

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering
Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA

**Analisi numeriche per la valutazione della stabilità di
una sezione arginale del fiume Adige**

Relatrice: Prof. Simonetta Cola
Correlatrice: Prof. Viviana Mangraviti

Laureando: Luca Santinello

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

ABSTRACT

Il presente elaborato di tesi illustra uno studio incentrato sulla valutazione della stabilità strutturale e del comportamento idraulico di un tratto arginale del fiume Adige, situato tra Zambana e Salorno.

Per indagare questi meccanismi, è stata condotta una modellazione numerica tramite il software GeoStudio. La caratterizzazione geotecnica e idraulica dei terreni di fondazione e del corpo arginale si è basata sull'interpretazione di specifiche indagini in situ, avvalendosi in particolare di prove penetrometriche SPT e prove di permeabilità Lefranc. Le analisi hanno successivamente previsto la simulazione dei moti di filtrazione in regime stazionario attraverso il modulo SEEP/W e le verifiche di stabilità globale dei pendii all'equilibrio limite mediante il modulo SLOPE/W. Al fine di valutare la risposta della struttura arginale nelle condizioni idrauliche più gravose, i modelli numerici sono stati volutamente implementati privi di opere di stabilizzazione, trascurando gli effetti della parziale saturazione all'interno del corpo arginale e livello di piena coincidente con la sommità arginale.

I risultati ottenuti hanno evidenziato una marcata vulnerabilità dell'intero sistema, dovuta alla scelta molto cautelativa dei parametri meccanici del terreno e alla mancata modellazione degli effetti della parziale saturazione del rilevato arginale. Lo studio evidenzia la potenziale inadeguatezza dell'argine nel sopportare piene prolungate estreme e prolungate, i cui effetti potrebbero essere contenuti realizzando mirati interventi di mitigazione mirati, quali diaframmi impermeabili e trincee drenanti, per evitarne il collasso strutturale durante piene intense e prolungate nel tempo.

INDICE

Indice.....	1
Indice delle Figure.....	3
Indice delle Tabelle	5
1 Introduzione	6
1.1 Motivazione e contesto dello studio	6
1.2 Gli argini fluviali	7
1.3 Meccanismi di collasso ed erosione retrogressiva.....	8
2 Caso studio	10
2.1 Stato dell'arte.....	10
2.2 Metodologia.....	10
2.3 Interpretazione delle prove in situ	13
2.3.1 Le prove SPT	13
2.3.2 Le prove Lefranc.....	15
2.4 Inquadramento geologico e geomorfologico della Valle dell'Adige nel tratto Zambana - Salorno.....	16
2.5 Localizzazione dei sondaggi.....	18
3 Validazione del codice di calcolo	20
3.1 Geometria	20
3.2 Materiali	21
3.3 Condizioni al contorno	23
3.3.1 Analisi di filtrazione in condizioni stazionarie	23
3.3.2 Analisi di stabilità	24
3.4 Risultati analisi e confronto	25
3.4.1 Risultati analisi di filtrazione.....	25
3.4.2 Risultati analisi di stabilità.....	27
4 Modellazione numerica di sezioni tipo	29
4.1 Scelta del tratto omogeneo A1	29
4.2 Definizione meccanica e idraulica del tratto omogeneo A1	30
4.3 Geometria e stratigrafia delle sezioni considerate del tratto A1	33
4.4 Condizioni al contorno	35
4.4.1 Analisi di filtrazione in condizioni stazionarie	35

4.4.2 Analisi di stabilità	36
4.5 Risultati.....	37
4.6 Risultati delle analisi di filtrazione.....	37
4.7 Risultati delle analisi di stabilità in termini di Pore Water Pressure	40
5 Conclusioni	45
Bibliografia	47

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1.1: Fontanazzo vicino a San Michele All'Adige 31/10/2023, Pinter (2024).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 1.2: Esempio di intervento sui fontanazzi nella zona a Nord di San Michele 31/10/2023, Pinter (2024)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.1: Mappa delle diverse zone omogenee, Busato (2026).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.2: Ubicazione dei sondaggi utilizzati per la definizione dei tratti omogenei, Busato (2026)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2.3: Localizzazione del bacino dell'Adige con affluenti (Scorpio et al, 2018). In rosso l'area oggetto di studio, Busato (2026)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.4: Rappresentazione dell'area di studio. In rosso il tratto campione (Google Earth Pro)</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.5: Spezzone sondaggio SX27, sponda sinistra</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3.1: Geometria del modello geotecnico</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.2: Discretizzazione del modello</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.3: Geometria del modello geotecnico di Pinter (2024)</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3.4: Condizioni al contorno delle analisi di filtrazione in condizioni stazionarie ..</i>	<i>23</i>
<i>Figura 3.5: Rilevato arginale per l'analisi di stabilità con superficie di “ingresso” e “uscita”</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.6: Modello numerico con geometria semplificata della sezione di San Michele all'Adige sviluppato in questo studio.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.7: Vettori di flusso in condizioni stazionarie, Pinter (2024)</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3.8: Distribuzione del fattore di sicurezza in condizioni stazionarie.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.9: Distribuzione del fattore di sicurezza in condizioni stazionarie, Pinter (2024)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 4.1: Esempio della costruzione del cartiglio, tavola SX 4-8KM, Busato (2026).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.2: Schema sintetizzato della geometria considerata per il tratto A1 in conformazione 4C o 4D, Busato</i>	<i>30</i>
<i>(2026)</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4.3: Geometria di sezione: (a) sezione media sx, (b) sezione media dx, (c) sondaggio SX24, (d) sondaggio SX27, (e) sondaggio S3289</i>	<i>34</i>
<i>Figura 4.4: Condizioni al contorno delle analisi di filtrazione in condizioni stazionarie, sezione sondaggio SX27.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.5: Rilevato arginale per l'analisi di stabilità con superficie di “ingresso” e “uscita”, sezione SX27.....</i>	<i>36</i>

<i>Figura 4.6: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione media sinistra.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.7: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione media destra.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.8: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione SX24</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.9: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione SX27</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.10: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione S3289</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4.11: Spezzone del risultato delle analisi di stabilità, sezione media sinistra</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.12: Spezzone del risultato delle analisi di stabilità, sezione media destra.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 4.13: Spezzone del risultato delle analisi di stabilità, sezione SX24</i>	<i>42</i>
<i>Figura 4.14: Spezzone del risultato di analisi di stabilità, sezione SX27.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 4.15: Spezzone del risultato di analisi di stabilità, sezione S3289</i>	<i>44</i>

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tabella 2.1: Formule utilizzate per il ϕ' ($^{\circ}$), Busato (2026).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabella 3.1: Proprietà idromeccaniche adottate per validare il modello numerico rispetto alla sezione modellata da Pinter (2024)</i>	<i>22</i>
<i>Tabella 3.2: Definizione delle aree di ingresso e uscita.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 4.1: Sintesi dei parametri medi fisico-meccanici e dei dati geometrici, sponda sinistra; A=ghiaia ciottolosa-sabbiosa angolare, B=depositi limo-sabbia ghiaiosa, C=ghiaia ciottolosa-sabbiosa poligenica, D=sabbie ghiaiose</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 4.2: Deviazione standard dei parametri medi fisico-meccanici, sponda sinistra; A=ghiaia ciottolosa-sabbiosa angolare, B=depositi limo-sabbia ghiaiosa, C=ghiaia ciottolosa-sabbiosa poligenica, D=sabbie ghiaiose</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 4.3: Sintesi dei parametri medi fisico-meccanici e dei dati geometrici, sponda destra; A'=riporto arginale ghiaia-sabbia, C'=ghiaia sabbioso-limosa poligenica con lenti di ciottoli, E=sabbia fine marrone</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 4.4: Deviazione standard dei parametri medi fisico meccanici, sponda destra; A'=riporto arginale ghiaia-sabbia, C'=ghiaia sabbioso-limosa poligenica con lenti di ciottoli, E=sabbia fine marrone</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 4.5: Condizioni al contorno delle analisi di filtrazione in condizioni stazionarie..</i>	<i>35</i>
<i>Tabella 4.6: Definizione delle aree di ingresso e uscita.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabella 4.7: Sintesi dei valori degli FS ottenuti per ogni sezione.....</i>	<i>44</i>

1 INTRODUZIONE

1.1 Motivazione e contesto dello studio

Il presente elaborato si sviluppa a partire dalle analisi dei dati raccolti nell'ambito di un ampio studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università di Padova in collaborazione con il Servizio Bacini Montani della Provincia Autonoma di Trento. L'obiettivo principale è approfondire la valutazione dello stato strutturale e la stabilità di un tratto arginale del fiume Adige localizzato tra Zambana e Salorno.

Negli ultimi anni, la crescente frequenza e intensità delle precipitazioni estreme legate ai cambiamenti climatici ha messo in forte pressione le opere di difesa idraulica. Eventi meteorologici estremi, come la tempesta “Vaia”, hanno evidenziato la vulnerabilità degli argini fluviali del fiume Adige all'interno della Provincia Autonoma di Trento. Lungo questi rilevati si è infatti intensificata la formazione dei “fontanazzi” (Figura 1.1), ossia pericolose risalite di sedimento causate dall'erosione interna e retrogressiva al piede dell'argine lato campagna (Pinter, 2024).



Figura 1.1: Fontanazzo vicino a San Michele All'Adige 31/10/2023, Pinter (2024)

Le criticità dell'argine non dipendono unicamente dalle azioni idrauliche di superficie, ma sono legate alla complessità stratigrafica e geomorfologica del sottosuolo, dove il rilevato interseca gli

antichi paleoalvei del fiume. I depositi ghiaioso-sabbiosi di fondazione ad alta permeabilità innescano vie preferenziali alla filtrazione sotterranea, portando ad una fessurazione del terreno e alla successiva creazione di condotti detti “sifoni” che asportano i materiali fini in superficie. Questo tipo di processo rende il rilevato suscettibile a fenomeni di sifonamento e può portare al collasso strutturale dell’opera (Busato, 2026)

1.2 Gli argini fluviali

Si definisce rilevato arginale una struttura di origine antropica con quota sopraelevata rispetto al piano campagna, progettata per contenere le esondazioni e proteggere i territori limitrofi durante gli eventi di piena (Pinter, 2024; Vincenzi, 2025). Un cedimento di queste opere comporta un rilascio incontrollato delle acque, causando ingenti danni materiali e mettendo a rischio la sicurezza della popolazione nelle aree limitrofe. Poiché storicamente non sono esistiti standard univoci per la loro costruzione, i rilevati presentano un’elevata variabilità di caratteristiche strutturali, essendo spesso composti da materiale sciolto, granulare o fino, reperito localmente (Pinter, 2024).

Nel contesto europeo e specificamente in quello italiano le opere di difesa idraulica sono costituite prevalentemente da argini di tipo storico. A differenza delle sezioni zonate di concezione moderna, i rilevati storici sono strutture complesse formate da molteplici strati di terreno sovrapposti nel corso di molti anni (CIRIA et al., 2013). Queste opere non nascono da un singolo processo di progettazione omogeneo, ma sono il risultato di continui ampliamenti e innalzamenti, eseguiti in più fasi e con materiali diversi in risposta a successivi eventi di piena (CIRIA et al., 2013). Gli argini possono essere composti da una varietà di materiali. Nelle prime fasi costruttive veniva tipicamente impiegato il terreno reperibile localmente e facile da trasportare e posare, mentre per i successivi ampliamenti si è ricorso a terreni maggiormente stabili e impermeabili (CIRIA et al., 2013).

A causa di questa complessa evoluzione costruttiva, i sistemi arginali storici presentano frequentemente discontinuità nella composizione lungo la sezione longitudinale e carenze strutturali nel nucleo e nella fondazione, causate da errori in fase di posa o dall'utilizzo di terreni permeabili (CIRIA et al., 2013). Per compensare queste eterogeneità stratigrafiche e controllare i moti di filtrazione che potrebbero minare la stabilità dell'opera, gli interventi di adeguamento prevedono tipicamente l'allargamento del corpo arginale, la realizzazione di schermi

impermeabili all'interno del rilevato, oppure l'installazione di filtri drenanti al piede della struttura sul lato campagna (CIRIA et al., 2013). Oltre a tali adeguamenti, il rilevato arginale può essere ampliato da estensioni laterali denominate “berme”, che conferiscono maggiore stabilità alla struttura e allungano i percorsi di filtrazione dell'acqua, seppur aumentando il consumo di suolo. In aggiunta, possono essere predisposti dei sistemi di drenaggio al piede della struttura lato campagna per direzionare e raccogliere l'acqua di infiltrazione. Le trincee drenanti infatti abbassano la pressione interstiziale al piede del rilevato, aumentando di conseguenza le tensioni efficaci (Pinter, 2024; Vincenzi, 2025).

1.3 Meccanismi di collasso ed erosione retrogressiva

Durante la loro vita utile, le opere arginali subiscono un lento deterioramento a causa di fattori climatici, biologici o antropici, che le indeboliscono fino a poterne causare il collasso strutturale sotto lo sforzo di un evento di piena. I principali cedimenti sono innescati dai regimi di filtrazione e dalle pressioni interstiziali, che generano fenomeni di erosione o instabilità del pendio (Pinter, 2024; Vincenzi, 2025).

Questi meccanismi vengono distinti in due categorie, a seconda che l'erosione avvenga sulla superficie del rilevato (erosione esterna) o sugli strati di fondazione arginale (erosione interna) (Pinter, 2024; Vincenzi, 2025).

Tra i meccanismi di erosione interna in particolare, assume un'importanza critica l'erosione retrogressiva, un fenomeno per cui le particelle dell'argine vengono progressivamente asportate dal moto di filtrazione in corrispondenza di superfici sprovviste di adeguati sistemi filtranti. Il moto di filtrazione infatti, asportando le particelle di terreno, scava dei veri e propri condotti sotterranei. L'espulsione di questo materiale in superficie genera i caratteristici accumuli di sedimento noti come “fontanazzi” (Pinter, 2024; Vincenzi, 2025).

In condizioni critiche, come durante gli eventi di piena, il gradiente idraulico accelera drasticamente l'erosione e le velocità di flusso, portando ad una estensione delle cavità sotterranee e un conseguente collasso dell'intera struttura arginale. Per mitigarne temporaneamente lo sviluppo, si interviene circondando i fontanazzi con sacchi di sabbia per incrementarne il peso del terreno e di conseguenza il gradiente critico raggiungibile localmente (Figura 1.2) (Pinter, 2024).

Infine, il moto di filtrazione può generare un'instabilità globale del versante arginale sia lato fiume che lato campagna. Sul lato fiume a causa delle forze filtranti dirette verso l'alveo durante il rapido abbassamento del livello idrometrico, e sul lato campagna a causa della prolungata saturazione del corpo arginale durante piene durature, portando spesso a scivolamenti di tipo rotazionale (Pinter, 2024; Vincenzi, 2025).



Figura 1.2: Esempio di intervento sui fontanazzi nella zona a Nord di San Michele 31/10/2023, Pinter (2024)

2 CASO STUDIO

2.1 Stato dell'arte

Questo studio si pone in diretta continuità con le recenti analisi condotte nel medesimo contesto territoriale da Fabbian (2020-2024), Pinter (2024) e Busato (2026), al fine di approfondirne e completarne i risultati.

I dati alla base del modello geologico-geotecnico derivano da due campagne d'indagine (primi anni 2000 e 2023). Per le specifiche analisi numeriche condotte in questa sede, l'implementazione e la caratterizzazione delle sezioni di studio si basano sulle prove penetrometriche SPT e sulle prove Lefranc (Paragrafo 2.3) disponibili, determinanti per la definizione rispettivamente della resistenza meccanica e della permeabilità dei terreni di fondazione.

Il presente elaborato si fonda sui dati interpretati ed elaborati da Busato (2026), dal quale sono state recepite le tavole longitudinali stratigrafiche di tratti identificati come omogenei secondo i dati reperiti dall'ultima campagna di indagini del 2023.

2.2 Metodologia

Il presente studio è stato articolato in due fasi. Durante la prima fase si è presa in considerazione l'analisi dei profili longitudinali e delle stratigrafie degli argini dell'Adige nel tratto compreso tra Zambana e Salorno, individuati precedentemente da Busato (2026). Questo passaggio preliminare ha consentito di identificare i tratti arginali omogenei, con l'intento di modellarne la stabilità del fronte lato campagna durante il raggiungimento del massimo livello idrico in condizioni stazionarie. La caratterizzazione geotecnica del tratto arginale si è basata sull'elaborazione dei risultati ricavati dalle prove SPT; nello specifico, è stato analizzato il tratto omogeneo identificato come A1 (Figura 2.1) all'interno del quale sono stati condotti i sondaggi denominati SX22, SX23, SX24, SX27 per il lato sinistro del fiume e S3286, S3289, S3290, S3291 per il lato destro (Figura 2.2).

Le campagne geognostiche a disposizione risalgono a due periodi distinti. I sondaggi più recenti, localizzati in sponda sinistra, sono stati eseguiti nel mese di giugno 2023, mentre i più antichi,

situati in sponda destra, risalgono al periodo tra settembre e ottobre 2002. Entrambe le campagne di indagine sono state affiancate dall'esecuzione di prove di permeabilità in sito di tipo Lefranc.

