modellazione della sezione 21 su GeoStudio

A questo punto tutte e tre le sezioni oggetto di studio sono state sottoposte ad un'analisi di filtrazione stazionaria (meno complessa rispetto a quella transitoria, ma allo stesso tempo meno fedele alla realtà) seguita da un'analisi di stabilità

(argomento trattato nel paragrafo 4.4) che restituisce un coefficiente di sicurezza FS che, in accordo con la normativa vigente, deve risultare maggiore di 1,2. Per la sola sezione 4 tale condizione non si è verificata (i risultati delle analisi sono descritti nel Cap.5), per cui è stata condotta un'analisi di filtrazione transitoria, in modo da ricavare un risultato derivante da una simulazione più fedele alla realtà. Infatti, la condizione stazionaria equivale a simulare una situazione in cui la piena del fiume permane per un tempo sufficientemente lungo tale da trascurare la variazione delle variabili rispetto al fattore tempo, situazione che difficilmente si verifica nella realtà dei fatti, al contrario dell'analisi transitoria che simula l'evoluzione del livello idrometrico del fiume e quindi il fenomeno reale. Per condurre l'analisi stazionaria, oltre a impostare il modello così come descritto precedentemente, è sufficiente fornire al software la massima altezza idrometrica del fiume in corrispondenza della sezione oggetto di studio, un dato che, in accordo con quanto scritto nel paragrafo 4.1, è stato ricavato da uno studio precedente condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell'Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini, pubblicato nel Marzo 2021 e riportato in Tabella 4.

Tabella 4: Massime altezze idrometriche in corrispondenza delle tre sezioni oggetto d'analisi con $Tr=100$ anni.

MASSIME ALTEZZE IDROMETRICHE CON $Tr= 100$ anni [m]		
SEZIONE 4	SEZIONE 13	SEZIONE 21
2,3	3,3	4,1

Invece per condurre l'analisi transitoria è necessario utilizzare un idrogramma di piena come quello visualizzabile nel Grafico 1, che descrive l'evoluzione del livello idrometrico del fiume nel tempo. Esso è caratterizzato da una crescita del livello fino ad un punto di massimo in circa 24 ore seguita da una decrescita in 48 ore in accordo con la piena storica del fiume nel 1996.

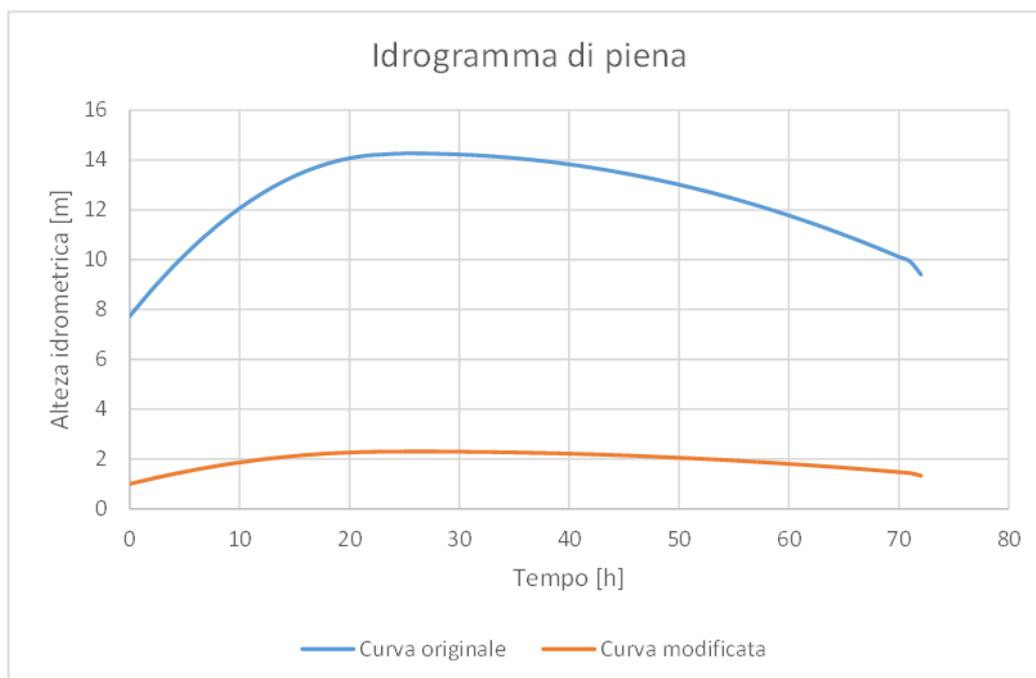


Grafico 1 : Idrogramma di piena utilizzato per l'analisi in transitorio

Com'è osservabile, nel grafico soprastante sono riportati due andamenti: il primo è relativo alla curva originale determinata nel corso di uno studio precedente condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell'Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini, pubblicato nel Marzo 2021, il secondo invece è il primo andamento scalato in riferimento al massimo livello di piena registrato in corrispondenza della sezione 4, ossia 2,3 m.

4.4. ANALISI DI STABILITA' DEL RILEVATO ARGINALE

Per valutare la stabilità delle tre sezioni arginali oggetto di studio viene utilizzato il metodo all'equilibrio limite implementato nel pacchetto SLOPE/W di Geostudio. Tutti i materiali sono trattati con un modello di tipo Mohr-Coulomb e i parametri assegnati, angolo d'attrito interno ed eventuale coesione, sono riferiti alle condizioni drenate. Il software calcola automaticamente il coefficiente di sicurezza

FS lungo superfici di scorrimento scelte dall'utente e utilizza un metodo di letteratura per valutare il fattore di sicurezza. Nel presente studio si adottano superfici di scivolamento circolari e le verifiche vengono condotte con il metodo di Morgenstern-Price, illustrato nel paragrafo 4.4.1. La sola sezione 4 è stata soggetta a due analisi di stabilità: la prima in condizioni stazionarie che ha riportato come risultato un coefficiente di sicurezza $FS < 1,2$, ossia minore rispetto al valore limite imposto da normativa, la seconda in condizioni transitorie il cui risultato è riportato nel paragrafo 5.1. Il motivo per cui si è scelto di eseguire due analisi è legato al risultato negativo della prima. Infatti le condizioni stazionarie risultano essere eccessivamente gravose per il rilevato arginale per i motivi spiegati nel precedente paragrafo. Di conseguenza risulta essere ragionevole ripetere la simulazione in condizioni transitorie tali da riprodurre più fedelmente la realtà. Tuttavia è bene precisare che è positivo e rassicurante che un'analisi di stabilità in regime di stazionarietà restituisca un coefficiente di sicurezza maggiore di 1,2 perché vuol dire che l'argine è particolarmente sicuro, di conseguenza se si verifica tale circostanza si è ritenuto non necessario ripetere l'analisi in condizioni transitorie le quali necessitano di una modellazione più complessa. Nel capitolo 5 vengono presentate per ciascuna sezione i risultati delle analisi di stabilità assieme ai risultati delle analisi di filtrazione eseguite. Inoltre saranno riportate per ogni sezione delle tabelle che riassumono i parametri geotecnici utilizzati nelle analisi di stabilità per la modellazione del rilevato arginale e del terreno di fondazione secondo il criterio di Mohr-Coulomb. Tali parametri per il terreno di fondazione (nei modelli di Fig. 17,18,19 rappresentato con colore verde e con dicitura "sabbia limosa 2") sono stati ricavati in riferimento alla modellazione geotecnica della sezione "San Filippo" nel corso di uno studio precedente condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell'Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini, pubblicato nel Marzo 2021. Per quanto riguarda invece i parametri meccanici del terreno costituente il rilevato (nei modelli di Fig. 17,18,19 rappresentato con colore giallo e con dicitura "sabbia limosa 1") si sono ipotizzati valori di coesione e angolo di attrito interno tipici di sabbie limose parzialmente sature. Si precisa che per le sole sezioni 13 e 21 si sono ipotizzati 3 valori di angolo d'attrito interno e 3 valori di coesione e per ciascuna combinazione si è andati a condurre un'analisi differente

i cui risultati sono riportati nei paragrafi 5.2 e 5.3. Tale scelta non è stata presa in considerazione per la sezione 4 in quanto l'analisi in transitorio richiede l'impiego di un tempo maggiore per l'elaborazione dei risultati ottenuti, il che risultava eccessivo per gli scopi di tale studio.

