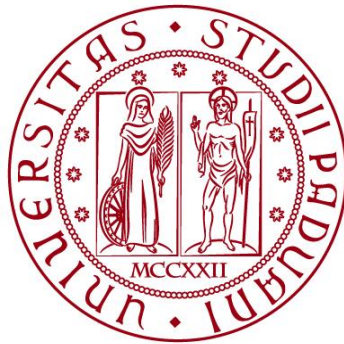


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E**  
**AMBIENTALE**

*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio



**TESI DI LAUREA**  
**ANALISI DELLA FILTRAZIONE ATTRAVERSO UN CORPO**  
**ARGINALE TRAMITE MODELLO FEM CALIBRATO SU**  
**MISURE DI TEMPERATURA ESEGUITE CON FIBRA OTTICA**  
**IN TRINCEA ORIZZONTALE**

**Relatore: Dott.ssa GIORGIA DALLA SANTA**

**Laureando: SAMUELE CAMPELLO**

**ANNO ACCADEMICO 2022-2023**

## ABSTRACT

Seepage through an embankment body or through its foundation can compromise the effectiveness of the infrastructure or cause it to collapse. A tool that can give spatially distributed monitoring of filtration is the optical fiber (Distributed fiber optic sensing, DFOS). Some relevant uses of this technology are analyzed. Then, a modeling is carried out using the FeFlow FEM software, to better evaluate the seepage of the Adige river water, in a site near Salorno (BZ), with the aim of evaluating the contribution of seepage on the measured temperature over time. It is evaluated whether the stratigraphy estimated and used in the model was compatible with the surveys of the DFOS system on site. The calibration process led to change some permeability parameters. The analysis of the influence of seepage to the temperature field suggests that it is unlikely that the cold river water could directly influence the temperature measured at the OF. On the other hand, it is quite clear that the seepage mechanism during the flood event pushed resident water upwards, thus increasing the measured temperature.

## SOMMARIO

La filtrazione attraverso un corpo arginale o attraverso la sua fondazione può compromettere l'efficacia dell'opera o causarne il collasso. Uno strumento che permette il monitoraggio spazialmente distribuito della filtrazione è la fibra ottica (distributed fibre optic sensing, DFOS). Sono analizzati alcuni impieghi di rilievo di questa tecnologia. Successivamente è svolta una modellizzazione tramite il software FEM FeFlow per la filtrazione presso l'argine del fiume Adige vicino a Salorno (BZ), con lo scopo di valutare i contributi della filtrazione sull'andamento di temperatura misurato. È stato valutato se la stratigrafia stimata e impiegata nel modello è compatibile con le rilevazioni del sistema DFOS in sito. Il processo di calibrazione ha portato a variare alcuni valori di permeabilità. Dall'analisi del contributo della filtrazione sulla temperatura, risulta poco probabile che alla sezione analizzata l'acqua fredda del fiume abbia avuto un'influenza diretta sulle misure delle FO. Risulta invece che la filtrazione innescata dalla piena abbia spinto l'acqua residente verso la superficie, aumentando lievemente la temperatura presso le FO.

## Sommario

### **CAPITOLO 1**

1 Introduzione .....	6
1.1 Struttura di un argine.....	8
Altri elementi: sopralzi e drenaggi .....	9
1.2 Cause di collasso arginale .....	10
2 La filtrazione.....	11
2.1 Reticoli di filtrazione.....	11
Sifonamento.....	11
Capillarità.....	12
2.2 Meccanismi di filtrazione attraverso un argine in terra .....	13
2.2.1 Il piping .....	15
2.2.2 Valutazione delle variabilità del materiale.....	18
2.3 I possibili effetti della filtrazione sulla resistenza al taglio del materiale.....	20
2.4 Esempi reali di collasso arginale provocato dalla filtrazione.....	21
Fiume Foenna (2006) .....	21
Fiume Secchia (2014).....	22
Fiume Serchio (2009).....	23
3 Impiego, limiti e vantaggi della DFOS: analisi della letteratura .....	24
3.1 La necessità di un monitoraggio distribuito .....	24
3.1.1 Monitoraggio distribuito tramite ERT .....	25
3.2 DFOS: distributed fibre optic sensing.....	26
3.2.1 Principio di funzionamento .....	27
3.2.2 Calibrazione .....	28
3.2.3 Installazione .....	29
3.2.4 I metodi passivo e attivo.....	30
3.2.5 Impiego DFOS: analisi dei risultati dalla letteratura .....	33
3.3 Teoria del trasporto di fluido e calore in un mezzo poroso .....	42
3.3.1 Equazioni del trasporto di fluido in mezzo poroso.....	42
3.3.2 Equazioni del trasporto di calore in mezzo poroso .....	43

### **CAPITOLO 2**

1 Obiettivo.....	47
2 Introduzione al caso studio: l'Adige a Salorno .....	47
2.1 Caratteristiche geografiche e morfologiche.....	47
2.2 Indagini geotecniche.....	49