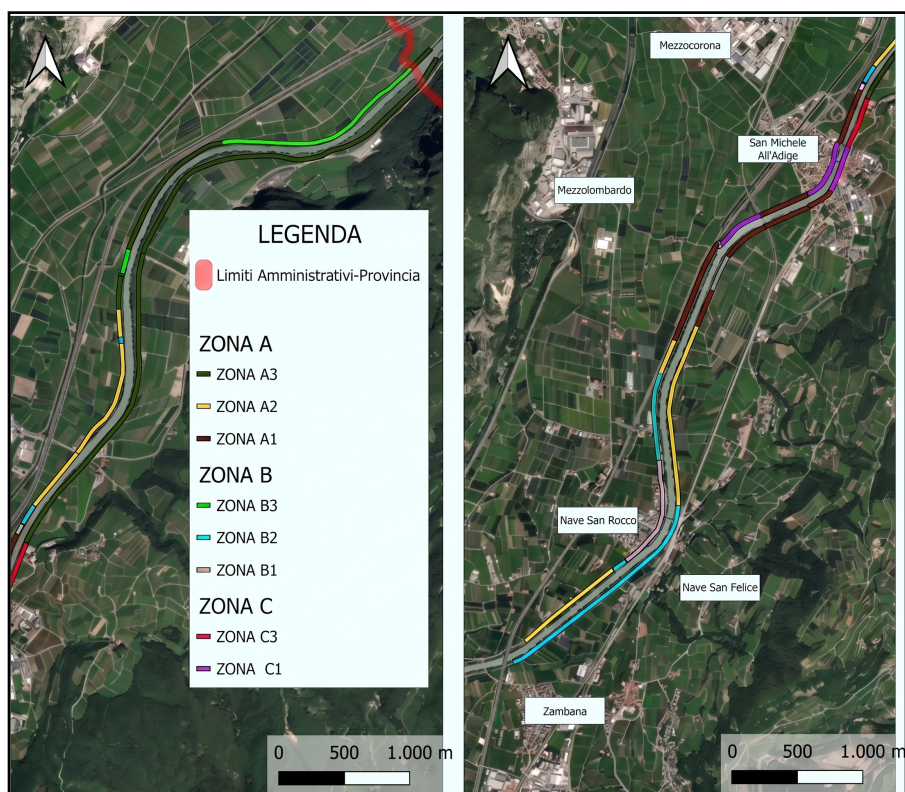


Figura 2.1: Mappa delle diverse zone omogenee, Busato (2026)

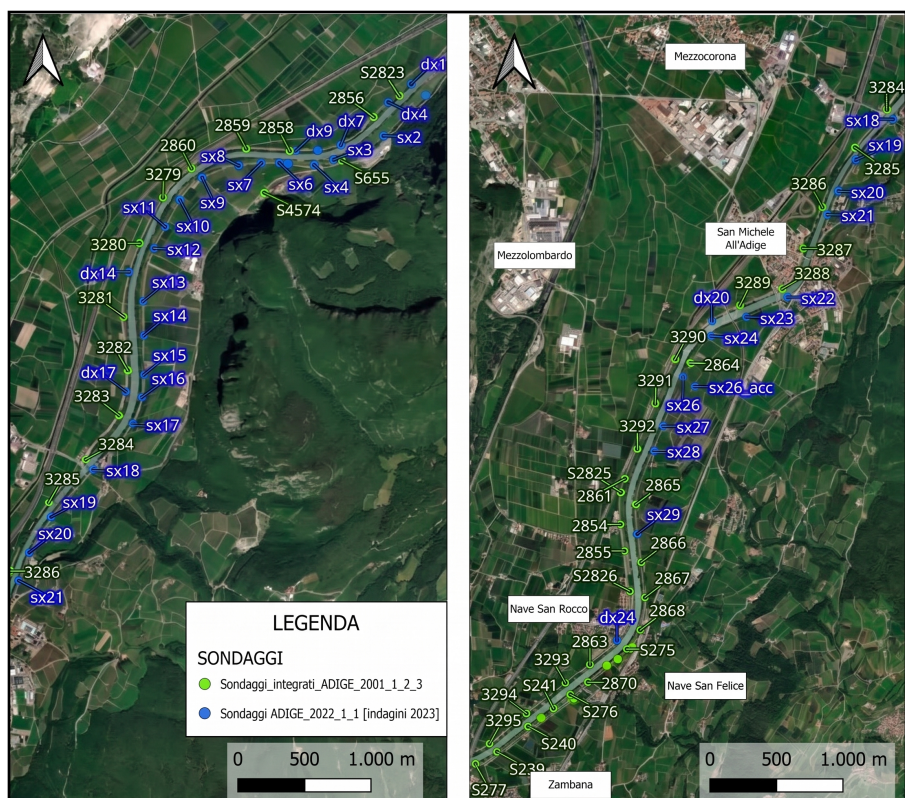


Figura 2.2: Ubicazione dei sondaggi utilizzati per la definizione dei tratti omogenei, Busato (2026)

Per sopperire invece alla locale mancanza di prove SPT e completare la caratterizzazione dei terreni, ci si è avvalsi direttamente dei risultati pregressi. I parametri idro-meccanici di Fabbian (2022) e i modelli di Pinter (2024) hanno fornito i valori di riferimento necessari per definire le proprietà geomeccaniche anche nelle sezioni prive di dati diretti.

La seconda fase dello studio è stata condotta in ambiente GeoStudio mediante un approccio agli elementi finiti per l'analisi di filtrazione e all'equilibrio limite per la stabilità del versante lato campagna, adottando una schematizzazione bidimensionale della sezione trasversale tipica dell'argine. Per l'elaborazione numerica sono stati utilizzati i parametri geomeccanici e idraulici ricavati dalle prove in situ precedentemente analizzate, assegnando a ciascuna unità stratigrafica i rispettivi valori di conducibilità idraulica (k), angolo di attrito efficace (ϕ'), compressibilità (m) e peso dell'unità di volume (γ). Per quanto concerne la coesione efficace (c'), si è scelto di assumere un valore nullo: tale ipotesi cautelativa, condivisa anche dagli studi di Pinter (2024) e Busato (2026), risulta coerente con la simulazione di un terreno a grana grossa in condizioni di completa saturazione, operando a favore di sicurezza nei calcoli di stabilità globale.

L'analisi di filtrazione, implementata mediante il codice di calcolo SEEP/W, ha avuto lo scopo di valutare il comportamento idraulico della sezione stratigrafica in regime stazionario. Al fine di simulare lo scenario più gravoso, la modellazione è stata condotta in condizioni critiche, imponendo il livello idrico del fiume in piena fino alla quota della cresta arginale e ipotizzando la completa saturazione dei terreni. L'analisi ha consentito di definire l'assetto della rete di flusso e la distribuzione delle pressioni neutre all'interno del corpo arginale e della fondazione.

Successivamente, importando il regime delle pressioni interstiziali così ricavato, sono state eseguite le verifiche di stabilità globale dei pendii avvalendosi del modulo SLOPE/W. Le analisi sono state condotte secondo i metodi dell'equilibrio limite, applicando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb a tutte le unità stratigrafiche. Attraverso questa procedura, il software ha calcolato la superficie di scivolamento più sfavorevole e il corrispondente Fattore di Sicurezza (FS) minimo, permettendo di valutare la stabilità dell'opera alle condizioni critiche di massima piena per il rilevato privo di opere di stabilizzazione.

2.3 Interpretazione delle prove in situ

Le prove SPT e le prove Lefranc sono state impiegate, rispettivamente, nella caratterizzazione meccanica e nella determinazione della permeabilità dei terreni, risultando fondamentali anche nella definizione della tipologia dei materiali presenti.

Dalle prove in situ (SPT e Lefranc) sono stati estrapolati i parametri geomeccanici e idraulici chiave – angolo di attrito interno (ϕ'), densità relativa (DR), permeabilità idraulica (k), indice dei vuoti (e), porosità (n) e compressibilità (m) – che andranno a costituire i dati di ingresso per le analisi numeriche di filtrazione e stabilità sviluppate tramite il software Geostudio.

2.3.1 Le prove SPT

La Standard Penetration Test (SPT) è una prova geotecnica in situ molto diffusa che si esegue durante i sondaggi a carotaggio a continuo. Consiste nell'infusione dinamica in condizioni standard di un campionatore nel terreno sciolto tramite la caduta libera di una mazza (63,5 kg da 76 cm di altezza). Il parametro chiave che si ottiene è il valore N-SPT, che corrisponde al numero di colpi necessari per far penetrare il campionatore negli ultimi 30 cm di una corsa totale di 45 cm. Questo valore funge da indicatore diretto della resistenza alla penetrazione del terreno ed è stato utilizzato, attraverso diverse formulazioni empiriche per materiali granulari, per calcolare parametri fondamentali come l'angolo di attrito interno e la densità relativa (Vincenzi, 2025).

I valori di resistenza alla penetrazione standard misurati in campo (N_{SPT} grezzo) sono stati corretti per tenere conto delle condizioni operative dello strumento e delle condizioni di pressione in situ. Per ottenere il parametro normalizzato $N_{1,60}$ si è fatto ricorso alla formula di Liao & Whitman (1986), come riportato da Vincenzi (2025):

$$N_{1,60} = N_{SPT} * C_N * C_E * C_B * C_R * C_S$$

C_N = fattore di correzione per il sovraccarico del terreno

C_E = fattore di correzione legato all'efficienza energetica dello strumento

C_B = fattore di correzione legato al raggio del foro

C_R = fattore di correzione legato alla lunghezza dell'asta

C_S = fattore di correzione legato al tipo di campionatore

L'angolo di attrito interno φ' è stato ricavato applicando quattro correlazioni empiriche in parallelo, con la finalità di stimare correttamente un valore medio rappresentativo e la sua deviazione standard. Le formulazioni adottate sono riportate nella Tabella 2.1.

Tabella 2.1: Formule utilizzate per il φ' (°), Busato (2026)

Correlazione	φ' (°)	Granulometria di riferimento
Shioi & Fukuni (1982) con $N_{1,60}$ da Liao & Whitman (1986)	$\varphi'(^{\circ}) = \sqrt{(15 * N_{1,60})} + 15$	Sabbie, sabbie fini/limose, limi
Shioi & Fukuni (1982)	$\varphi'(^{\circ}) = 0.3 * N_{1,60} + 27$	Sabbie medie e grossolane, fino a ghiaiose
Shioi & Fukuni (1982) con $N_{1,60}$ da Boulanger & Idriss (1986)	$\varphi'(^{\circ}) = \sqrt{(15 * N_{1,60})} + 15$	Sabbie, sabbie fini/limose, limi
Schmertmann (1975) per ghiaie/sabbie	$\varphi'(^{\circ}) = 27.1 + 0.3 * N_{1,60} - 0.00054 * (N_{1,60})^2$	Ghiaie/sabbie

La densità relativa DR è stata calcolata applicando la relazione di Skempton (1986):

$$DR = \sqrt{\frac{N_{1,60}}{60}} \cdot 100 \text{ [\%]}$$

Per la determinazione dell'indice dei vuoti si è adottata la relazione proposta da Lambe & Whitman (1969). Assumendo valori caratteristici per le sabbie e le ghiaie, pari rispettivamente a $e_{max} = 0,80$ ed $e_{min} = 0,40$, si è applicata la seguente equazione:

$$e = e_{max} - DR \cdot (e_{max} - e_{min})$$

Successivamente per ricavare la porosità è stata utilizzata la relazione di Lambe & Whitman (1969):

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

Per quanto concerne il parametro di compressibilità, la sua determinazione è avvenuta in due passaggi. Preliminarmente è stato stimato il modulo edometrico (E_{ed}) tramite la correlazione empirica proposta da Robertson & Campanella (1983), che lo lega al numero di colpi normalizzato:

$$E_{ed} = \alpha \cdot N_{60}$$

Il coefficiente empirico α è stato differenziato in base alla natura litologica del livello stratigrafico analizzato, assumendolo pari a 1000 per i depositi ghiaiosi e a 700 per le frazioni sabbiose. Successivamente, la compressibilità è stata ricavata analiticamente calcolando il reciproco del modulo edometrico così ottenuto:

$$m_v = \frac{1}{E_{ed}}$$

2.3.2 Le prove Lefranc

Le prove Lefranc, eseguite in situ durante o subito dopo i sondaggi, servono a calcolare il coefficiente di permeabilità orizzontale di terreni sciolti o debolmente coesivi saturi in condizioni di flusso radiale. La procedura prevede l'isolamento di una porzione del foro per permettere l'ingresso dell'acqua. Sebbene esistano configurazioni a carico variabile, per i materiali granulari ad elevata permeabilità si predilige la prova a carico costante. In questo caso, il livello dell'acqua nel foro viene mantenuto stabile tramite un'immissione continua che compensa l'assorbimento del terreno, permettendo di ricavare matematicamente il coefficiente di permeabilità (Vincenzi, 2025)

Come riportato nello studio di Busato (2026), la stima della conducibilità idraulica in situ si è basata sui risultati delle prove Lefranc condotte sui vari sondaggi a differenti profondità, interpretate applicando la formulazione di Hvorslev (1951). Poiché la geometria della tasca filtrante risulta identica per tutte le misurazioni, essendo caratterizzata da un diametro (D) e una

lunghezza (L) costanti, l'area della sezione trasversale del foro è pari a $A = \frac{\pi}{4}D^2$. Di conseguenza, si è adottato un fattore di forma

$$F = \frac{2\pi L}{\ln(4L/D)}, \text{ valido per configurazioni cilindriche con rapporto } L/D > 4.$$

Per le prove a carico costante, la permeabilità è stata ricavata come:

$$k = Q / (F \cdot H)$$

Q = portata media stabilizzata in $[m^3/s]$

H = colonna idraulica applicata

Per la prova a carico variabile, la conducibilità è stata calcolata sempre utilizzando la formula di Hvorslev (1951):

$$k = (A / F) \cdot \ln(H_1 / H_2) / \Delta t$$

2.4 Inquadramento geologico e geomorfologico della Valle dell'Adige nel tratto Zambana - Salorno

L'assetto geologico e geomorfologico della media Valle dell'Adige, nel tratto tra Zambana e Salorno, deriva da una complessa evoluzione tettonica, glaciale e sedimentaria. I versanti ripidi sono costituiti da rocce vulcaniche atesine e formazioni calcareo-dolomitiche, mentre il fondovalle è dominato da depositi quaternari di origine glaciale e da strati di sedimenti fluivo-glaciali e lacustri più recenti portati dall'Adige e dai suoi affluenti (Busato, 2026).

Dal punto di vista morfologico, l'evoluzione della piana si divide in due fasi. In condizioni naturali, l'Adige formava un sistema a meandri, costituito anche dai torrenti immissari Noce e Avisio, che scorreva liberamente nella piana alluvionale. La continua divagazione dell'alveo fluviale ha generato una marcata eterogeneità stratigrafica, determinando l'accumulo di sedimenti a diversa granulometria (Busato, 2026). A partire dal XIX secolo, le opere di rettifica di epoca austro-ungarica hanno costretto il fiume ad un alveo rettilineo arginato (Figura 2.3). L'artificializzazione del corso fluviale ha tuttavia innescato severe criticità geotecniche. Le arginature attuali intersecano frequentemente i paleoalvei, ossia gli antichi letti abbandonati del fiume, i quali sono costituiti da corpi di ghiaia e sabbia altamente permeabili immersi terreni fini. Questi contrasti litologici creano percorsi preferenziali per la filtrazione idrica, rendendo

storicamente questo tratto particolarmente soggetto a fenomeni di sifonamento, fontanazzi e collassi strutturali (Busato, 2026).

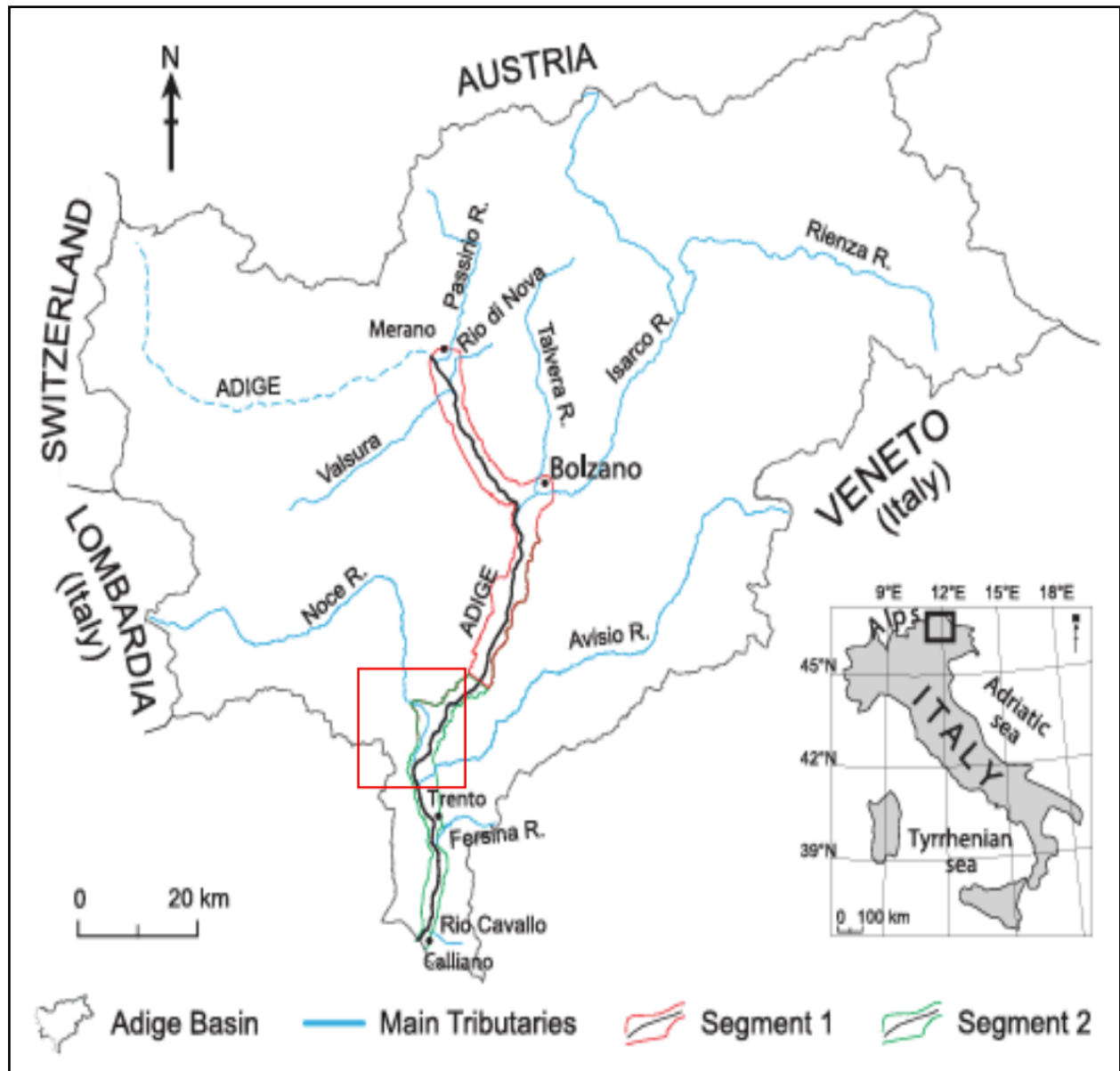


Figura 2.3: Localizzazione del bacino dell'Adige con affluenti (Scorpio et al, 2018). In rosso l'area oggetto di studio, Busato (2026)

A differenza del più ampio contesto di 12 km analizzato da Busato (2026), il presente lavoro si concentra su un tratto arginale di 3,3 km compreso tra San Michele all'Adige e Nave San Felice. Restringere il campo d'indagine ha permesso di eseguire analisi geotecniche di maggior dettaglio, ottenendo risultati numerici specifici per questa porzione di argine. La Figura 2.4 illustra l'area specifica oggetto di studio.

