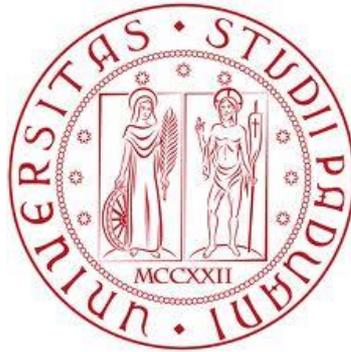


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

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

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**STUDIO DELL'INFLUENZA DEI LIVELLI DELL'ADIGE
SULLA FILTRAZIONE ARGINALE
A NORD DEL CANALE GORZONE A CAVARZERE
TRAMITE MODELLO AGLI ELEMENTI FINITI**

*Numerical analyses for evaluating the influence of the Adige river level on the
pore water pressure under the Gorzone levee in Cavarzere*

Relatore: Prof.ssa Cola Simonetta

Correlatore: Ing. Dalla Santa Giorgia

Laureanda: Malaman Vanessa

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

INDICE

Introduzione	pag. 1
1. Argini e relativa caratterizzazione	pag. 3
1.1. Struttura arginale	pag. 3
1.2. Caratterizzazione in sito	pag. 4
1.3. La filtrazione	pag. 6
1.4. Problematiche causate dalla filtrazione	pag. 8
2. Descrizione del sito in esame.	pag. 11
2.1. Inquadramento geografico.	pag. 12
2.2. Prove effettuate e stratigrafia	pag. 15
2.3. Sistema di monitoraggio installato.	pag. 18
2.4. Geometria della sezione considerata.	pag. 19
2.5. Livelli idrometrici dei fiumi Adige e Gorzone	pag. 23
3. Implementazione del modello e simulazioni eseguite	pag. 27
3.1. Geometria del modello.	pag. 27
3.2. Condizioni al contorno	pag. 29
3.3. Inserimento dati e modifiche	pag. 32
3.4. Taratura del modello – simulazioni 1 e 2.	pag. 32
4. Risultati	pag. 39
4.1. Validazione.	pag. 39
4.2. Condizioni di magra e di piena del fiume Adige	pag. 43
Conclusioni.	pag. 50
Bibliografia	pag. 52
Sitografia	pag. 53

INTRODUZIONE

Questa tesi si inserisce nell'ambito di una convenzione tra l'Unità Operativa del Genio Civile di Padova – Regione Veneto nel 2021 e Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale – ICEA dell'Università di Padova intitolata “indagini e monitoraggio dell'argine in sinistra idraulica del fiume Gorzone in comune di Cavarzere (VE)”. Infatti, nel comune di Cavarzere (VE), nella frazione di Boscochiario, le frequenti venute d'acqua a lato campagna dell'argine del Gorzone creano disagi importanti per la popolazione e la convenzione stipulata ha lo scopo di definire le locali condizioni di filtrazione attraverso la struttura arginale tramite indagini geognostiche e opportune campagne di misura, per fornire un supporto scientifico per ottimizzare gli interventi programmati.

Inizialmente è stata svolta un'indagine geotecnica conoscitiva per determinare le litologie e le caratteristiche dei terreni costituenti l'argine sinistro del Canale Gorzone presso le località San Gaetano e Boscochiario. La stratigrafia è stata definita a partire dalle informazioni fornite da una serie di sondaggi a carotaggio continuo con prelievo di campioni, prove penetrometriche con piezocono (CPTU) e prove di permeabilità in foro di tipo Lefranc eseguite nei fori di sondaggio. Per approfondire la conoscenza stratigrafica, in un secondo tempo sono stati eseguiti anche dei rilievi geoelettrici ERT.

Successivamente, per approfondire la comprensione del fenomeno di filtrazione e per monitorarlo, è stato realizzato un sistema di monitoraggio formato da due sensori di temperatura e pressione installati sulla medesima verticale, ma a due profondità diverse, e una installazione sperimentale con fibra ottica, formata da tre verticali parallele, in modo da monitorare la filtrazione lungo tutta la sequenza stratigrafica.

Inizialmente sono state eseguite analisi modellistiche per simulare la filtrazione attraverso l'argine sinistro del Gorzone considerando una sezione limitata al canale Gorzone stesso, ma successivamente si è notato che le pressioni misurate negli strati sabbiosi al piede del rilevato non erano influenzate solo dalla variazione del livello dell'acqua del canale Gorzone, ipotizzando così l'influenza del vicino fiume Adige.

La seguente tesi tratta quindi l'analisi del regime di filtrazione nel corpo arginale del fiume Gorzone a Cavarzere, considerando l'influenza del fiume Adige, in quel tratto ad esso molto

prossimo, per comprendere meglio i fontanazzi osservati. Il problema viene studiato tramite un modello numerico agli elementi finiti bidimensionale che rappresenta una unica sezione trasversale comprendente Adige e Gorzone, considerando la stratigrafia locale e le proprietà dei terreni (permeabilità e porosità), analizzando diverse condizioni di livelli dell'acqua nei due fiumi considerati, quota piezometrica indisturbata della falda, e pressione negli acquiferi, come forniti dai dati misurati.

Nel Capitolo 1 viene descritta la struttura arginale in generale, i vari componenti e i problemi che possono insorgervi. Viene soprattutto trattato il problema della filtrazione, alla quale è soggetto anche l'argine in analisi. Inoltre, vengono descritte alcune tecniche di caratterizzazione utilizzate per identificarne la stratigrafia con i relativi vantaggi e svantaggi.

Nel Capitolo 2 viene descritto il sito d'indagine, con la stratigrafia locale e le prove in sito eseguite per ricavarla. Viene descritta anche la geometria della sezione considerata, comprendente sia il canale Gorzone che il fiume Adige, e le approssimazioni che è stato necessario assumere al fine di poterla ricostruire. Inoltre, vengono descritti brevemente i dati utilizzati nel monitoraggio, quindi i dati di livello idrometrico e di pressione, e i punti e le sezioni di misura.

Successivamente, nel Capitolo 3 viene descritto il software, basato sugli elementi finiti (FEM, Finite Element Method), utilizzato per la simulazione della filtrazione nel corpo arginale e in fondazione, basandosi sulla definizione della geometria del problema, condizioni al contorno e dati iniziali.

Vengono inoltre descritte le procedure di inserimento dati, descritte le condizioni al contorno utilizzate durante il processo di calibrazione e validazione, e i primi risultati ottenuti.

Il programma utilizzato può simulare anche la stabilità arginale ed assistere in modo completo alla modellazione geotecnica. Inoltre, può effettuare analisi sia in regime stazionario sia transitorio, quindi considerare, eventualmente, anche effetti dipendenti dal tempo.

Il quarto capitolo evidenzia i risultati ottenuti in base alla variazione di alcune caratteristiche o condizioni al contorno al fine di ottenere i risultati più simili alla realtà. Esso mostra anche alcune immagini di regimi di filtrazione che sono probabilmente si ricreano nel luogo di interesse e i valori principali dei risultati ottenuti.

1. ARGINI E RELATIVA CARATTERIZZAZIONE

Il capitolo tratta la conformazione generale degli argini, le varie tecniche di indagine utilizzate per la caratterizzazione e i problemi a cui possono essere soggetti. L'obiettivo è la descrizione generale della struttura naturale che verrà analizzata in seguito in un ambito ben preciso e dei problemi a cui è principalmente soggetta.

1.1. STRUTTURA ARGINALE

L'argine è una barriera, facente parte dei sistemi di difesa passivi, con funzione di contenimento delle piene di un corso d'acqua. Da ciò, si deduce che l'impermeabilità è la caratteristica primaria da garantire; infatti, esso deve limitare il flusso di filtrazione attraverso il corpo arginale e nel terreno di fondazione ai fini di ridurre i fenomeni di erosione e instabilità locali [1]. Con lo stesso scopo è importante la funzione drenante dell'argine che consente l'indirizzamento della filtrazione verso zone di raccolta. A causa delle condizioni d'esercizio variabili dei corsi d'acqua e delle azioni esterne a cui sono sottoposti, funzioni importanti da considerare sono anche la stabilità e la protezione esterna degli argini, con l'obiettivo di evitarne l'erosione [2].

Gli elementi che possono essere presenti in una sezione arginale sono raffigurati in *Figura 1* e hanno diverse funzioni nel comportamento arginale [3].

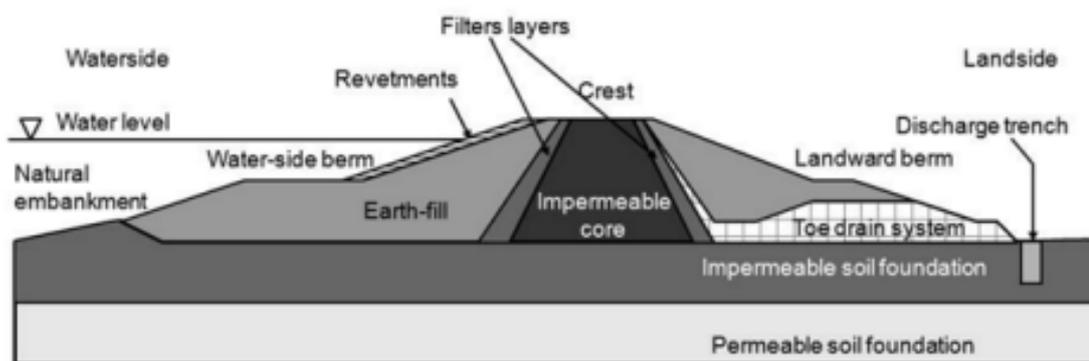


Figura 1 - Elementi sezione arginale [3]

Il terreno di fondazione, innanzitutto, ha la funzione di sostenere l'argine e ne deve costituire un supporto stabile, inoltre assume le funzioni di impermeabilità e filtrazione.

Il corpo arginale fornisce stabilità alla pressione dell'acqua riducendo le infiltrazioni. Nel caso in cui il corpo impermeabile non garantisca l'impermeabilizzazione è possibile aggiungere

nella parte centrale un nucleo impermeabile o ricoprire la sezione mediante un rivestimento con materiali a bassa permeabilità. Quest'ultimo ricopre anche una funzione anti-erosiva. Inoltre, è possibile inserire elementi filtro ai lati del nucleo impermeabile che consentono di soddisfare la funzione filtrante, principalmente in geotessile, per consentire la filtrazione senza che particelle fini possano essere rimosse dall'argine; quindi, svolgono anch'essi una funzione anti-erosiva.

Ai fini di stabilizzare l'argine si può agire attraverso la riduzione della pendenza media, aumentando la larghezza della base della struttura, in modo da allungare il percorso di filtrazione e riducendo, di conseguenza, la linea di saturazione del corpo arginale; a questo scopo possono essere utilizzate le berme, che sono estensioni dell'argine verso il lato fiume o campagna.

Inoltre, possono essere inseriti, nella zona al piede lato campagna, dei sistemi di drenaggio che promuovono la stabilità dell'argine e controllano i flussi di filtrazione drenando l'acqua. I sistemi di drenaggio sono costituiti anche da trincee o pozzi drenanti nel caso in cui il terreno di fondazione sia costituito da uno strato impermeabile di terreno ricoperto da uno permeabile, solitamente abbastanza profondo [3].

1.2. CARATTERIZZAZIONE IN SITO

[2] Le indagini di caratterizzazione si conducono in tre fasi [2]: la prima fase, che consiste nella raccolta di tutte le informazioni necessarie tramite raccolta di dati pregressi o indagini geognostiche appositamente eseguite; la seconda fase, durante la quale si effettua una zonizzazione in tratti omogenei caratterizzati dalle medesime caratteristiche avvalendosi di sopralluoghi e indagini geofisiche di superficie, e si individua la presenza di situazioni particolari; la terza fase, prevede l'analisi di dettaglio delle sezioni rappresentative di un tratto omogeneo o di punti critici e si utilizzano prove geotecniche in sito e laboratorio e misure geofisiche di dettaglio.

Per quanto riguarda la seconda fase, i metodi geofisici più utilizzati sono la tomografia elettrica, le indagini elettromagnetiche, le indagini georadar, le prove sismiche e le misure del potenziale elettrico manuale.

La tomografia elettrica (Electrical Resistivity Tomography – ERT) viene principalmente eseguita con un multi-elettrodo per misurare la resistività elettrica. Dopo aver generato un campo elettrico nel terreno si procede misurando la differenza di potenziale indotta attraverso

una serie di coppie di elettrodi, vengono utilizzati, di solito, dai 25 ai 100 elettrodi disposti in linea retta con interasse costante. Le configurazioni di misura del georesistivimetro consentono di attivare opportunamente gli elettrodi di interesse [4]. Tale tecnica ha tempi di acquisizione onerosa, garantisce risultati buoni per differenze stratigrafiche marcate e fornisce una misura quantitativa [5].

Le indagini elettromagnetiche (Frequency Domain Electromagnetic Method – FDEM) si basano sulla generazione di un campo elettromagnetico secondario da parte dei corpi conduttivi nel sottosuolo investiti dal campo elettromagnetico primario indotto attraverso una bobina trasmittente. Utilizzando una bobina ricevente, viene misurato il campo risultante indotto, e attraverso la differenza di ampiezza e fase con il campo primario si possono ricavare la conducibilità apparente e la suscettività magnetica del terreno. Essa è una tecnica rapida ed economica dato che non necessita contatto tra strumento e terreno, ma si può ricavare solamente una misura qualitativa, in quanto la resistività apparente fa riferimento alla media pesata dello strato superficiale [2].

Le indagini georadar (GPR) vengono usate per individuare discontinuità nelle caratteristiche dielettriche del sottosuolo sfruttando impulsi elettromagnetici ad alta frequenza emessi da antenne mobili. Nota la velocità di propagazione, misurando il tempo di andata e di ritorno dell'onda, si può ricavare la profondità dell'elemento riflettente. La risoluzione dei risultati aumenta con l'aumentare della frequenza delle antenne ma con questa si riduce la possibilità di indagare piccole strutture a profondità elevate e il segnale subisce maggiore assorbimento e attenuazione in presenza di suoli altamente conduttivi [2].

[5] Le indagini sismiche possono essere di diverse tipologie; infatti, inizialmente venivano considerate solo le velocità di propagazione delle onde primarie, successivamente è iniziato lo studio delle onde secondarie polarizzate e non, poi si è arrivati anche allo studio delle onde superficiali dispersive Rayleigh. Questi metodi sismici ricostruiscono spazialmente il modulo di elasticità confinato grazie alla misura delle velocità delle onde primarie, mentre, attraverso la misura delle velocità delle onde secondarie, ottengono informazioni riguardo il modulo di rigidità al taglio, dopo aver assunto nota la densità. Le indagini sismiche sono economiche e rapide ma i dati devono essere interpretati ricorrendo a risultati di altre prove.

Le misure del potenziale elettrico manuale vengono eseguite in riferimento al self-potential method - SP che è un metodo geofisico passivo. Esso consiste nella misura della distribuzione del potenziale elettrico in un insieme di punti di misura attraverso elettrodi. Si esegue una mappatura del potenziale utilizzando uno o più elettrodi di riferimento come base fissa con lo scopo di individuare anomalie che rappresentino fenomeni di filtrazione. Il potenziale elettrico

che viene misurato è associato a correnti elettriche nel terreno, che sono a loro volta dovute alla presenza di acqua con differenti contenuti salini, correnti di filtrazione e diverso comportamento dei terreni a grana fine dal punto di vista elettrochimico [6]. Le misure ottenute da questo metodo sono qualitative.

Per quanto riguarda la terza fase citata in precedenza, le indagini che si eseguono consistono in sondaggi, prove di laboratorio, prove in sito eseguite in continuo lungo verticali (CPT, CPTU), prove sismiche lungo verticali, prove per la determinazione della permeabilità in sito (Lefranc in foro, prove di pompaggio in regime stazionario).

[I] La prova CPTU viene eseguita infiggendo una punta elettrica chiamata piezocono nel terreno a velocità costante. La punta registra i dati del terreno come la resistenza di punta, l'attrito laterale e la pressione neutra e li trasmette ad una centralina, permettendo così di analizzarli e ricavarne informazioni sul tipo di terreno attraversato.

[II] La prova di permeabilità in foro Lefranc permette di determinare la permeabilità del livello presente al fondo foro nel foro di sondaggio. È una prova di permeabilità a carico variabile eseguita in pozzetti di piccolo diametro, si esegue basandosi sul prelievo di un determinato volume di acqua dal pozzetto e sulla seguente misura del livello una volta che il sistema si è riportato all'equilibrio. I vantaggi sono i costi limitati e la velocità di esecuzione.

1.3. LA FILTRAZIONE

La filtrazione è uno dei maggiori problemi dei rilevati arginali e può portare a erosione o altri fenomeni di deterioramento e successiva instabilità. Esso può avvenire in diverse condizioni, come descritto nel seguito.

In *Figura 2* si può notare la differenza delle condizioni di filtrazione tra un argine omogeneo e tra argini con filtri o dreni al piede di valle. Questi ultimi infatti concentrano il flusso verso il filtro, riducendo, di conseguenza, il percorso di filtrazione.

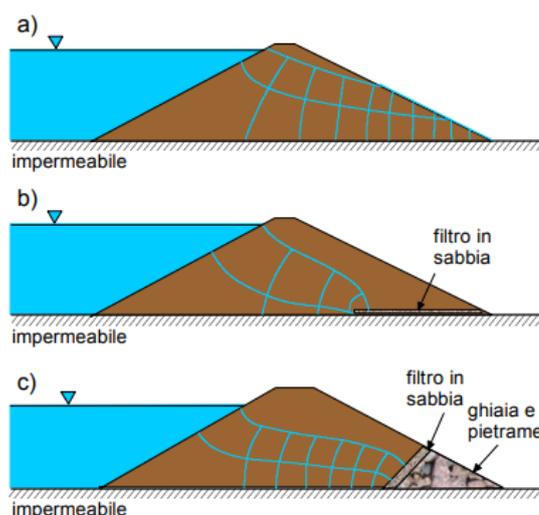


Figura 2 - Reticolo idrodinamico per argine su terreno impermeabile e per argine a) omogeneo, b) con filtro orizzontale, c) con dreno al piede di valle [2]

[2] In particolare, si considera la presenza di filtro in sabbia al piede dell'argine lato campagna in *Figura 2*; prendendo in esame *Figura 2b* e variando il rapporto di anisotropia della permeabilità del corpo del rilevato, si ottengono i reticoli di *Figura 3*, nei quali la lunghezza di filtrazione aumenta nel caso in cui il rapporto di anisotropia aumentasse. Il rapporto in questione considera la permeabilità orizzontale su permeabilità verticale.