2.3 Geometria e stratigrafia .....	52
3 Materiali e metodi.....	53
3.1 Teoria della modellizzazione numerica agli elementi finiti .....	53
3.1.1 Il metodo variazionale di Galerkin .....	53
3.1.2 Soluzione di un problema agli elementi finiti.....	54
3.2 Il software FeFlow .....	57
3.3 Elaborazione dei dati .....	57
4 Descrizione: il modello implementato in FeFlow .....	57
4.1 Geometria e mesh .....	57
4.1.1 Mesh.....	58
4.1.1 Proprietà materiali .....	59
4.1.2 Condizioni al contorno imposte .....	61
4.1.3 Condizioni iniziali imposte .....	63
5 Risultati .....	64
5.1 Calibrazione .....	64
5.2 Dinamica di temperatura osservata .....	68
5.3 Analisi di sensitività .....	73
5.3.1 Relazione tra l'andamento della saturazione e l'andamento dell'altezza piezometrica .....	73
5.3.2 Condizione al contorno per la linea di falda .....	74
5.3.4 Il ruolo del diaframma.....	75
5.3.5 Il ruolo delle precipitazioni .....	77
5.3.6 La presenza di pipe.....	78
5.3.7 Due fronti termici: dalle precipitazioni e dalla piena .....	82
5.3.8 Permeabilità .....	83
5.4 Considerazioni conclusive .....	83
6 Conclusioni .....	84
Bibliografia .....	85

# Capitolo 1

## *La filtrazione attraverso argini in terra: dinamiche, rischi e monitoraggio*

# 1 Introduzione

Molti fiumi italiani presentano argini in terra, costruiti per limitare l'area esondata durante gli eventi di piena o per rettificare il loro percorso. Oggi i progetti di nuova costruzione di argini fluviali in Italia sono molto rari, mentre riceve molta attenzione il monitoraggio e la manutenzione, anche per il fatto che gli eventi di piena stanno diventando più frequenti e più intensi per effetto del cambiamento climatico (EASAC (2018) e Carrera et al. (2015)).

Monitorare la filtrazione è essenziale per individuare gli interventi geotecnici utili a ridurre il rischio di collasso dell'argine, ma anche per osservare nell'immediato gli effetti delle piene, con la possibilità di prescrivere l'evacuazione in prossimità dei tratti più vulnerabili.

Per assolvere a queste funzioni il sistema di monitoraggio deve essere distribuito nello spazio, continuo nel tempo, consultabile in tempo reale e con una risoluzione spaziale abbastanza dettagliata da individuare processi di filtrazione a volte molto localizzati.

I sistemi di misura a fibra ottica dispongono potenzialmente di tutte queste caratteristiche, e per questo sono studiati da oltre 15 anni e sempre più spesso impiegati in siti reali, sebbene non ancora in modo sistematico.

I sistemi di misura a fibra ottica distribuita (*distributed fiber optic sensing* o DFOS) sono particolarmente efficienti nella misura della temperatura.

La temperatura è una variabile che spesso mostra una stretta dipendenza con la filtrazione; tuttavia, ogni caso può presentare peculiarità, e formulare un modello interpretativo valido universalmente è molto difficile. Per facilitare questo processo di interpretazione si può ricorrere a software di modellazione numerica, i quali permettono di integrare i diversi informazioni sperimentali e analizzare il contributo della filtrazione sui dati di temperatura rilevati. Questa procedura di interpretazione mediante software è l'oggetto della presente trattazione.

L'oggetto della modellizzazione di seguito presentata è l'argine sinistro del fiume Adige presso Salorno (BZ). Si tratta di un sito di monitoraggio sperimentale, nel quale sono installati diversi strumenti di misura, tra cui la fibra ottica per il monitoraggio della temperatura; è di particolare interesse per il fatto che è un'area soggetta a fenomeni di *sand boil* anche in tempi recenti.

Il modello numerico, realizzato con il software agli elementi finiti FeFlow, è stato utilizzato per simulare la filtrazione su una sezione trasversale all'argine (quindi con geometria bidimensionale) durante l'intenso evento di piena dell'ottobre 2018. Sebbene i dati di temperatura misurati siano già stati analizzati e interpretati nel dettaglio in pubblicazioni precedenti, l'uso di un modello numerico come FeFlow ha permesso di elaborare ulteriormente i dati e formulare nuove ipotesi, in particolare in merito alle dinamiche di propagazione del calore.

Di seguito, gli argomenti sono suddivisi in due capitoli.

Nel primo capitolo sono riportati alcuni concetti sullo stato dell'arte sul monitoraggio arginale tramite DFOS, particolarmente utili a offrire il contesto e gli scopi dell'elaborazione software eseguita.

Nel secondo capitolo sono riportati i dati relativi al caso studio, i materiali e i metodi utilizzati nell'elaborazione e infine i risultati ottenuti.

# 1.1 Struttura di un argine

Gli argini artificiali limitano il percorso del fiume in un alveo più circoscritto di quello naturale. Per questo motivo nei momenti di piena il livello idrometrico può alzarsi diversi metri sopra il piano campagna, con notevoli rischi per le infrastrutture. Nei principali fiumi della Pianura Padana, gli argini artificiali raggiungono altezze di sette, otto e pure nove metri nel caso del Po e dell'Adige (Figura 1) (EWGOLF., 2018).