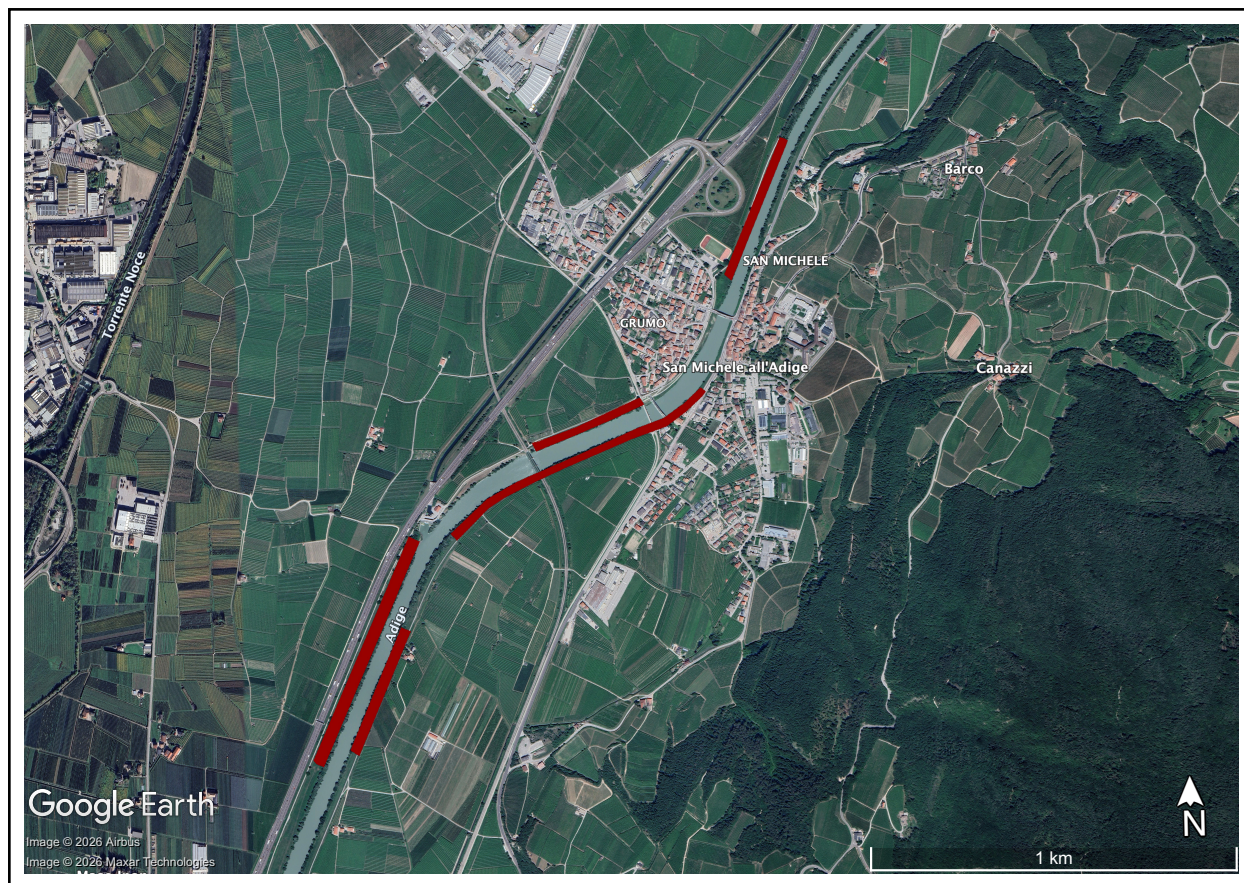


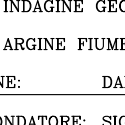
Figura 2.4: Rappresentazione dell'area di studio. In rosso il tratto campione (Google Earth Pro)

2.5 Localizzazione dei sondaggi

Lo studio si basa sui dati ricavati da sondaggi a carotaggio continuo eseguiti in cresta arginale, suddivisi in due tipologie di provenienza. Il primo gruppo comprende indagini meno recenti (risalenti ai primi anni 2000), estratte dal geoportale della Provincia Autonoma di Trento e identificate da una sigla numerica. Il secondo gruppo include invece sondaggi di più recente esecuzione (come le campagne svolte nel 2023), caratterizzati da una denominazione progressiva verso valle e da un codice che specifica la sponda idrografica di appartenenza (Busato, 2026).

Nello specifico, l'area d'esame del presente lavoro si concentra su un tratto campione che comprende complessivamente 10 sondaggi, distribuiti su entrambe le sponde del fiume. Sulla sponda destra sono stati analizzati i sondaggi appartenenti al gruppo meno recente, identificati dalle sigle S3286, S3289, S3290 e S3291. Sulla sponda sinistra, invece, lo studio si avvale dei sondaggi più recenti, comprendendo la serie da SX22 a SX24, le relative prove SX23_acc e SX24_acc, e il sondaggio SX27 (Figura 2.3).

 BOLZANO - BOZEN SONDAGGI GEOGNOSTICI SU TERRENI E ROCCIA GEOGNOSTISCHE BOHRUNGEN IN LOCKER- UND FESTGESTEIN				COMMITTENTE: PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO				SONDAGGIO Nr. SX27			
				PROGETTO: INDAGINE GEOGNOSTICA				X=EST= 663272.81			
				LOCALITÀ: ARGINE FIUME ADIGE (TN)				Y=NORD= 5116464.42			
				DATA ESECUZIONE: DAL 14.06. AL 15.06.2023				Z=m.s.l.m.= 207.86			
SUPERVISORE: DR. GEOL. S. VALLE				SONDATORE: SIG. M. MOGGIOL				TIPO SONDA: NENZI GELMA 1			

Tipo di perforazione	Rivestimento	Spessore strato [m]	Profondità [m]	Legenda	DESCRIZIONE LITOLOGICA	Lunghezza manovra [m]	TCH [%]	SCH [%]	RPQ [%]	PROVE IN SITU						Quota falda [m]	Attrezzaggio	NOTE ED OSSERVAZIONI		
										Standard Penetration Test										
										Profondità [m]	Nr. Colpi			N.S.P.T.	Tipo di punta				Campioni	Prove in foro
											0-15 cm	15-30 cm	30-45 cm							
		4.60	4.60		Ghiaia, fortemente ciottolosa, sabbiosa; angolare; color grigio.	1.50	100											Coordinate espresse con il sistema UTM WGS 84. Attrezzaggio: m 0.00 + 20.00: Piezometro in PVC DN80 (dat. 0.50 mm) con pozzetto carrabile cieco: m 0.00 + 8.00 fess.: m 8.00 + 20.00		
		0.40	5		Sabbia fine e limo; color marrone chiaro.	100														
		1.10	6.10		Limo, sabbioso fine, debolmente ghiaioso fine; color marrone.	6.00														
					Ghiaia, ciottolosa, sabbiosa; poligenica, arrotondata; color marrone - grigio.	100														
						7.50	100											Sintesi misurazione falda Falda: 6.20 m da p.c. Data: 16.06.2023		
					100															
					9.00															
						100														

Altezza e 101 mm

mm

10

7.50
LeFranc
8.00

8.20

8.00

19

3 VALIDAZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

La modellazione della sezione arginale è stata condotta utilizzando il software di calcolo GeoStudio con l'obiettivo di eseguire le analisi di filtrazione e di stabilità. L'impostazione del modello all'interno del programma richiede all'utente la definizione della geometria del terreno, l'assegnazione dei parametri geotecnici e idrogeologici ai vari strati e la determinazione delle condizioni al contorno.

Al fine di validare la robustezza del codice di calcolo, si è deciso di operare un confronto con il modello numerico realizzato da Pinter (2024). Nello specifico, si è cercato di riprodurre i risultati ottenuti da Pinter per la sezione di San Michele dell'Adige, mantenendo inalterate le proprietà fisico-meccaniche dei terreni. Si è optato, tuttavia, per una geometria del dominio volutamente semplificata, al fine di focalizzare l'attenzione sull'affidabilità della risposta computazionale del software.

3.1 Geometria

Per l'analisi, è stata implementata nel software una geometria di profilo accuratamente scalata e rettificata, caratterizzata da 4 strati omogenei di spessore e proprietà costanti (Figura 3.1).

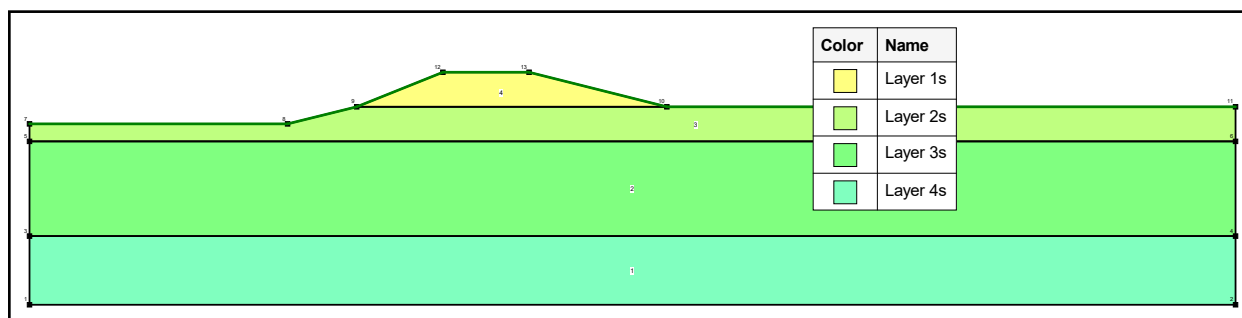


Figura 3.1: Geometria del modello geotecnico

La discretizzazione del modello è stata organizzata con una griglia a elementi quadrati e triangolari di lunghezza 0.5 m per il corpo arginale e il primo strato di fondazione, e una griglia a elementi quadrati di 1 m per i due layer più profondi (Figura 3.2), come nel modello originale di Pinter (2024) (Figura 3.3).

Come già enunciato in precedenza si è deciso di utilizzare una stratigrafia semplificata al fine di verificare la corretta convergenza delle equazioni di filtrazione ed equilibrio limite senza eventuali interferenze.

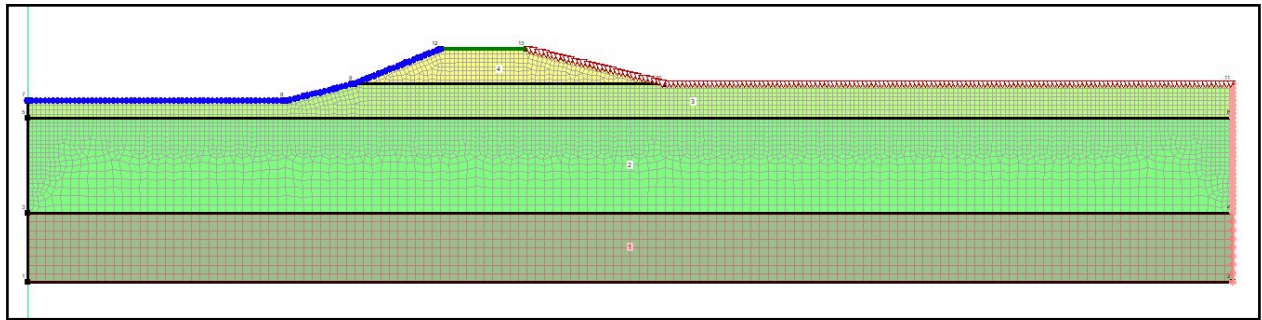


Figura 3.2: Discretizzazione del modello

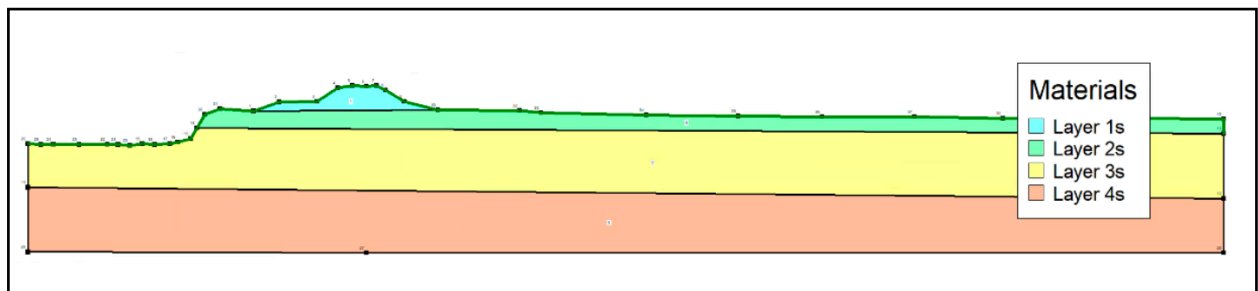


Figura 3.3: Geometria del modello geotecnico di Pinter (2024)

Sulla geometria definita in precedenza, sono state effettuate le analisi di filtrazione e in seguito le analisi di stabilità all'equilibrio limite fronte lato campagna dell'argine. Il software GeoStudio gestisce questa tipologia di calcolo attraverso il modello SLOPE/W, che utilizza la distribuzione delle pressioni dell'acqua generata dal modulo SEEP/W per ricercare le superfici di scorrimento critiche e calcolare i relativi fattori di sicurezza nelle diverse fasi del processo di filtrazione.

3.2 Materiali

Al fine di garantire la rigorosa coerenza del confronto, per la definizione dei materiali si è scelto di adottare gli stessi parametri geotecnici e idraulici impiegati da Pinter (2024). Come illustrato nel modello di riferimento, sono stati utilizzati come valori di porosità, permeabilità e compressibilità i parametri ricavati dai lavori precedenti sull'area di Salorno (Fabbian, 2024), riportati in seguito (Tabella 3.1). Allo stesso modo il rapporto tra permeabilità verticale e orizzontale (k_y/k_x) è stato assunto come 0.1, in accordo con gli studi passati (Pinter, 2024).

Tabella 3.1: Proprietà idromeccaniche adottate per validare il modello numerico rispetto alla sezione modellata da Pinter (2024)

Layer	Permeabilità orizzontale satura (m/s)	Porosità (-)	Compressibili tà (kN/m ³)	Peso per unità di volume (kN/ m ³)	Angolo di attrito interno (°)
1	2.50E-05	0.361	1.60E-05	21.0	40.0
2	1.92E-05	0.365	9.00E-05	18.0	30.0
3	2.68E-04	0.354	2.00E-05	19.0	34.5
4	1.00E-09	0.472	5.00E-04	18.0	20.0

Prendendo in riferimento il modello costitutivo, nella presente validazione si è scelto di non implementare né la curva di ritenzione idrica intermedia né la curva di permeabilità idraulica adottate da Pinter (2024). Tale scelta comporta una differenza significativa nel modo in cui i due modelli simulano il comportamento idraulico e meccanico del terreno in condizioni di parziale saturazione. È pertanto ragionevole ipotizzare che l'assenza di queste curve rappresenti una delle cause principali della discrepanza riscontrata tra i valori del Fattore di Sicurezza (FS) minimo ottenuto nelle due diverse simulazioni.

A differenza di quanto stabilito per il modello costitutivo, per il comportamento meccanico si è deciso di assumere le medesime ipotesi validate da Pinter. I terreni che compongono il modello numerico sono stati delineati secondo il criterio Mohr - Coulomb, che determina la resistenza al taglio in funzione della coesione (c), della tensione efficace normale alla superficie di taglio (σ') e dell'angolo di attrito interno del materiale (ϕ). In termini di tensioni efficaci il criterio può essere scritto in questo modo:

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi'$$

In accordo con lo studio di riferimento, per ogni layer i valori di angolo d'attrito e peso specifico per unità di volume (Tabella 2.1) sono stati mantenuti invariati. La coesione è stata assunta nulla ($c=0$) in maniera cautelativa data la natura grossolana dei materiali. Inoltre si è scelto di mantenere l'approccio conservativo di Pinter riguardo l'effetto della suzione nei materiali parzialmente saturi, per evitare una sovrastima della stabilità globale del rilevato.