Nel caso in cui il terreno di fondazione sia permeabile, invece il flusso d'acqua viene richiamato da essa incrementando la velocità di filtrazione e di conseguenza si assiste alla riduzione della lunghezza di filtrazione nel corpo arginale; in *Figura 4* si visualizza la differenza tra la situazione in cui il terreno di fondazione abbia la stessa permeabilità del terreno del corpo del

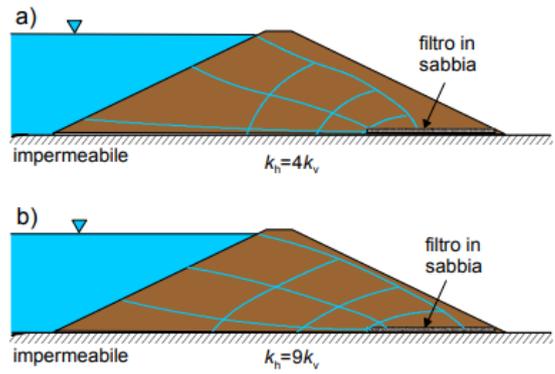


Figura 3 - Reticolo idrodinamico per argine, su terreno impermeabile, con filtro orizzontale e per terreno con rapporto di anisotropia a) pari a 4, b) pari a 9 [2]

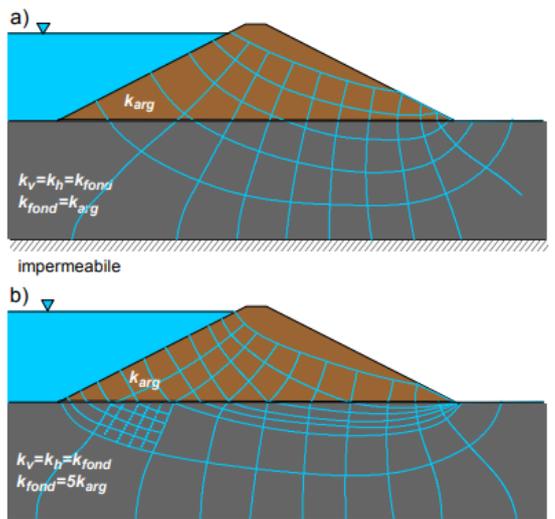


Figura 4 - Reticolo idrodinamico per argine omogeneo su terreno permeabile con a) permeabilità uguale, b) permeabilità diversa rispetto alla permeabilità del terreno del corpo [2]

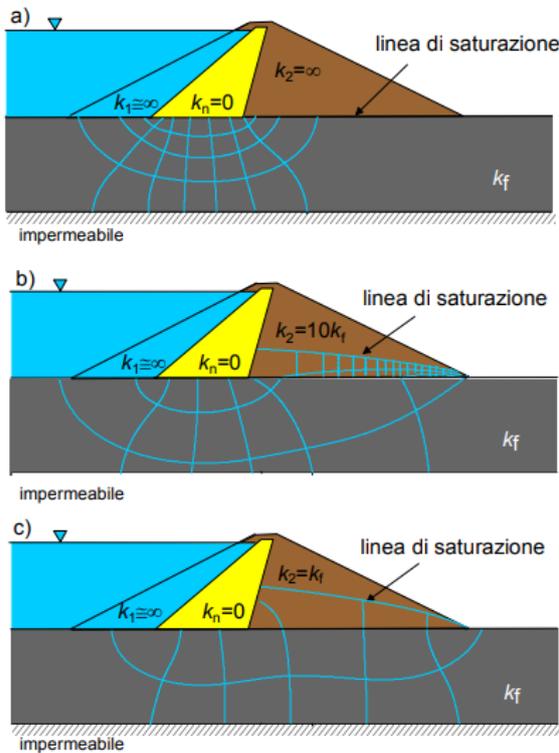


Figura 5 - Reticolo idrodinamico per argine zonato con terreno lato campagna avente diversa permeabilità [2]

rilevato e in cui, invece, la permeabilità dei due sia differente, ovvero che il terreno di fondazione abbia permeabilità maggiore del corpo arginale.

Come ultima considerazione, si analizza il caso di un argine zonato in cui varia la permeabilità del terreno al lato campagna e resta uguale la permeabilità del terreno di fondazione. Esso è rappresentato in *Figura 5*.

Si osserva che la linea di saturazione nel corpo arginale si alza nel caso di permeabilità minori quindi si assiste a maggiore filtrazione nel corpo arginale.

1.4. PROBLEMATICHE CAUSATE DALLA FILTRAZIONE

Le rotture sono, di solito, strettamente legate ai regimi di filtrazione; infatti, possono verificarsi erosione interna, instabilità del paramento arginale interno ed esterno, instabilità al piede o a campagna per liquefazione statica e sifonamento. Sono situazioni frequenti anche le rotture per le pressioni neutrali che si sviluppano durante le fasi degli eventi di piena, come ad esempio l'instabilità del terreno di fondazione e dell'argine. Altra tipologia di rottura, questa volta dovuta all'azione dell'acqua e al moto ondoso, è l'erosione esterna [2].

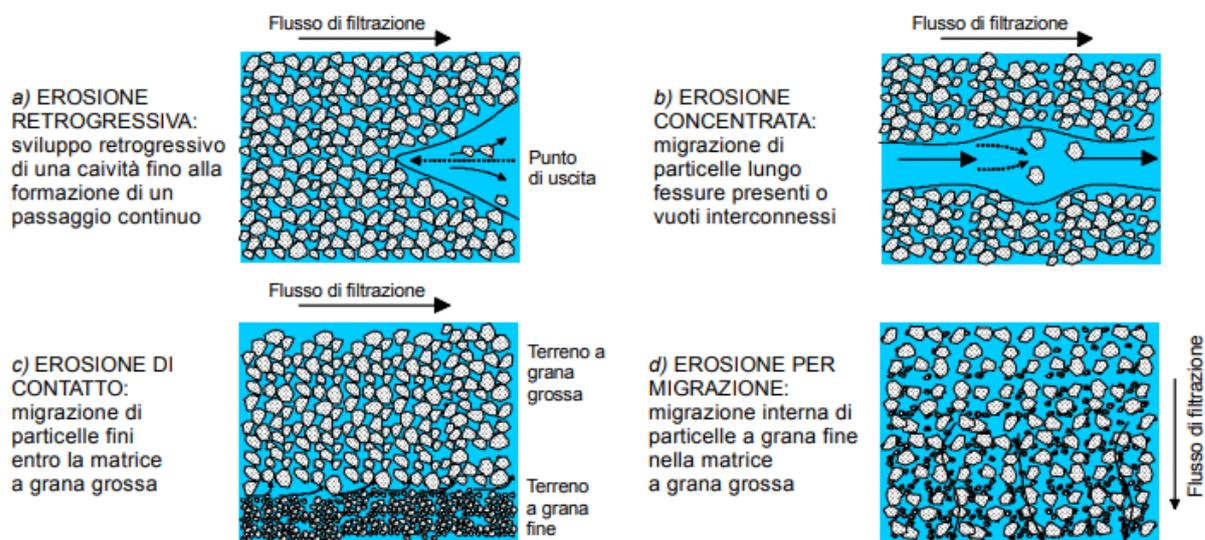


Figura 6 - Tipologie di erosione interna [2]

L'erosione interna, ovvero il processo di asportazione delle particelle fini del terreno, genera dei canali preferenziali di filtrazione nel corpo arginale, nel terreno di fondazione o attorno a strutture presenti nel terreno. Essa è causata principalmente dalla forza di filtrazione, la quale è strettamente legata al gradiente idraulico. Inoltre, è di difficile previsione in quanto il gradiente idraulico è condizionato dall'eterogeneità stratigrafica.

Quando la filtrazione è associata ad asportazione di terreno, il flusso aumenta insieme alla forza erosiva dell'acqua perché il terreno diventa più permeabile e ciò comporta gravi problemi.

Sono presenti diversi meccanismi di erosione interna rappresentati in *Figura 6*. La filtrazione da campagna verso l'alveo può dare luogo a erosione retrogressiva, come rappresentato in *Figura 6a*, sottoescavazione e instabilità della banca arginale. L'erosione retrogressiva può avere luogo da campagna verso l'alveo o viceversa, ed inizia attraverso l'innesco, poi prosegue fino a formare un sifone e alla finale rotta [3].

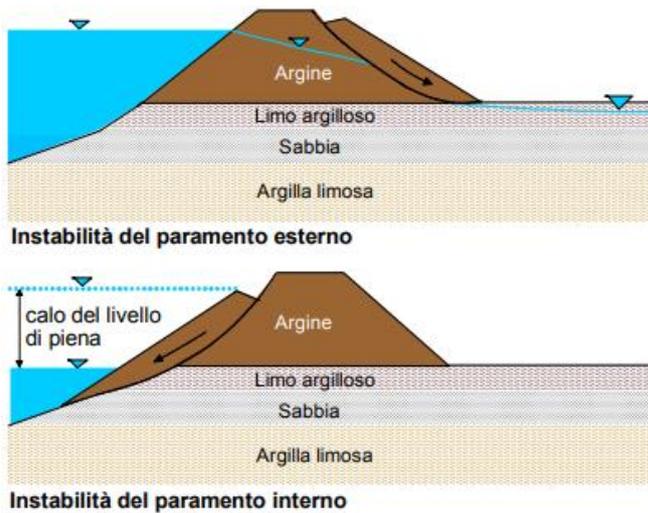


Figura 7 - Instabilità delle scarpate arginali [2]

possono aggravare la situazione; durante i mesi estivi l'argine può asciugarsi e crepare e queste fessure costituiranno un percorso preferenziale per l'acqua in autunno. Ciò si verifica principalmente nei tipi di terreno argilloso o torboso, nei casi in cui il terreno è scarsamente compattato e saturo [3].

Il paramento esterno rimane per la maggior parte dell'anno in condizioni di saturazione parziale per cui può essersi creato uno stato fessurativo nell'argine a causa dei cicli stagionali. Le fessurazioni possono poi essere sede di moti di filtrazione che aumentano la pressione neutrale e rammolliscono il terreno così da portare al collasso del paramento esterno [2].

Il paramento interno, invece, è soggetto ad instabilità durante la diminuzione della piena del fiume. La causa principale è la forza di filtrazione instaurata nel corpo arginale verso la sponda interna [2].

La liquefazione statica e sifonamento si manifesta a valle di un argine e si innesca durante le piene come si vede in *Figura 8*, inoltre può avere forma retrogressiva. [2] Solitamente il fenomeno inizia con il sollevamento locale e fessurazione, i quali consentono la creazione di vie preferenziali di filtrazione. Da qui si assiste a liquefazione statica e alla formazione di un fontanazzo individuato dalla

L'instabilità del paramento esterno o interno può avvenire con i meccanismi rappresentati in *Figura 7*. Quando un materiale argilloso viene compattato per formare un argine, la sua resistenza al taglio dipenderà dalle caratteristiche dei materiali costituenti, dal contenuto di umidità del suolo e dal grado di compattazione. Nel tempo però, il terreno potrebbe variare le proprie caratteristiche e le variazioni stagionali

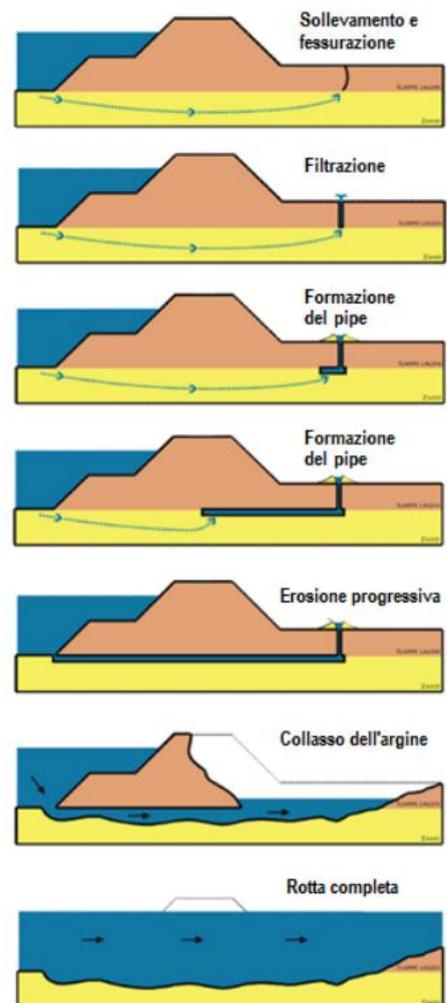


Figura 8 - Sifonamento

presenza di acqua in superficie al lato campagna. Successivamente, progredisce formando un sifone che collega il lato campagna e il fiume tramite il processo di erosione retrogressiva. Gli effetti del fenomeno comportano il collasso dell'argine a lato campagna e alla successiva rotta completa. [2] Si può osservare che quando dal lato campagna si ha una stratigrafia del tipo: terreno poco permeabile sopra al terreno che può andare incontro a sifonamento; la condizione necessaria per poter verificare erosione è che la sottoppressione agente sullo strato superiore sia elevata, consentendo la fuoriuscita del materiale eroso attraverso fessurazione. In queste condizioni va eseguita la verifica a sollevamento dello strato superficiale prima della verifica a erosione retrogressiva.

La rottura per sollevamento al piede avviene quando uno strato di terreno granulare, interessato da fenomeni di filtrazione diretti dall'alveo verso campagna, si trova sotto ad uno strato poco permeabile con modesta resistenza meccanica. In questo caso la pressione nello strato granulare può essere maggiore del valore idrostatico del livello della falda freatica a lato campagna quindi si riduce lo stato tensionale efficace. Quando la resistenza dello strato meno permeabile si riduce, il paramento esterno perde il sostegno fornito dal terreno di fondazione e può subire uno scivolamento verso valle. Alcune volte una rottura di questo tipo è accompagnata dalla traslazione dell'intero argine [2].

2. DESCRIZIONE SITO

Il capitolo pone l'attenzione sul sito arginale del caso studio considerato, di cui viene descritta l'ubicazione e le caratteristiche stratigrafiche note, e quelle ipotizzate per le analisi modellistiche eseguite. Viene descritta, inoltre, la geometria della sezione considerata nel modello per lo studio delle venute d'acqua a lato campagna, verso la sponda sinistra del fiume Gorzone, ottenuta dall'unione di una sezione dell'Adige e una del Gorzone quasi allineate.



Figura 8 - Venute d'acqua località Boscochiario vista dall'alto



Figura 9 - Venute d'acqua località Boscochiario vista dalla strada che porta al cimitero



Figura 10 – Gorzone nel periodo delle venute d'acqua

2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO



Figura 11 - Immagine satellitare del sito [III]

aumentare potrebbero insorgere problemi anche per quanto riguarda la stabilità arginale.

In *Figura 11* sono riportate in rosso le tracce delle due sezioni oggetto d'indagine.

Le venute d'acqua si presentano, nello specifico in corrispondenza della traccia della sezione ai piedi dell'argine nel punto di distacco della strada laterale per il cimitero, lungo la strada bianca ai piedi dell'argine verso ovest, tra la rampa est di salita all'argine e la casa singola e in un secondo luogo, non molto distante da questi punti, ovvero ai piedi dell'argine vicino al ponte individuato nel lato est in *Figura 11*.

Lungo l'argine sinistro del fiume Gorzone sono state eseguite molte prove in sito al fine di definirne la stratigrafia e le caratteristiche di permeabilità; esse si estendono anche verso la campagna fornendo le condizioni al contorno necessarie in seguito.

Attualmente, della zona compresa tra i due fiumi non si hanno informazioni stratigrafiche e nemmeno del lato campagna a destra del fiume Adige.

Il sito d'interesse si colloca nel territorio comunale di Cavarzere in località Boscochiaro (VE).

La zona in questione è collocata in bassa pianura, ed è quindi caratterizzata da depositi alluvionali; caratterizzati da elevata eterogeneità spaziale, per cui alla stessa quota è possibile ritrovare variazioni di granulometria rilevanti anche in distanze contenute.

La zona, rappresentata in *Figura 11*, è caratterizzata da venute d'acqua a sinistra del fiume Gorzone, al lato campagna, ovvero fontanazzi, che creano disagio. Inoltre, tali eventi vanno controllati in quanto se dovessero

Nella zona è presente un'area pozzi di Azienda Piovese Gestione Acque vicino alla sezione dell'Adige da noi trattata, che sicuramente influenza il regime idraulico locale. Dalla suddetta centrale di Boscochiaro, visibile nella carta tecnica della Regione Veneto, si preleva acqua mediante otto pozzi golenali e dalla superficie del fiume Adige [IV].



Figura 12 - Area pozzi di Azienda Piovese Gestione Acque

I pozzi, visibili in *Figura 12*, si trovano nella zona di terreno pianeggiante compresa fra il letto di magra dell'Adige e il suo argine, che viene sommersa nei

periodi di piena e prelevano acqua dalla falda freatica. Ne deriva quindi un abbassamento del livello di falda che potrebbe portare al verificarsi di diminuzioni delle pressioni negli strati sottostanti e di altre falde semi-confinete.

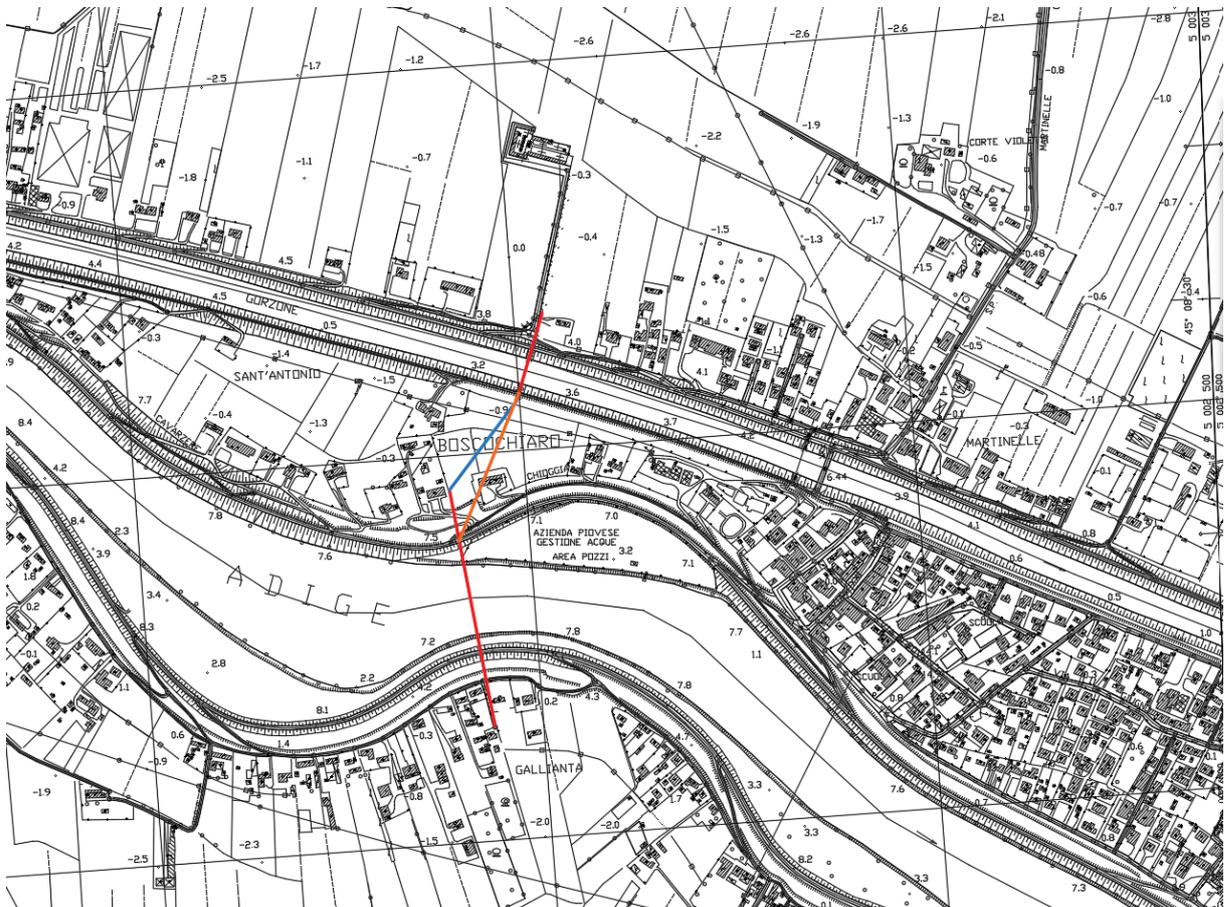


Figura 13 - Estratto della Carta Tecnica Regionale con sezioni d'interesse [V]



Figura 14 - Inquadramento geografico nella regione veneto. Sito analizzato rappresentato con punto rosso. [VI]

2.2. PROVE EFFETTUATE E STRATIGRAFIA

La campagna di indagine è iniziata nel 2014 con i sondaggi a carotaggio continuo, il prelievo di campioni rimaneggiati, la valutazione della permeabilità con prova di permeabilità in foro di tipo Lefranc, le prove penetrometriche con piezocono (CPTU) e la prova ERT.