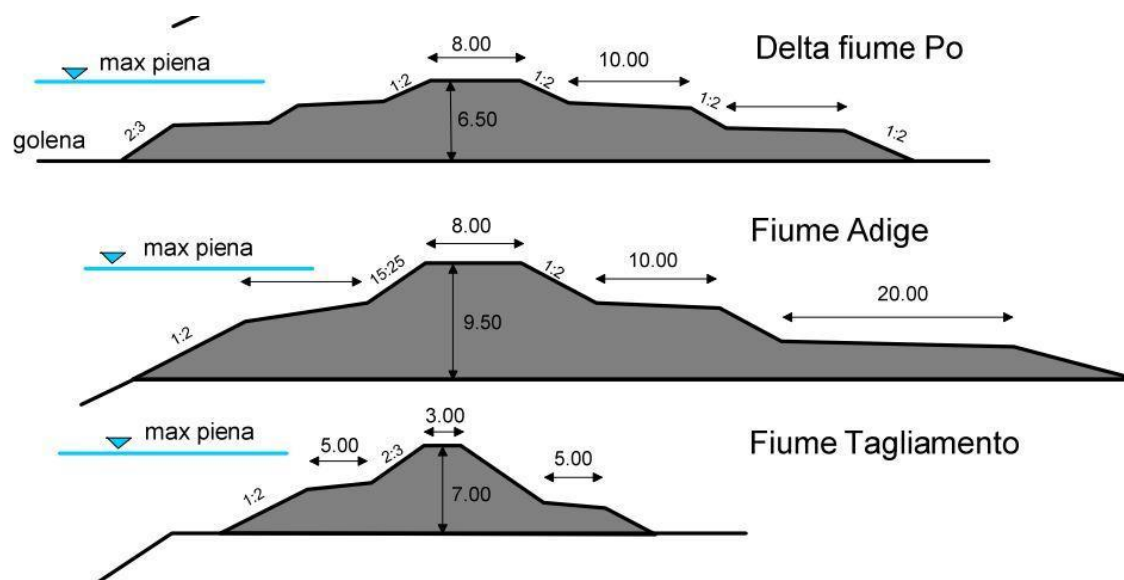


Figura 1- Geometrie degli argini di alcuni dei maggiori fiumi della pianura Padana (Simonini et al., 2014)

Un argine è un rilevato artificiale, che può avere diversa geometria e composizione in base alle esigenze e alla disponibilità di materiali in fase di costruzione.

Rispetto alla geometria, possiamo distinguere essenzialmente due tipologie:

- Argini con berme: prevedono delle estensioni in terra della sponda, a ridotta pendenza, con lo scopo «di stabilizzare il rilevato sui due lati riducendone la pendenza media, di ridurre l'azione erosiva in caso di sormonto della cresta dell'argine, di allungare i percorsi di filtrazione in fondazione e contenere la linea di saturazione del corpo arginale» (Simonini et al., 2014).
- Argini ad unica pendenza: sono privi di berme.

Rispetto alla composizione, gli argini si possono classificare in:

- Argini omogenei: costituiti da uno stesso materiale a bassa permeabilità, opportunamente miscelato.
- Argini zonati: costituiti da due componenti a diversa permeabilità. Si possono avere due configurazioni principali. La prima, prevede un nucleo impermeabile con esternamente rivestimenti più permeabili (analogamente alle dighe in terra più comuni) caratterizzata dalla capacità di trattenere maggiore quantità di acqua. La seconda, prevede un rivestimento impermeabile posto necessariamente lato fiume.



- Con diaframma: il diaframma è una struttura in cemento armato, oppure realizzata tramite jet grouting o ancora in materiale plastico o metallico (palancole), che può essere ammorzato all'interno dell'argine. Data la sua impermeabilità, permette di allungare il percorso di filtrazione quindi ridurre il gradiente idraulico.

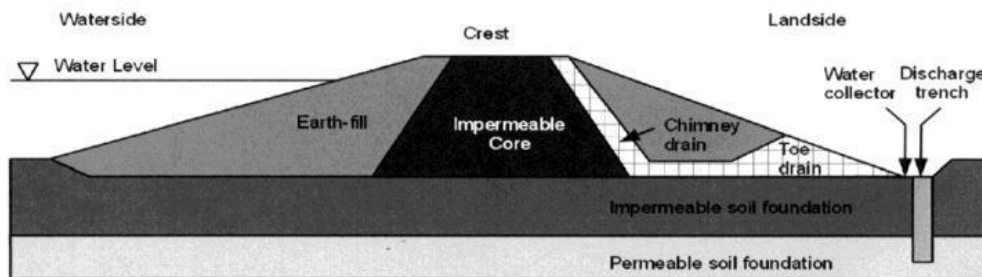


Figura 2 - Argine zonato con nucleo (core) impermeabile e dreno al piede (Simonini et al., 2014)

## Altri elementi: sopralzi e drenaggi

Sempre al fine di agire sulla filtrazione, e in particolare per abbassare la linea di saturazione, possono essere impiegati dei drenaggi lato campagna. I drenaggi vengono posti al piede dell'argine, e agiscono concentrando su di essi le linee di flusso: in questo modo abbassano la linea di saturazione e garantiscono una maggiore resistenza alla struttura.