3.3 Condizioni al contorno

3.3.1 Analisi di filtrazione in condizioni stazionarie

Per una corretta simulazione del processo di filtrazione in condizioni stazionarie, il modello è stato configurato replicando le condizioni al contorno definite da Pinter (2024), rappresentate in seguito (Figura 3.4):

- la porzione superiore del lato campagna è stata definita come una superficie di potenziale infiltrazione, in rosso;
- sul confine destro del modello, lato campagna è stata impostata una quota piezometrica fissa di 207 m.s.l.m, in rosa;
- sul lato fiume è stato impostato un tirante corrispondente alla sommità della struttura arginale di 212 m, in blu.

Si sottolinea che il software assume per impostazione predefinita un comportamento impermeabile per le superfici del dominio alle quali non è stata assegnata esplicitamente una condizione al contorno.

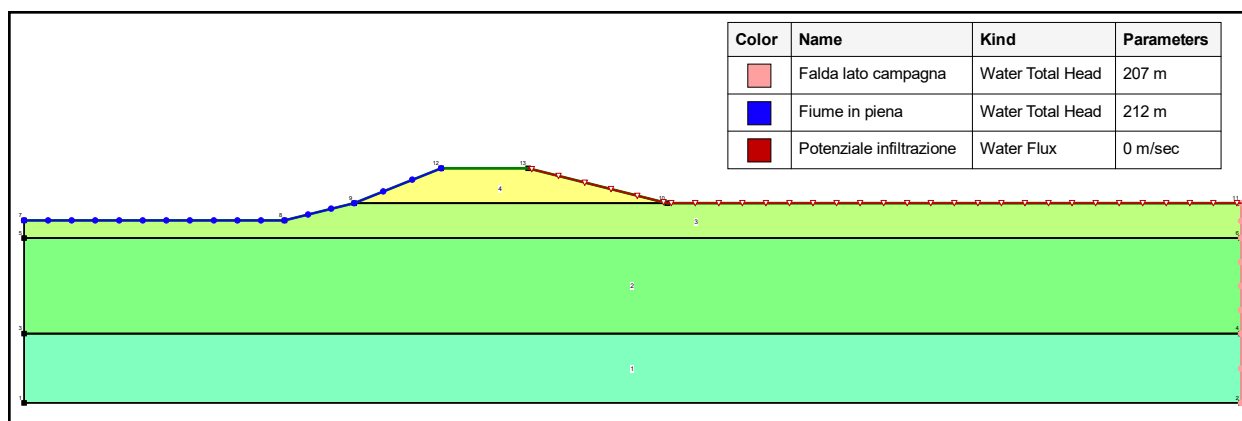


Figura 3.4: Condizioni al contorno delle analisi di filtrazione in condizioni stazionarie

Il software per garantire l'efficienza di calcolo considera nulla la pressione interstiziale di una superficie di infiltrazione, condizione che tuttavia può andare a sviluppare un flusso d'acqua. Una ulteriore problematica del modello è la mancata conoscenza dell'estensione di questa superficie, che viene determinata tramite l'utilizzo di processi iterativi. Per ovviare a queste complicazioni GeoStudio consente di definire la condizione al contorno di "potenziale di infiltrazione". L'algoritmo impone inizialmente una condizione di flusso nullo sull'intero

parametro e al termine di ogni interazione vengono verificate le pressioni nodali. Qualora vengano individuati nodi con pressioni a valori positivi (carico idraulico maggiore della quota topografica), il programma converte in maniera automatica la condizione al contorno per permettere la fuoriuscita di acqua dal sistema. Nello specifico, la condizione di flusso nullo viene aggiornata imponendo una condizione di carico idraulico equivalente alla elevazione del nodo stesso ($H = y$), procedendo poi al ricalcolo dell'intera soluzione. Analogamente a quanto impostato da Pinter (2024), nel presente modello si è pertanto deciso di assegnare una condizione iniziale di flusso nullo, affidando al software la gestione dinamica e la ricalibrazione autonoma del contorno.

3.3.2 Analisi di stabilità

In accordo con l'impostazione metodologica di Pinter (2024), le analisi di stabilità all'equilibrio limite sono state condotte applicando il metodo di Morgenstern e Price (1965). La procedura di calcolo necessita della definizione della geometria dei meccanismi di rottura ipotizzati. In particolare, in questo modello sono state definite le aree di ingresso e di uscita delle superfici di scorrimento (Tabella 3.2), che delimitano l'insieme dei possibili tratti in cui le superfici di rottura intersecano i confini del modello (Figura 3.5). Per escludere dalle analisi una eccessiva incidenza delle rotture superficiali, la ricerca del calcolatore è stata limitata a superfici aventi una profondità minima di 30 cm.

Tabella 3.2: Definizione delle aree di ingresso e uscita

Range	Coordinata Iniziale (X; Y)	Coordinata Finale (X;Y)	Posizione Geometrica
Ingresso	48 m; 212 m	66 m; 210 m	Dal punto 12 a metà scarpata di valle
Uscita	66 m; 210 m	78 m; 208 m	Da metà scarpata fino a 4 m oltre il punto 10

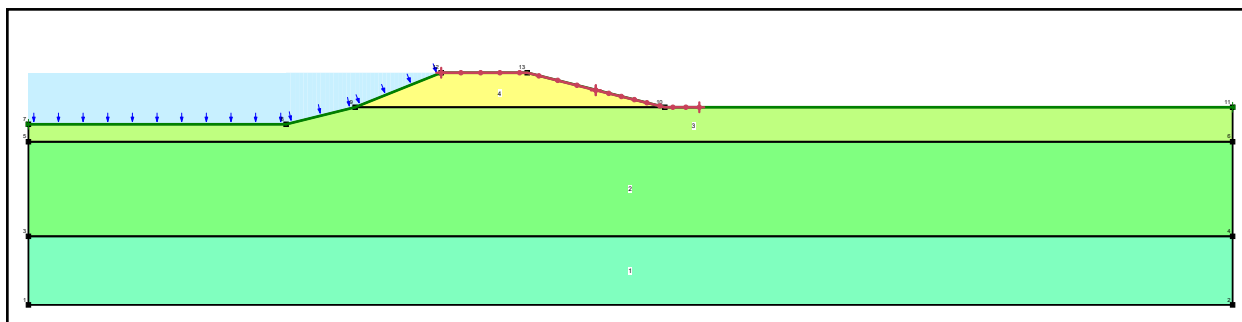


Figura 3.5: Rilevato arginale per l'analisi di stabilità con superficie di "ingresso" e "uscita"

Il metodo dell'equilibrio limite ipotizza la presenza di una superficie di scorrimento di geometria nota e valuta la stabilità di un pendio determinando il Fattore di Sicurezza (FS), definito come il rapporto tra la resistenza al taglio disponibile e la tensione tangenziale mobilitata (τ). Per gestire le disomogeneità del terreno e le geometrie complesse, la zona instabile viene discretizzata in strisce verticali attraverso il metodo dei conci (Pinter, 2024).

All'interno del software GeoStudio il modulo SLOPE/W, nota la geometria del meccanismo di collasso imposto, risolve le equazioni di equilibrio globale, alla traslazione e alla rotazione, attraverso processi iterativi, integrando i carichi gravitazionali, le funzioni di forza e il campo delle pressioni interstiziali, individuando la superficie di rottura fisicamente ammissibile a cui è associato il FS minimo.

3.4 Risultati analisi e confronto

Il presente paragrafo illustra i risultati relativi alle simulazioni di filtrazione e all'analisi di stabilità, confrontandoli con le analisi di riferimento condotte da Pinter (2024).

3.4.1 Risultati analisi di filtrazione

Analogamente alla simulazione di Pinter (2024), dalle analisi di filtrazione in regime stazionario vengono evidenziati i percorsi di flusso (flow path) che si formano all'interno del rilevato e degli strati di fondazione per il modello realizzato in questo studio (Figura 3.6) e per quello realizzato da Pinter (Figura 3.7). Nonostante l'adozione di una geometria del dominio volutamente semplificata, si riscontra una buona analogia tra i flussi d'acqua (indicati dalle frecce blu in Figura 3.6). Si evidenzia come l'acqua attraversi il rilevato arginale, convergendo verso il piede di valle, e il primo strato di fondazione, convergente verso la superficie del piano campagna.

Questo andamento del moto di filtrazione risulta essere pienamente compatibile con la generazione dei fenomeni di "fontanazzi sabbiosi" documentati nell'area di indagine.

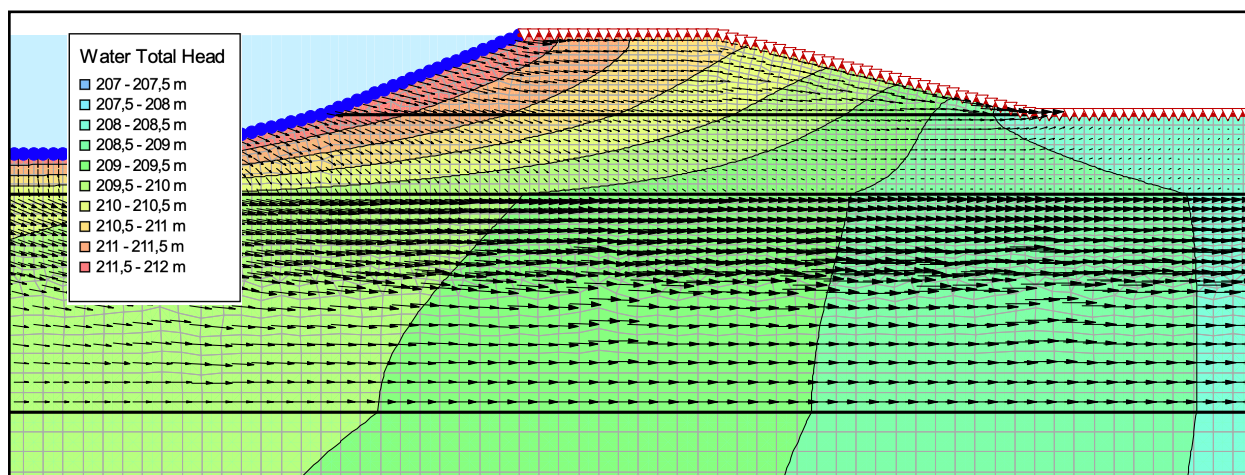


Figura 3.6: Modello numerico con geometria semplificata della sezione di San Michele all'Adige sviluppato in questo studio

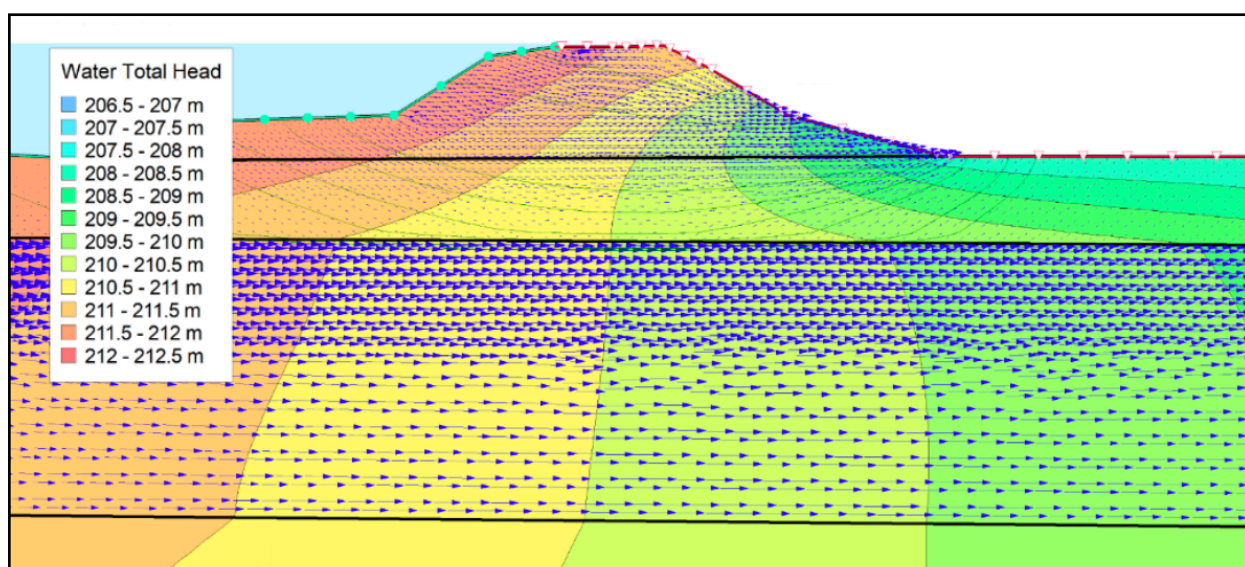


Figura 3.7: Vettori di flusso in condizioni stazionarie, Pinter (2024)

Per quanto riguarda il modello costitutivo assegnato ai materiali, si è deciso di implementare una modulazione in condizioni di completa saturazione ("Saturate Only"). A differenza delle analisi di Pinter (2024), in cui sono state adottate le curve di ritenzione idrica per simulare la parziale saturazione del corpo arginale, questo approccio si allinea con l'obiettivo di validazione semplificata. Tale assunzione trova riscontro nelle stesse conclusioni di Pinter (2024), che osserva come la differenza tra rilevato in regime stazionario e parzialmente saturo non sia sostanziale. Questa strategia infine garantisce maggiore stabilità numerica al calcolo, dimostrando l'affidabilità del software Geostudio. Passando all'analisi dei risultati, occorre fare

una precisazione sulla distribuzione dei carichi idraulici, ben evidenziata dai contour riportati in figura. L'adozione della geometria semplificata fa sì che le condizioni di carico imposte sul contorno risultino leggermente diverse rispetto al modello di riferimento; tale differenza nell'impostazione dei vincoli si traduce, inevitabilmente, in una discrepanza sostanziale tra i due contour esaminati.

3.4.2 Risultati analisi di stabilità

L'analisi di stabilità in condizioni stazionarie con materiali in stato di completa saturazione ha restituito un Fattore di Sicurezza (FS) minimo pari a 1.545 (Figura 3.8). Confrontandolo con i risultati ottenuti da Pinter (2024), che registrava un FS minimo di 0.862 (Figura 3.9), emerge una marcata differenza quantitativa.

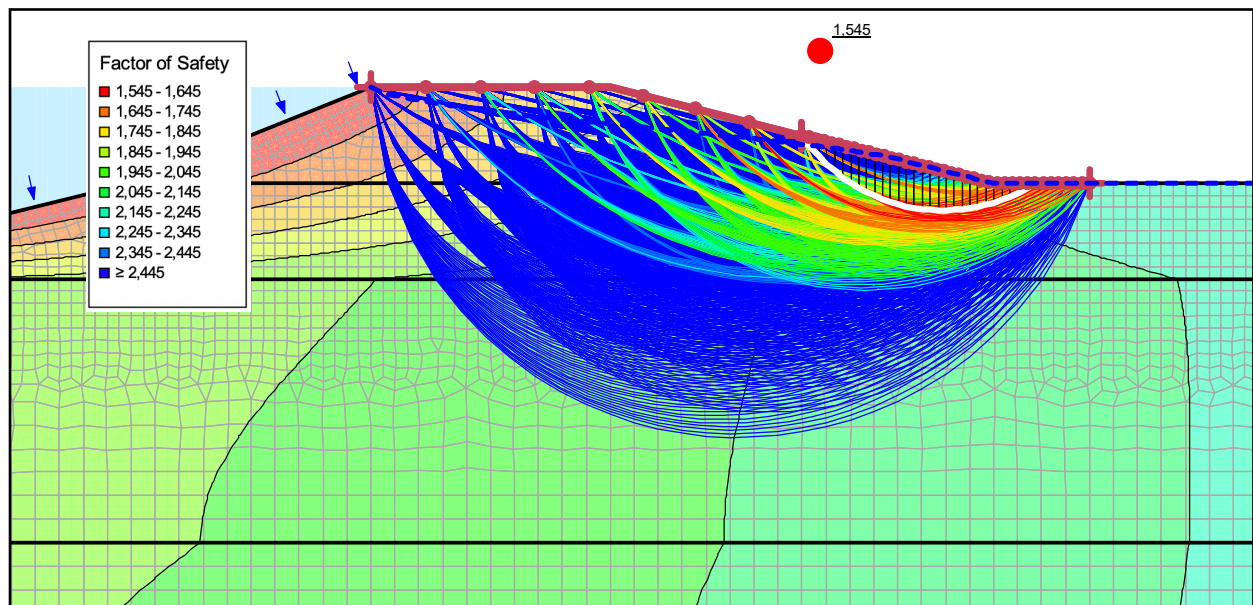


Figura 3.8: Distribuzione del fattore di sicurezza in condizioni stazionarie

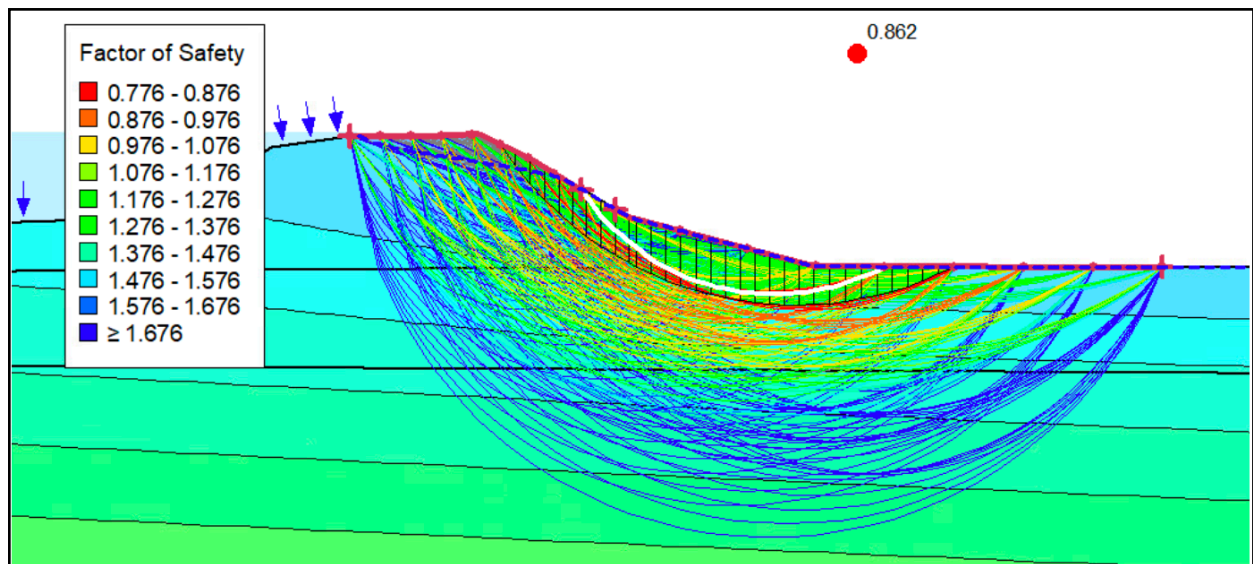


Figura 3.9: Distribuzione del fattore di sicurezza in condizioni stazionare, Pinter (2024)