In conclusione è opportuno sottolineare che il software di calcolo riduce tali parametri in accordo con la normativa vigente e utilizzato la Combinazione 2(A2+M2+R2) dell'Approccio 1. Il fattore di sicurezza viene confrontato con il coefficiente γ_r globale pari ad 1.1 nel caso di NTC2018 per la progettazione geotecnica e pari a 1.2 secondo il DMIT per le opere di ritenuta, quest'ultimo più restrittivo del primo e per tale motivo è stato scelto come termine di confronto in tale studio.

4.4.1 METODO DI MORGESTERN-PRICE

In questo paragrafo si è voluto approfondire il metodo di Morgenstern-Price, utilizzato per condurre la verifica di stabilità dei tre rilevati arginali oggetto di studio. Esso, più in generale, è un metodo utile all'analisi di stabilità di un pendio, quest'ultimo pensato come una discesa naturale, la parete di uno scavo artificiale o, appunto, la scarpata di un rilevato arginale. Nell'analisi di stabilità dei pendii si cerca di eseguire il confronto tra la resistenza a rottura disponibile e quella effettivamente mobilitata ed il coefficiente di sicurezza FS indica qualitativamente questo confronto.

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'}{\tau}$$

Tale verifica dell'equilibrio risulta essere condotta localmente, in ogni punto dell'ipotetica superficie di rottura. La verifica di stabilità globale può essere eseguita in modo analogo scrivendo il rapporto per il calcolo del coefficiente FS in termini di equilibrio di forze o momenti dell'intera massa. In questo caso la formula per il calcolo del fattore di sicurezza FS risulta essere:

$$FS = \frac{\text{Forze resistenti o momenti}}{\text{Forze agenti o momenti}}$$

Nella realtà la distribuzione delle tensioni nel pendio può aver raggiunto condizioni critiche solo in alcune zone mentre in altre la resistenza mobilitata può risultare decisamente inferiore a quella limite. Inoltre il movimento dei vari punti coinvolti nel fenomeno può avvenire con varie modalità che dipendono, oltre che dalle caratteristiche meccaniche dei terreni interessati, dallo stato tensionale preesistente, dall'entità delle pressioni neutrali, dal percorso tensionale seguito per arrivare a rottura e dalle condizioni al contorno. Per questo motivo risulta evidente che l'analisi della stabilità di un pendio naturale o artificiale risulta essere un problema piuttosto complesso, in cui la mole di dati da raccogliere è numerosa.

In generale l'analisi di stabilità dei pendii viene condotta con il metodo dell'equilibrio limite globale. Con questo metodo si ricava una soluzione approssimata per il problema di stabilità scegliendo una superficie di scivolamento di forma semplice e utilizzando le equazioni di equilibrio. La verifica di stabilità si conduce esaminando un certo numero di possibili superfici di scivolamento per ricercare quella che rappresenta il rapporto minimo tra la resistenza a rottura disponibile e quella effettivamente mobilitata. Tale procedimento è esattamente quello che adotta il software GEO-SLOPE per eseguire la verifica di stabilità, infatti esso prende in analisi un numero elevato di possibili superfici di scivolamento, restituendo il coefficiente di sicurezza minore tra quelli rilevati. In letteratura esistono diversi metodi di analisi di stabilità all'equilibrio limite globale ed essi differiscono tra loro per la tipologia di superficie di scivolamento considerata e le ipotesi che essi considerano per rendere il problema staticamente determinato. Infatti, la rottura di un pendio si verifica lungo superfici con curvatura variabile, da un minimo nella parte alta ad un massimo nella parte mediana ed al valore intermedio nella parte inferiore; per questo motivo è necessario andare ad ipotizzare la geometria di tale superficie, in particolare semplificandone l'andamento. Il metodo di Morgenstern-Price è possibile utilizzarlo con l'ipotesi di superficie di rottura di forma generica, tuttavia il software utilizzato nell'analisi ipotizza una geometria circolare. Inoltre si riporta a scopo informativo che i metodi più semplici ipotizzano superfici di rottura piane. Il secondo aspetto da approfondire riguarda il

motivo per cui i metodi di stabilità all'equilibrio limite si differenziano tra di loro sulla base delle ipotesi che utilizzano per rendere il problema staticamente determinato. Per capire tale concetto è necessaria una premessa: la maggiorparte dei metodi e in particolare quello di M-P suddivide la massa di frana in n conci e per ciascuno di essi esegue un'analisi di stabilità. Inutile dire che, tanto più è elevato n , tanto più l'analisi risulta accurata. Il software GEO-SLOPE suddivide l'ammasso in $n=30$ conci. A questo punto poniamo l'attenzione alle incognite del problema visibili in Fig.20. Con riferimento all'equilibrio delle forze e dei momenti, le incognite del problema sono:

- n forze normali N alla base del concio
- n forze tangenziali T alla base del concio
- $n-1$ forze normali E interconcio
- $n-1$ forze tangenziali interconcio X
- n distanze a_i tra il punto di applicazione di N e il centro di rotazione A_i
- $n-1$ distanze d_i fra il punto di applicazione di E e il centro di rotazione A_i
- 1 valore del fattore di sicurezza FS

Per un totale di $6n-2$ incognite rispetto alle $4n$ equazioni disponibili, ossia le tre equazioni della statica e l'equazione per il calcolo del coefficiente di sicurezza (si sottolinea che le distribuzioni delle pressioni neutrali e le conseguenti risultanti si assumono note). Il problema così impostato è staticamente indeterminato. Per diminuire l'indeterminazione del problema è comune a tutti i metodi assumere che il punto di applicazione della forza N sia il centro della base del concio. Tale ipotesi è tanto più vera tanto più numeroso è il numero di conci in cui è stato suddiviso il corpo di frana. In questo modo il numero di incognite viene ridotto a $5n-2$ tuttavia l'indeterminazione persiste, per cui è necessario introdurre delle ulteriori assunzioni per renderlo risolvibile dal punto di vista numerico, ed è proprio in esse che si differenziano i numerosi schemi risolutivi dell'equilibrio limite attualmente disponibili. Detto questo poniamo l'attenzione sul metodo di Morgenstern-Price. In esso vengono soddisfatti l'equilibrio delle forze in direzione verticale e orizzontale e l'equilibrio dei momenti.

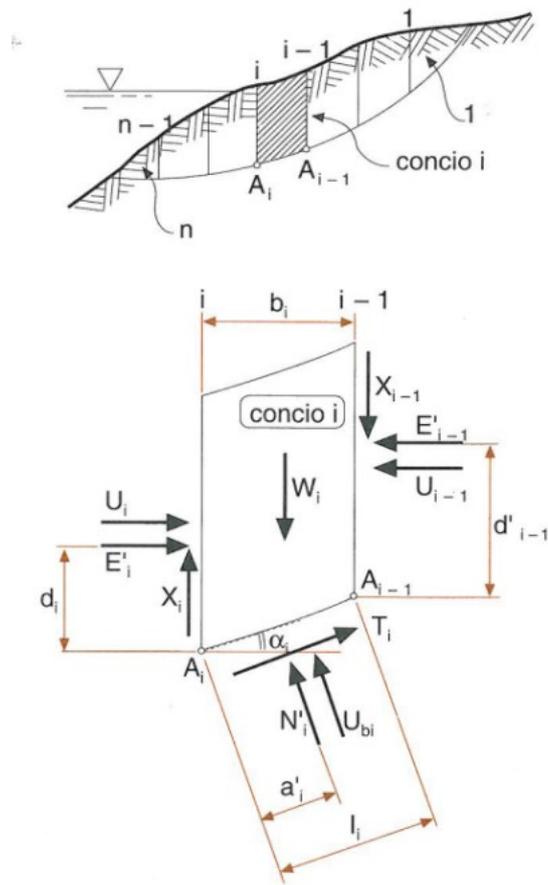


Figura 20 : Forze e distanze agenti nel generico concio i-esimo

L'ipotesi che il metodo introduce per rendere il problema staticamente determinato è assumere un'arbitraria funzione matematica per descrivere la direzione degli sforzi tra i conci e più precisamente pongono il rapporto tra le forze verticali X ed orizzontali E pari a:

$$\frac{X}{E} = \lambda f(x)$$

dove $f(x)$ una funzione arbitraria, che definisce come varia la direzione della risultante delle forze di interazione nella massa in scivolamento, e λ è un fattore di scala, che esprime la percentuale della funzione richiesta per soddisfare l'equilibrio delle forze e dei momenti. Possibili scelte della funzione $f(x)$ sono: costante, mezzo seno, trapezoidale o una particolare funzione specificata caso per caso. Per l'analisi con GEO-SLOPE è stata adottata la funzione mezzo seno. Una volta scelta la

funzione $f(x)$ si determinano i valori delle forze incognite per ogni concio e solo successivamente si calcolano i coefficienti di sicurezza corrispondenti all'equilibrio dei momenti e all'equilibrio delle forze. In questo modo il calcolo viene ripetuto variando il fattore λ fino a quando F_f e F_m coincidono, ossia fino a quando l'equilibrio di forze e momenti è soddisfatto contemporaneamente. Il software di calcolo esegue esattamente il procedimento descritto che riassumiamo di seguito:

- Si ipotizza la possibile superficie di scorrimento.
- Si suddivide l'ipotetico ammasso franoso in $n=30$ conci.
- Per ciascun concio si calcolano le forze incognite del problema.
- Si calcolano i coefficienti di sicurezza globali F_f e F_m variando ad ogni iterazione il fattore λ fino a quando essi coincidono.
- Si ipotizza una nuova superficie di scorrimento e si ripetono i punti precedenti.
- Tale iter si ripete fino a un numero n di superfici di scorrimento prefissate e viene considerata come critica quella che restituisce il coefficiente di sicurezza FS minore.

A conclusione del capitolo viene riportato in Fig.21 un diagramma di flusso avente la funzione di riassumere il processo d'analisi utilizzato. Anche se esso risulta essere particolarmente chiaro ed esaustivo, è bene riportare di seguito una breve descrizione del diagramma. L'inizio dell'analisi si è svolto in ambiente QGIS, con lo scopo di ricavare i rilievi topografici delle sezioni d'argine d'interesse. Si è proseguito poi in ambiente AutoCad per poter applicare alle 45 sezioni studiate il criterio grafico, dal quale è stato possibile ricavare l'indice r^* . Le sezioni con tale indice inferiore a 0,75 sono state ritenute sicure mentre quelle con coefficiente maggiore di 0,75 sono state sottoposte ad un'analisi di filtrazione stazionaria seguita da un'analisi di stabilità con l'ausilio del software GEOSLOPE. L'output di quest'ultima analisi è un coefficiente di sicurezza FS che, secondo la normativa vigente, deve risultare maggiore di 1,2 affinché l'argine risulti sicuro. Nel caso in cui il coefficiente FS risulti inferiore di tale valore si è eseguito una nuova analisi di filtrazione, in questo caso transitoria, in modo da meglio simulare le condizioni reali a cui è soggetto l'argine e trarre così un risultato più fedele alla realtà.