Per le prove di tipo Lefranc si è usata una metodologia a carico variabile tramite l'immissione di acqua all'interno delle aste e rilevando il livello di acqua in foro con una sonda freaticometrica a intervalli di tempo prestabiliti [7].

Successivamente, nel 2021 sono stati eseguiti altri rilievi geo elettrici, alcuni lungo stendimenti paralleli all'argine sinistro del Gorzone, uno dei quali raffigurati in *Figura 16*, altri quasi ortogonali verso la campagna; si riporta il risultato ottenuto lungo la sezione d'interesse in *Figura 17*. Essi mostrano l'elevata eterogeneità spaziale delle condizioni stratigrafiche di cui si è parlato nel paragrafo precedente.

Inoltre, è stata verificata la congruenza con i risultati della prova ERT del 2014 eseguita su stendimento parallelo all'argine sinistro del canale Gorzone riportato in *Figura 18*, con quelli delle prove CPTU, i cui risultati sono raffigurati in *Figura 15* e i sondaggi con esito riportato in *Figura 19*.

Il sondaggio S3 e la prova CPTU 1, eseguite in prossimità della sezione da noi considerata permettono di definire una stratigrafia semplificata illustrata in seguito. Essa è stata arricchita anche di una lente sabbiosa poco profonda rilevata dalle prove ERT sia del 2014 sia del 2021.

Gli strati profondi del profilo, dai 20 ai 30 m dalla sommità arginale, sono ricavati esclusivamente dalle

prove ERT e in parte dalla prova CPTU 1 in quanto il sondaggio è stato eseguito fino alla profondità di 20 m. La prova CPTU 1 invece raggiunge la profondità di 25 m dalla sommità arginale.

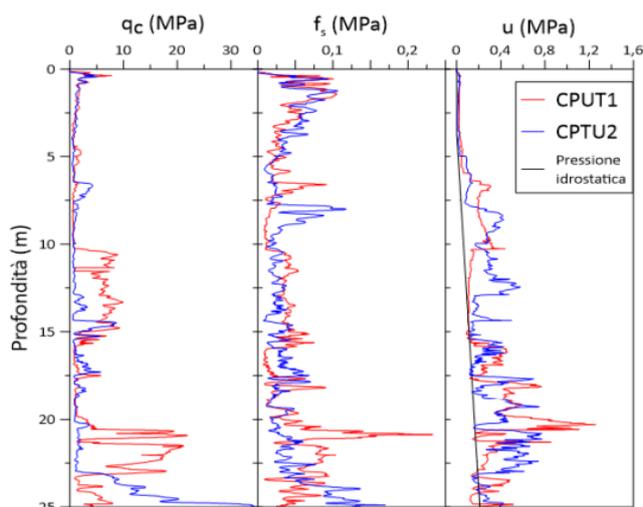


Figura 15 - risultati CPTU 2014 [8]

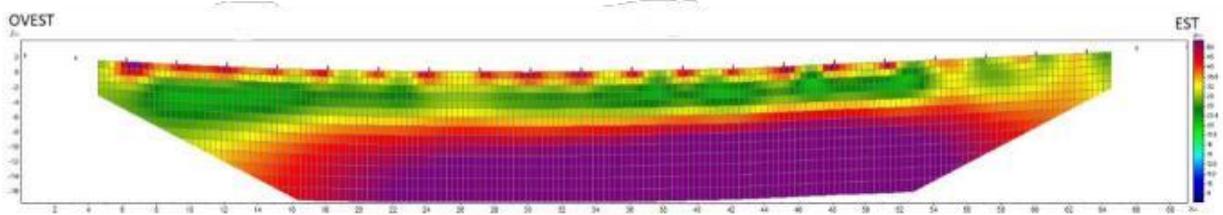


Figura 16 - ERT 2021 stendimento parallelo all'argine [8]

Range di valori ($\Omega\cdot m$)	Litologia
$Rho < 20$	Argilla
$20 < Rho < 30$	argilla limosa, limo argilloso
$30 < Rho < 35$	limo, limo sabbioso
$35 < Rho < 50$	limo sabbioso, sabbia fine
$Rho > 50$	sabbia media, sabbia grossolana

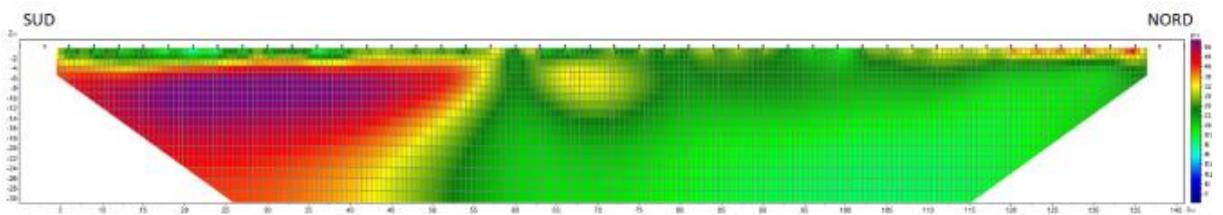


Figura 17 - ERT 2021 stendimento ortogonale all'argine [8]

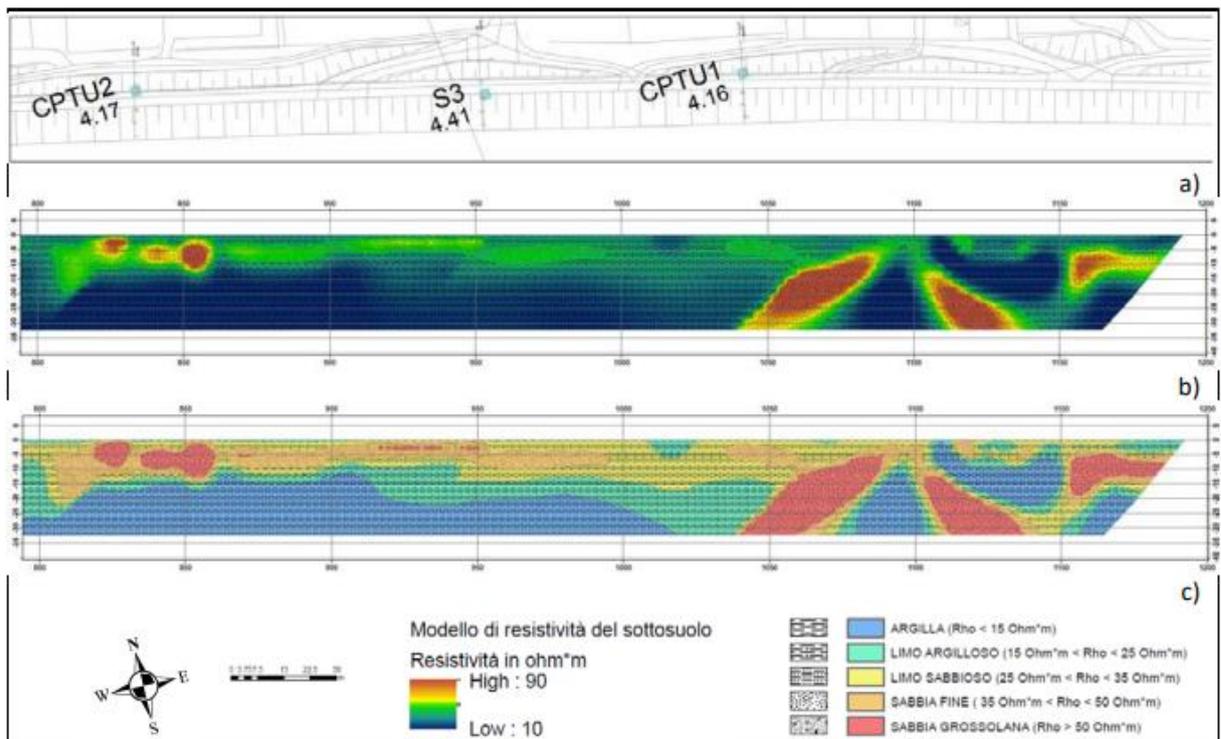


Figura 18 - ERT 2014 stendimento parallelo all'argine [8]

		Via Ruvigo, 196/1 - 38010 CAMPO SAN MARTINO (PD) P. I.V.A. 03696190282 www.ecosonda.it		SCHEDA STRATIGRAFICA DI SONDAGGIO			Certificato n° 0482/14 Data emissione 11/09/2014			
COMMITTENTE: Genio Civile di Padova CANTIERE: Argine sx Fiume Gorzone LOCALITA': Loc. San Gaetano, Cavarzere (VE) RESPONSABILE DI SITO: Dott. Matteo Perini				QUOTA P.C. = N.D. QUOTA FALDA da b.p.= N.D.			Sondaggio n° S3			
RESPONSABILE DI LABORATORIO: Dott. Francesco Morbin				ATTREZZATURA: Comacchio MC 450P DATA INIZIO: 09/09/2014 DATA FINE: 09/09/2014						
Da m 6,00 A m 20,00 Profondità Finale (m) 20,00			PROFONDITA' m da p.c.	SIMBOLOGIA STRATIGRAFICA	CAMPIONI			S.P.T.		
Descrizione Litologica (A.G.I. 1977)					TIPO	NUMERO	PROFONDITA' m da p.c.	POCKET PENETROMETER Kg/cm ²	TORVANE Kg/cm ²	N
Riperti ghiaiosi in matrice sabbioso limosa			0,00							
Argilla limosa sabbiosa di colore marrone										
Argilla consistente limosa sabbiosa di colore marrone			3,00				1,3 1,3 1,6	0,6 0,6 0,4		
Argilla debolmente limosa di colore marrone			5,00							
Argilla debolmente limosa di colore grigio con intercalazione torbosa a 8,40 m			6,20				1,5 1,5 1,5	0,6 0,6 0,6		
Argilla organica di colore nero con presenza di materiale ligneo			9,30				0,9	0,5		
Argilla di colore grigio			9,70			C1	10,00	1,0	0,5	
Limo argiloso sabbioso di colore grigio			10,20				1,3 1,5 1,3	0,6 0,7 0,6		
Sabbia di granulometria grossolana di colore grigio			13,30							
FINE SONDAGGIO 20 m			20,00							

Figura 19 - Stratigrafia da sondaggio del 2014 in testa all'argine [8]

Le prove eseguite in sito hanno quindi fornito le informazioni necessarie per ricostruire la sequenza stratigrafica locale: fino a 23 m di profondità dalla sommità arginale si evidenzia un'alternanza di livelli di argille poco consistenti a comportamento prevalentemente non drenato dedotto dai valori elevati di pressioni interstiziali e qualche strato di limo o limo-sabbioso.

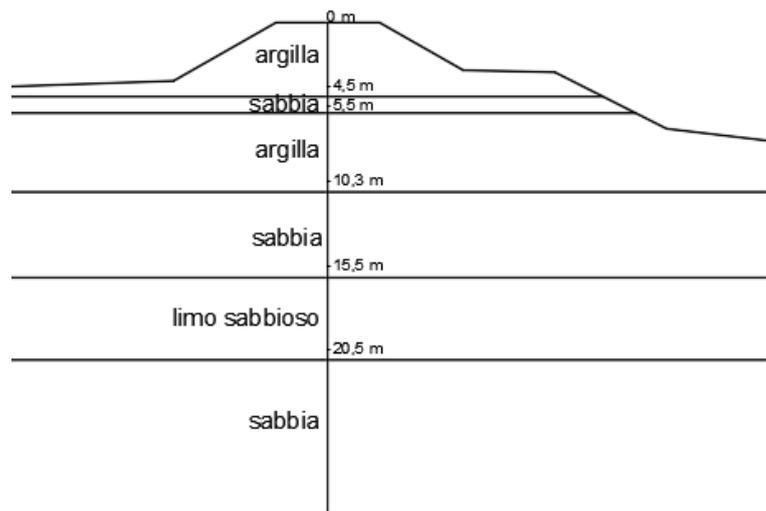


Figura 20 - Stratigrafia

In particolare, si trova uno strato sabbioso alla profondità di circa 10 m con spessore variabile da 3 a 5 m; alla base si trova a tratti uno strato argilloso e poi sabbia limosa tra 20 e 23 m di profondità. Inoltre, si trova un altro filone di sabbia più superficiale a circa 4 m di profondità.

Una delle cose più importanti all'inizio dell'analisi è definire la stratigrafia deducendola dalle prove eseguite, pur apportando alcune semplificazioni per poterla inserire nel modello come si può vedere in *Figura 20*.

Non essendoci ulteriori informazioni per quanto riguarda la parte del fiume Adige, la stratigrafia è stata assunta lineare e costante lungo tutto il profilo preso in considerazione.

2.3. SISTEMA DI MONITORAGGIO INSTALLATO

Sono stati installati dei misuratori puntuali di pressione e temperatura in corrispondenza degli strati a maggiore permeabilità a 10 e a 18 m di profondità dal piano campagna, come si vede in *Figura 21*, che registrano in continuo fornendo un dato ogni ora.

Inoltre, in corrispondenza della sezione della strada del cimitero, è stato installato un cavo di fibra ottica su 3 verticali a distanza di circa 3 m l'una dall'altra, parallelamente al piede arginale, visibile anch'esso in *Figura 21*. La fibra ottica viene interrogata tramite un apposito interrogatore che emette un segnale all'interno del cavo, che a sua volta viene rifratto: il segnale rifratto viene modificato dalla temperatura del mezzo in cui il cavo è inserito e, dall'analisi della componente Raman anti-stokes si ricava così la temperatura del terreno attraversato. Le

campagne di misura sono state effettuate con una frequenza all'incirca mensile. La fibra ottica, al contrario dei sensori, fornisce una misura della temperatura continua nello spazio ma solamente nel momento in cui viene interrogata, quindi puntuale nel tempo.

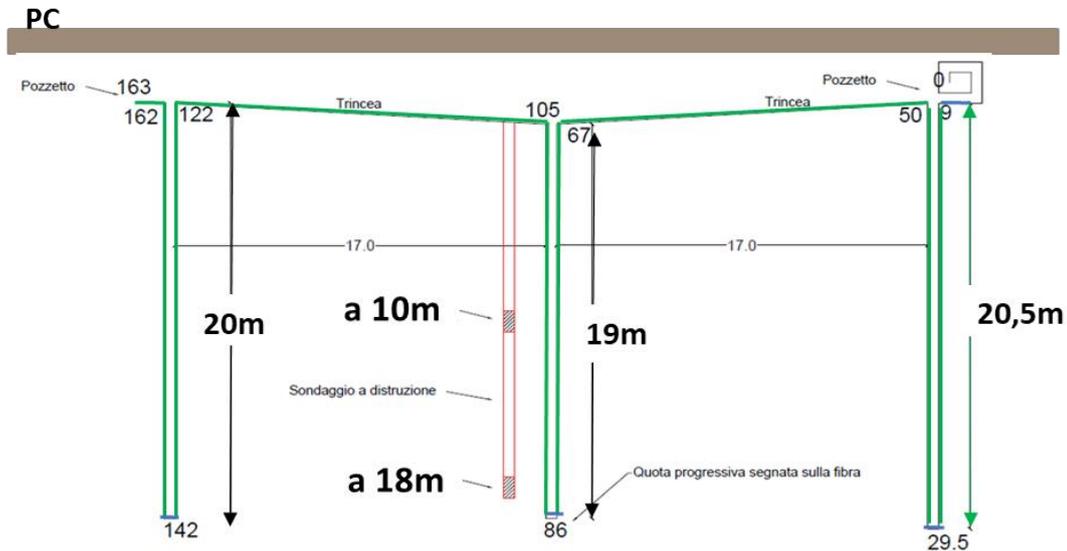


Figura 21 - Sistema di monitoraggio installato

I valori di pressione restituiti costituiscono l'output che si vuole ottenere dal modello e vengono utilizzati ai fini della calibrazione dello stesso. Alcune proprietà dei livelli stratigrafici non sono note e devono quindi essere calibrate nel modello in modo da ottenere gli stessi valori misurati nel sito anche con il modello numerico. Una volta calibrato, il modello dev'essere validato considerando un nuovo periodo di misura e confrontandone sempre i dati di output con quelli restituiti dai sensori citati in precedenza. Il modello può essere utilizzato in condizioni diverse solamente una volta che sono state eseguite entrambe le fasi descritte.

2.4. GEOMETRIA DELLA SEZIONE CONSIDERATA

Un'altra cosa rilevante per iniziare l'analisi è definire la geometria della sezione, ovvero il dominio di calcolo. Esso deve tener conto della geometria del corpo degli argini e del terreno di fondazione, inoltre per una buona riuscita dell'analisi, il profilo dev'essere abbastanza esteso da raggiungere una zona indisturbata, in modo che le condizioni al contorno non interferiscano con i risultati numerici che il software ci fornirà. In particolare, il profilo considerato è allungato di circa 200 m sia verso il lato campagna della sponda sinistra del Gorzone sia verso il lato campagna della sponda destra dell'Adige, arrivando quindi ad alcuni fossi che confinano i

campi, che forniscono il livello della prima falda superficiale, utili per definire le condizioni al contorno.

È stata scelta la sezione più prossima a quelle disponibili del canale Gorzone derivanti da analisi precedentemente svolte dall'Università di Padova. Essa è rappresentata in *Figura 22*. Il piano campagna del Gorzone è 0,9 m più alto di quello dell'Adige.