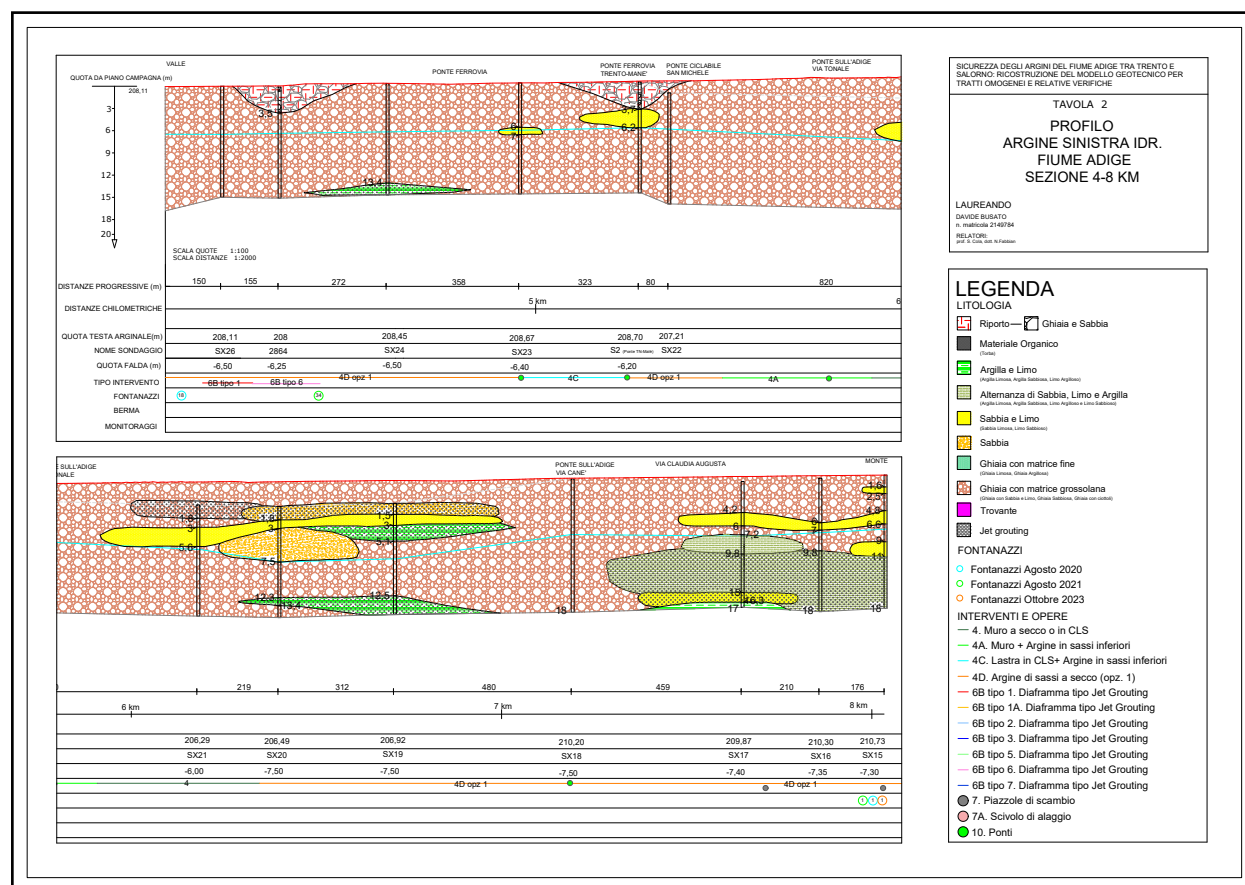
Si è riscontrata tuttavia una coerenza nei meccanismi di rottura, in quanto in entrambi i modelli le superfici critiche si innescano sulla sommità dell'argine per poi approfondirsi all'interno del primo strato di fondazione (Layer 2s), confermando tale livello limo-sabbioso come principale elemento di debolezza del sistema stratigrafico.

La discrepanza individuata nel valore del FS non è imputabile all'assenza della parziale saturazione, il cui effetto si è ritenuto trascurabile sia nelle analisi di filtrazione sia di stabilità, ma rappresenta la corretta risposta computazionale alla geometria e alle condizioni al contorno semplificate introdotte. Il profilo topografico ridotto permette infatti lo sviluppo di superfici di scorrimento più ampie che massimizzano le forze di resistenza globali. Questa rigorosa sensibilità dell'algoritmo alle variazioni topografiche, unita alla corretta replicazione dei percorsi di filtrazione, consente di ritenere il software GeoStudio pienamente validato e affidabile per le successive analisi sull'argine del fiume Adige.

4 MODELLAZIONE NUMERICA DI SEZIONI TIPO

4.1 Scelta del tratto omogeneo A1

Per affrontare la complessità stratigrafica dell'area, Busato (2026) ha ricostruito le sezioni longitudinali di tutti i 24 km di argini (Figura 4.1). Concentrandosi sui primi 15 m di sottosuolo, ha diviso il territorio in tre zone litologiche principali caratterizzate da diverse tipologie di terreno. La Zona Litologica 1 è costituita da una successione stratigrafica omogenea, dominata da ghiaie a matrice grossolana. La Zona Litologica 2 differisce dalla precedente per la presenza all'interno del corpo ghiaioso di uno strato di sabbie limose. La Zona Litologica 3 è il settore a maggiore eterogeneità verticale per la comparsa di profonde alternanze limoso-argillose (Busato, 2026).



omogenei”, creando un sistema pratico di schematizzazione dell’intera infrastruttura arginale (Figura 2.1).

Basandosi su questa suddivisione, per le analisi numeriche di questa tesi si è scelto di indagare il comportamento del tratto omogeneo A1. Questa sezione rappresenta perfettamente la Zona 1, essendo caratterizzata quasi interamente da depositi di ghiaia grossolana (Figura 4.2). Rispetto allo studio di Busato (2026), tuttavia, è stata fatta una precisa scelta metodologica. Anche se il tratto A1 originale comprende opere di difesa come i rivestimenti antierosione (4C e 4D), le simulazioni condotte in questo lavoro hanno trascurato la presenza di questi materiali, considerando questa ipotesi a vantaggio di sicurezza. Di conseguenza, i modelli sviluppati in GeoStudio rappresentano l'argine e la fondazione nel loro stato di fatto naturale, senza inserire alcuna opera di difesa strutturale. Questa semplificazione ha permesso di valutare, a favore di sicurezza, la tenuta idraulica e meccanica del solo rilevato in terra, osservandone la risposta intrinseca alle condizioni di piena. Inoltre, si è scelto di considerare da Busato (2026) solo la geometria del tratto A1, mentre la stratigrafia è stata studiata partendo dai sondaggi considerati al Paragrafo 2.5.

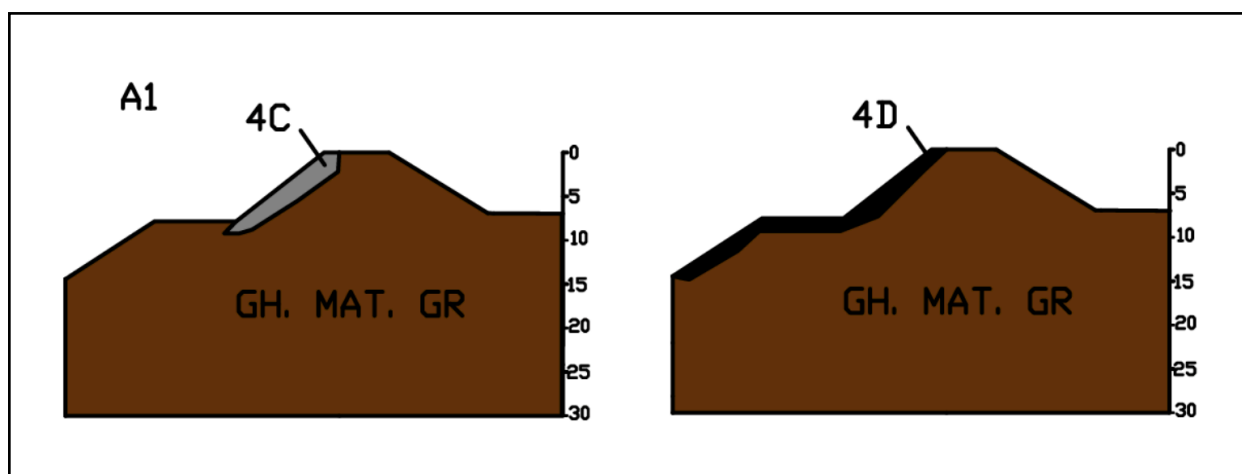


Figura 4.2: Schema sintetizzato della geometria considerata per il tratto A1 in conformazione 4C o 4D, Busato (2026)

4.2 Definizione meccanica e idraulica del tratto omogeneo A1

Applicando la procedura descritta nel Paragrafo 2.3, l'analisi dei dati geognostici è stata condotta su tutti i sondaggi disponibili per ricavare le caratteristiche meccaniche e idrauliche del sottosuolo. Per ogni strato sono stati definiti i principali parametri di calcolo: la conducibilità idraulica (k), la porosità (n), la compressibilità ricavata (m_v), l'angolo di resistenza al taglio (ϕ')

e la coesione (c'). Il peso dell'unità di volume (γ) è stato dedotto dalla letteratura per terreni analoghi, attingendo nello specifico ai lavori di Pinter (2024) e Busato (2026). È opportuno ribadire che, limitatamente ai terreni più superficiali per i quali non erano disponibili prove Lefranc dirette, anche il coefficiente di conducibilità idraulica è stato stimato tramite un confronto litologico con i materiali già caratterizzati nei due studi appena citati. Dall'analisi dei sondaggi, è stato riscontrato che le sezioni non hanno una stratigrafia omogenea dal punto di vista geotecnico, come invece semplificato da Busato (2026).

Sono state dunque considerate due sezioni tipo con caratteristiche medie rappresentative della sponda destra e di quella sinistra. Entrambe le sezioni sono state successivamente implementate e modellate nel software GeoStudio con l'obiettivo di eseguire le verifiche di stabilità lato campagna e calcolare in automatico il Fattore di Sicurezza minimo dell'opera.

A integrazione della modellazione dei profili medi, le analisi numeriche sono state estese anche ad alcune sezioni che evidenziavano delle singolarità stratigrafiche, considerate critiche. Nello specifico, sono stati analizzati singolarmente i tratti in corrispondenza dei sondaggi SX24, SX27 e S3289, i quali presentavano un andamento litologico anomalo e non riconducibile alle geometrie medie elaborate per le due sponde, rendendo necessaria una valutazione separata della loro stabilità.

Nelle tabelle riportate di seguito vengono presentati nel dettaglio i profili medi adottati per la sponda sinistra (Tabella 4.1) e destra (Tabella 4.2), con le rispettive deviazioni standard dei parametri di sponda sinistra (Tabella 4.2) e destra (Tabella 4.3). Oltre ai parametri idraulici e meccanici appena descritti, nelle tabelle sono riportati i principali dati riguardanti la geometria dei profili stratigrafici del sottosuolo: il range di profondità di inizio e fine strato (prof), gli spessori medi (spess), la quota sommitale dell'argine (q) e l'individuazione della falda freatica (ff). Al fine di snellire la struttura delle tabelle, a ogni orizzonte litologico è stata associata una lettera di riferimento. Per i profili della sponda sinistra, la nomenclatura adottata prevede la lettera A per la ghiaia ciottolosa e sabbiosa di tipo angolare (colore grigio), la lettera B per i depositi di limo e sabbia ghiaiosa (grigio-marrone), la lettera C per la ghiaia ciottolosa e sabbiosa di tipo poligenico e arrotondato (marrone-grigio) e la lettera D per le sabbie da ghiaiose a fortemente ghiaiose, debolmente ciottolose, poligeniche e arrotondate (grigio-marrone). Per quanto riguarda i profili della sponda destra, la classificazione prevede la lettera A' per il riporto

arginale (ghiaia sabbioso-limosa da poligenica a carbonatica), la lettera C' per i depositi alluvionali (ghiaia sabbioso-limosa poligenica con lenti di ciottoli, o ghiaia poligenica con sabbia e limo) e la lettera E per identificare un ulteriore strato di riporto costituito da sabbia fine marrone, ghiaiosa e limosa, con inclusi organici e frustoli di probabile origine alluvionale.

Tabella 4.1: Sintesi dei parametri medi fisico-meccanici e dei dati geometrici, sponda sinistra; A=ghiaia ciottolosa-sabbiosa angolare, B=depositi limo-sabbia ghiaiosa, C=ghiaia ciottolosa-sabbiosa poligenica, D=sabbie ghiaiose

Strato	k (m/s)	n	mv (1/kPa)	γ (kN/m ³)	c'	ϕ' (°)	prof (m)	spess (m)	q (m)	ff (m)
A	7,3E-05	0,33	4,1E-05	19,50	-	35,12	0 - 6	5,50	208,64	-6,30
B	8,3E-06	0,35	2,3E-04	20,00	-	28,87	4,6 - 7 12 - 25	4,68		
C	1,6E-03	0,32	2,9E-05	21,00	-	35,65	5,4 - 20	11,40		
D	1,3E-04	0,42	8,5E-05	20,00	-	33,84	16,1 - 25	6,15		

Tabella 4.2: Deviazione standard dei parametri medi fisico-meccanici, sponda sinistra; A=ghiaia ciottolosa-sabbiosa angolare, B=depositi limo-sabbia ghiaiosa, C=ghiaia ciottolosa-sabbiosa poligenica, D=sabbie ghiaiose

Strato	dev st k	dev st n	dev st mv	dev st ϕ'
A	8,2E-05	3,8E+00	4,1E-05	2,31
B	9,4E-06	3,4E+00	2,3E-04	7
C	2,6E-03	5,7E+00	2,9E-05	3,16
D	1,9E-04	2,9E+00	8,5E-05	-

Tabella 4.3: Sintesi dei parametri medi fisico-meccanici e dei dati geometrici, sponda destra; A'=riporto arginale ghiaia-sabbia, C'=ghiaia sabbioso-limosa poligenica con lenti di ciottoli, E=sabbia fine marrone

Strato	k (m/s)	n	mv (1/kPa)	γ (kN/m ³)	c'	ϕ' (°)	prof (m)	spess (m)	q (m)	ff (m)
A'	1,8E-04	0,34	3,8E-05	19,50	-	35,47	0 - 7	4,95	208,88	-6,18
C'	2,7E-05	0,34	2,8E-05	21,00	-	36,77	3,8 - 15	9,55		
E	3,0E-06	0,35	5,3E-05	19,50	-	34,28	2 - 4	2,00		

Tabella 4.4: Deviazione standard dei parametri medi fisico meccanici, sponda destra; A'=riporto arginale ghiaia-sabbia, C'=ghiaia sabbioso-limosa poligenica con lenti di ciottoli, E=sabbia fine marrone

Strato	dev st k	dev st n	dev st mv	dev st ϕ'
A'	3,7E-05	2,5E+00	1,1E-05	3,80
C'	4,8E-05	2,1E+00	1,4E-05	3,2
E	-	-	-	-

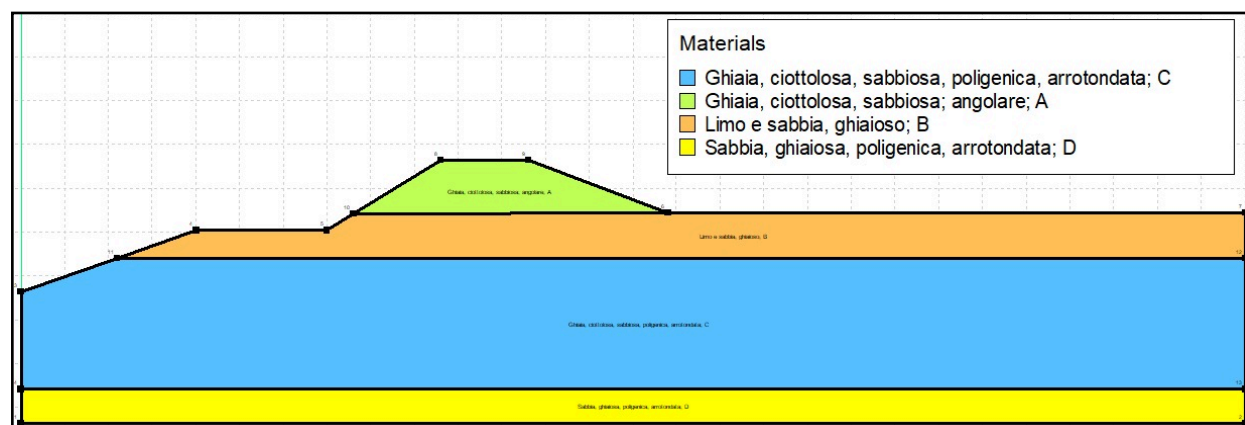
4.3 Geometria e stratigrafia delle sezioni considerate del tratto A1

Per la costruzione del dominio di calcolo, a differenza degli approcci basati su ricostruzioni topografiche sito-specifiche (Busato, 2026), nel presente elaborato si è scelto di adottare una geometria unificata per tutte e cinque le sezioni analizzate. Il profilo geometrico di riferimento, utilizzato per modellare sia la sponda destra che quella sinistra, corrisponde a quello illustrato in Figura 4.2.