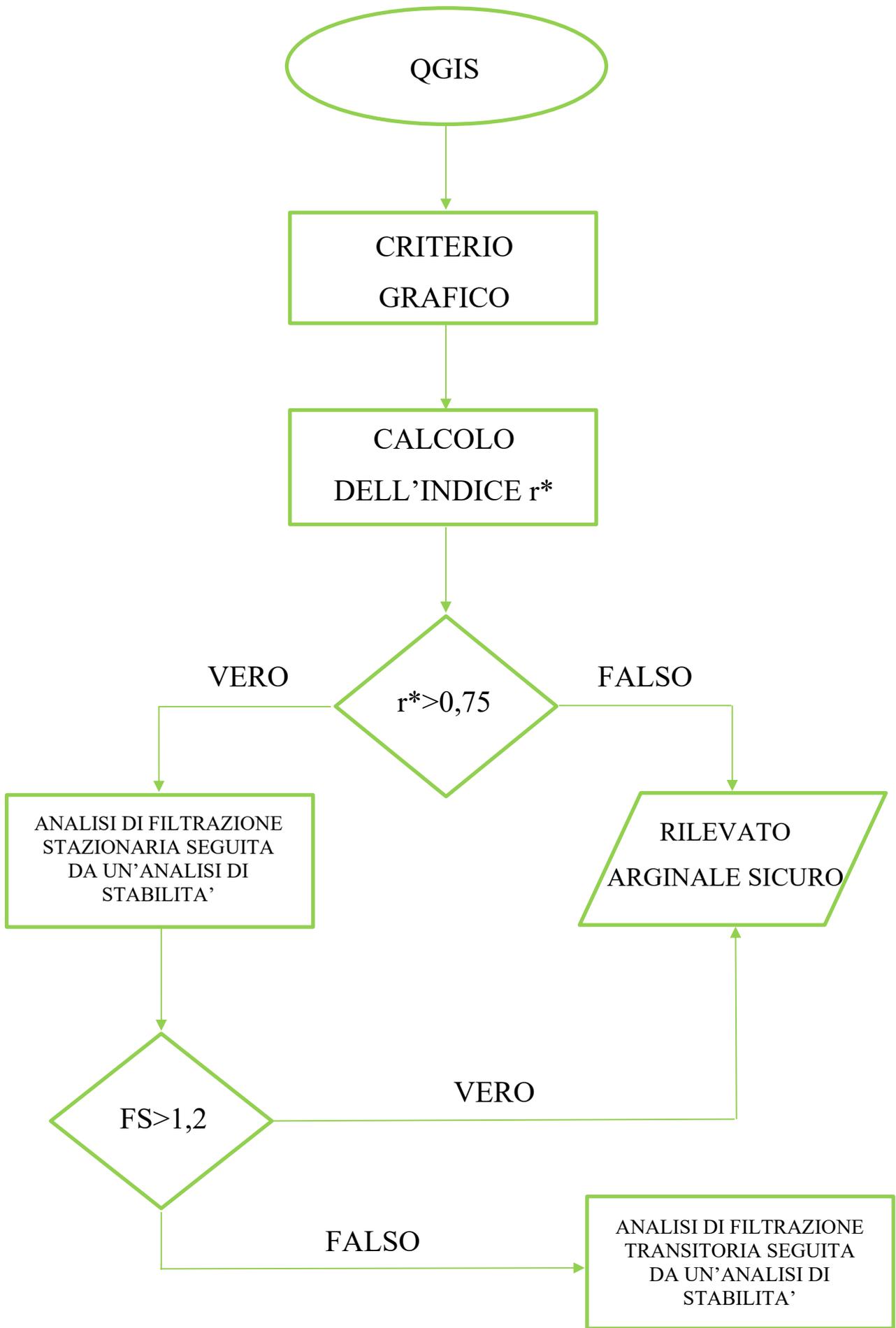


Figura 21: Diagramma di flusso riassuntivo del processo d'analisi utilizzato

5. RISULTATI

Nel seguente capitolo verranno riportati i risultati delle analisi svolte. La sequenza con cui verranno riportati tali risultati sarà la stessa utilizzata nel Cap.4: verranno inserite inizialmente due mappe, ricavate in ambiente QGIS, che riassumono i valori dell'indice r^* ottenuti dall'applicazione del metodo grafico per tutte le 45 sezioni esaminate. Successivamente si analizzeranno più nel dettaglio i risultati delle analisi di filtrazione e stabilità condotte per le sezioni 4, 13 e 21, ossia quelle approfondite per avere un coefficiente $r^* > 0,75$. Tali sezioni sono state sottoposte ad un'analisi di filtrazione e stabilità svoltesi in regime di stazionarietà; oltre a ciò, la sola sezione 4 è stata soggetta ad una successiva analisi in regime transitorio dato che, come specificato nel paragrafo 4.3, il regime stazionario produceva un coefficiente di sicurezza FS tale da non soddisfare la normativa vigente. Di conseguenza risultava più corretto simulare delle condizioni transitorie più fedeli alla realtà per ottenere un valore del coefficiente di sicurezza FS più significativo. Per tutte e tre le sezioni i risultati dell'analisi di filtrazione sono stati riportati con un'immagine rappresentativa della variazione del carico piezometrico totale all'interno del rilevato arginale arricchita da frecce rappresentative del percorso di filtrazione dell'acqua. Invece, per quanto riguarda i risultati delle analisi di stabilità, per ciascuna sezione è riportata l'immagine del modello arginale in cui è possibile osservare la superficie di scivolamento critica e il relativo coefficiente di sicurezza FS. Tali immagini, per le sole sezioni 13 e 21, sono relative al caso in cui si sono utilizzati i valori minori di angolo d'attrito e coesione tra quelli considerati mentre i risultati delle analisi di stabilità successive sono riportati all'interno delle Tabelle 7 e 8 rispettivamente per la sezione 13 e 21. La sezione 4 invece non necessita di una tabella riassuntiva perché l'analisi di stabilità è stata condotta con una sola coppia di valori di angolo d'attrito e coesione per i motivi già spiegati al paragrafo 4.4.

5.1. CRITERIO GRAFICO: RISULTATI DELL'ANALISI

Anche se tali risultati sono già stati riportati in Tab.2 all'interno del paragrafo 4.2, per completezza sono stati inseriti all'interno di tale capitolo in un formato diverso da quello utilizzato precedentemente. In questo caso infatti, come visualizzabile in Fig.22 e 23, i valori dell'indice r^* sono collocati all'interno di mappe rappresentative del corso del fiume analizzato. In particolare è chiaro come tali valori siano riportati al di sopra della sezione oggetto di ricerca ed è altrettanto chiaro quali siano le sezioni sicure e quali invece hanno richiesto un'analisi più approfondita: le prime sono state indicate con il colore verde, le seconde invece con il colore rosso. In questo modo si è voluto dare la possibilità al lettore di visualizzare e collocare geograficamente la posizione delle sezioni studiate avendo un responso immediato sul loro stato di sicurezza.



Figura 22: estratto mappa che riassume i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo grafico sulle sezioni arginali oggetto di studio.



Figura 23: estratto mappa che riassume i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo grafico sulle sezioni arginali oggetto di studio.

5.2. SEZIONE 4 : RISULTATI DELL'ANALISI DI FILTRAZIONE E STABILITA'

Inizialmente tale sezione è stata sottoposta ad un'analisi di filtrazione stazionaria seguita da una successiva analisi di stabilità all'equilibrio limite globale che ha riportato i risultati visibili rispettivamente in Fig.24 e 25. Si segnalano inoltre in Tabella 5 e 6 i parametri geotecnici utilizzati rispettivamente per l'analisi di filtrazione e stabilità; essi sono rimasti invariati anche per le successive analisi in transitorio.

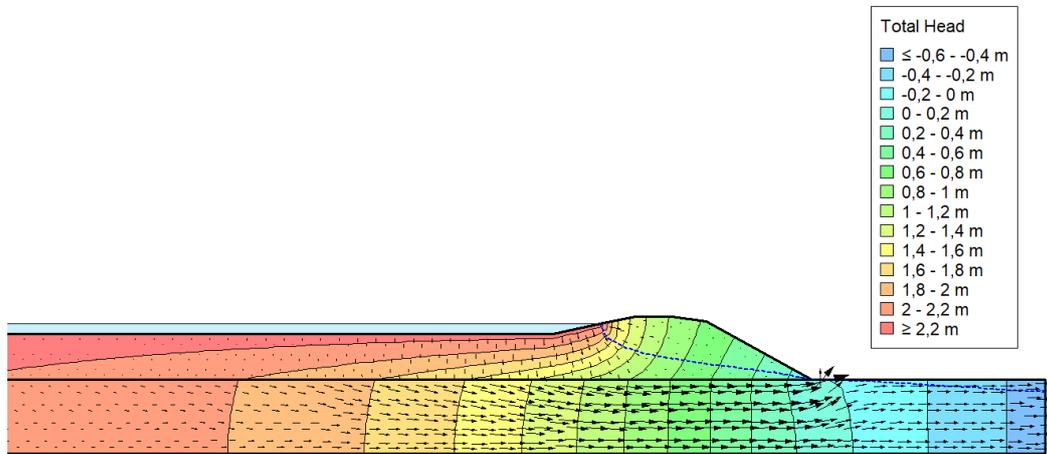


Figura 24: Contour del carico piezometrico totale della sezione 4 in condizioni stazionarie

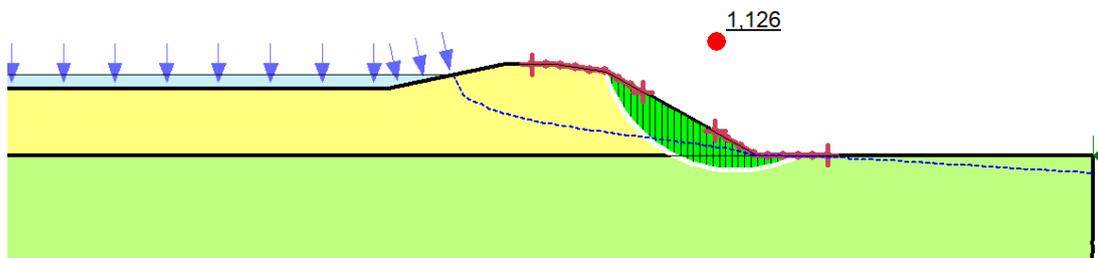


Figura 25 : Analisi di stabilità nella sezione 4 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS ottenuto in condizioni stazionarie.

Tabella 5 : Parametri geotecnici utilizzati nell'analisi di filtrazione della sezione 4

PARAMETRI GEOTECNICI PER ANALISI DI FILTRAZIONE		
MATERIALE	COMPRESSIBILITA' [1/kPa]	PERMEABILITA' [m/s]
SABBIA LIMOSA 1	2,35679E-05	2,00E-07
SABBIA LIMOSA 2	3,45734E-05	4,00E-06

Tabella 6 : Parametri geotecnici utilizzati nell'analisi di stabilità della sezione 4

PARAMETRI GEOTECNICI PER ANALISI DI STABILITA'		
MATERIALE	ANGOLO DI ATTRITO	COESIONE [kPa]
SABBIA LIMOSA 1	33°	1
SABBIA LIMOSA 2	32°	0

L'analisi di filtrazione ha riportato un lieve ma possibile sifonamento ai piedi del rilevato arginale mentre la successiva analisi di stabilità non risulta essere soddisfatta secondo la normativa vigente che vuole un coefficiente di sicurezza FS maggiore di 1,2. Questo appena descritto è il principale motivo per cui si è deciso di ripetere tali analisi non più in condizioni stazionarie, ma in transitorie. Infatti, ribadendo un concetto già spiegato nei capitoli precedenti, l'analisi stazionaria risulta simulare poco fedelmente la realtà dato che essa riproduce per un tempo sufficientemente lungo la condizione di piena; situazione che ha poche probabilità di verificarsi durante un reale fenomeno di innalzamento del livello idrometrico del fiume. Di conseguenza si è andati ad eseguire un'analisi in transitorio per riprodurre con maggiore accuratezza il fenomeno in modo da ottenere risultati più attendibili.