Inoltre, la sezione del fiume Adige, rappresentata in *Figura 23*, è stata ottenuta mediante richiesta al Genio Civile di Rovigo, i contorni sono stati opportunamente semplificati mantenendone la geometria e le quote principali.

Le sezioni sono tracciate ortogonalmente al corso d'acqua corrispondente; l'andamento serpeggiante del fiume Adige e le sezioni disponibili inviate dal Genio Civile di Rovigo, porta alla conseguente unione di sezioni con orientamento lievemente differente come mostrato in *Figura 24*.

La coerenza altimetrica dei due profili è stata appurata riportando le due sezioni in questione alla quota sul livello del medio mare.

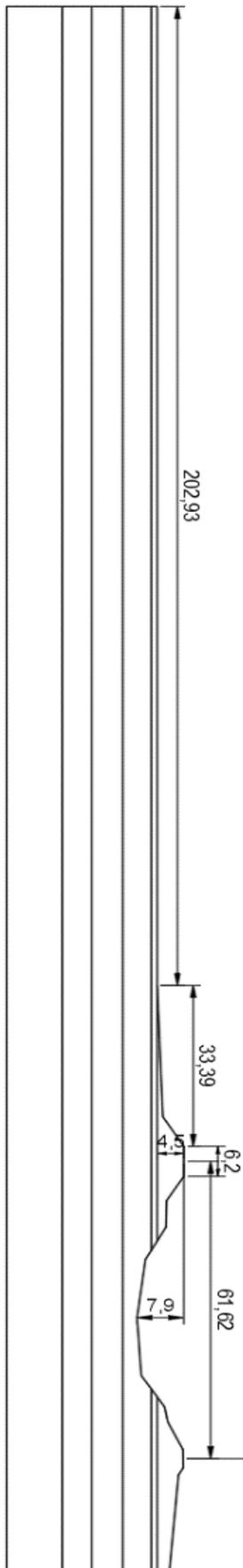


Figura 22 - Sezione del Gorzone

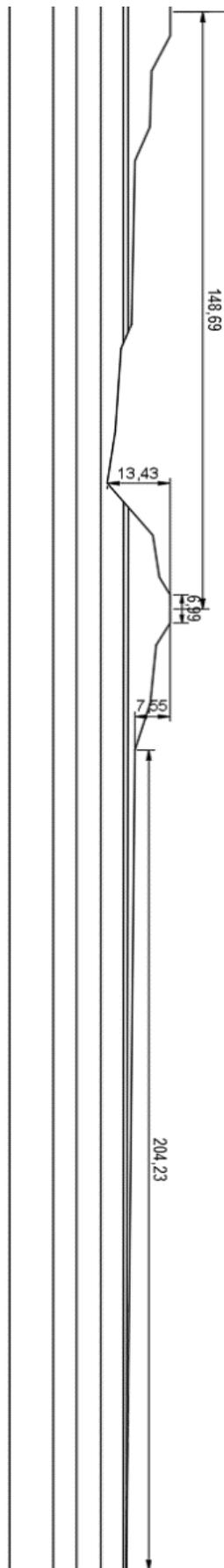


Figura 23 - Sezione dell'Adige

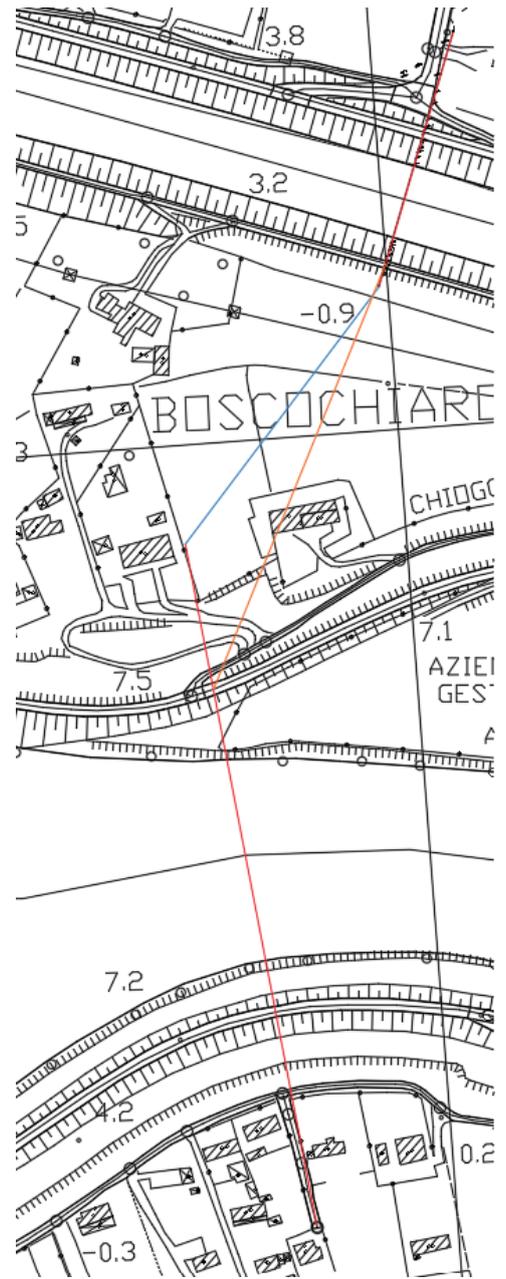


Figura 24 - Planimetria da estratto CTR

Per quanto riguarda la sezione dell'Adige la quota sul medio mare era fornita, mentre per la sezione del Gorzone, della quale erano già stati fatti studi, si è considerata la quota sul medio mare disponibile nel punto di posizionamento della fibra ottica al piede dell'argine. Quest'ultima è stata fornita con maggiore dettaglio da rilievi altimetrici eseguiti con GPS dai topografi indicando una quota sul medio mare di -0,199 m. Inoltre, si sono utilizzate le quote del terreno puntuali presenti sulla carta tecnica regionale.

La distanza tra i due profili si può apprezzare in *Figura 25*. Essa è stata misurata dalla planimetria fornita insieme alle sezioni, prendendo alcuni punti di riferimento ben definiti sia in planimetria sia in sezione; infatti, è stata scelta la mezzeria della strada sulla sponda destra del canale Gorzone e quella della strada sulla sponda sinistra dell'Adige.

Inoltre, viene riportata la sezione complessiva in *Figura 26*.

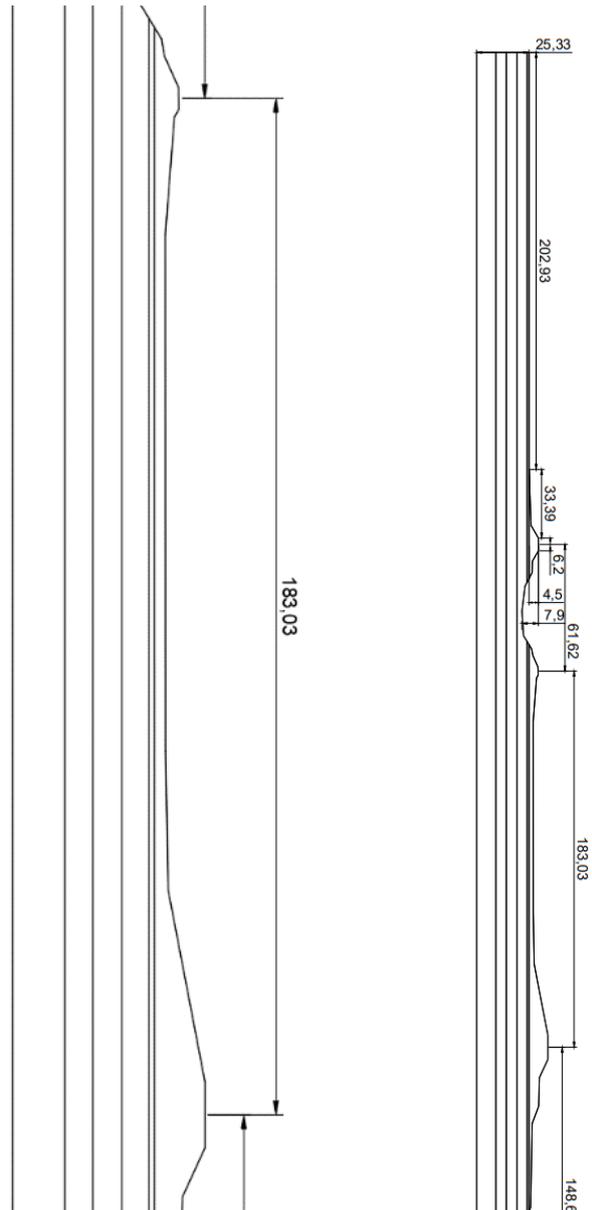


Figura 25 - Sezione distanza tra i profili

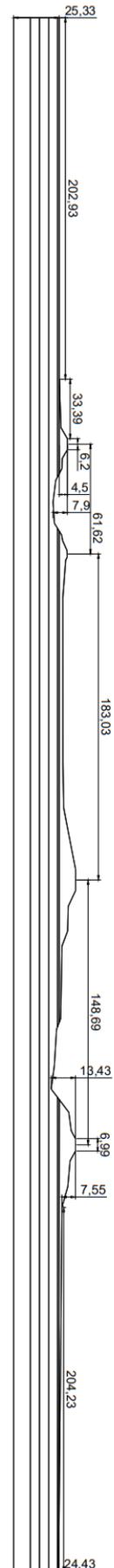


Figura 26 - Sezione completa quotata

2.5. LIVELLI IDROMETRICI DEI FIUMI ADIGE E GORZONE

Il livello idrometrico dell'Adige è stato fornito dall'ARPAV specificandone il periodo di interesse ed è servito per definire le condizioni al contorno che richiede il software per procedere all'analisi. Essi sono registrati ogni dieci minuti dall'idrometro nella stazione di misura di Cavarzere, identificata come sezione n. 004IP00001 circa 3 km a monte rispetto alla sezione dell'Adige considerata per le analisi, in corrispondenza del secondo ponte di Cavarzere, ponte Caduti per la libertà, visibile in *Figura 27* e contrassegnato con il bollino arancione. La sezione utilizzata per le seguenti analisi è contrassegnata con il bollino giallo.



Figura 27 - Vista dall'alto delle sezioni [IV]

Le due sezioni sono state confrontate tramite le aree in quanto sono state osservate quote del letto del fiume, forme e larghezze differenti; infatti, insieme ai dati del livello idrometrico è stata fornita la sezione di misura con la quota zero dell'idrometro e la quota di riferimento sul medio mare.

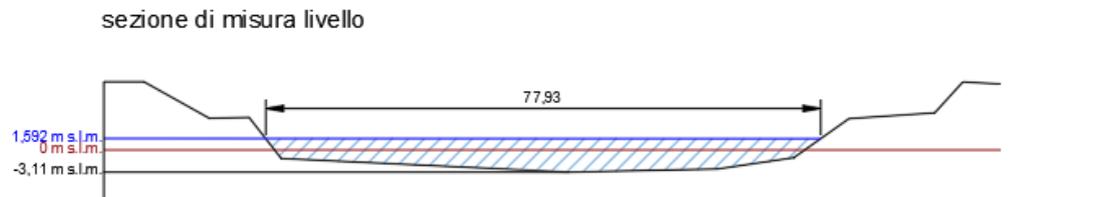


Figura 28 - Sezione di misura del livello del fiume Adige

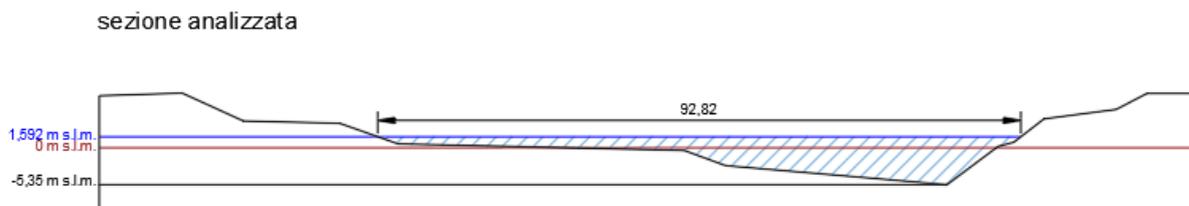


Figura 29 - Sezione analizzata del fiume Adige

Le aree di entrambe risultano di circa 290 m²; perciò, si è verificato che l'approssimazione ipotizzata del livello dell'Adige fosse congruente con l'uso della sezione in *Figura 29*, differente da quella in cui è avvenuta la registrazione rappresentata con opportune semplificazioni in *Figura 28*. Ciò resta valido in una prima approssimazione superficiale in quanto la relazione tra i livelli delle due sezioni dipende anche da altre variabili; inoltre, determinate variazioni del livello potrebbero portare sostanziali differenze di area.

Nelle *Figure 28 e 29* sono riportate le seguenti linee:

- Linea blu per identificare il livello medio del fiume registrato dal giorno 1/02/2021 al giorno 5/02/2021, periodo che verrà utilizzato anche in seguito
- Linea rossa indica lo zero sul medio mare
- Linea nera indica la profondità massima del letto del fiume.

Per quanto riguarda le misure del livello idrometrico del Gorzone, esso è registrato da un idrometro in corrispondenza del ponte subito a valle, a circa 400 m verso est rispetto alla sezione considerata; in *Figura 30* si può osservare la posizione della sezione, raffigurata dal punto giallo, e quella del ponte, rappresentata dal punto verde. Viene fornita una misura ogni ora dall'idrometro facente parte del sistema di monitoraggio installato dall'Università di Padova; le misure vengono poi riportate al riferimento del livello del medio mare cosicché possano essere paragonate con quelle del fiume Adige sopradescritte.

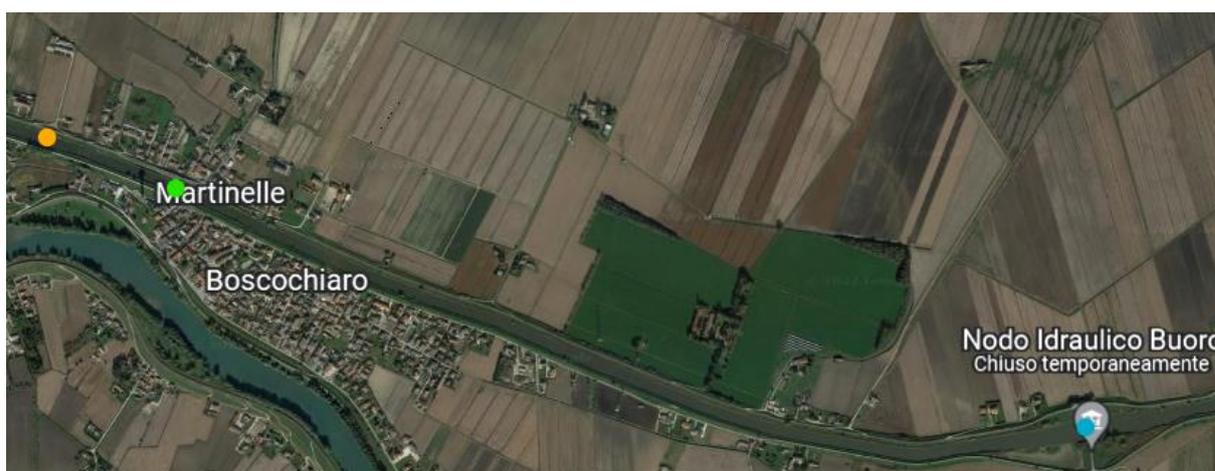


Figura 30 - Vista dall'alto di sezione, ponte di misura e manufatto di Buoro [IV]

Altro aspetto da considerare, fondamentale per il livello idrometrico del fiume Gorzone è la presenza del manufatto idraulico di Buoro, rappresentato in *Figura 31* e *32*. Esso ha lo scopo di evitare la risalita del cuneo salino e di alzare il livello dell'acqua a monte dello stesso. In particolare, quest'ultimo permette alle idrovore presenti di attingere acqua per scopi irrigui [VII].



Figura 31 - Manufatto di Buoro



Figura 32- sbarramento del manufatto di Buoro, differenza livello monte-valle

Il manufatto in questione è uno sbarramento che viene azionato nei periodi estivi. Nel periodo considerato in questa tesi, è stato attivato il giorno 11/03/2021, periodo che verrà preso in considerazione di seguito per le analisi.

Da studi precedenti si riporta che le falde profonde non subiscono variazioni rilevanti dall'attivazione dello sbarramento sebbene il fiume riporti un innalzamento del livello idrometrico di circa 1 m [8].



Figura 33 - Gorzone con livello stabilito dal manufatto di Buoro, vista dal manufatto.

Il manufatto è rappresentato in *Figura 30* attraverso il punto blu. La sua influenza sui livelli del Gorzone può essere apprezzata nel grafico di *Figura 34*.

I livelli idrometrici sono stati quindi ricondotti ad uno zero comune, il livello del medio mare, per poterli confrontare tra loro ed utilizzare come condizioni al contorno indicative della quota della superficie dell'acqua.

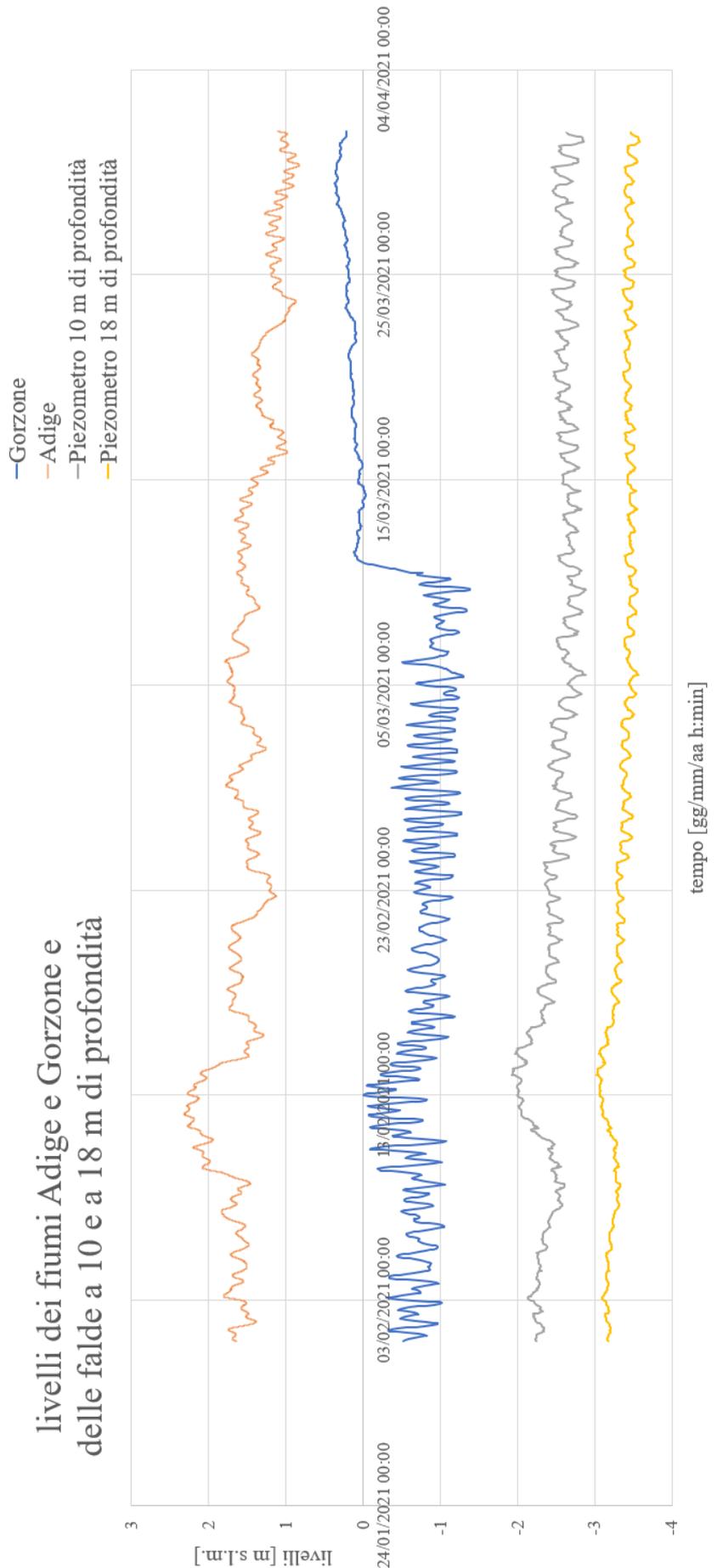


Figura 34 - Livelli idrometrici dei fiumi Adige e Gorzone e pressioni negli strati a 10 e 18 m di profondità

3. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO E SIMULAZIONI ESEGUITE

Il capitolo descrive la implementazione del modello agli elementi finiti realizzato per analizzare il problema, vengono spiegate le condizioni al contorno, imposte nelle varie simulazioni eseguite e vengono illustrati i primi risultati ottenuti.