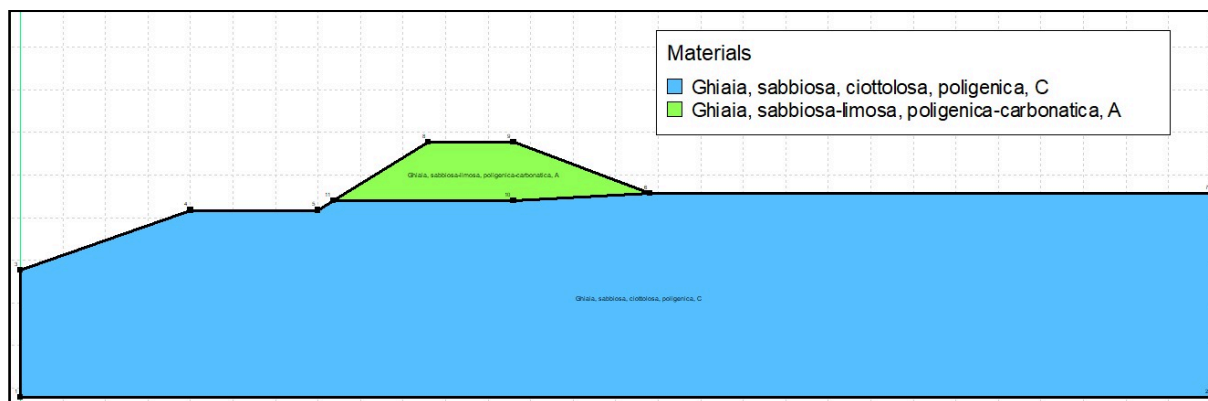
Questa schematizzazione è stata dettata da due motivazioni principali. Da un lato, la mancanza di dati topografici e stratigrafici di estremo dettaglio non ha permesso di definire profili geometrici univoci e isolati in corrispondenza dei sondaggi anomali (SX24, SX27 e S3289). Dall'altro, l'adozione di una singola sezione tipo risponde al preciso obiettivo metodologico di sfruttare i parametri geotecnici medi per valutare il comportamento globale dell'intero tratto omogeneo A1, restituendo così un modello valido per l'intera tratta di riferimento.

Il modello numerico è stato discretizzato con una griglia a elementi quadrati e triangolari. Per garantire elevata precisione nelle zone più critiche, agli strati superficiali del rilevato e della fondazione è stata assegnata una lunghezza degli elementi di 0,5 m. Per gli strati geologici più profondi si è adottata una maglia di 1 m, ottimizzando così i tempi di calcolo senza compromettere l'affidabilità del modello.

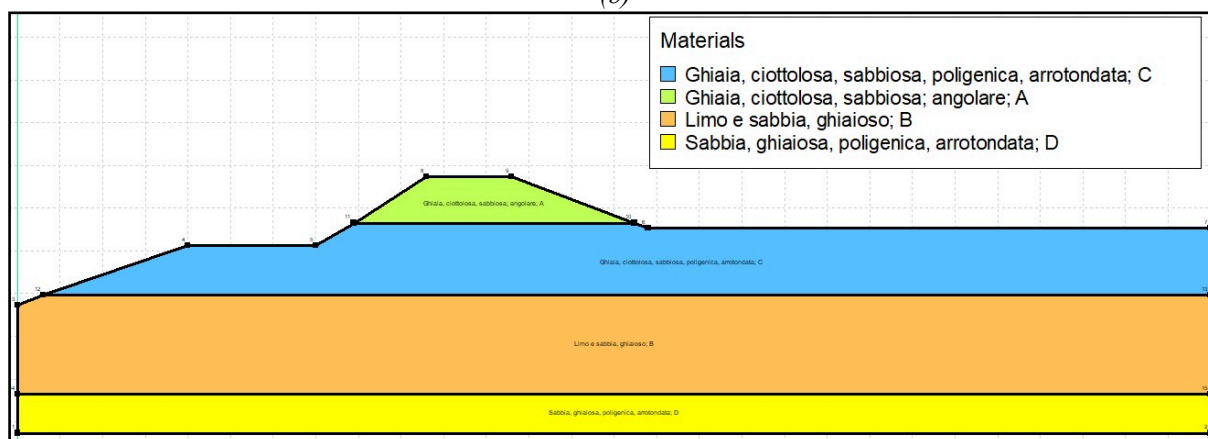
Nelle figure seguenti sono illustrati i profili stratigrafici delle sezioni, completi dell'assegnazione dei materiali le cui proprietà meccaniche e idrauliche utilizzate sono quelle medie elencate nelle Tabelle 4.1 e 4.2.



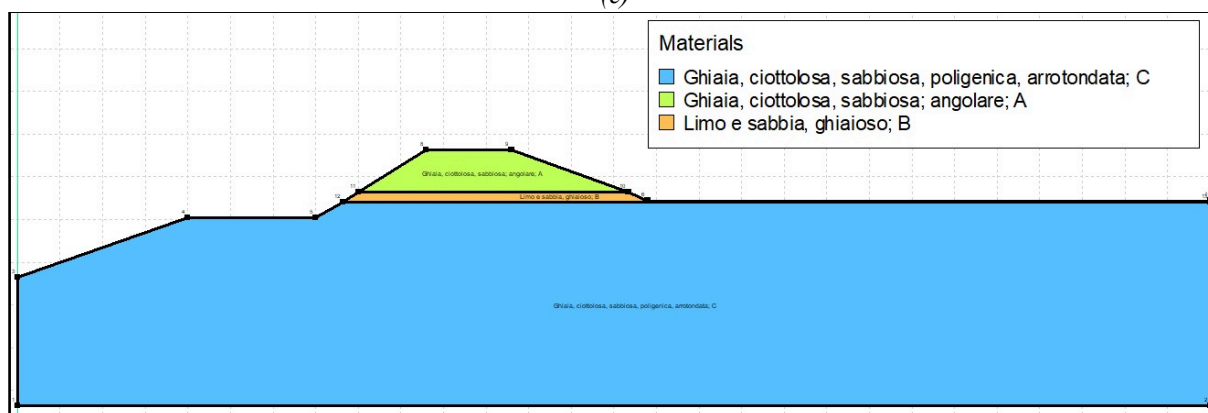
(a)



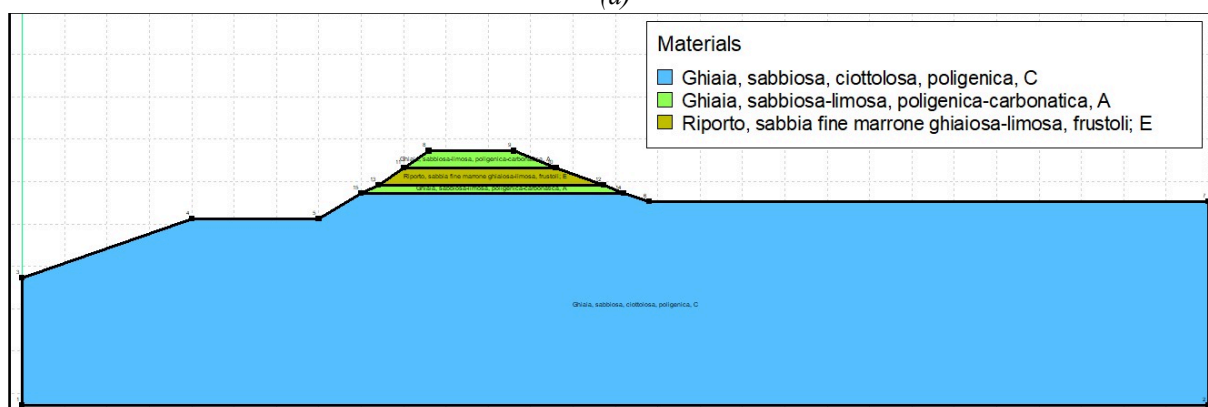
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.3: Geometria di sezione: (a) sezione media sx, (b) sezione media dx, (c) sondaggio SX24, (d) sondaggio SX27, (e) sondaggio S3289

4.4 Condizioni al contorno

Come illustrato al Paragrafo 3.3, a cui si rimanda per l'inquadramento teorico, l'impostazione di adeguate condizioni al contorno costituisce un passaggio fondamentale per l'affidabilità della modellazione numerica. Per ragioni di sintesi, si riportano di seguito direttamente le tabelle riepilogative con le condizioni al contorno assegnate ai modelli di filtrazione e stabilità per tutte le sezioni analizzate.

4.4.1 Analisi di filtrazione in condizioni stazionarie

Tabella 4.5: Condizioni al contorno delle analisi di filtrazione in condizioni stazionarie

Sezione	Fiume in Piena (m)	Falda lato campagna (m)
Media SX	208,14	202,30
Media DX	208,88	202,70
Sondaggio SX24	208,64	202,24
Sondaggio SX27	208,14	201,94
Sondaggio S3289	208,55	203,04

La superficie di Potenziale d'Infiltrazione è stata impostata in tutte le simulazioni come costante e pari a 0 m/s.

Un esempio di geometria della sezione, completa delle rispettive condizioni al contorno, è illustrato in Figura 4.4.

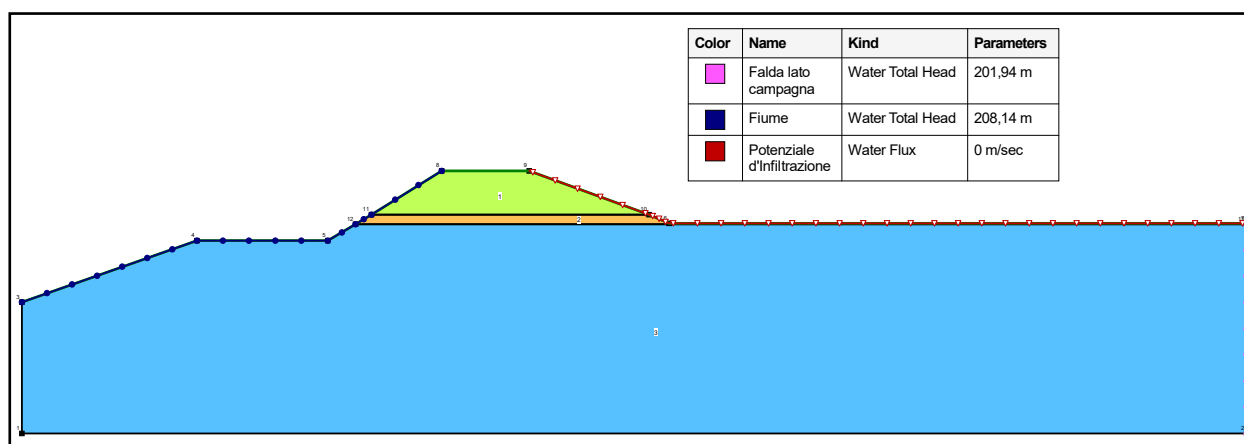


Figura 4.4: Condizioni al contorno delle analisi di filtrazione in condizioni stazionarie, sezione sondaggio SX27

4.4.2 Analisi di stabilità

Le verifiche di stabilità globale sono state eseguite con il metodo di Morgenstern e Price (1965) sui parametri descritti al Paragrafo 4.2. La definizione geometrica del problema ha previsto l'assegnazione di specifici range di ingresso e uscita per le superfici di rottura (Tabella 4.6 e Figura 4.5). Per evitare che il software restituisse cinematismi di scivolamento superficiali, di scarso interesse per la stabilità complessiva del rilevato arginale, la profondità minima delle superfici di scorrimento indagate è stata limitata a un intervallo variabile tra 0,3 m e 1 m.

Tabella 4.6: Definizione delle aree di ingresso e uscita

Sezione	Range	Coordinata Iniziale (X; Y)	Coordinata Finale (X; Y)
Media SX	Ingresso	48 m; 208,14 m	74 m; 202,14 m
	Uscita	74 m; 202,14 m	82 m; 202, 14 m
Media DX	Ingresso	48 m; 208,88 m	71,01 m; 204 m
	Uscita	73,68 m; 203 m	83 m; 202,88 m
Sondaggio SX24	Ingresso	48,03 m; 208,64 m	72 m; 203,40 m
	Uscita	74 m; 202,64 m	82 m; 202, 64 m
Sondaggio SX27	Ingresso	48,08 m; 208,14 m	65 m; 205,59 m
	Uscita	65 m; 205,59 m	80 m; 202,14 m
Sondaggio S3289	Ingresso	48,06 m; 208,55 m	71 m; 203,55 m
	Uscita	72,65 m; 203 m	83 m; 202,55 m

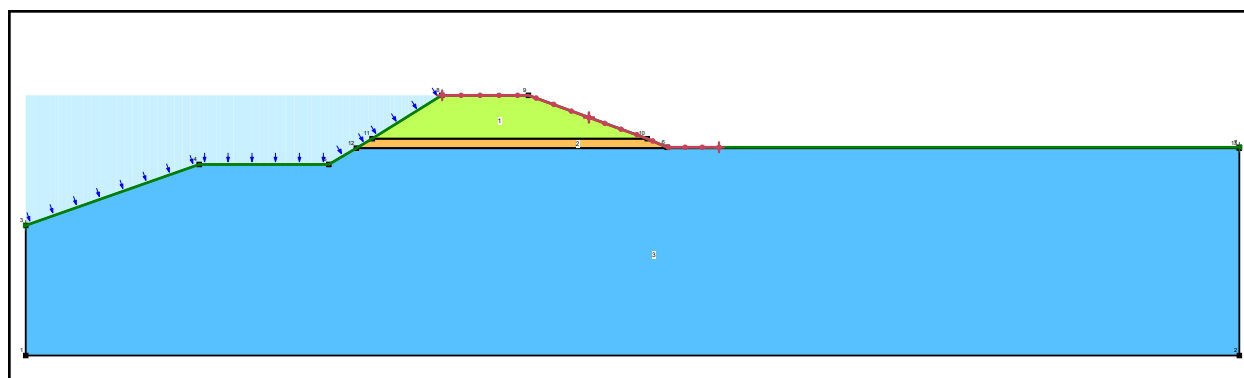


Figura 4.5: Rilevato arginale per l'analisi di stabilità con superficie di "ingresso" e "uscita", sezione SX27

4.5 Risultati

Il presente Paragrafo espone i risultati delle simulazioni di filtrazione e della analisi di stabilità condotte sui modelli numerici definiti nei paragrafi precedenti. Prendendo come riferimento la metodologia delle indagini pregresse svolte sullo stesso sistema arginale (Pinter, 2024; Busato, 2026), lo studio si differenzia concentrandosi sulla valutazione degli scenari di massima criticità. Con questo scopo, le analisi di infiltrazione sono state svolte trascurando gli effetti della parziale saturazione del corpo arginale e imponendo un tirante idraulico corrispondente alla sommità dell'argine per tutte le sezioni studiate.

Va precisato che un'analisi in regime stazionario con il fiume al colmo non rispecchia fedelmente le reali condizioni che si verificano in un argine durante il transito di un'onda di piena, per quanto questa possa essere di prolungata entità (Pinter, 2024). Tuttavia, questa assunzione fortemente cautelativa è stata adottata per spingere il modello verso lo scenario peggiore possibile e per poterne testare i limiti di sicurezza.

A seguito delle simulazioni idrauliche in SEEP/W, la distribuzione delle pressioni neutre è stata impiegata come input per il calcolo del Fattore di Sicurezza minimo. Le analisi all'equilibrio limite sono state quindi condotte in SLOPE/W tramite il metodo all'equilibrio limite di Morgenstern e Price (1965), già descritto a livello teorico nel Paragrafo 3.3.2.

4.6 Risultati delle analisi di filtrazione

Le analisi di filtrazione sono state eseguite per valutare la distribuzione del carico idraulico totale (*Water Total Head*), la direzione del moto di filtrazione, l'entità dei gradienti idraulici e le pressioni interstiziali da impiegare nelle verifiche di stabilità. Nei grafici, il contour del carico totale (somma del carico geodetico e piezometrico) è affiancato ai vettori di flusso, i quali consentono di tracciare le direzioni preferenziali dell'acqua e individuare le zone di concentrazione del gradiente. Da questi risultati emerge una marcata differenza di comportamento tra le sezioni medie e i profili interessati da eterogeneità stratigrafiche.