Per prevenire il rischio di sormonto, è possibile ricorrere a sopralzi realizzati con elementi strutturali (muri a gravità, terra armata, diaframmi). Tuttavia l'impiego di elementi strutturali rigidi (che non rispondono alle deformazioni del corpo arginale) può portare a fenomeni di distacco, e quindi potrebbe aprire vie preferenziali di filtrazione e favorire l'erosione (Simonini et al., 2014).

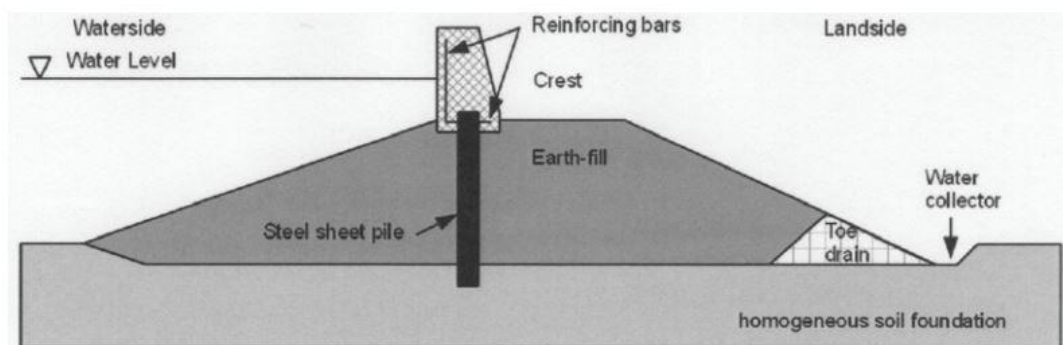


Figura 3 - Sopralzo arginale fondato su diaframma a palancole (*sheet pile*) (Simonini et al., 2014).

## 1.2 Cause di collasso arginale

La causa più comune di fallimento della struttura arginale è la rottura idraulica, o più in particolare il sormonto (come è stato, per esempio, per il Bacchiglione nel 2010) (EWGOLF., 2018). Il sormonto avviene quando le intense precipitazioni innalzano il livello idrometrico tanto da superare l'altezza dell'argine, portando alla tracimazione. Questo problema può aggravarsi progressivamente per l'erosione esterna prodotta dal flusso d'acqua, che abbassa l'argine e lo rende più vulnerabile (Figura 4).

Seconda causa è il regime di filtrazione, che può agire in diverse modalità:

- Erosione interna: include erosione retrogressiva (il *piping* è la forma più frequente), e. concentrata (in presenza di fessurazioni o comunque vie preferenziali), e. di contatto (quando il flusso è parallelo alla stratigrafia, tra uno strato grossolano e uno fine).
- Instabilità del paramento arginale: si può avere distacco di una porzione del fianco arginale. Lato campagna la causa è la perdita delle qualità meccaniche dovuta a cicli di imbibizione ed essiccamento, che provocano fessurazione quindi aumento delle pressioni neutre. Lato alveo invece la causa è la forza di filtrazione in fase di diminuzione della piena.
- Instabilità al piede o alla fondazione a causa delle sottopressioni. Le sottopressioni possono provocare sollevamento lato campagna oppure liquefazione; riducono le tensioni efficaci dunque la resistenza al taglio, incrementando il rischio di slittamento (Simonini et al., 2014).

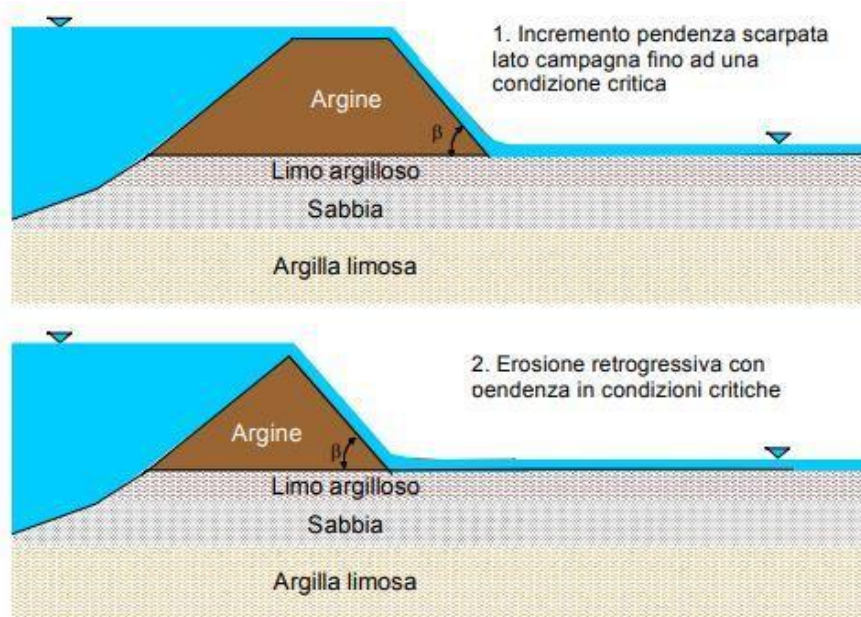


Figura 4 - Processo di sormonto e conseguente erosione esterna (Simonini et al., 2014).