Per la caratterizzazione dei vari livelli stratigrafici, per le proprietà che non sono note, vengono in partenza assunti dei valori da letteratura, che poi durante il processo di calibrazione, vengono variati in modo che il modello risultino conformi a quello che si misura effettivamente nella realtà. In una fase successiva, ovvero durante la validazione del modello, viene preso in considerazione un nuovo periodo di misura e si confrontano i risultati con quelli misurati, verificandone la coerenza. In questo modo il modello risulta utilizzabile in condizioni diverse.

3.1. GEOMETRIA DEL MODELLO

Per definire la geometria del modello è essenziale inserire:

- La sezione e la stratigrafia con le semplificazioni descritte in precedenza
- I punti di misura in corrispondenza dei sensori di temperatura e pressione alla profondità di 10 e 18 m dal piano campagna collocati in strati sabbiosi
- La mesh di calcolo
- Le caratteristiche idrauliche dei terreni.

La sezione, la stratigrafia, i punti di misura e la mesh utilizzata restano invariate per tutto il processo di analisi; i primi tre sono stati definiti in precedenza.

La mesh di calcolo viene definita fornendo le indicazioni sulla dimensione e sulla forma che gli elementi della stessa devono avere; in particolare, vengono definiti gli elementi di forma esclusivamente triangolare e di una grandezza tale da avere per ciascun livello almeno tre nodi in verticale come è possibile vedere in *Figura 35*. Nel nostro caso, tale grandezza corrisponde a 1,6 m per tutti gli strati, eccetto la lente sabbiosa costituente il secondo strato a partire dalla sommità arginale; infatti, in quest'ultimo la grandezza degli elementi è di 0,4 m.

Si verifica che ci siano almeno due nodi di calcolo all'interno di ciascun livello, in quanto, se i nodi di calcolo si trovassero solo nel contorno della regione potrebbero fornire risultati molto meno attendibili.

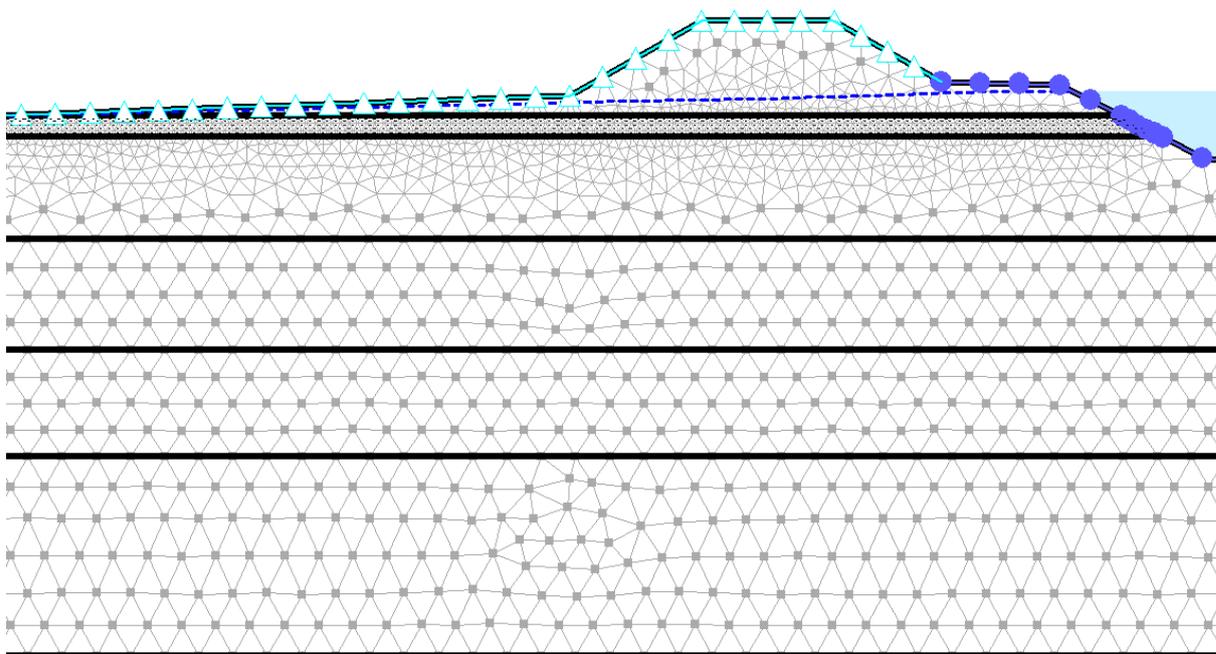


Figura 35 - Mesh di calcolo con elementi triangolari

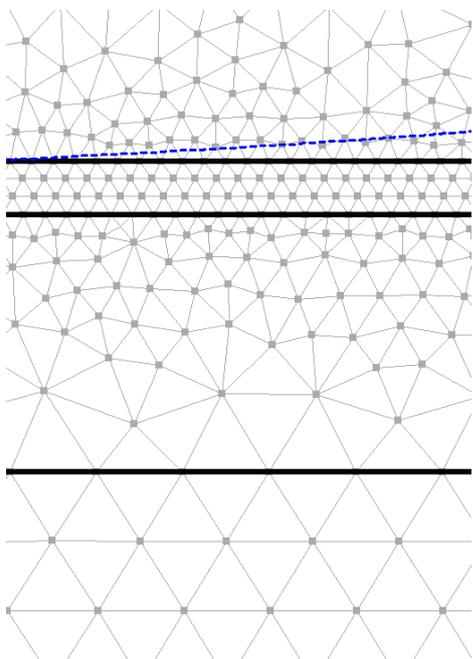


Figura 36 - Dettaglio dimensioni mesh di calcolo

Le deformazioni che si vedono nella maglia nell'ultimo e nel terz'ultimo strato, in *Figura 35*, sono date dall'inserimento dei due punti in cui sono stati posizionati i piezometri e ci consentono di ottenere i risultati nei determinati punti di interesse.

Quelle che si possono apprezzare negli strati adiacenti al secondo sono eseguite ai fini di omogeneizzare le mesh con elementi triangolari di dimensioni differenti, rispettivamente 1,6 m e 0,4 m per gli strati adiacenti e per il secondo strato, il dettaglio è visibile in *Figura 36*.

Durante il processo di calibrazione le caratteristiche dei terreni possono essere modificate per fare in modo che i risultati ottenuti dal modello siano congruenti a quelli reali dato che le proprietà dei terreni non sono note ma vengono inizialmente assunte pari a dei valori da

letteratura. A ciò fa eccezione lo strato di sabbia a 10,3 m di profondità rispetto alla sommità arginale per il quale è stata eseguita una prova di permeabilità Lefranc per cui si dovrebbe mantenere un valore simile a quello ottenuto.

Per simulare la filtrazione causata dai fiumi Adige e Gorzone, nel modello sono state attribuiti ai singoli strati le proprietà caratteristiche dei terreni riportate in *Tabella 1*, che derivano dalle prove in sito descritte in precedenza e da simulazioni derivanti da studi precedenti.

Alla base dell'argine sinistro del Gorzone, è stata inserita una lente sabbiosa locale ad elevata permeabilità riscontrata nelle prove ERT eseguite ma non visibile dal sondaggio S3 del 2014.

Tabella 1 - Caratteristiche terreni

da	a	Terreno	Permeabilità [m/s]	Permeabilità [m/h]	Porosità
0	4,5	argilla1	$7,5 \cdot 10^{-8}$	0,00027	0,47
4,5	5,5	lente sabbiosa	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,36	0,41
5,5	10,3	argilla2	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0,00036	0,41
10,3	15,5	sabbia1	$5,7 \cdot 10^{-6}$	0,02052	0,47
15,5	20,5	limo sabbioso	$1,0 \cdot 10^{-7}$	0,00036	0,44
20,5	base	sabbia2	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,09	0,47

[9] Come caratteristiche del terreno, il programma richiede inoltre il rapporto tra permeabilità verticale e orizzontale che è stata posta inizialmente pari a 0,1 per tutti i terreni. In un secondo momento, il rapporto è stato diminuito a 0,05 per i terreni argillosi.

3.2. CONDIZIONI AL CONTORNO

Le condizioni al contorno da definire sono:

- Il livello idrometrico dei fiumi (total head)
- La superficie di filtrazione potenziale (potential seepage face)

- Il livello della falda a lato campagna (total head)

Nel processo di calibrazione, sono state eseguite due simulazioni: la prima considera una condizione istantanea del livello idrometrico e delle pressioni misurate, e la seconda considera una condizione mediata; infatti, inizialmente si è utilizzato il valore fornito in un orario fissato di un giorno prestabilito, successivamente si è effettuata la media dei livelli misurati per un periodo di 5 e 10 giorni.

I risultati della simulazione vengono confrontati con i dati di pressione oraria forniti dai piezometri; perciò, anch'essi vengono inizialmente considerati puntuali nel tempo e successivamente vengono mediati durante lo stesso periodo dei livelli idrometrici dei fiumi.

I valori dei livelli idrometrici e delle pressioni registrate dai piezometri sono riportati in *Tabella 2* in metri sul livello del mare.

Tabella 2 - Dati livelli idrometrici e piezometri

Situazione		[m s.l.m.]	Livello idrometrico Gorzone	Livello idrometrico Adige	Piezometro1 10 m dal piano campagna	Piezometro2 18 m dal piano campagna
1	Situazione invernale: Adige in morbida	1/02/2021 12:50 AM	-0,53	1,66	-2,25	-3,18
2	Situazione invernale: Adige in morbida media 5 giorni	1/02/2021 - 5/02/2021 (media 5 giorni)	-0,69	1,59	-2,27	-3,17
3	Situazione invernale: Adige in morbida media 10 giorni	1/02/2021 - 10/02/2021 (media 10 giorni)	-0,69	1,69	-2,37	-3,22
4	Situazione invernale: Adige basso	25/02/2021 12:50 AM	-0,73	1,49	-2,47	-3,34

Le quattro righe di *Tabella 2* fanno riferimento al livello idrometrico del Gorzone con manufatto di Buoro disattivato.

La media del periodo viene considerata per considerare una condizione quasi stazionaria in termini di filtrazione lungo i livelli sabbiosi.

La condizione di *potential seepage face* definisce le superfici attraverso le quali è possibile la fuoriuscita di acqua, quindi, dove è possibile il verificarsi di venute d'acqua e fontanazzi. Essa viene imposta lungo tutto il piano campagna e sulla superficie esterna e superiore degli argini.

Il livello della falda a lato campagna, ovvero nel contorno laterale del dominio, è stato imposto alla distanza di circa 200 m dalla fine della sezione sia del Gorzone sia dell'Adige. Questa condizione al contorno è stata imposta seguendo diversi step.

Alla distanza di 200 m sopracitata si trova un fossato e si stima un livello della falda superficiale di circa 0,5 m sotto al piano campagna sia al confine laterale dalla parte del Gorzone sia dalla parte dell'Adige.

Tenendo in considerazione queste stime, è stata inserita la condizione al contorno solo per il livello superficiale argilloso.

Successivamente, si sono ipotizzate delle pressioni differenti per i due acquiferi da inserire come total head sempre al confine laterale. Esse sono poi state sottoposte a modifica per rendere il modello conforme alla realtà poiché non sono disponibili misure piezometriche in condizioni indisturbate, corrispondenti ai confini del dominio di calcolo considerato.

Tutte le condizioni al contorno utilizzate sono state rappresentate in *Figura 37* al fine di visualizzare dove sono state poste.

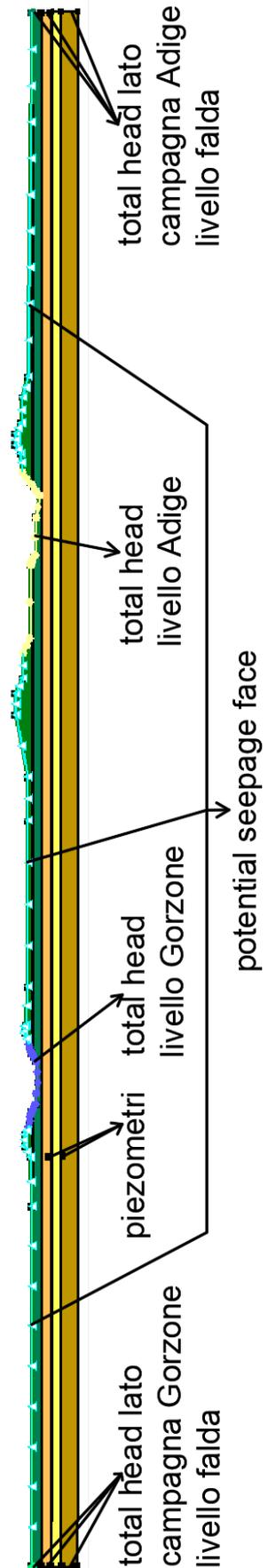


Figura 37 - Condizioni al contorno e piezometri

3.3. INSERIMENTO DATI E MODIFICHE

Inizialmente sono state inserite le caratteristiche iniziali dei terreni e le varie condizioni al contorno, in particolare, inserendo i diversi livelli idrometrici dei fiumi, la total head negli strati sabbiosi e nello strato superficiale argilloso.

Teniamo in considerazione che la pressione riportata nelle tabelle è fornita in m sul livello del mare, perciò, dal valore che si ottiene con il software, è stato sottratto il valore dello zero del medio mare, che nel nostro caso è 26,47 m.

Dall'inserimento dati si ottiene la simulazione della filtrazione in funzione della total head quindi della pressione in m. Inoltre, si ottiene la linea di saturazione che rappresenta il confine tra falda freatica e zona insatura.

Si ottengono anche, in particolare, i dati della pressione nei nodi della mesh di calcolo e nei punti inseriti appositamente nel profilo in corrispondenza dei sensori di pressione e temperatura. Questi ultimi sono importanti in quanto ci permettono di verificare che il comportamento del modello creato riproduca e sia corrispondente a quello che avviene nella realtà.

Le zone caratterizzate dalle venute d'acqua si localizzano dove la linea di saturazione emerge sul piano campagna, al quale è stata imposta la condizione al contorno di potential seepage face per il valore di prevalenza totale, ovvero la total head corrispondente alla quota del piano campagna e la pore-water pressure, ovvero la pressione dell'acqua interstiziale, pari alla pressione atmosferica. Inoltre, il software riproduce i vettori paralleli al flusso d'acqua.

3.4. TARATURA DEL MODELLO – SIMULAZIONI 1 E 2

Dalla prima fase di taratura si ottengono i risultati di *Tabella 3* in cui si riporta il confronto tra gli output ottenuti dal modello e i dati misurati tramite il valore puntuale per il periodo di inizio e fine febbraio dei livelli idrometrici e dei piezometri mostrati in *Tabella 2*, inserendo le caratteristiche dei terreni di *Tabella 1*.

Come livelli delle falde profonde si sono ipotizzati:

- Per lo strato di sabbia a 10 m di profondità 23,5 m
- Per lo strato di sabbia a 18 m di profondità 22,8 m.

Tabella 3 - Paragone dati di pressione caratteristiche terreni

pressione [m s.l.m.]	10 m di profondità	18 m di profondità
Pressione misurata nei sensori il giorno 01/02/2021 (piezometri)	-2,25	-3,18
Corrispondente output del modello, situazione 1 (con caratteristiche terreni indicate in <i>Tabella 1</i>)	-1,79	-2,84
Differenza (%)	-20,5%	-10,5%
Pressione misurata dai sensori il giorno 25/02/2021 (piezometri)	-2,47	-3,34
Corrispondente output del modello, situazione 4 (con caratteristiche terreni indicate in <i>Tabella 1</i>)	-1,85	-2,87
Differenza (%)	-24,9%	-13,9%

A partire dalla *Tabella 1* si è modificata la permeabilità dei terreni dato che le differenze percentuali tra i valori ottenuti e quelli misurati sono abbastanza elevate; in questo modo si cerca di procedere alla taratura del modello rendendo minori le differenze percentuali calcolate. Inoltre, in queste condizioni, il modello indica leggere venute d'acqua al lato campagna del fiume Gorzone che però, da interviste svolte a persone della zona, non risultano esserci nel periodo di febbraio bensì solamente una volta attivato il manufatto di Buoro ovvero dopo la metà di marzo.

Quindi, sono sicuramente da apportare modifiche delle caratteristiche dei terreni, soprattutto quelli superficiali.

In aggiunta, in *Tabella 4* si riportano i confronti tra le differenze percentuali registrate in condizioni di Adige e Gorzone differenti e quelle ottenute come output dal modello.

Dai dati riportati in *Tabella 4* si può notare che a una differenza percentuale dei livelli dei fiumi Gorzone e Adige rispettivamente del 38,3% e -10,2% corrisponde una differenza percentuale nei dati rilevati dai sensori del 9,9% e del 5% rispettivamente per quello posto a 10 m di profondità e a 18 m.

Queste ultime sono differenze percentuali abbastanza elevate se le confrontassimo con quelle mostrate nei dati di pressione di output del software che producono una differenza del

3,7% e del 1% rispettivamente per la profondità di 10 e 18 m. Quindi, le pressioni non mostrano la dipendenza che ci si aspettava dai livelli idrometrici dell'Adige.