Nei modelli rappresentativi delle sezioni medie della sponda sinistra (Figura 4.6) e destra (Figura 4.7), si osserva globalmente una dissipazione dell'energia da monte verso il piano campagna di valle, con carichi massimi nell'ordine dei 208-209 m che decadono fino a 202-203 m. Se nella sponda destra questo processo avviene in modo omogeneo, la sezione media sinistra presenta

una criticità specifica legata al sottosuolo. In essa si osserva infatti un livello di fondazione molto più permeabile degli altri; qualora questo strato dovesse spingersi fino ad affiorare nelle vicinanze del piede dell'argine, provocherebbe un pericoloso innalzamento dei gradienti locali, portando a potenziali problemi di instabilità per sifonamento e alla formazione di fontanazzi.

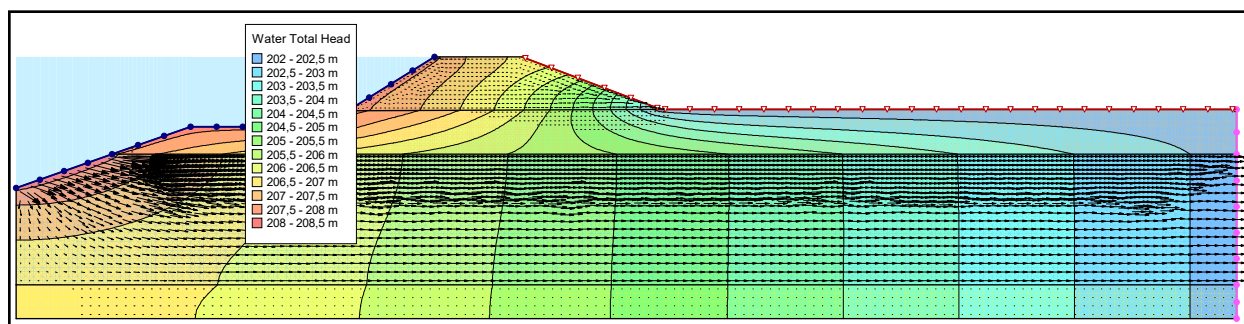


Figura 4.6: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione media sinistra

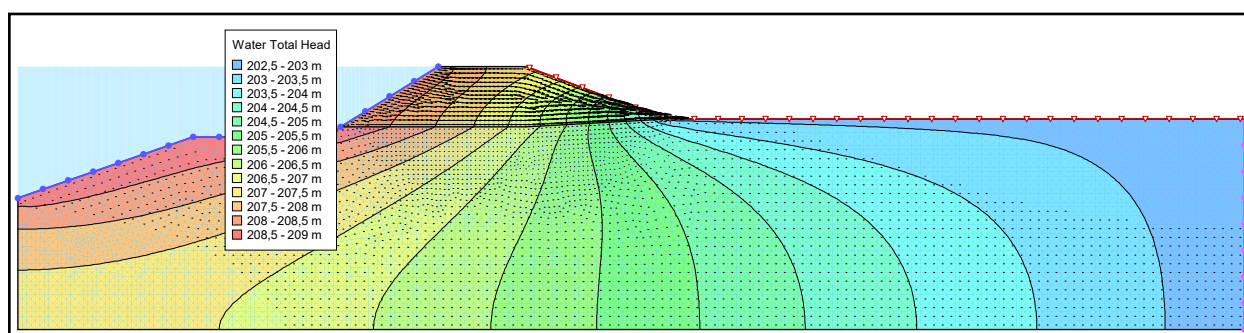


Figura 4.7: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione media destra

Questa regolarità del comportamento del moto di filtrazione subisce una drastica alterazione con l'implementazione delle stratigrafie sito-specifiche.

Sulla sponda sinistra, la sezione relativa al sondaggio SX24 (Figura 4.8) mostra sempre una distribuzione del carico idraulico totale compresa tra circa 202-209 m. La stratigrafia locale tuttavia modifica l'andamento delle linee equipotenziali rispetto alla sezione media sinistra, evidenziando una diversa redistribuzione del flusso all'interno del sottosuolo e una differente risposta idraulica dei terreni interessati. Si può notare questo tipo di comportamento anche nella sezione in corrispondenza del sondaggio SX27 (Figura 4.9), in cui la distribuzione del carico idraulico totale presenta valori compresi tra circa 201,5 m e 208,5 m. Lo strato a maggiore permeabilità anche in questo caso determina una modifica più marcata della distribuzione del carico idraulico. L'analisi vettoriale della velocità mostra un marcato addensamento orizzontale dei flussi idrici all'interno di specifici livelli stratigrafici del rilevato, i quali agiscono come condotti preferenziali ad alta permeabilità. La presenza di uno strato molto permeabile subito

sotto il rilevato genera elevati gradienti locali e impedisce la dissipazione delle pressioni neutre, poiché l'acqua tende a bypassare i livelli stratigrafici meno permeabili.

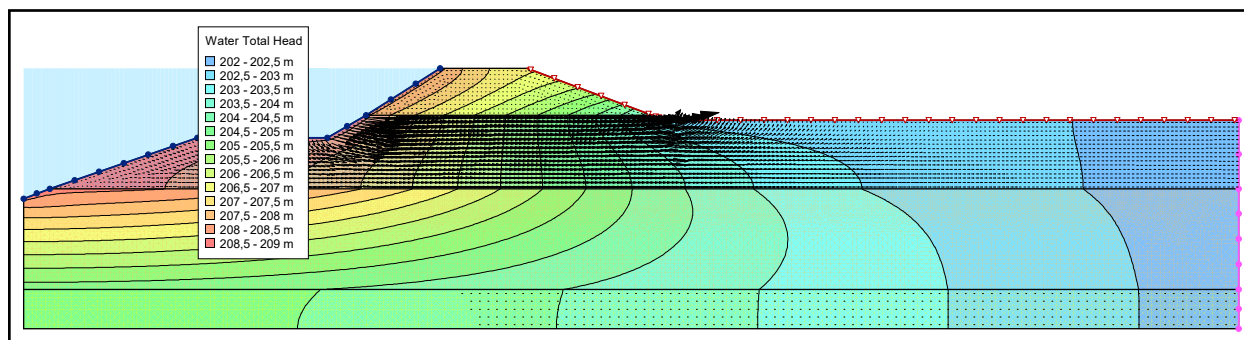


Figura 4.8: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione SX24

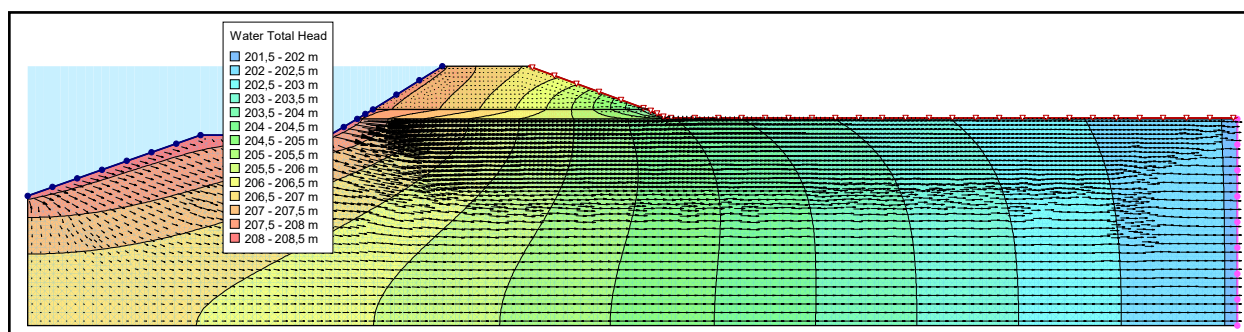


Figura 4.9: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione SX27

Una criticità affine emerge sulla sponda destra nella sezione corrispondente al sondaggio S3289 (Figura 4.10). Il confronto con la sezione media destra evidenzia che la locale presenza di uno strato altamente permeabile determina una diversa distribuzione dei gradienti idraulici, senza produrre effetti peggiorativi sulla stabilità globale della sponda. Tuttavia, vista la posizione dello strato permeabile, elevate velocità del flusso in uscita potrebbero innescare fenomeni di erosione nel corpo arginale e delle venute d'acqua lato campagna.

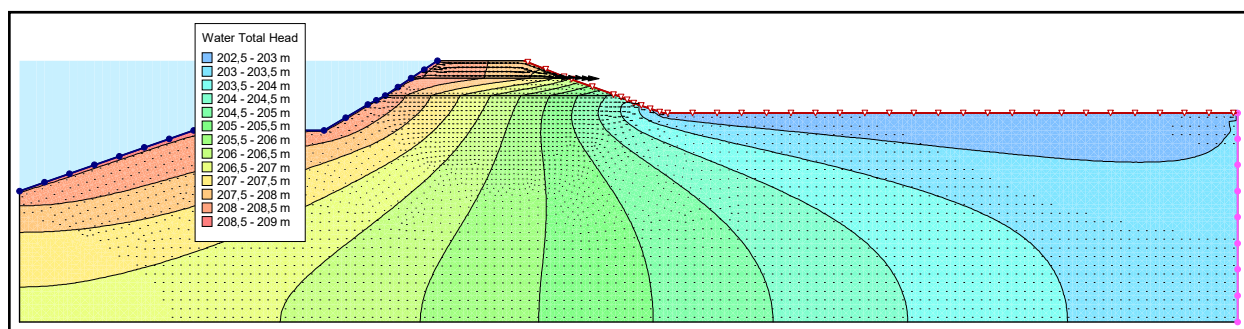


Figura 4.10: Risultato delle analisi di filtrazione in termini di water total head, sezione S3289

In sintesi, il confronto conferma che, se da un lato le sezioni medie rendono l'idea di come mediamente avviene il fenomeno di filtrazione lungo il tratto arginale considerato, dall'altro le lenti e gli orizzonti ad alta permeabilità rilevati dai sondaggi agiscono come vie di deflusso preferenziali, concentrando e accelerando il moto dell'acqua. Questa concentrazione focalizza la dissipazione dell'energia in determinati punti, innalza severamente i gradienti idraulici locali e accresce in modo significativo la suscettibilità dell'opera a fenomeni di instabilità e di erosione.

4.7 Risultati delle analisi di stabilità in termini di Pore Water Pressure

L'integrazione tra l'analisi dei moti di filtrazione e quella geomeccanica evidenzia in modo diretto come la distribuzione delle pressioni neutre (*Pore Water Pressure*) governi lo sviluppo delle superfici di scorrimento e influenzi il Fattore di Sicurezza (FS) dell'argine.

Nella sezione media sinistra, le pressioni interstiziali mostrano un incremento progressivo con la profondità, raggiungendo valori intorno ai 40 kPa in prossimità del paramento lato campagna (Figura 4.11). Questo assetto idraulico riduce marcatamente le tensioni efficaci in prossimità della zona di uscita. L'azione combinata di queste pressioni e delle resistenze degli strati A ($\phi'=35,12^\circ$) e B ($\phi'=28,87^\circ$) innesca una superficie di rottura critica con FS pari a 0,784, evidenziando una grave instabilità strutturale conseguente all'ipotesi molto cautelativa imposta di coesione nulla.

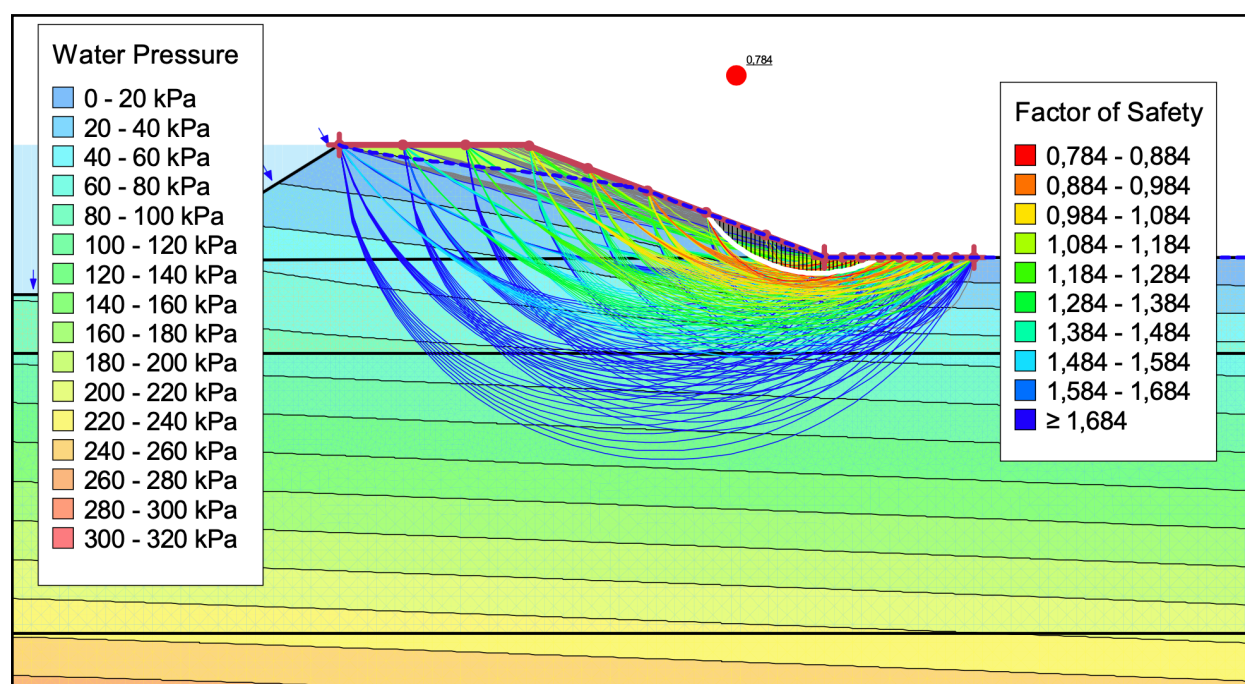


Figura 4.11: Spezzone del risultato delle analisi di stabilità, sezione media sinistra

Passando alla sezione media destra (Figura 4.12), l'analisi evidenzia che le pressioni neutre in corrispondenza del piede dell'argine di valle – area cruciale in cui emerge la superficie di scorrimento – si mantengono su valori contenuti, nell'ordine dei 20-30 kPa. Il meccanismo di rottura si sviluppa principalmente all'interno dello strato superficiale A', caratterizzato da un buon angolo di attrito pari a $35,47^\circ$ e coesione nulla. Questo limitato accumulo di pressioni in uscita, combinato alla resistenza offerta dal materiale, determina una condizione di stabilità sensibilmente migliore rispetto alla sezione media sinistra, restituendo un Fattore di Sicurezza pari a 1,023. Tuttavia, essendo tale valore estremamente prossimo all'unità, l'opera si trova in uno stato di equilibrio limite che richiederà specifica attenzione nella progettazione di futuri interventi di miglioramento.

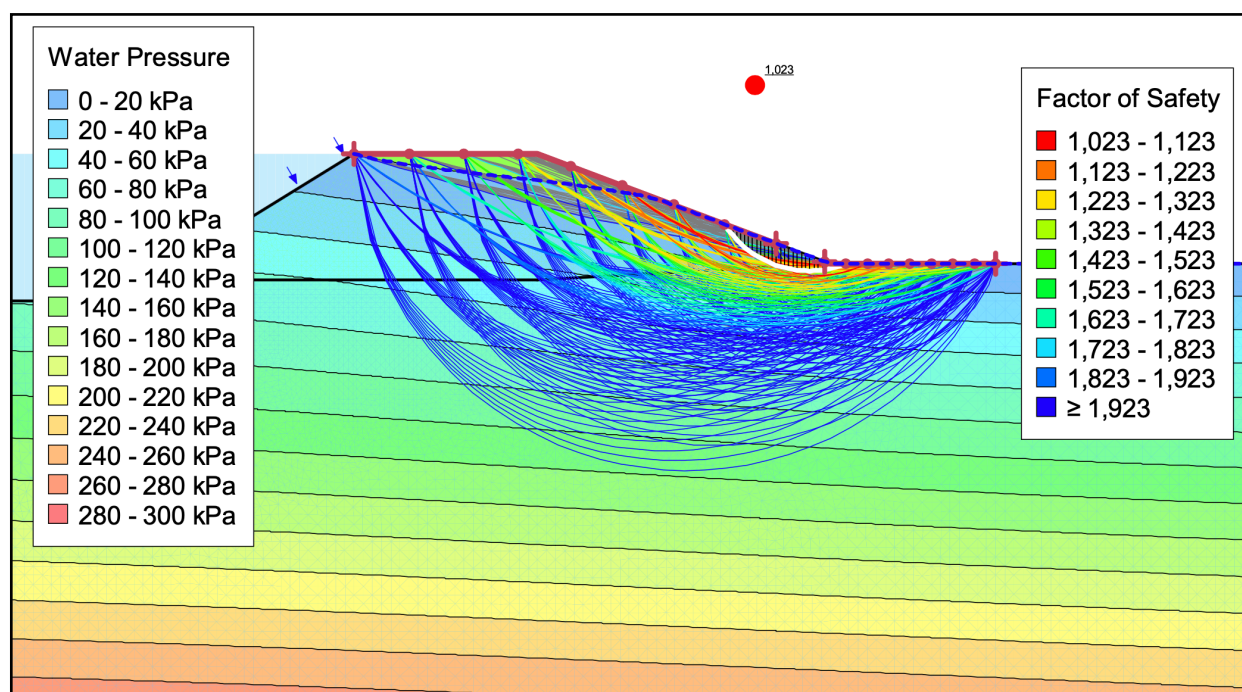


Figura 4.12: Spezzone del risultato delle analisi di stabilità, sezione media destra

Nel sondaggio SX24 in sponda sinistra (Figura 4.13), la stabilità del versante beneficia di un'ottima interazione tra idrodinamica e geomeccanica. Al piede dell'argine le pressioni neutre si attestano su valori contenuti, prossimi ai 20 kPa, limitando il decadimento delle tensioni efficaci in uscita. Di conseguenza, a differenza delle sezioni più vulnerabili, la superficie di scorrimento che attraversa lo strato superficiale A ($\phi'=35,12^\circ$) e lo strato C ($\phi'=35,65^\circ$) può contare sulle elevate resistenze al taglio intrinseche di questi materiali. Questa combinazione restituisce un FS pari a 1,197, il valore migliore tra tutti i casi analizzati.