La successiva analisi di filtrazione transitoria restituisce un possibile risultato ad ogni istante temporale analizzato secondo la discretizzazione scelta dall'utente, in

questo caso un'analisi ogni ora, per una durata complessiva del fenomeno di 72 ore, in accordo con l'idrogramma di piena rappresentato nel Grafico 1 di pagina 35. Risulta quindi necessario individuare l'istante rappresentativo delle condizioni più gravose per il rilevato arginale. Tale istante è quello in cui si raggiunge il massimo livello idrometrico, circa 24 ore dall'inizio del fenomeno, circostanze secondo le quali il software restituisce come risultato un possibile sifonamento ai piedi del rilevato arginale. Tuttavia tale condizione è da approfondire e analizzare con studi e ricerche più dettagliate che siano in grado di determinare il reale stato di fatto dell'argine. In Fig.26 è possibile osservare l'andamento del carico piezometrico totale, calcolato come la somma della pressione dell'acqua e l'elevazione del punto rispetto all'asse di riferimento, lungo il percorso di filtrazione espresse in metri di colonna d'acqua e l'andamento ipotetico della superficie freatica indicato in linea tratteggiata blu. Inoltre in Fig.27 e 28 si riportano i risultati dell'analisi di filtrazione in due istanti temporali successivi a quello rappresentato in Fig.26. In particolare esse rappresentano il risultato ottenuto dalla simulazione rispettivamente dopo 48 ore e dopo 72 ore dall'inizio del fenomeno. I risultati che si osservano da tali immagini sono prevedibili e congruenti all'andamento della funzione che descrive l'innalzamento e l'abbassamento del livello idrometrico rappresentato nel Grafico 1 di pagina 35.

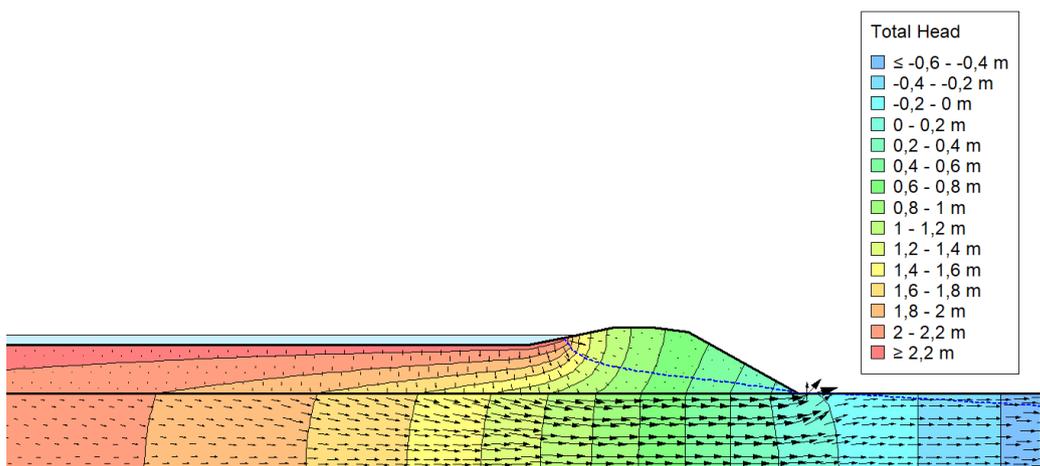


Figura 26 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 4 ottenuto con analisi di filtrazione transitoria. L'istante rappresentato è quello di raggiungimento del massimo livello idrometrico.

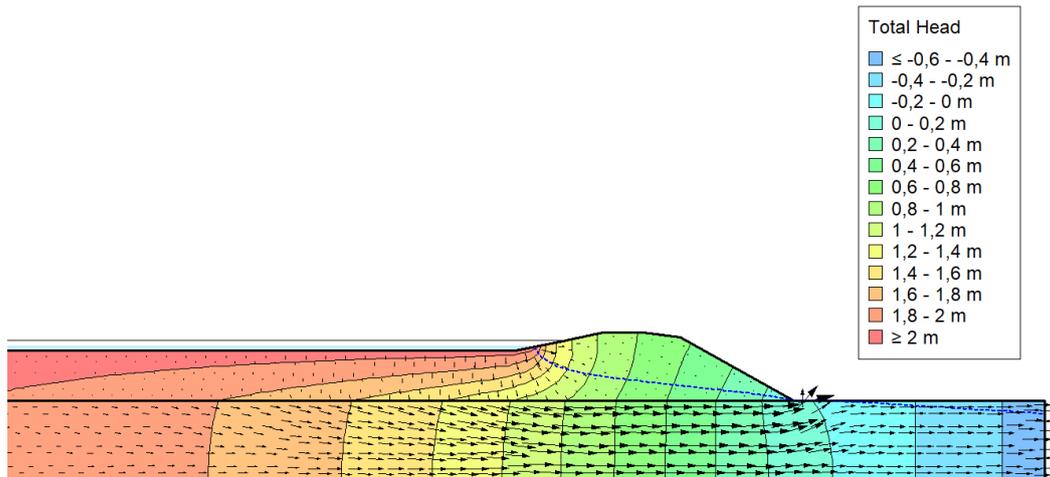


Figura 27 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 4 ottenuto con analisi di filtrazione transitoria. L'istante rappresentato è il raggiungimento delle 48 ore dall'inizio del fenomeno.

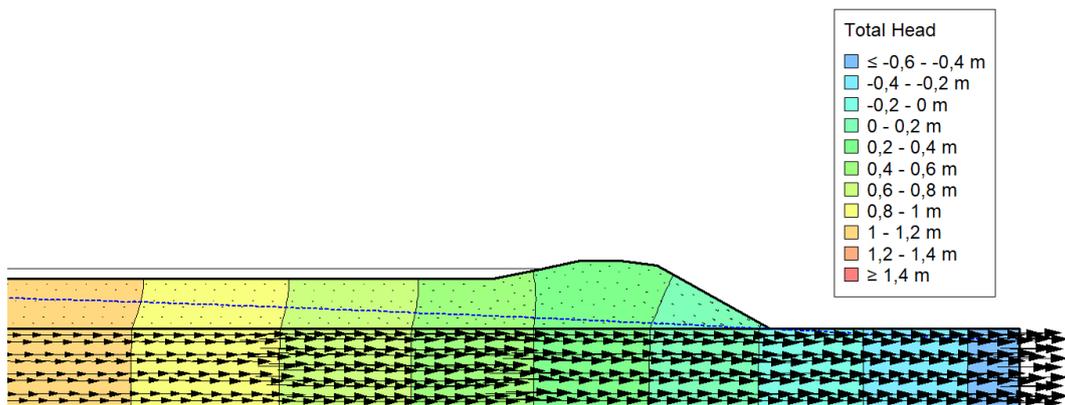


Figura 28 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 4 ottenuto con analisi di filtrazione transitoria. L'istante rappresentato è il raggiungimento delle 72 ore dall'inizio del fenomeno.

Ponendo ora l'attenzione sull'analisi di stabilità rappresentata in Fig.29 e considerando sempre l'istante più gravoso, ossia l'istante in cui si raggiunge il massimo livello idrometrico e le proprietà dei materiali indicate in Tabella 6, il coefficiente di sicurezza FS risulta maggiore, anche se di poco, rispetto a quello ottenuto in condizioni stazionarie a conferma di quanto ci si aspettava per i motivi già spiegati più volte nel corso del seguente elaborato. Tuttavia risulta ancora essere

inferiore al valore di 1,2 non garantendo quindi la sicurezza del rilevato arginale secondo la normativa vigente. Essendo questa un'analisi preliminare in cui la modellazione geotecnica dell'argine è stata solo ipotizzata in riferimento ad indagini precedenti, è bene approfondire tale risultato nel caso in cui si eseguano campagne indagini in sito e studi più dettagliati sulla sicurezza del tratto arginale oggetto di studio. Inoltre, essendo quella eseguita un'analisi in transitorio, il valore del coefficiente di sicurezza FS varia nel corso della simulazione dato che varia il livello idrometrico e quindi il carico con cui è sollecitato il rilevato arginale. L'andamento del valore del coefficiente FS è visualizzabile nel Grafico 2 che, come prevedibile, dopo una piccola crescita iniziale diminuisce fino al punto di minimo assoluto in corrispondenza del massimo livello idrometrico per poi aumentare nuovamente dato che tale livello si riduce, in accordo con il Grafico 1 di pagina 35.