Tabella 4 - Differenze percentuali

	Livello Gorzone	Livello Adige	Sensori 10 m	Sensori 18 m	Risultati 10 m	Risultati 18 m
01/02/2021	-0,53	1,66	-2,25	-3,18	-1,79	-2,84
25/02/2021	-0,73	1,49	-2,47	-3,34	-1,85	-2,87
Differenza (%)	38,3%	-10,2%	9,9%	5,0%	3,7%	1,0%

Per risolvere il problema si è ipotizzato un adattamento della stratigrafia ponendo un leggero innalzamento dello strato di sabbia a 10 m di profondità, rappresentato in *Figura 37*, al fine di metterlo in contatto con il letto dell'Adige e poter, in questo modo, aumentare la pressione negli strati sabbiosi diminuendo le quote piezometriche ipotizzati nel contorno laterale della sezione, inizialmente eccessivamente elevati (quota piezometrica imposta primo acquifero pari a 23,5; secondo acquifero pari a 22,8) per una situazione di bassa pianura come quella allo studio.

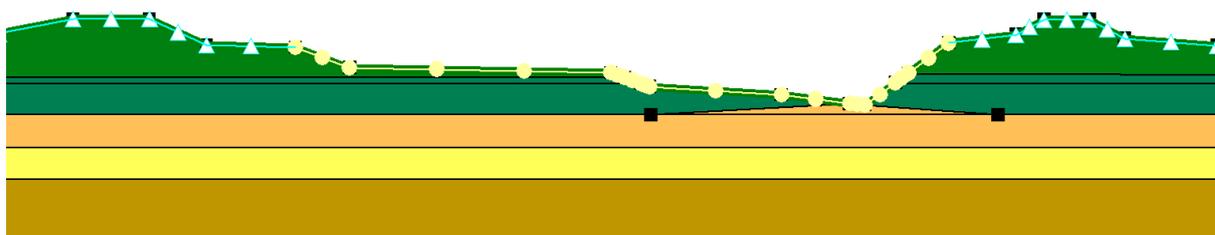


Figura 38 - Innalzamento strato di sabbia e sostituzione lente sabbiosa con argilla

L'innalzamento è stato creato attraverso una regione triangolare di altezza 1,4 m e di circa 60 m come lunghezza della base. Ad essa vengono associate le stesse proprietà dello strato sabbioso sottostante e una mesh con elementi triangolari di grandezza 0,8 m che creano una fila di nodi di calcolo sufficienti in quanto la zona non è oggetto principale di analisi. Il dettaglio viene raffigurato in *Figura 39*. In quest'ultima sono anche visibili i vettori indicanti il flusso d'acqua e la linea blu tratteggiata che rappresenta la quota di falda.

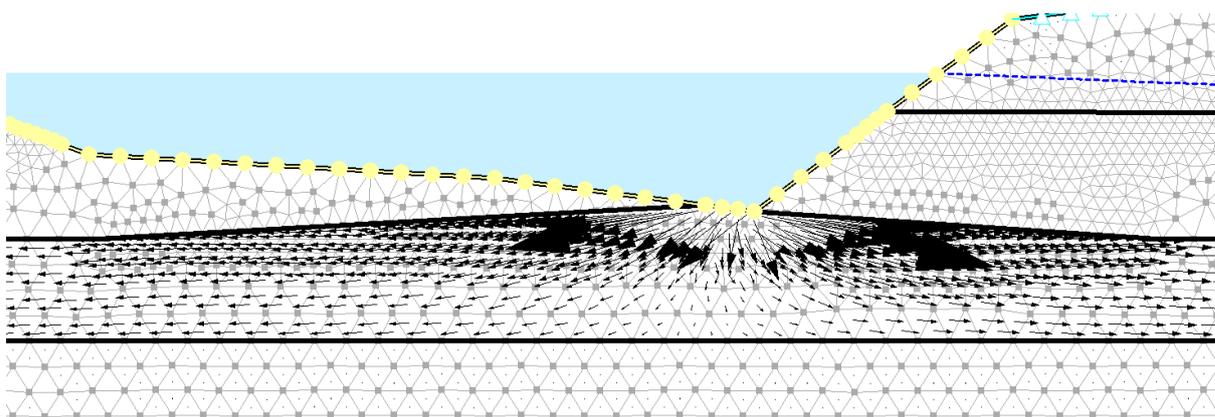


Figura 39 - Dettaglio mesh e contatto con letto del fiume

Inoltre, analizzando più nel dettaglio i risultati ottenuti dalle prove ERT a disposizione, a 20 m dall'argine verso il piano campagna la lente sabbiosa, situata alla profondità di 4,5 m dalla sommità arginale, è stata interrotta, e, anche a questo livello di 1 m sono state attribuite le caratteristiche degli strati confinanti.

In Figura 38 e, in seguito, in Figura 40, viene riportata la rappresentazione della modifica.

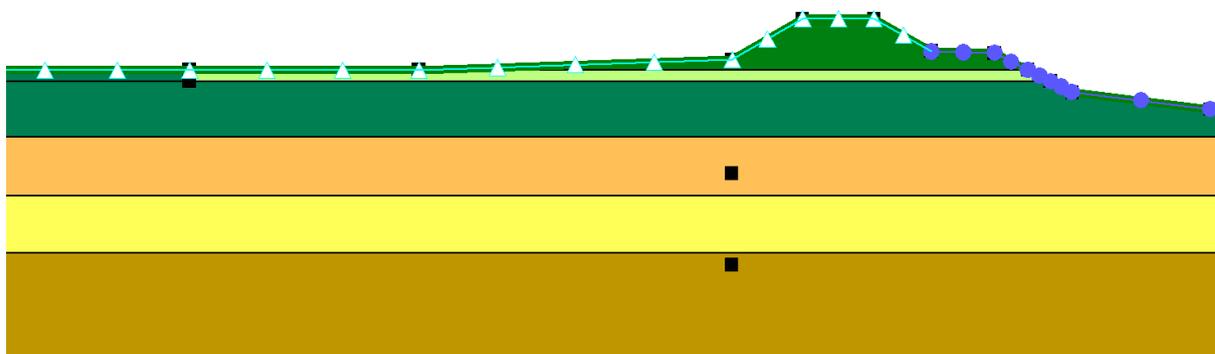


Figura 40 - Riduzione lente sabbiosa e sostituzione con argilla dopo 20 m dal corpo arginale

Dopo aver modificato la mesh di calcolo è stata eseguita nuovamente l'operazione di taratura e calibrazione. La calibrazione del modello viene eseguita per il periodo di inizio febbraio. In questa fase vengono calibrate le proprietà dei terreni ai fini di riscontrare, nei risultati del modello numerico, il reale comportamento verificatosi e i dati di pressione ottenuti dai sensori.

Le total head negli strati sabbiosi si sono poste pari a 22,5 m per lo strato a 10 m di profondità dal piano campagna e di 22,2 m per lo strato più profondo, mentre quella nello strato argilloso superficiale è posta 0,5 m sotto al piano campagna.

Successivamente, apportando modifiche alle caratteristiche dei terreni, mostrate in *Tabella 5*, si sono ottenuti i risultati di *Tabella 6*.

Di seguito le analisi eseguite con i dati di *Tabella 5* verranno distinte dalla dicitura “dati modificati”, mentre la dicitura “dati iniziali” fa riferimento alla geometria variata ma con proprietà dei materiali elencati in *Tabella 1*. In questo modo risulta semplice confrontare i valori e verificare che quelli riportati in *Tabella 5* simulano il comportamento reale in miglior modo.

Tabella 5 - Caratteristiche terreni modificate

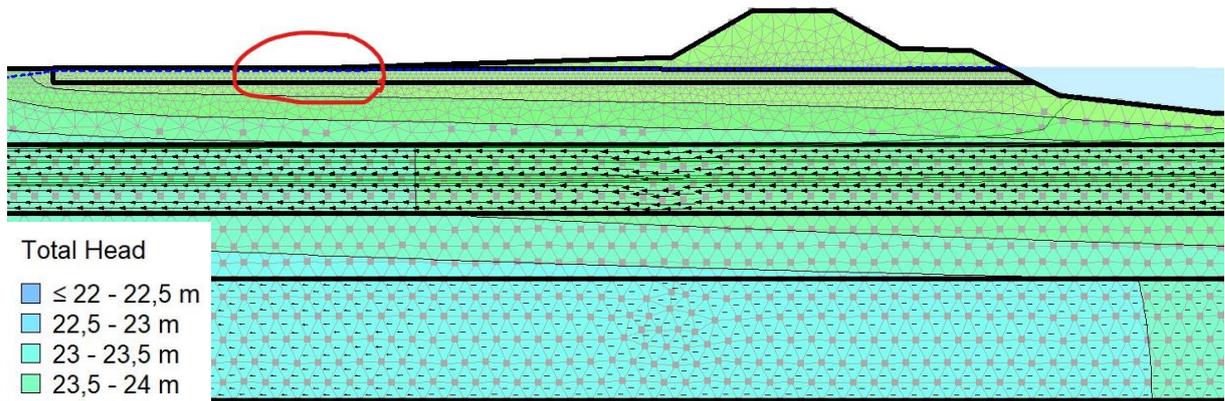
da	a	Terreno	Permeabilità [m/s]	Permeabilità [m/h]	Porosità	ky/kx
0	4,5	argilla1	$7,5 \cdot 10^{-8}$	0,00027	0,47	0,05
4,5	5,5	lente sabbiosa	$2,8 \cdot 10^{-6}$	0,01	0,41	0,1
5,5	10,3	argilla2	$1,1 \cdot 10^{-9}$	0,000004	0,41	0,05
10,3	15,5	sabbia1	$5,7 \cdot 10^{-5}$	0,2052	0,47	0,1
15,5	20,5	limo sabbioso	$5,6 \cdot 10^{-8}$	0,0004	0,44	0,1
20,5	base	sabbia2	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,09	0,47	0,1

In particolare, sono state ridotte le permeabilità dello strato di argilla e anche dello strato del limo sabbioso che suddivide i due livelli di sabbia. In questo modo le pressioni nei punti di controllo diminuiscono in quanto il Gorzone non influisce sulla pressione negli strati sottostanti, come si è notato anche dal confronto dei livelli idrometrici dei fiumi e dai valori registrati dai sensori, data la presenza del livello di argilla, caratterizzato da una permeabilità di $0,4 \cdot 10^{-5}$ m/h. Al contrario, la permeabilità del livello di fondo del fiume Adige è stata aumentata, in modo da riprodurre maggiormente il collegamento idraulico osservate nei dati misurati tra i livelli del fiume Adige e le pressioni nei punti di controllo.

Tabella 6 - Risultati illustrati inizio febbraio

pressione [m s.l.m.]	10 m di profondità	18 m di profondità
dati misurati 1/02/2021 12:50AM	-2,25	-3,18
output modello dati iniziali, situazione 1	-2,07	-2,88
Differenza %	-8,0%	-9,2%
output modello dati modificati, situazione 1	-2,31	-3,10
Differenza %	-2,8%	-2,5%
dati misurati 1/02/2021 - 5/02/2021 (media 5 giorni)	-2,27	-3,17
output modello dati iniziali, situazione 2	-2,11	-2,91
Differenza %	-7,1%	-8,3%
output modello dati modificati, situazione 2	-2,27	-3,09
Differenza %	-0,2%	-2,5%
dati misurati 1/02/2021 - 10/02/2021 (media 10 giorni)	-2,37	-3,22
output modello dati iniziali, situazione 3	-2,10	-2,89
Differenza %	-11,3%	-10,2%
output modello dati modificati, situazione 3	-2,32	-3,11
Differenza %	-2,1%	-3,4%

Si può notare come tutte le differenze percentuali tra i dati misurati dai sensori e quelli ricavati come output dal software siano diminuite, indice che il modello si avvicina maggiormente ai valori reali, e quindi meglio riproduce la realtà. Inoltre, è stata riprodotta con successo la condizione delle venute d'acqua assenti in questo periodo come si può notare da *Figura 42*.



- Total Head
- ≤ 22 - 22,5 m
 - 22,5 - 23 m
 - 23 - 23,5 m
 - 23,5 - 24 m
 - 24 - 24,5 m
 - 24,5 - 25 m
 - 25 - 25,5 m
 - 25,5 - 26 m
 - 26 - 26,5 m
 - 26,5 - 27 m
 - 27 - 27,5 m
 - ≥ 27,5 m

Figura 41 - Filtrazione a nord del Gorzone senza venute d'acqua

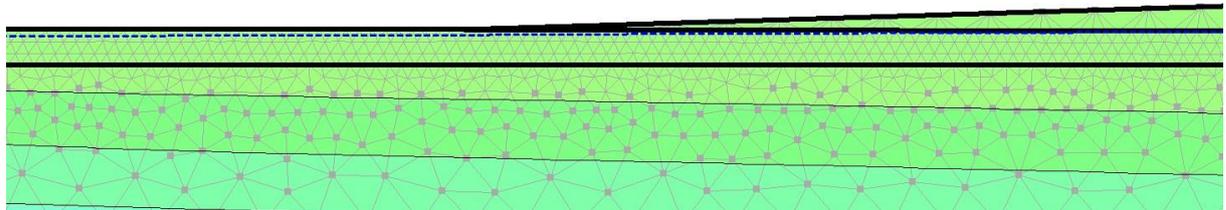


Figura 42 - Dettaglio della zona indicata con il cerchio rosso nella figura precedente: piano campagna senza venute d'acqua

4. RISULTATI

Il seguente capitolo illustra i risultati ottenuti attraverso le modifiche che saranno apportate alle caratteristiche dei materiali e alle condizioni al contorno. I risultati si basano su tempi stazionari quindi per ridurre l'errore che potrebbe essere causato dal tempo di filtrazione lungo gli strati si considerano i livelli dei fiumi medi su un determinato numero di giorni e lo stesso per le pressioni rilevate dai sensori.

Vengono inoltre riportati alcuni dei valori più significativi e delle immagini che mostrano in quale forma si ottengono i risultati e possono dare l'idea del regime di filtrazione instaurato.

4.1. VALIDAZIONE

Durante la seconda fase, quella di validazione del modello, è stato considerato inizialmente un periodo senza condizioni particolari, per poi considerare invece il periodo in cui il fiume Gorzone viene tenuto con un livello elevato dall'attivazione dello sbarramento di Buoro.

Inoltre, si mostra nuovamente la differenza di risultati con il precedente set di caratteristiche e quello attuale per il periodo di fine febbraio.

Le condizioni al contorno utilizzate come total head negli strati sabbiosi sono rimaste invariate; quindi, imposte pari a 22,5 m e 22,2 m rispettivamente per lo strato costituito da sabbia alla profondità di 10 m e di 18 m dal piano campagna.

In questo caso viene considerata una misura puntuale del giorno 25/02/2021 e se ne mostrano i risultati in *Tabella 7*.

Tabella 7 – Risultati del giorno 25 febbraio

pressione [m s.l.m.]	Piezometro 10 m di profondità	Piezometro 18 m di profondità
dati misurati 25/02/2021 12:50AM	-2,47	-3,34
output modello dati iniziali	-2,13	-2,91
Differenza %	-13,7%	-12,7%
output modello dati modificati	-2,35	-3,13
Differenza %	-4,6%	-6,2%

Si apprezza la contenuta differenza percentuale inferiore al 10%; quindi, risulta essere una buona stima del comportamento effettivamente riscontrato nella realtà.

Anche in questo caso si sono eliminate le venute d'acqua a lato campagna dato che nel luogo si iniziano a vedere a marzo quando viene attivato il manufatto di Buoro.

Di seguito, in *Tabella 9* si riportano i risultati ottenuti nel periodo di attivazione del manufatto. Le condizioni al contorno utilizzate rimangono invariate per quanto riguarda la total head negli strati sabbiosi, mentre i livelli idrometrici dei fiumi vengono modificati applicando quelli registrati dagli idrometri, riportati di seguito in *Tabella 8*.

Tabella 8 – dati livelli idrometrici e piezometri

Situazione		[m s.l.m.]	Livello idrometrico Gorzone	Livello idrometrico Adige	Piezometro 1 10 m dal piano campagna	Piezometro 2 18 m dal piano campagna
5	Manufatto Buoro attivato	15/03/2021 12:50 AM	0,06	1,44	-2,59	-3,43
6	Manufatto Buoro attivato media 5 giorni	11/03/2021 - 15/03/2021 (media 5 giorni)	0,04	1,47	-2,67	-3,47

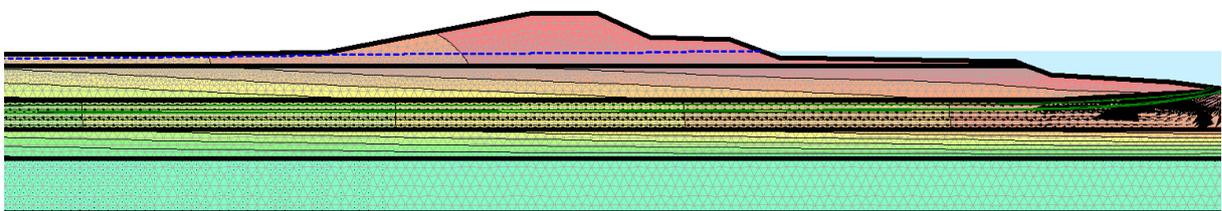
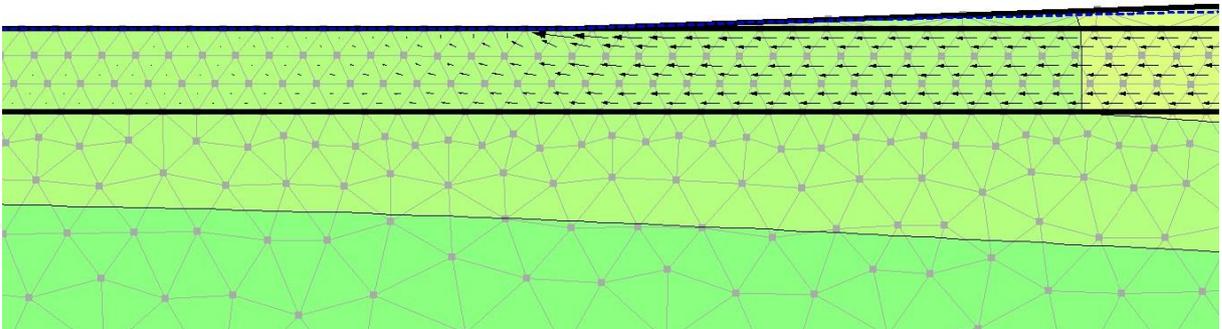
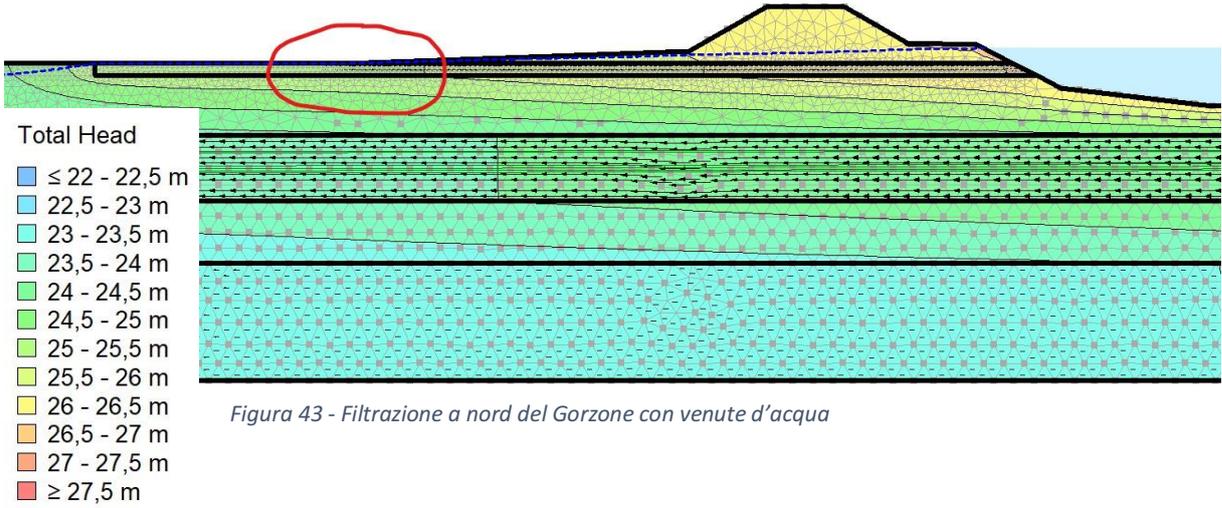
Innanzitutto, si possono notare venute d'acqua a lato campagna simbolo che il modello riproduce con buona approssimazione i dati rilevati in sito.