## 2 La filtrazione

Ogni opera idraulica in terra è potenzialmente soggetta ad un regime di filtrazione; questo può non comportare rischi se coinvolge portate limitate e se non comporta la saturazione di una buona parte della struttura.

La filtrazione può essere contenuta applicando alcune delle strategie già anticipate, ma non del tutto eliminata. Queste strategie possono essere:

- l'impiego di rivestimenti impermeabili, per limitare dall'esterno la filtrazione verso il corpo arginale;
- l'impiego di componenti strutturali impermeabili da infiggere nella struttura, per allungare il percorso di filtrazione dunque ridurre il gradiente idraulico;
- la realizzazione di canali di drenaggio, per concentrare al piede dell'argine le linee di flusso.

### 2.1 Reticoli di filtrazione

Un regime di filtrazione stazionario può essere rappresentato con un reticolo di filtrazione, che raffigura nelle linee equipotenziali le soluzioni all'equazione differenziale di Laplace:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 u}{\partial^2 z} = 0$$

Tale equazione deriva dall'applicazione della legge di Darcy sotto diverse ipotesi (omogeneità, isotropia, flusso irrotazionale, volume della matrice costante). In particolare le ipotesi di omogeneità e isotropia nella realtà sono frequentemente disattese. Quando l'approssimazione è non trascurabile, è possibile risolvere il problema della filtrazione attraverso modelli numerici.

La filtrazione interessa il corpo arginale quando vi è un rilevante dislivello tra la linea di saturazione al lato campagna e il livello idrometrico del corpo idrico.

Il regime può essere stazionario (costante nel tempo) o transitorio. In particolare è quest'ultimo a portare maggiori criticità alla sicurezza del corpo arginale (Kuriqi et al., 2016). In condizioni stazionarie, è possibile esprimere la portata che coinvolge un numero scelto di linee di flusso, secondo l'equazione (Berardi, 2020, p.140):

$$Q = k\Delta H \frac{N_f}{N_d}$$

In base alle condizioni al contorno, si possono poi classificare regimi a moto confinato o non confinato. Attraverso gli argini fluviali il moto è non confinato, in quanto non tutte le condizioni al contorno sono note (per esempio solitamente non c'è un confine impermeabile lateralmente e inferiormente).

### Sifonamento

In presenza del dislivello  $\Delta H$  tra il livello del fiume e la linea di saturazione verso campagna, si instaura una pressione di filtrazione (maggiore al crescere del gradiente idraulico) che può

essere positiva o negativa, in base al verso relativo alla gravità. E' negativa quando agisce in modo opposto alla gravità: in questi casi può annullare le tensioni efficaci, portando alla liquefazione del terreno interessato. Il valore limite di  $\Delta H$  prima di giungere alla liquefazione è individuato dal gradiente idraulico critico, pari a  $i_{cr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$  (Berardi, 2020, p.145).

Le condizioni di annullamento delle tensioni efficaci  $\sigma'$  si verificano quando nel tratto di interesse il gradiente idraulico  $i = \frac{dh}{dl}$  è maggiore del gradiente critico. Tali condizioni sono quelle che possono provocare l'innesco di un fenomeno erosivo, specie se lo strato superficiale è di composizione sabbiosa.

## Capillarità

Nel caso di terreni a grana fine, può essere utile tenere presente il fenomeno della capillarità. Per la capillarità l'acqua può risalire - se la matrice è omogenea - fino ad alcuni metri sopra la linea di saturazione, con l'effetto di aumentare le tensioni efficaci (dunque la resistenza) degli strati inferiori. Infatti l'acqua risalita nella cosiddetta frangia capillare costituisce un carico aggiuntivo, ma non aumenta le pressioni neutrali.

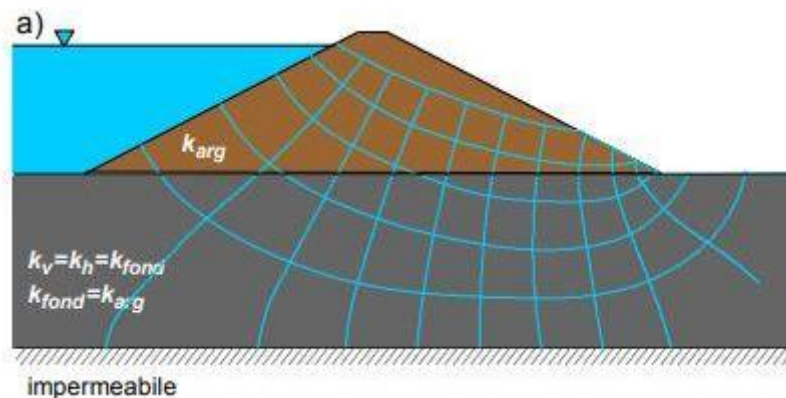


Figura 6 - Schema di reticolo di filtrazione attraverso un'argine di filtrazione con fondazione di pari permeabilità (Simonini et al., 2014).