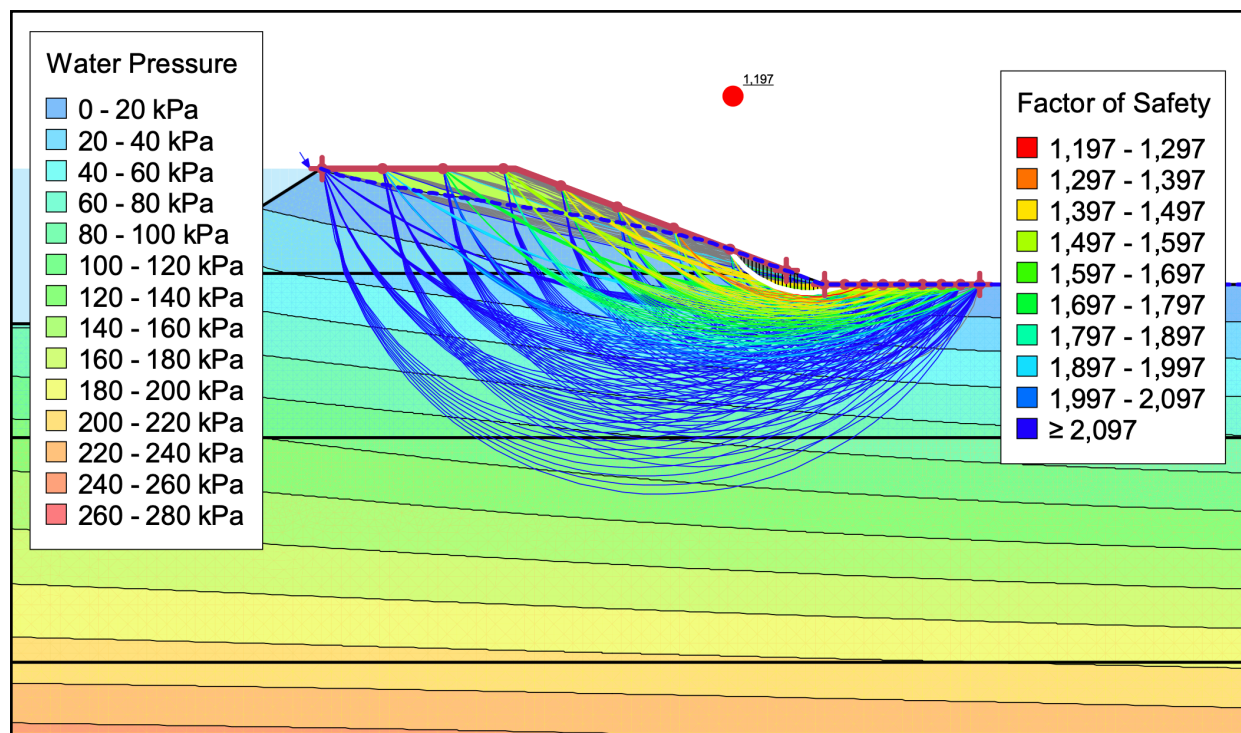


Figura 4.13: Spezzone del risultato delle analisi di stabilità, sezione SX24

Il sondaggio SX27 in sponda sinistra (Figura 4.14) evidenzia la massima vulnerabilità strutturale tra le sezioni indagate, registrando il Fattore di Sicurezza minimo assoluto pari a 0,548. Questa criticità è imputabile in primo luogo al livello di fuoriuscita di falda molto più elevato rispetto agli altri profili indagati, da cui conseguono maggiori pressioni neutre in corrispondenza del piede arginale di valle (20-40 kPa). L'effetto combinato dell'elevata linea di filtrazione in uscita e delle deboli caratteristiche geomeccaniche dei terreni con angoli di attrito (ϕ') di $35,12^\circ$ per lo strato superficiale e $28,87^\circ$ per il secondo strato, abbatte severamente le resistenze al taglio. Ne consegue lo sviluppo di una superficie di scivolamento estesa e profonda, che compromette la stabilità globale del rilevato.

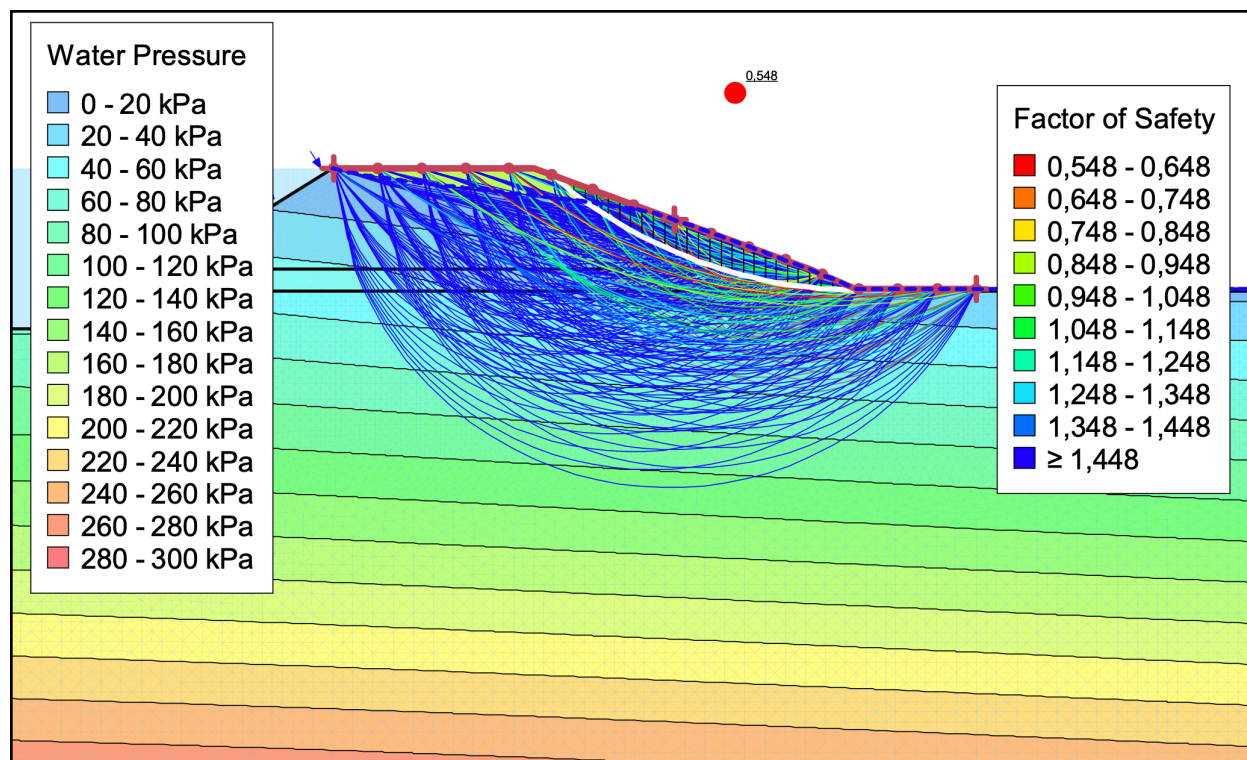


Figura 4.14: Spezzione del risultato di analisi di stabilità, sezione SX27

Infine, per il sondaggio S3289 in sponda destra (Figura 4.15), l'analisi del meccanismo di collasso evidenzia pressioni neutre al piede dell'argine di valle contenute, attestandosi su valori di circa 20 kPa. Assieme al sondaggio SX24, questa sezione presenta il miglior comportamento in merito alla distribuzione dei carichi idraulici. Inoltre, il limitato innalzamento delle pressioni neutre permette di sfruttare appieno la buona resistenza al taglio dei materiali intercettati (caratterizzati da angoli di attrito ϕ' di 35,47° e 34,28°). L'influenza di questi parametri dimostra che la presenza di uno strato molto permeabile non induce un drastico crollo della stabilità. Il calcolo restituisce infatti un Fattore di Sicurezza pari a 1,156. Tuttavia, pur rappresentando uno dei valori più alti dell'intera campagna, tale risultato rimane comunque prossimo all'unità, indicando margini di sicurezza residui assai ridotti per l'opera.

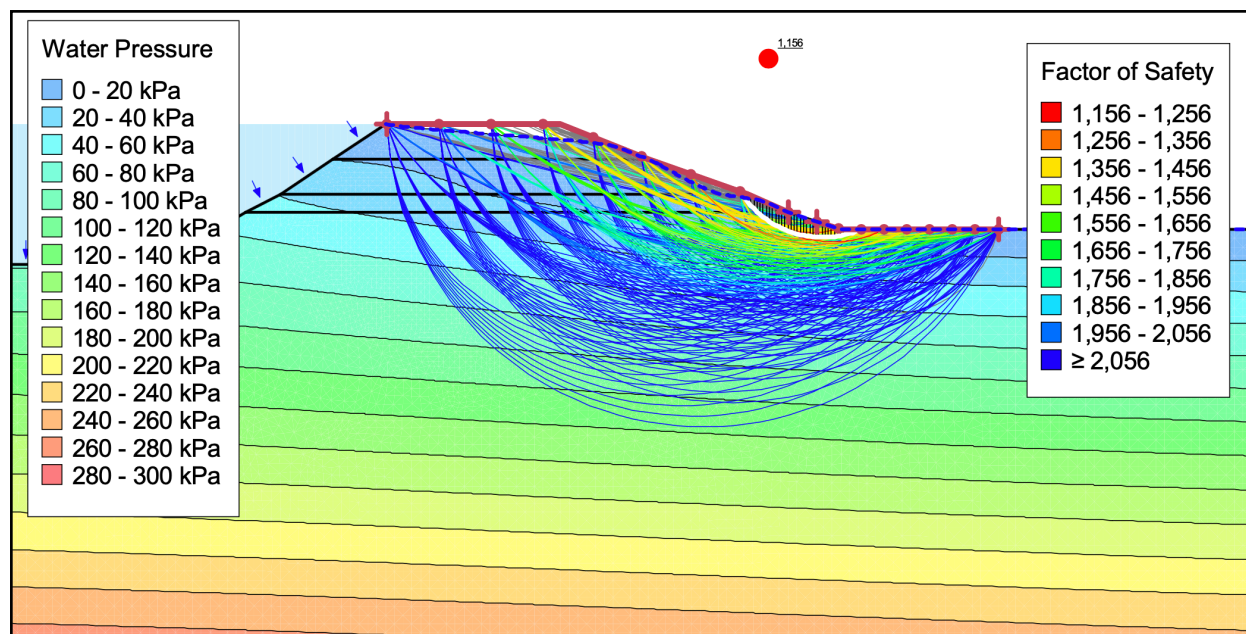


Figura 4.15: Spezzone del risultato di analisi di stabilità, sezione S3289

È opportuno fare una precisazione sui Fattori di Sicurezza ottenuti, che risultano globalmente bassi e spesso prossimi all'unità (Tabella 4.7). Questo esito è legato a precise scelte metodologiche fortemente cautelative. In primo luogo, considerata la natura grossolana dei terreni indagati, si è scelto di azzerare il parametro della coesione. In secondo luogo, per simulare lo scenario più critico per l'infrastruttura, si è trascurato il contributo stabilizzante offerto dalla parziale saturazione. Tale approccio conservativo è stato dettato anche dalle tempistiche dello studio, che non hanno permesso di approfondire modelli con coesione non nulla. È fondamentale inoltre ricordare che l'estensione delle superfici di rottura dipende profondamente da questi parametri, infatti più lo scorrimento si spinge in profondità verso il piano campagna, più la condizione di instabilità dell'opera risulta severa.

Tabella 4.7: Sintesi dei valori degli FS ottenuti per ogni sezione

Sezione analizzata	Fattore di Sicurezza (FS)
Media SX	0,784
Media DX	1,023
Sondaggio SX24	1,197
Sondaggio SX27	0,548
Sondaggio S3289	1,156

5 CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è posto come obiettivo la valutazione della stabilità strutturale e dei meccanismi di filtrazione che interessano un tratto arginale del fiume Adige, situato tra i comuni di Zambana e Salorno. Attraverso l'impiego del modello di calcolo GeoStudio sono state sviluppate analisi numeriche di filtrazione e verifiche di stabilità all'equilibrio limite, applicate a diverse stratigrafie rappresentative del tratto omogeneo identificato come A1. Per testare i margini di sicurezza dell'opera, le simulazioni sono state condotte imponendo lo scenario idraulico più critico possibile, ovvero un regime stazionario con i materiali in stato di completa saturazione e il livello del fiume spinto fino alla sommità arginale.

I risultati dell'analisi dei moti di filtrazione hanno confermato un comportamento idraulico condiviso, in quanto nelle sezioni medie di entrambe le sponde e in quelle sito-specifiche l'acqua si canalizza sempre negli strati più permeabili. Nello specifico, l'introduzione dei profili stratigrafici in corrispondenza dei sondaggi SX24, SX27 e S3289 ha ribadito come la presenza di questi strati ad alta permeabilità generi costantemente delle vie di deflusso preferenziali. Questa canalizzazione può concentrare il flusso d'acqua attraverso il corpo arginale. Di conseguenza, si assiste a un severo innalzamento dei gradienti idraulici in uscita, una condizione che innesci fenomeni di instabilità localizzata al piede che può risultare nella formazione di fenomeni erosivi nell'area oggetto di studio.

Complessivamente, l'integrazione del campo delle pressioni neutre con le verifiche di stabilità globale ha evidenziato una potenziale vulnerabilità del sistema arginale quando sottoposto a condizioni idrauliche e meccaniche critiche. L'innalzamento delle pressioni neutre insieme all'assenza di ogni tipo di coesione apparente compromette infatti la stabilità nei profili, portandoli ai limiti del collasso. Le problematiche del sistema arginale emergono ulteriormente analizzando le sezioni sito-specifiche, dove nel caso del modello relativo al sondaggio SX27 si è registrato il valore più critico dell'intera campagna di analisi. Occorre precisare, infine, che i bassi Fattori di Sicurezza ottenuti derivano dall'assunzione di scenari idraulici e meccanici volutamente estremi (coesione nulla e assenza di parziale saturazione). Ulteriori studi che approfondiscano gli effetti della vulnerabilità dei parametri meccanici e della validità delle ipotesi fatte in questo studio risultano necessari.

Alla luce di quanto emerso dalle modellazioni numeriche, è possibile concludere che il tratto arginale in esame, considerato nella sua naturale conformazione e privo di interventi di stabilizzazione, risulti strutturalmente inadeguato a supportare eventi di piena prolungati ai livelli critici. Eventuali marcate eterogeneità stratigrafiche del sottosuolo, caratteristiche delle zone in cui il rilevato interseca gli antichi paleoalvei del fiume, si confermano come l'elemento di maggiore debolezza dell'intero sistema. Emerge pertanto la necessità di prevedere e mantenere in efficienza opportune opere di mitigazione, quali schermi impermeabili o sistemi di drenaggio al piede lato campagna. Questi interventi risultano infatti indispensabili per controllare i gradienti di filtrazione, favorire l'aumento delle tensioni efficaci e garantire la sicurezza dei territori limitrofi scongiurando il rischio di erosione retrogressiva e di collasso strutturale dell'opera.

BIBLIOGRAFIA

- CIRIA, Ministry of Ecology of United Kingdom, & USACE (2013). *The International Levee Handbook*. CIRIA, London. ISBN: 978-0-86017-734-0.
- Fabbian, N. (2022–2024). *Studi sulla valutazione del rischio arginale del fiume Adige – Tratto Salorno–Laghetti (BZ)*. Documenti tecnici interni, Provincia Autonoma di Trento.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2024). *GeoStudio – SEEP/W and SLOPE/W Software Reference Manual (version 2024)*. Calgary, Canada.
- GeoStru (s.d.). Equilibrio limite (LEM). Manuale online. Disponibile a: https://help.geostru.eu/slope/it/equilibrio_limite_lem.htm
- Pinter, L. (2024). *Sicurezza degli argini del fiume Adige nel tratto a nord di San Michele all'Adige: analisi multidisciplinare e modellazione numerica*. Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova.
- Skempton, A. W. (1986). *Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation*. Géotechnique, 36(3), 425–447.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Verifiche e sezioni (s.d.). Piano Complesso di Intervento. Disponibile a: https://cloud.ldpgis.it/sites/volterra/files/prg_ru/piano_complesso_di_intervento/pci_sd2_13_verifiche_e_sezioni.pdf
- Vincenzi, V. (2024-2025). *Indagini non invasive per la caratterizzazione degli argini fluviali: applicazione all'argine del fiume Adige a nord di Trento*. Tesi di Laurea Magistrale, Università degli Studi di Padova.