Inoltre, anche in questo caso le differenze percentuali risultano essere minori del 10%, come mostrato in *Tabella 9*; quindi, è possibile procedere all'utilizzo del modello anche in altre situazioni per simulare il regime di filtrazione.

Tabella 9 - Risultati attivazione manufatto di Buoro

Pressione [m s.l.m.]	Piezometro 10 m di profondità	Piezometro 18 m di profondità
Dati misurati 11/03/2021 - 15/03/2021 (media 5 giorni)	-2,67	-3,47
output modello	-2,47	-3,15
Differenza %	-8,2%	-10,1%

Dati misurati 15/03/2021 12:50AM	-2,590	-3,427
output modello	-2,368	-3,138
Differenza %	-8,6%	-8,4%



Inoltre, è stata calcolata la portata media filtrante attraverso la lente sabbiosa utilizzando la legge di Darcy [5,8] riportata di seguito.

$$Q = vA; \quad v = ki$$

Q è il volume di fluido filtrato per unità di tempo ovvero la portata, v è la velocità di filtrazione, A è l'area della sezione trasversale del suolo corrispondente al flusso Q, k è la permeabilità del terreno e $i = \frac{\Delta h}{L}$ è il gradiente idraulico calcolato come rapporto tra la differenza delle altezze piezometriche e la lunghezza di filtrazione.

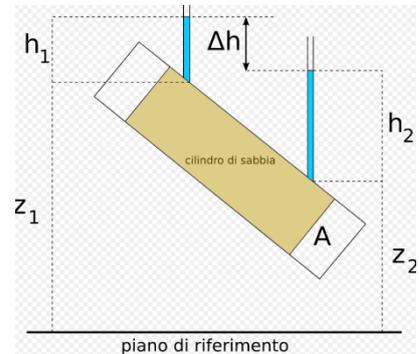


Figura 46 - Legge di Darcy (rappresentazione Δh) [VIII]

Viene calcolata la portata in condizioni critiche quindi nel caso in cui sia alzato lo sbarramento del manufatto di Buoro. In queste condizioni all'inizio della sezione registriamo un valore piezometrico di 26,525 m.

Per il calcolo viene presa in considerazione una sezione verso il lato campagna in cui il livello piezometrico misura 25,684 m con una distanza dall'inizio di 45,2 m. Il gradiente idraulico che ne risulta assume il valore adimensionale di 0,0186, che moltiplicato per la permeabilità della lente sabbiosa $k=0,01$ m/h, fornisce una velocità di filtrazione pari a 0,000186 m/h.

Tenendo in considerazione lo spessore della lente pari a 1 m, come definito nei capitoli precedenti, e ipotizzando profondità unitaria, la portata d'interesse risulta essere 0,186 l/h.

Il risultato ottenuto corrisponde approssimativamente a quello ottenuto con il software. Esso restituisce la portata uscente in diversi vertici del contorno del dominio e sommandoli si ritrova il valore approssimato di 0,21 l/h come mostrato in *Tabella 10*.

Tabella 10 - Portata con permeabilità della lente sabbiosa pari a $k=0,01$ m/h

Water Flux (m ³ /hr) $k=0,01$ m/h					
$-1,3 \cdot 10^{-8}$	$-7,26 \cdot 10^{-7}$	$-1,77 \cdot 10^{-6}$	$-4,03 \cdot 10^{-6}$	$-9,20 \cdot 10^{-6}$	$-2,31 \cdot 10^{-5}$
$-2,85 \cdot 10^{-7}$	$-9,21 \cdot 10^{-7}$	$-2,18 \cdot 10^{-6}$	$-4,94 \cdot 10^{-6}$	$-1,14 \cdot 10^{-5}$	-0,00011
$-4,14 \cdot 10^{-7}$	$-1,15 \cdot 10^{-6}$	$-2,68 \cdot 10^{-6}$	$-6,06 \cdot 10^{-6}$	$-1,43 \cdot 10^{-5}$	
$-5,59 \cdot 10^{-7}$	$-1,43 \cdot 10^{-6}$	$-3,28 \cdot 10^{-6}$	$-7,46 \cdot 10^{-6}$	$-1,80 \cdot 10^{-5}$	Totale: -0,00021

È stata calcolata la portata anche attraverso la simulazione della filtrazione nel caso in cui il dispositivo di Buoro sia attivato ipotizzando che la lente sabbiosa abbia la permeabilità iniziale pari a $k=0,36$ m/h. Essa corrisponde alla permeabilità iniziale riportata in *Tabella 1* che poi è stata successivamente modificata ricreando una situazione più consona alla realtà. Essendo leggermente diverse anche le perdite di carico durante la filtrazione, è stato calcolato il nuovo gradiente idraulico nello stesso modo descritto in precedenza ed è risultato pari a 0,0217.

Successivamente, applicando le stesse semplificazioni e gli stessi passaggi visti sopra si ottiene una portata media pari a 7,8 l/h.

Essa è stata confrontata con quella ottenuta dal software che si riporta di seguito insieme ai valori restituiti nei diversi vertici del contorno del dominio. La somma, ovvero la portata media, è riportata nell'ultima cella della *Tabella 11* ed è pari a 7,5 l/h che corrisponde approssimativamente a quella calcolata.

Tale valore è abbastanza elevato ma si vuole evidenziare il gradiente idraulico, che risulta molto simile nei due casi. Ciò significa che la filtrazione profonda non è influenzata significativamente dalla filtrazione superficiale analizzata.

Tabella 11 - Portata con permeabilità della lente sabbiosa pari a $k=0,36$ m/h

Water Flux (m ³ /hr) $k=0,36$ m/h					
$-1,85*10^{-6}$	$-3,05*10^{-5}$	$-7,42*10^{-5}$	-0,00017	-0,00039	-0,0036
$-1,23*10^{-5}$	$-3,86*10^{-5}$	$-9,12*10^{-5}$	-0,00021	-0,00049	-0,00265
$-1,76*10^{-5}$	$-4,83*10^{-5}$	-0,00011	-0,00026	-0,00062	
$-2,36*10^{-5}$	$-6,00*10^{-5}$	-0,00014	-0,00031	-0,00079	Totale: -0,00749

4.2. CONDIZIONI DI MAGRA E DI PIENA DEL FIUME ADIGE

Nelle condizioni di magra e di piena del fiume Adige, rispettivamente il giorno 30/04/2021 e 15/05/2021, il manufatto di Buoro era attivo ed erano presenti le venute d'acqua al lato campagna del fiume Gorzone.

Viste le contenute differenze percentuali in situazioni di livelli idrometrici differenti, si procede alla stima delle pressioni negli strati profondi confinati attraverso il modello precedentemente validato.

La total head negli strati sabbiosi rimane invariata assumendo i valori di 22,5 m e 22,2 m rispettivamente per lo strato a 10 m e 18 m di profondità.

Come livello idrometrico del canale Gorzone si è assunto il valore di 0,16 m s.l.m. per entrambi i casi dato che il manufatto di Buoro ne mantiene costante l'altezza.

Per quanto riguarda il livello del fiume Adige è stato misurato dagli idrometri nelle condizioni di magra e di piena del fiume rispettivamente pari a 1,03 m s.l.m. e 3,30 m s.l.m.

Tabella 12 – Dati livelli idrometrici

	Situazione	[m s.l.m.]	Livello idrometrico Gorzone	Livello idrometrico Adige
7	Condizioni di magra dell'Adige	30/04/2021 09:30 AM	0,16	1,03
8	Condizioni di piena dell'Adige	15/05/2021 12:30 AM	0,16	3,30

Si riportano le immagini del fiume Adige al fine di visualizzarne la variazione di livello.

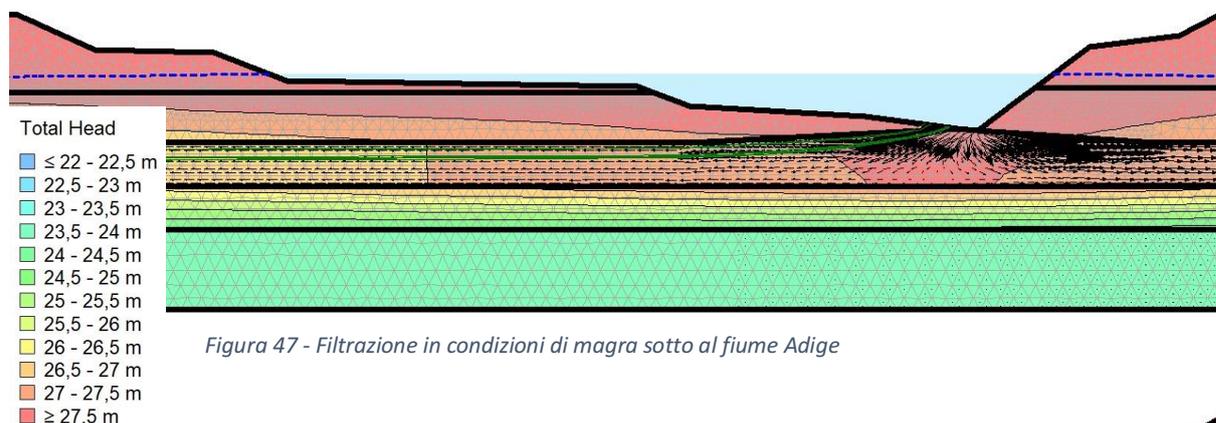


Figura 47 - Filtrazione in condizioni di magra sotto al fiume Adige

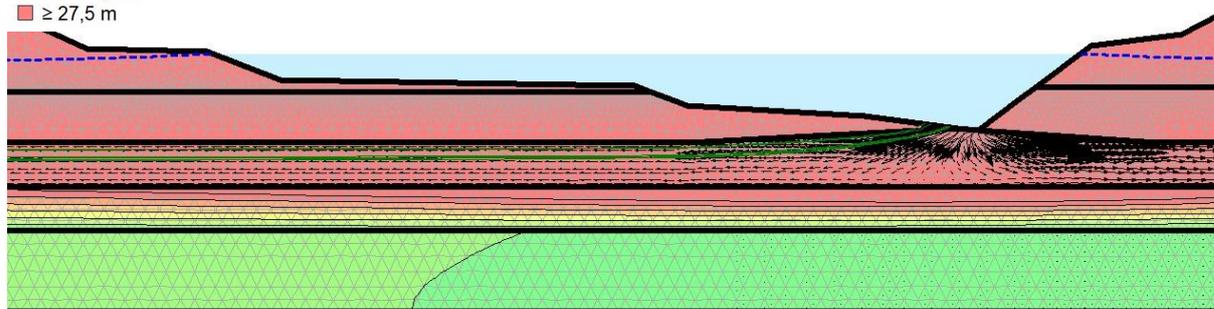


Figura 48 - Filtrazione in condizioni di piena sotto al fiume Adige

Dalle Figure 47 e 48 si può apprezzare anche un notevole incremento della pressione nel caso di Adige in piena indicato dal colore rosso. Inoltre, si può notare un lieve aumento delle dimensioni dei vettori di flusso che sono riportati paralleli al flusso d'acqua.

Inoltre, si riporta il grafico del periodo che comprende la condizione di magra (30/04/2021) e di piena (15/05/2021) in *Figura 49*.

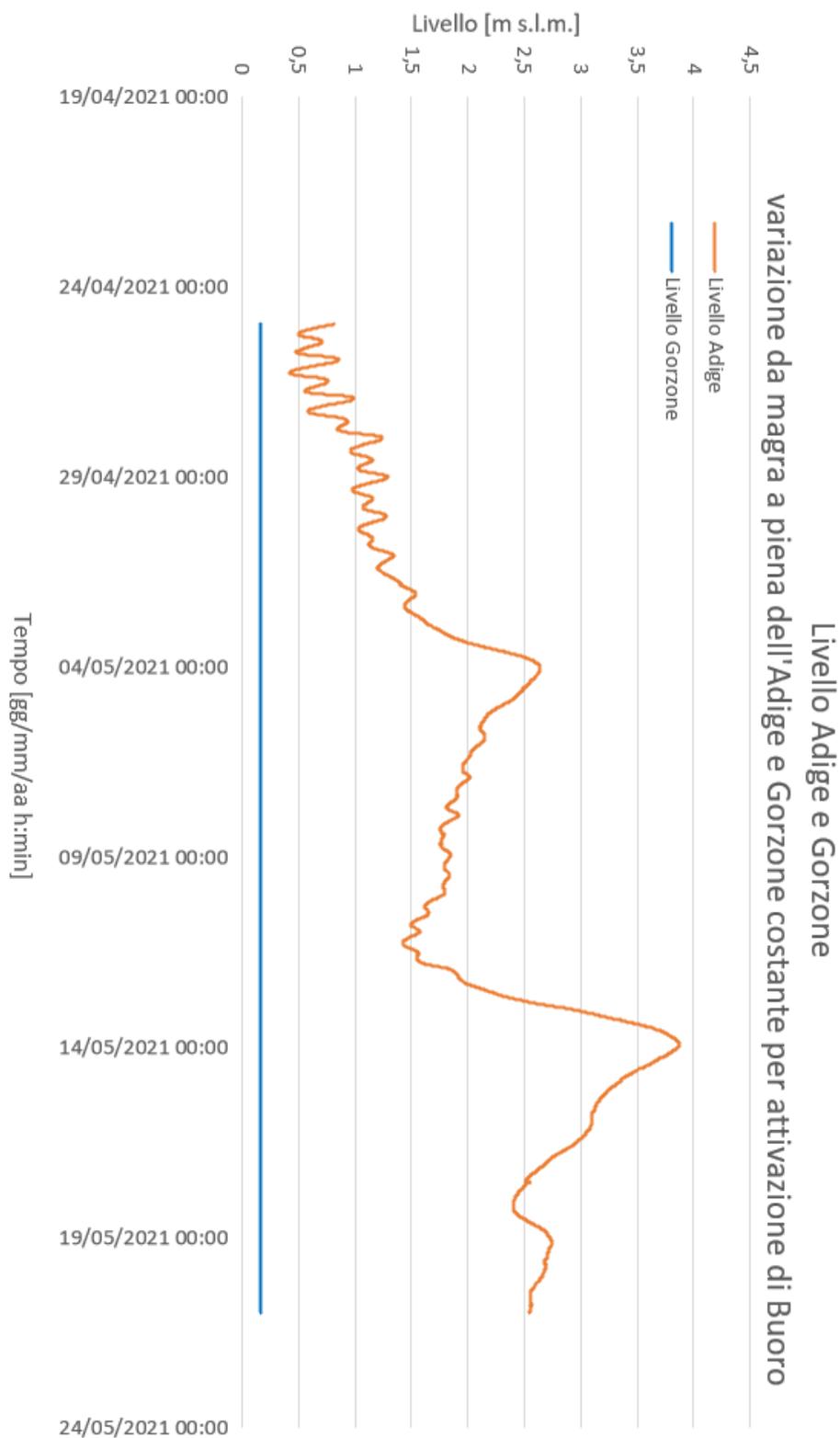


Figura 49 - Livelli idrometrici Adige e Gorzone

Dalla simulazione si ottengono i risultati illustrati in *Tabella 13*. Essi dimostrano essere abbastanza in linea con quanto espresso da studi precedenti che accennavano a variazioni di 0,4

m per la pressione a 10 m di profondità [8]; infatti, se paragonati ai risultati ottenuti a metà marzo che mostravano una pressione di circa -2,4 m, la variazione a cui si assiste è di 0,5 m.

Tabella 13 - Risultati nelle condizioni di magra e di piena del fiume Adige

Pressione [m s.l.m.]	Piezometro 10 m di profondità	Piezometro 18 m di profondità
output modello dati modificati, situazione 1 (01/02/2021)	-2,31	-3,10
(condizione di magra dell'Adige) Output modello 30/04/2021 09:30 AM	-2,50	-3,21
Differenza (%)	-8,3%	-3,6%
(condizione di piena dell'Adige) Output modello 15/05/2021 12:30 AM	-1,87	-2,81
Differenza (%)	19,0%	9,4%
Differenza (%)	25,2%	12,5%

Le pressioni negli strati sabbiosi risentono molto della piena del fiume Adige presentando anch'esse un aumento, mentre in condizioni di magra diminuiscono. La variazione a cui si assiste tra condizioni di magra e di piena è di 0,63 m per il punto di controllo alla profondità di 10 m, mentre in quello di profondità pari a 18 m la variazione è di 0,6 m corrispondenti rispettivamente a una variazione percentuale del 25,2% e 12,5%; esse sono riportate nell'ultima riga della *Tabella 13*.

Sono state calcolate anche le variazioni percentuali tra una situazione del livello dell'Adige media che potrebbe essere quella presente al giorno 01/02/2021 e la condizione di magra e di piena. Si nota che lo strato in connessione idraulica con il letto dell'Adige subisce una differenza di pressioni maggiore rispetto allo strato sabbioso più profondo.

Innanzitutto, è importante notare che in entrambi i casi sono presenti venute d'acqua al lato campagna dell'argine sinistro del Gorzone, ed il modello riproduce bene le venute d'acqua (vedi *Figura 50 e 51*). Le figure citate mostrano come variano le pressioni nel punto di profilo di nostro interesse in particolare in corrispondenza dei punti di controllo indicati in rosso. Confrontando il caso che rappresenta la condizione di magra e quella di piena, si può apprezzare

lo slittamento del confine delle aree con diverso colore verso sinistra che stanno ad indicare la presenza di pressioni maggiori negli strati in cui sono presenti i punti di controllo.