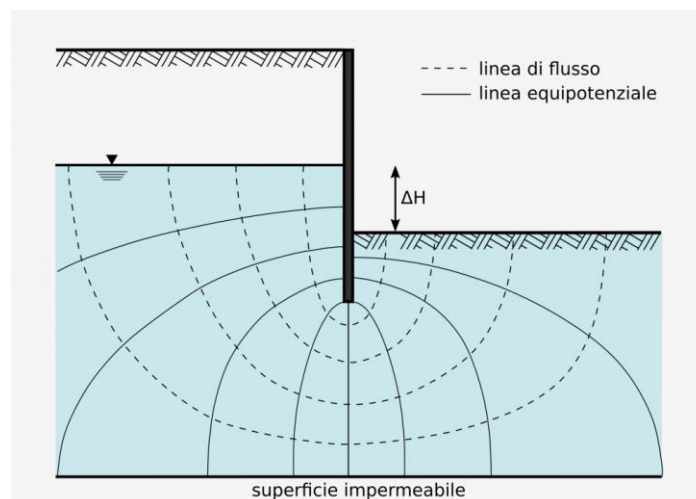


Figura 5 - Reticolo di filtrazione in condizioni favorevoli al sifonamento: dislivello dell'acqua tra monte e valle di una paratia (Soft.Lab, 2023).

## 2.2 Meccanismi di filtrazione attraverso un argine in terra

In base alla geometria dell'argine e alle proprietà dei materiali, la filtrazione può agire ponendo criticità di diversa natura.

Citiamo di seguito i fenomeni più significativi.

- Se il corpo arginale non è impermeabile, la linea di saturazione può intersecare il paramento, portando l'acqua a fuoriuscire, con rischio di erosione e riduzione di resistenza al taglio (Camici et al., 2015) (Figura 7). Un possibile rimedio prevede la creazione di dreni, come possono essere filtri in rockfill o fossi di drenaggio al piede che portano una riduzione delle pressioni interstiziali (Simonini et al., 2014).
- Se il corpo arginale è meno permeabile del terreno di fondazione, può essere soggetto a sottopressioni e quindi al rischio di slittamento (Berardi, 2020, p.139).
- Se il corpo arginale e gli strati superficiali della fondazione sono poco permeabili, o se l'argine è dotato di un diaframma in profondità, lato campagna il moto di filtrazione sarà prevalentemente ascendente. Questo può provocare, in base alla stratigrafia, erosione retrogressiva (piping), liquefazione (sand boil) o sollevamento; tutte situazioni che possono compromettere la stabilità dell'opera (Figura 8).

Poiché i corpi arginali sono solitamente poco permeabili, spesso si concentra l'analisi della filtrazione al livello della fondazione. Tuttavia questo non è sempre giustificato (Camici et al., 2015) perché è possibile riscontrare eterogeneità che portano l'instaurarsi di flussi attraverso l'argine stesso. Tra questi, l'intersezione con paleo-alvei (Cola et al., 2021) e in generale con piccoli strati alluvionali più permeabili; la presenza di tane scavate (Camici et al., 2015) (Figura 9); la presenza di manufatti (ad es. canali di scolo).

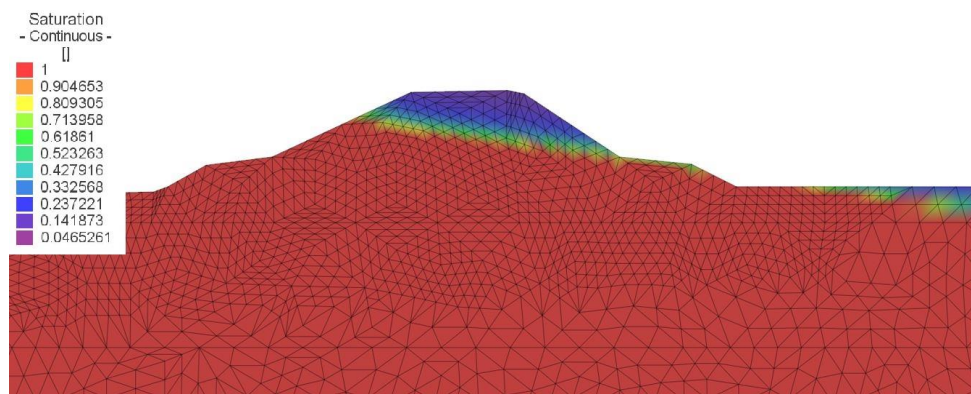


Figura 7 - Saturazione su una sezione arginale di materiale con permeabilità  $K=5 \cdot 10^{-4}$  m/s.