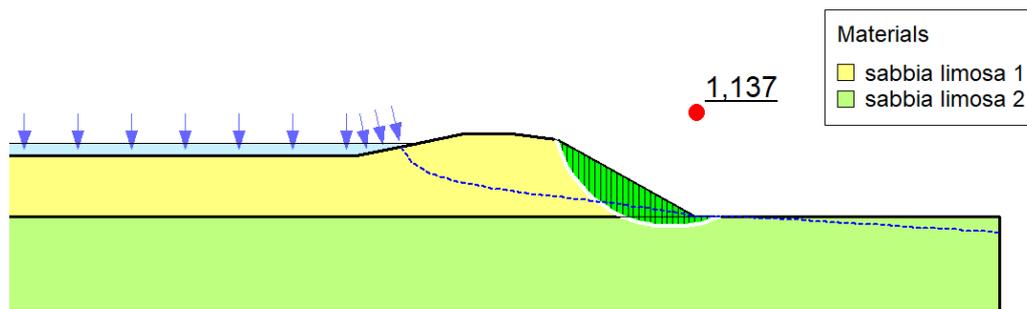


Figura 29 : Analisi di stabilità nella sezione 4 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS ottenuta in condizioni transitorie.

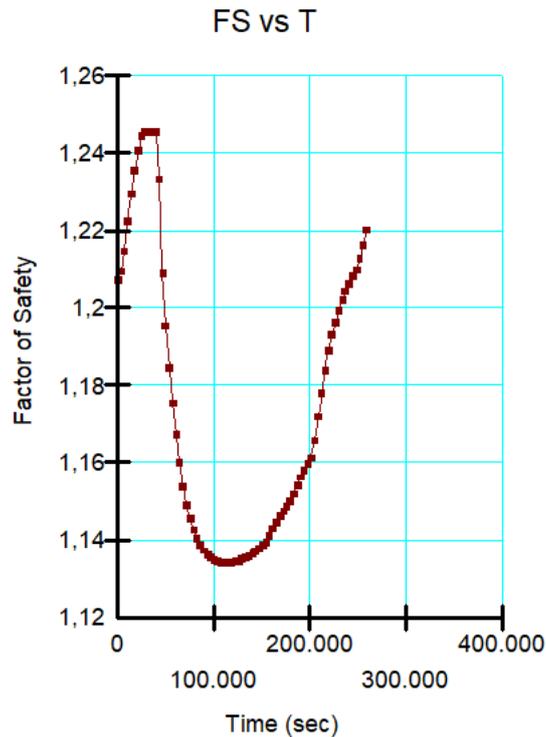


Grafico 2 : Andamento del coefficiente di sicurezza FS per tutta la durata del fenomeno transitorio.

5.3. SEZIONE 13 : RISULTATI DELL'ANALISI DI FILTRAZIONE E STABILITA'

In questo caso l'analisi di filtrazione è stazionaria e relativa alla condizione di piena del fiume. Si sottolinea, come già anticipato nei capitoli precedenti, che tale condizione è molto gravosa e poco fedele alla realtà dato che solitamente tali circostanze si manifestano per intervalli di tempo relativamente brevi. In Fig.30 è rappresentato il risultato dell'analisi dal quale è possibile ricavare l'andamento del carico piezometrico totale espresso in metri di colonna d'acqua e il possibile andamento della superficie freatica rappresentato in linea tratteggiata blu. A differenza del caso precedente il risultato della simulazione restituisce un lieve se non assente fenomeno di sifonamento ai piedi del rilevato arginale, tuttavia tale risultato dev'essere approfondito in studi maggiormente dettagliati tali da

determinare la reale condizione del rilevato arginale. Infatti è chiaro che la minore permeabilità del materiale costituente il rilevato o la presenza di diaframmi in calcestruzzo cambiano radicalmente il risultato di tale simulazione. Per condurre tale analisi si sono utilizzati gli stessi parametri geotecnici utilizzati per l'analisi di filtrazione della sezione 4 e visualizzabili nella Tabella 5 di pagina 48.

Per quanto riguarda invece il risultato dell'analisi di stabilità, esso è visibile in Fig.31. In questo caso il coefficiente di sicurezza che il software restituisce risulta essere pari a $1,286 > 1,2$. Tale situazione è rassicurante perché ottenuta in condizioni gravose per il rilevato arginale sia da un punto di vista dei parametri geotecnici assegnati ai materiali che sono gli stessi utilizzati nell'analisi di stabilità della sezione 4 e osservabili in Tabella 6 di pagina 48, sia per le condizioni di stazionarietà con cui si è svolta la simulazione. Si ribadisce che i parametri meccanici assegnati ai materiali sono ridotti con i coefficienti di sicurezza previsti dall'NTC 2018 così come spiegato nel paragrafo 1.1 e che, per il terreno di fondazione (sabbia limosa 2 in Fig.31), tali valori si sono ipotizzati uguali a quelli ottenuti per la sezione "San Filippo" nel corso di un precedente studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e ambientale dell'Università di Padova e dal Prof. Ing. Paolo Simonini, pubblicato nel Marzo 2021 e visualizzabili in Tabella 5 mentre i valori relativi al terreno costituente il rilevato (sabbia limosa 1 in Fig.31) sono stati ipotizzati considerando grandezze tipiche per quella tipologia di terreno. Si riportano infine in Tabella 7 i valori del coefficiente di sicurezza FS ottenuti modificando i parametri geotecnici del materiale costituente il rilevato arginale, così come spiegato nel paragrafo 4.4, mentre i parametri del terreno di fondazione si sono mantenuti costanti in tutte le simulazioni svolte. Commentando brevemente i valori ottenuti, si può osservare come mantenendo costante l'angolo di attrito e aumentando la coesione efficace del materiale il miglioramento sia più significativo rispetto alla situazione opposta. Generalizzando invece, dato che le proprietà meccaniche dei materiali sono schematizzate secondo il criterio lineare di Mohr-Coulomb $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$, è intuitivo che a parità di σ l'aumento di coesione e angolo di attrito porti ad un aumento della resistenza al taglio del materiale e quindi un aumento del coefficiente di sicurezza FS.

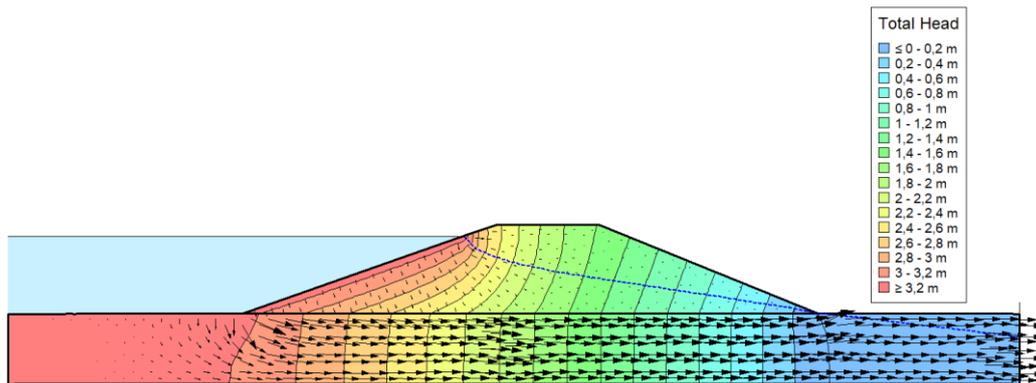


Figura 30 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 13

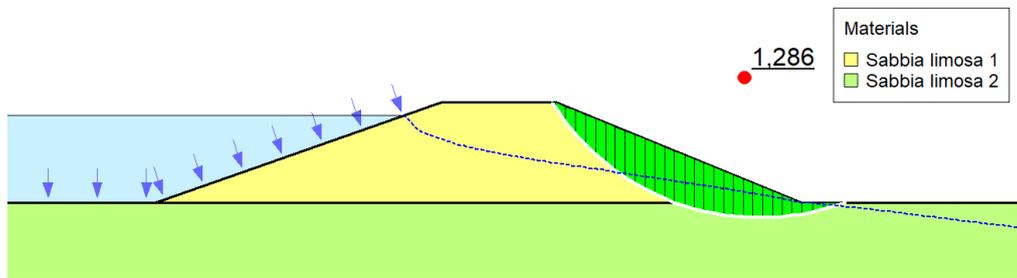


Figura 31 : Analisi di stabilità nella sezione 13 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS in condizioni stazionarie.