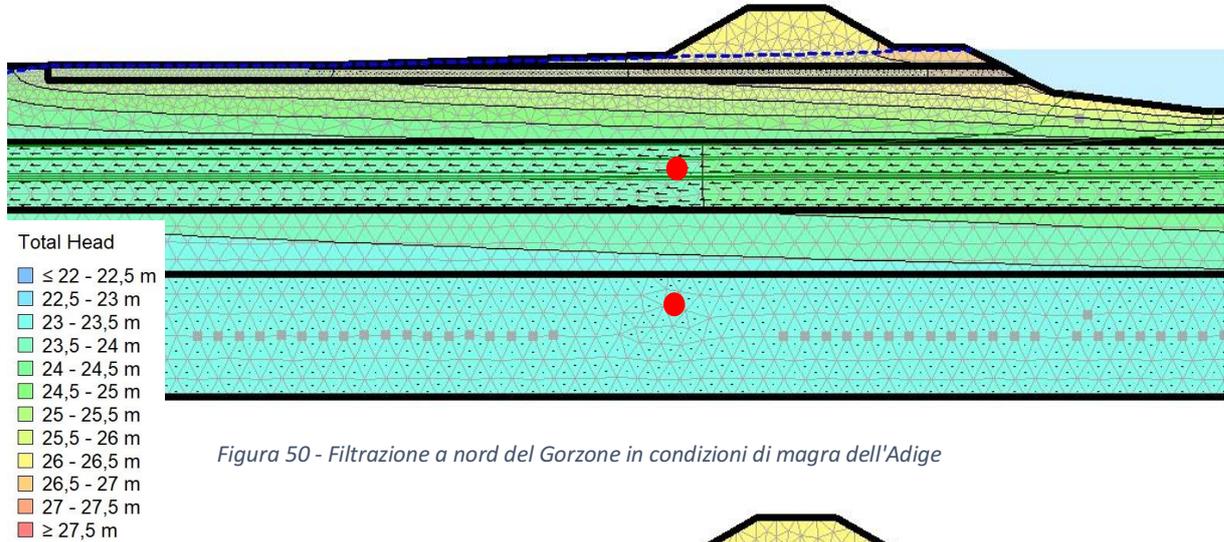


Figura 50 - Filtrazione a nord del Gorzone in condizioni di magra dell'Adige

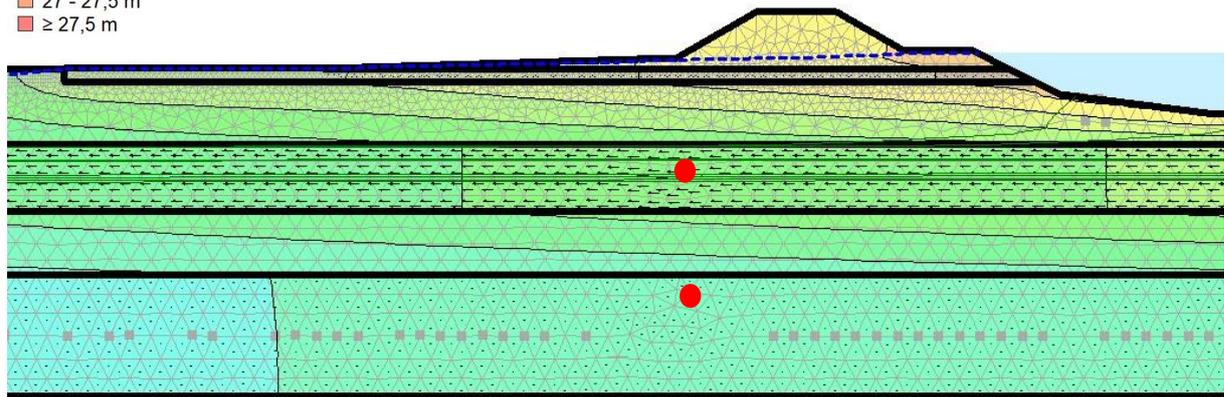


Figura 51 - Filtrazione a nord del Gorzone in condizioni di piena dell'Adige

In secondo luogo, sono stati esportati i risultati della portata media uscente dal piano al piede dell'argine del Gorzone e riportati in *Tabella 12* e *13* per capire in quale modo il livello del fiume Adige condizioni la portata delle venute d'acqua presenti.

Tabella 14 – Portata uscente in condizioni di magra dell'Adige

Water Flux (m ³ /hr) condizione di magra dell'Adige					
-1,92*10 ⁻⁷	-8,05*10 ⁻⁷	-1,78*10 ⁻⁶	-3,76*10 ⁻⁶	-7,97*10 ⁻⁶	-1,85*10 ⁻⁵
-3,58*10 ⁻⁷	-9,66*10 ⁻⁷	-2,12*10 ⁻⁶	-4,43*10 ⁻⁶	-9,57*10 ⁻⁶	-2,22*10 ⁻⁵
-4,96*10 ⁻⁷	-1,19*10 ⁻⁶	-2,62*10 ⁻⁶	-5,45*10 ⁻⁶	-1,15*10 ⁻⁵	

$-6,09 \cdot 10^{-7}$	$-1,45 \cdot 10^{-6}$	$-3,07 \cdot 10^{-6}$	$-6,53 \cdot 10^{-6}$	$-1,46 \cdot 10^{-5}$	Totale: $-1,20 \cdot 10^{-4}$
-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	----------------------------------

Tabella 15 - Portata uscente in condizioni di piena dell'Adige

Water Flux (m ³ /hr) condizione di piena dell'Adige					
$-4,46 \cdot 10^{-7}$	$-1,02 \cdot 10^{-6}$	$-2,17 \cdot 10^{-6}$	$-4,48 \cdot 10^{-6}$	$-9,66 \cdot 10^{-6}$	$-2,23 \cdot 10^{-5}$
$-5,71 \cdot 10^{-7}$	$-1,24 \cdot 10^{-6}$	$-2,66 \cdot 10^{-6}$	$-5,51 \cdot 10^{-6}$	$-1,16 \cdot 10^{-5}$	-0,00011
$-6,76 \cdot 10^{-7}$	$-1,50 \cdot 10^{-6}$	$-3,12 \cdot 10^{-6}$	$-6,58 \cdot 10^{-6}$	$-1,47 \cdot 10^{-5}$	
$-8,64 \cdot 10^{-7}$	$-1,83 \cdot 10^{-6}$	$-3,80 \cdot 10^{-6}$	$-8,04 \cdot 10^{-6}$	$-1,86 \cdot 10^{-5}$	Totale: $-2,30 \cdot 10^{-4}$

Possiamo notare che nel caso in cui l'Adige fosse in piena le portate medie uscenti a causa della filtrazione arginale sarebbero leggermente maggiori; passando da un valore di 0,12 l/h a 0,23 l/h. Questo indica che il livello dell'Adige influenza solamente in parte le venute d'acqua a lato campagna sebbene esse siano principalmente influenzate dalla permeabilità della lente sabbiosa collocata alla base dell'argine, e dal livello del Gorzone mantenuto costantemente alto dall'azione del manufatto di Buoro, come visto in precedenza. L'influenza dell'Adige sulle venute d'acqua resta quindi limitata e contenuta in quanto, in questo caso, è stata considerata la condizione di piena, ovvero del livello massimo raggiunto nel periodo di indagine.

Infine, sono state inserite due sezioni di flusso, indicate in Figura 52 attraverso le frecce blu direzionate verso l'alto, in corrispondenza degli strati sabbiosi in analisi.

Il software in questo caso riporta il valore del flusso che attraversa le due sezioni.

I dati di flusso si sono ricavati sia in condizione di magra sia in condizione di

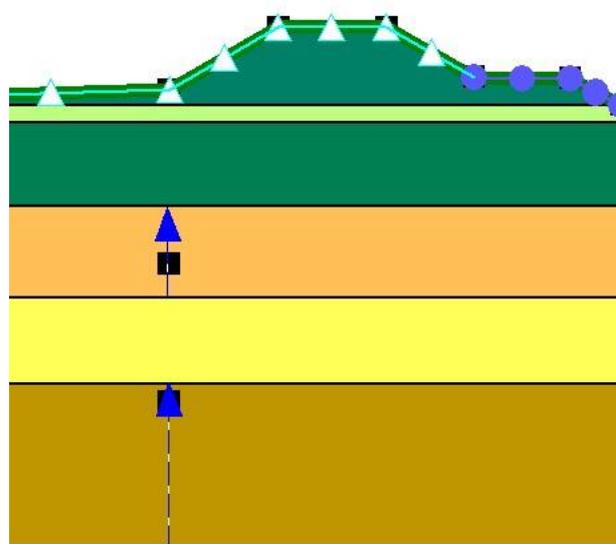


Figura 52 - Sezioni di flusso

piena e sono riportati in *Tabella 16*. Essi confermano la dipendenza del flusso nelle falde a 10 e 18 m di profondità dal piano campagna dal livello dell'Adige; infatti, le differenze percentuali ottenute per le due sezioni tra la condizione di magra e di piena corrispondono al 45,5% e al 43,1%.

Tabella 16 - flusso attraverso le due sezioni negli strati di sabbia

Flusso [m ³ /hr]	Sezione nello strato di sabbia a 10 m di profondità	Sezione nello strato di sabbia a 18 m di profondità
(condizione di magra dell'Adige) 30/04/2021 09:30 AM	0,0055	0,0030
(condizione di piena dell'Adige) Output modello 15/05/2021 12:30 AM	0,0081	0,0043
Differenza (%)	45,5%	43,1%

CONCLUSIONI

Da studi precedentemente svolti si era notato che le pressioni misurate negli strati sabbiosi non erano influenzate solo dal livello idrometrico del canale Gorzone e si era inizialmente ipotizzata l'influenza del fiume Adige.

La tesi aveva l'obiettivo di analizzare in regime di filtrazione considerando anche l'influenza dell'Adige ai fini di avere un inquadramento migliore della situazione in sito nel periodo in cui si osservano fontanazzi.

Inizialmente è stato calibrato il modello durante un periodo in cui le venute d'acqua non erano presenti, successivamente è stato validato considerando due periodi temporali differenti caratterizzati da diverse condizioni idrauliche: nel primo periodo, ovvero dal giorno 01/02/2021 al giorno 25/02/2021, non erano state ancora registrate delle venute d'acqua al lato nord del Gorzone, il secondo periodo, ovvero dal giorno 11/03/2021 al giorno 15/05/2021, invece era caratterizzato da fontanazzi.

Nello studio sono stati presi in considerazione periodi temporali di rilievo che hanno permesso di verificare la grande influenza del livello dell'Adige negli strati sabbiosi sottostanti. Esso risulta essere, in particolare, connesso con lo strato di sabbia alla profondità di 10 m dalla sommità arginale del canale Gorzone.

Il periodo analizzato parte da inizio febbraio e si protrae fino a metà marzo che corrisponde al periodo in cui il manufatto di Buoro viene attivato influenzando il livello del Gorzone. Quest'ultimo manifesta una tendenza crescente del livello idrometrico, mentre il fiume Adige evidenzia una tendenza decrescente. L'osservazione riportata è importante se confrontata con le pressioni misurate in sito dal piezometro posto a 10 m di profondità, nello strato idraulicamente connesso con il fiume Adige; infatti, queste riportano valori decrescenti, come anche quelli registrati dal piezometro posto a 18 m dalla sommità arginale del Gorzone.

Dopo la validazione del modello è stata simulata la filtrazione nei casi di magra e piena del fiume Adige, mentre il livello idrometrico del Gorzone è rimasto invariato. Calcolandone la portata media uscente dal piano campagna si può osservare una differenza di venute d'acqua. In particolare, esse raddoppiano a fronte di un aumento del livello piezometrico dell'Adige di circa 2,3 m.

La portata media delle venute d'acqua osservate è comunque collegata maggiormente alla permeabilità della lente sabbiosa e al livello del Gorzone; la variazione di questo parametro comunque non comporta differenze rilevanti negli strati profondi.

L'analisi conferma quello che si era dedotto dagli studi precedenti; infatti, è stata riprodotta e confermata la dipendenza della pressione negli strati profondi dal livello dell'Adige grazie ai dati ottenuti dal modello per quanto riguarda il flusso attraverso le due sezioni poste nei due strati in analisi e alle pressioni ottenute dal modello.

Il fenomeno dei fontanazzi, quindi, risulta essere riconducibile per la maggior parte alla lente di sabbia presente alla base del rilevato arginale; infatti, l'aumento di un ordine di grandezza della permeabilità di quest'ultima porta alla crescita della portata da 0,21 l/h a 7,5 l/h mentre la variazione del livello dell'Adige di 2 m porta alla crescita della portata da 0,12 l/h a 0,23 l/h.

Per porre fine alle venute d'acqua rilevate si potrebbe eseguire un diaframma con la funzione di allungare il percorso di filtrazione e quindi di riaffiorare oltre il piede del rilevato. La dissipazione di energia che ne consegue, impedisce l'innescio di fenomeni di sifonamento come mostrato in *Figura 53*. Si riportano due esempi di utilizzo dei diaframmi per la risoluzione dei fontanazzi [10].

I diaframmi oltre che al piede degli argini possono essere utilizzati per impermeabilizzare il corpo stesso del rilevato e rafforzarlo come in *Figura 54*.

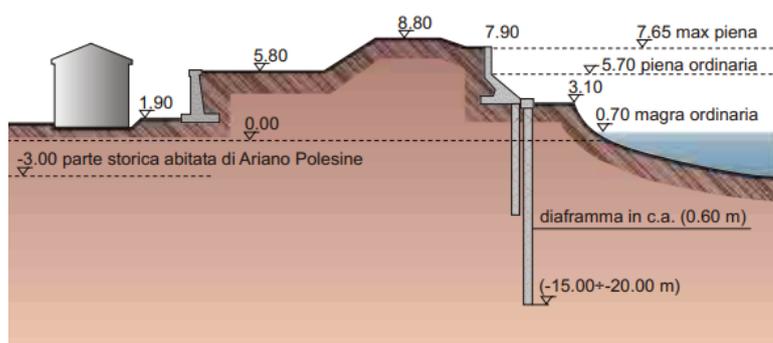


Figura 53 - Muro di sostegno e diaframma adottato ad Ariano Polesine

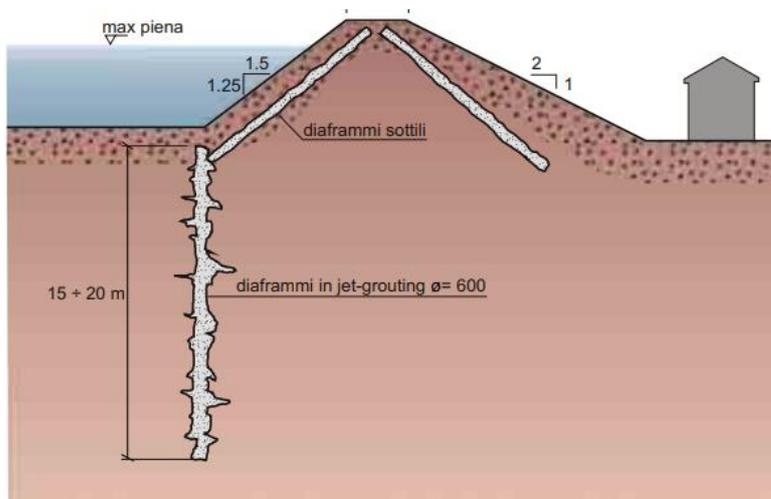


Figura 54 - Diaframmi ai fini di impermeabilizzare adottati lungo il Tagliamento

BIBLIOGRAFIA

- [1] Comina C., Vagnona F., Arato A., Fantina F., Naldi M.. A new electric streamer for the characterization of river embankments. *Engineering Geology* (2020).
- [2] Simonini P., Cola S., Bersan S., Caratterizzazione geotecnica, meccanismi di collasso e monitoraggio degli argini fluviali. *Atti del XXV convegno Italiano di Geotecnica*. (2014).
- [3] CIRIA, Ministry of Ecology of United Kingdom, USACE. *The International Levee Handbook*. CIRIA, London (2013).
- [4] Saad R., Prof. (Dr.) Nawaw M.N.M., Mohamad E. T., *Groundwater Detection in Alluvium Using 2-D Electrical Resistivity Tomography (ERT)*.
- [5] Craig R. F., *Craig's soil mechanics*, seventh edition.
- [6] Revil A., Karaoulis M., Johnson T., Kemna A., Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology, *Hydrogeology Journal* (2012).
- [7] Dott. Geol. Morbin F.. *Relazione tecnica indagini geotecniche in località San Gaetano e Boscochiario (cimitero) argine sinistro del fiume Gorzone*, (2014).
- [8] Coordinatore: Prof. Ing. Cola S.. Redatto: Ing. Fabbian N., Ing. Dalla Santa G., Ing. Schenato L.. *Indagini e monitoraggio dell'argine in sinistra idraulica del fiume Gorzone in comune di Cavarzere (VE) nell'ambito dei "Lavori per l'intercettazione delle filtrazioni in sinistra idraulica del fiume Gorzone in località Boscochiario in comune di Cavarzere (VE)"*, (2021).
- [9] GEO-SLOPE International Ltd., *seepage modeling with SEEP/W, an Engineering Methodology*, (2012).
- [10] APAT Agenzia Per la protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici. *Atlante delle opere di sistemazione fluviale. Manuali e linee guida* (2003).

SITOGRAFIA

[I] <https://www.tecnostudio.pd.it/le-prove-penetrometriche/>

[II] <https://www.geofisicasrl.it/>

[III] <https://earth.google.com/web/>

[IV] https://www.acegasapsamga.it/attivita_servizi/acqua_ciclo_idrico/cenni_storici_acqua/

[V] <https://idt2.regione.veneto.it/idt/downloader/download>

[VI] <https://www.unioncamereveneto.it>

[VII] <https://chioggia.indiretta.news/>

[VIII] https://it.wikipedia.org/wiki/Legge_di_Darcy

RINGRAZIAMENTI

Vorrei dedicare questo spazio a chi, con impegno e costanza, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato.

Un ringraziamento speciale va alla mia relatrice Cola Simonetta, la quale mi ha permesso di affrontare questo percorso di crescita, e alla mia correlatrice Dalla Santa Giorgia per i suoi preziosi consigli. Ringrazio entrambe per la loro grande disponibilità e per la tempestività ad ogni mia richiesta.

Ringrazio di cuore la mia famiglia, le mie cugine e Pietro perché, con il loro supporto e i loro insegnamenti, hanno contribuito al raggiungimento di un traguardo importante.

Infine, ringrazio i miei compagni di corso e gli amici che mi hanno ascoltata ad ogni difficoltà e che hanno reso il mio percorso più sereno e spensierato.