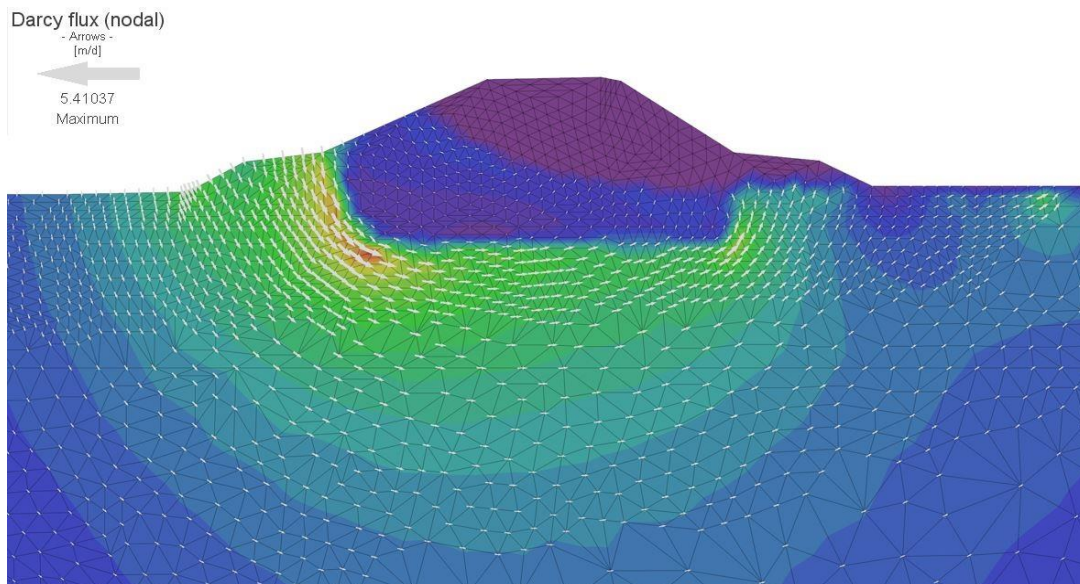


Figura 8 - Flusso di filtrazione al di sotto di un corpo arginale poco permeabile. Si osserva il flusso ascendente lato campagna, responsabile di una riduzione delle tensioni efficaci

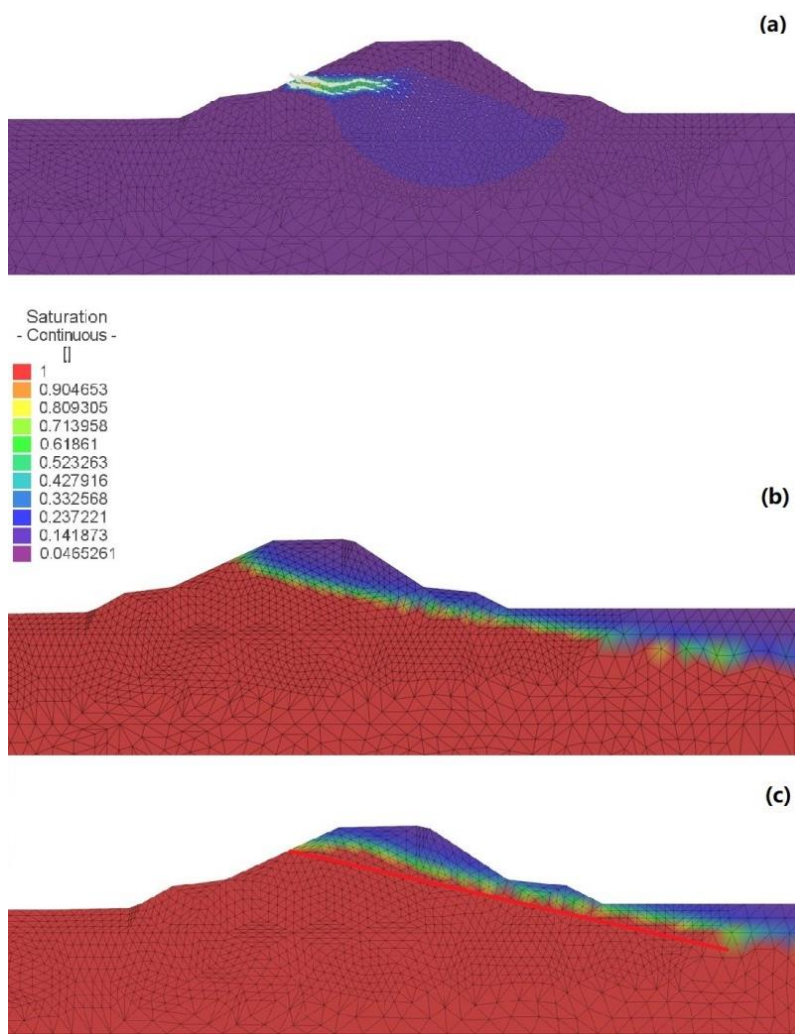


Figura 9 - Saturazione, effetti nel caso di una tana presente (c) o assente (b) all'interno del corpo. Posizione del tunnel in (a).