Tabella 7 : Coefficienti di sicurezza FS della sezione 13 ottenuti modificando i parametri geotecnici dei materiali di cui è composto l'argine.

COEFFICIENTI DI SICUREZZA SEZIONE 13			
COESIONE (kPa)	$\phi = 33^\circ$	$\phi = 36^\circ$	$\phi = 38^\circ$
1	1,29	1,35	1,40
2,5	1,35	1,42	1,46
5	1,45	1,50	1,52

5.4. SEZIONE 21 : RISULTATI DELL'ANALISI DI FILTRAZIONE E STABILITA'

Le considerazioni sui risultati ottenuti per la sezione 21 sono simili a quelle descritte per la sezione 13. Iniziando dal risultato dell'analisi di filtrazione stazionaria, com'è osservabile in Fig.32, risulta un lieve se non assente sifonamento ai piedi del rilevato arginale; un esito da approfondire in successive ricerche in quanto dipendente dal reale stato di fatto dell'argine come già spiegato nel paragrafo 5.2. Si ricorda inoltre che ai materiali sono stati assegnati gli stessi parametri geotecnici utilizzati per le analisi di filtrazione delle sezioni 4 e 13 e visualizzabili in Tabella 5. Proseguendo con la successiva analisi di stabilità, i risultati sono osservabili in Fig.33 e nella successiva Tabella 8. Per tale sezione, il valore del coefficiente di sicurezza FS, nell'ipotesi che assegna i parametri geotecnici di coesione e angolo di attrito peggiori al terreno costituente il rilevato arginale, (riportati in Tabella 8 e analoghi a quelli utilizzati nell'analisi di stabilità più gravosa per le sezioni 4 e 13 come osservabile in Tab. 6 e 7) risulta essere pari a $1,21 > 1,2$, quindi lo si può considerare uguale al valore limite imposto da normativa. In questa situazione non si può affermare che la verifica sia pienamente soddisfatta, tuttavia se si considera la condizione di stazionarietà e i bassi valori di angolo d'attrito e coesione assegnati ai materiali, ulteriormente ridotti con i coefficienti parziali di sicurezza previsti da normativa vigente, il risultato è confortante. In conclusione si riporta in Tabella 8 i valori dei coefficienti FS di tutti i casi esaminati così come spiegato nel paragrafo 4.4 e le considerazioni sui risultati ottenuti sono in linea con quelle fatte a conclusione del paragrafo 5.2.

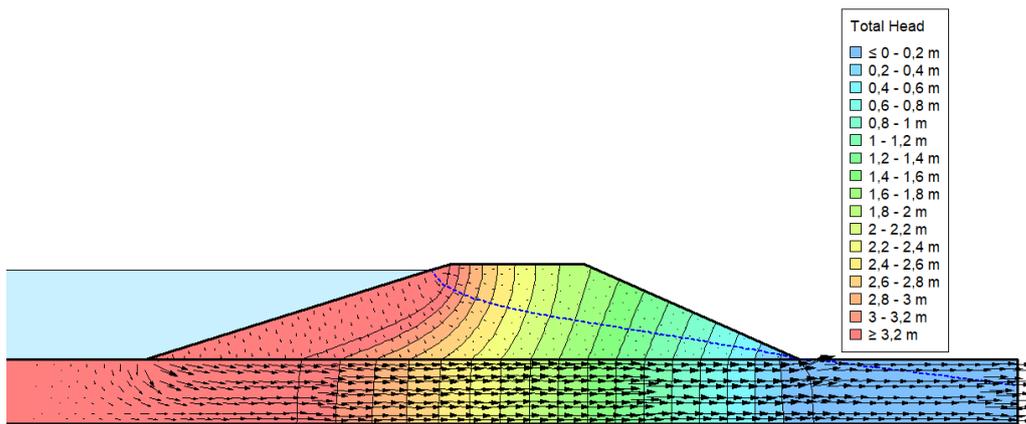


Figura 32 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 21

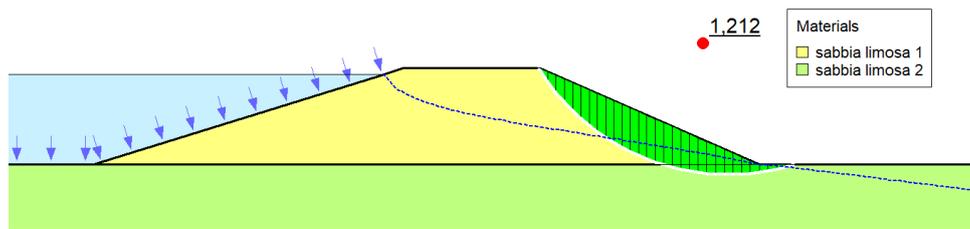


Figura 33 : Analisi di stabilità nella sezione 21 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS in condizioni stazionarie.

Tabella 8 : Coefficienti di sicurezza FS della sezione 21 ottenuti modificando i parametri geotecnici dei materiali di cui è composto l'argine.

COEFFICIENTI DI SICUREZZA SEZIONE 21			
COESIONE (kPa)	$\phi = 33^\circ$	$\phi = 36^\circ$	$\phi = 38^\circ$
1	1,21	1,29	1,33
2,5	1,28	1,34	1,37
5	1,37	1,40	1,43

6. CONCLUSIONI

Il presente studio ha preso in esame la sponda sinistra del basso corso del fiume Tagliamento, per un tratto avente una lunghezza complessiva di 20 km che si estende dalla foce fino a sud del paese di Latisana. Si ribadisce il fatto che non è stata eseguita alcuna analisi geotecnica in sito e in laboratorio, i dati e i parametri utilizzati derivano da recenti studi sul tratto arginale in sponda destra del basso corso del Tagliamento.

L'applicazione del criterio grafico, non regolato dal quadro normativo, non ha evidenziato particolari criticità nelle 45 sezioni oggetto di analisi. Infatti in nessuna di esse la cadente piezometrica di pendenza 1:4 esce dal rilevato arginale e di conseguenza nessun coefficiente r^* risulta essere maggiore di 1, come visibile in Tabella 2 e in Fig.21 e 22. Tuttavia in alcuni casi tale coefficiente risultava essere vicino all'unità, di conseguenza si è deciso di condurre analisi di filtrazione e stabilità più dettagliate con l'utilizzo del software GEO-SLOPE. Le prime hanno evidenziato la presenza di lievi se non assenti fenomeni di sifonamento ai piedi dell'argine, un risultato comunque da verificare con campagne indagini volte a determinare la reale stratigrafia e composizione dei rilevati arginali e con prove di laboratorio per la determinazione dei reali parametri geotecnici con cui modellare le sezioni oggetto di studio. Per quanto concerne le analisi di stabilità con i materiali aventi i minori valori considerati di angolo d'attrito e coesione efficace, la sezione 13 la soddisfa pienamente, la sezione 21 restituisce un coefficiente di sicurezza pari al valore limite imposto da normativa mentre la sezione 4 non la soddisfa né in condizioni stazionarie né in transitorie. A fronte di tali risultati bisogna ricordare che essi sono frutto di ipotesi derivanti da esperienze e studi pregressi sugli argini in generale e su quello oggetto di studio. Quindi qualsiasi situazione qui analizzata dev'essere approfondita rilevando con campagne indagini in sito la reale conformazione degli argini studiati.

In conclusione possiamo affermare che complessivamente lo studio preliminare eseguito non ha evidenziato particolari criticità nel tratto oggetto di studio. La sponda sinistra del Tagliamento è stata soggetta nel tempo a numerosi interventi di

miglioramento e rinforzo come evidenziato nel paragrafo 3.1 e lo studio condotto ha confermato il buono stato di salute del tratto arginale, tranne particolari e puntuali situazioni. Si sottolinea infine un aspetto tralasciato nei capitoli precedenti: in corrispondenza della sezione 5 l'analisi eseguita restituisce una condizione di sormonto. Conseguentemente a ciò, nel corso di prossimi studi maggiormente dettagliati, è consigliabile andare ad approfondire se tale condizione risulta essere veritiera o meno.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Estratto mappa da Google Earth con evidenziata in rosso il tratto arginale oggetto di studio.....	1
Figura 2 : Sezione arginale con definizione degli elementi che la compongono (CIRIA et al., 2013)	9
Figura 3 : Reticolo idrodinamico per argine su terreno impermeabile e per a) argine omogeneo, b) argine con filtro orizzontale, c) argine con dreno al piede di valle. 11	11
Figura 4 : Reticolo idrodinamico per argine su terreno impermeabile e per a) terreno anisotropo con $K_h=4K_v$, b) terreno fortemente anisotropo con $K_h=9K_v$	11
Figura 5 : estratto mappa da Google Earth con evidenziato il basso corso del fiume Tagliamento.	16
Figura 6 : ID tratti rinforzati sponda sinistra	18
Figura 7 : ID tratti rinforzati sponda SX.....	19
Figura 8 : ID tratti rinforzati sponda SX.....	19
Figura 9 : ID tratti rinforzati sponda SX.....	20
Figura 10 : Impostazione del foglio di lavoro in ambiente QGIS: in scala di grigi i file DTM sovrapposti ad un foglio Google Maps. Le linee in rosso indicano le sezioni oggetto di studio.	24
Figura 11 : Quota progressiva e altezza idrometrica con tempo di ritorno $T_r = 100$ anni espresse rispettivamente in metri e in centimetri.	24
Figura 12 : Interfaccia di lavoro dell'estensione "Profile Tool" all'interno dell'ambiente QGIS con visualizzazione grafica dell'altimetria lungo la sezione 10.	25
Figura 13 : Applicazione del criterio grafico ad un rilevato arginale con evidenziato il tracciamento della linea di saturazione di pendenza 1:4 e le grandezze "L" e "D".	26
Figura 14 : Applicazione del criterio grafico alla sezione 4 in ambiente AutoCad.	27
Figura 15 : Applicazione del criterio grafico alla sezione 13 in ambiente AutoCad.	28

Figura 16 : Applicazione del criterio grafico alla sezione 21 in ambiente AutoCad.	28
Figura 17 : Modellazione della sezione 4 su GeoStudio	33
Figura 18 : Modellazione della sezione 13 su GeoStudio	33
Figura 19 : Modellazione della sezione 21 su GeoStudio	33
Figura 20 : Forze e distanze agenti nel generico concio i-esimo.....	40
Figura 21: Diagramma di flusso riassuntivo del processo d'analisi utilizzato	42
Figura 22: estratto mappa che riassume i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo grafico sulle sezioni arginali oggetto di studio.	45
Figura 23: estratto mappa che riassume i risultati ottenuti con l'applicazione del metodo grafico sulle sezioni arginali oggetto di studio.	46
Figura 24: Contour del carico piezometrico totale della sezione 4 in condizioni stazionarie	47
Figura 25 : Analisi di stabilità nella sezione 4 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS ottenuto in condizioni stazionarie..	47
Figura 26 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 4 ottenuto con analisi di filtrazione transitoria. L'istante rappresentato è quello di raggiungimento del massimo livello idrometrico.	49
Figura 27 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 4 ottenuto con analisi di filtrazione transitoria. L'istante rappresentato è il raggiungimento delle 48 ore dall' l'inizio del fenomeno.....	50
Figura 28 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 4 ottenuto con analisi di filtrazione transitoria. L'istante rappresentato è il raggiungimento delle 72 ore dall' l'inizio del fenomeno.....	50
Figura 29 : Analisi di stabilità nella sezione 4 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS ottenuta in condizioni transitorie...	51
Figura 30 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 13	54
Figura 31 : Analisi di stabilità nella sezione 13 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS in condizioni stazionarie.....	54
Figura 32 : Contour del carico piezometrico totale per la sezione 21	56
Figura 33 : Analisi di stabilità nella sezione 21 con visualizzazione della superficie critica e relativo coefficiente di sicurezza FS in condizioni staionarie.....	56

INDICE DEI GRAFICI

Grafico 1 : Idrogramma di piena utilizzato per l'analisi in transitorio.....	35
Grafico 2 : Andamento del coefficiente di sicurezza FS per tutta la durata del fenomeno transitorio.	52

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 : Interventi eseguiti in sponda sinistra	20
Tabella 2 : Calcolo del rapporto r^* nelle 45 sezioni oggetto di studio	28
Tabella 3 : Parametri geotecnici dei materiali utilizzati per la modellazione delle sezioni arginali su GeoStudio necessarie all'analisi di filtrazione.	30
Tabella 4: Massime altezze idrometriche in corrispondenza delle tre sezioni oggetto d'analisi con $Tr=100$ anni.	34
Tabella 5 : Parametri geotecnici utilizzati nell'analisi di filtrazione della sezione 4	48
Tabella 6 : Parametri geotecnici utilizzati nell'analisi di stabilità della sezione 4	48
Tabella 7 : Coefficienti di sicurezza FS della sezione 13 ottenuti modificando i parametri geotecnici dei materiali di cui è composto l'argine.	54
Tabella 8 : Coefficienti di sicurezza FS della sezione 21 ottenuti modificando i parametri geotecnici dei materiali di cui è composto l'argine.	56

BIBLIOGRAFIA

Simonini P., *Studio preliminare sulle caratteristiche geotecniche e sulle condizioni di stabilità degli argini del fiume Tagliamento nel tratto di pertinenza della Regione Veneto*, 2021.

Simonini P., Cola S., Bersan S., *Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio degli argini fluviali. Relazione generale*, Volume 1, 2014.

NTC. *Norme Tecniche per le Costruzioni*. DEI, 2018.

Segreteria tecnica operativa dell'autorità di bacino dei fiumi Isonzo, Tagliamento, Livenza, Piave, Brenta-Bacchiglione. *Piano di bacino del fiume Tagliamento. Piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso*, 1997.

Università degli Studi di Padova, Dipartimento ICEA, *Studio preliminare sulle caratteristiche geotecniche e sulle condizioni di stabilità degli argini del fiume Tagliamento nel tratto di pertinenza della Regione Veneto*, s.d.

Simonini P., Ceccato F., *Analisi della documentazione inerente agli argini del basso corso del fiume Tagliamento*, Padova, 2021.

MIT, *Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)*, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2014.

International GEO-SLOPE, *Seepage modeling with SEEP/W*, 2012. URL <http://www.geoslope.com>

International GEO-SLOPE, *Stability modeling with GeoStudio*, 2012. URL <http://www.geoslope.com>

G. Brancucci, V. Marin, P. Salmona, *Dispense per l'uso del software QGIS*, 2016.

P. Colombo, F. Colleselli, *Elementi di geotecnica*, Zanichelli, 1996.

E. N. Bromhead, *Stabilità dei pendii*, Flaccovio Editore, 1986.

F. Colleselli, A. Mazzucato, G. Ricceri, M. Favaretti, M. Soranzo, *Conservazione dell'ambiente montano: Stabilità dei pendii*, Università degli studi di Padova, 1987.

M. Berti, *Appunti di analisi di stabilità dei versanti all'equilibrio limite*, Università degli studi di Bologna, 1999.