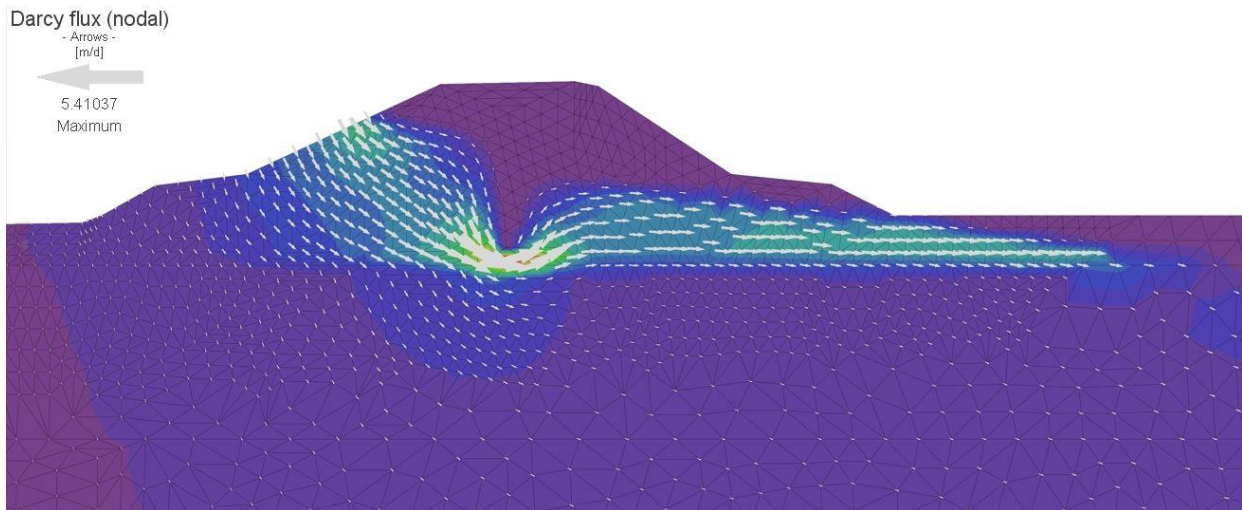


Figura 10 - Flusso di filtrazione al di sotto di un diaframma impermeabile

### 2.2.1 Il piping

Il piping è una forma di erosione interna che procede in modo retrogressivo, dunque dal lato fiume al lato campagna se l'altezza piezometrica è maggiore lato campagna (condizioni di magra), viceversa se l'altezza è maggiore lato fiume (condizioni di piena). Questo perché l'erosione inizia all'uscita del percorso di filtrazione, dove è possibile il distacco dei grani, a partire da quelli più fini (Figura 11).

Altre condizioni che possono innescare il piping sono: concentrazione delle linee di flusso in un punto d'uscita specifico, fratture preesistenti nello strato poco permeabile.

Si possono individuare quattro fasi principali di sviluppo del pipe:

- 1) filtrazione (iniziazione),
- 2) erosione retrogressiva (progressione),
- 3) allargamento,
- 4) rottura.

Perché si inneschi l'erosione, è necessaria una certa velocità di filtrazione e la presenza di un'uscita aperta non filtrata. Nel caso in cui lo strato finale sia sabbioso, queste condizioni prevedono l'annullamento delle tensioni efficaci. Nel caso invece di uno strato superficiale coesivo, le sottopressioni creeranno fratturazione idraulica (Van Beek et al., 2013). In entrambi i casi, innescata l'erosione le particelle trasportate dalla filtrazione vanno a formare i fontanazzi, con i caratteristici coni di terreno a forma di vulcano (Figura 12), formati dai sedimenti erosi depositati all'uscita (Martínez et al., 2016).

#### Fase di iniziazione

Le velocità di filtrazione sufficienti a liquefare il terreno non sono sempre sufficienti pure a formare il pipe: si potrebbe osservare una condizione di equilibrio fintantoché il dislivello piezometrico non aumenta ulteriormente. L'erosione retrogressiva iniziata può condurre a

pipng nel caso specifico in cui si ha uno strato coesivo (poco permeabile) al di sopra di uno strato acquifero sabbioso (Yang et al., 2019).

Se invece l'acquifero ha composizione più eterogenea (con una frazione di grani grossolani) si avrà principalmente erosione per migrazione (*soffusion*). La soffusion è il trasporto delle particelle più fini (come in Figura 14): è una forma di erosione interna, che comporta importanti riduzioni nella resistenza del materiale e aumento della permeabilità.

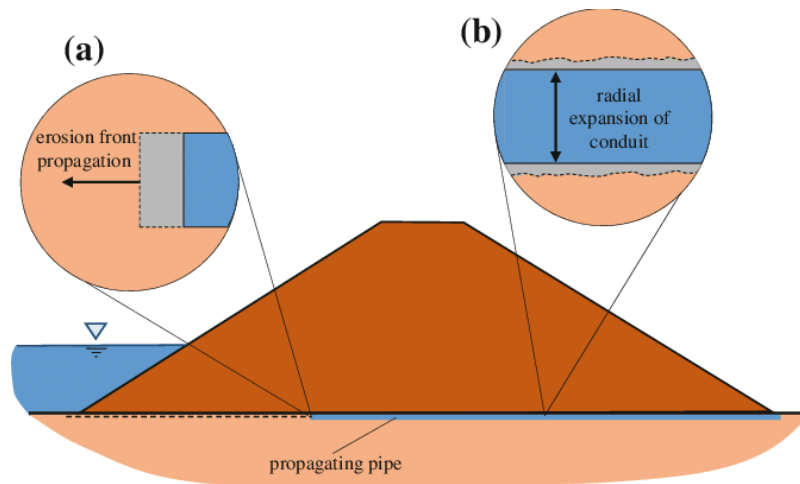


Figura 11 - Progressione di un pipe alla fondazione di un argine (Rotunno et al., 2017).



Figura 12 - Tipica forma di fontanazzi formato da liquefazione ed erosione retrogressiva, al piede di un argine (Simonini et al., 2014)



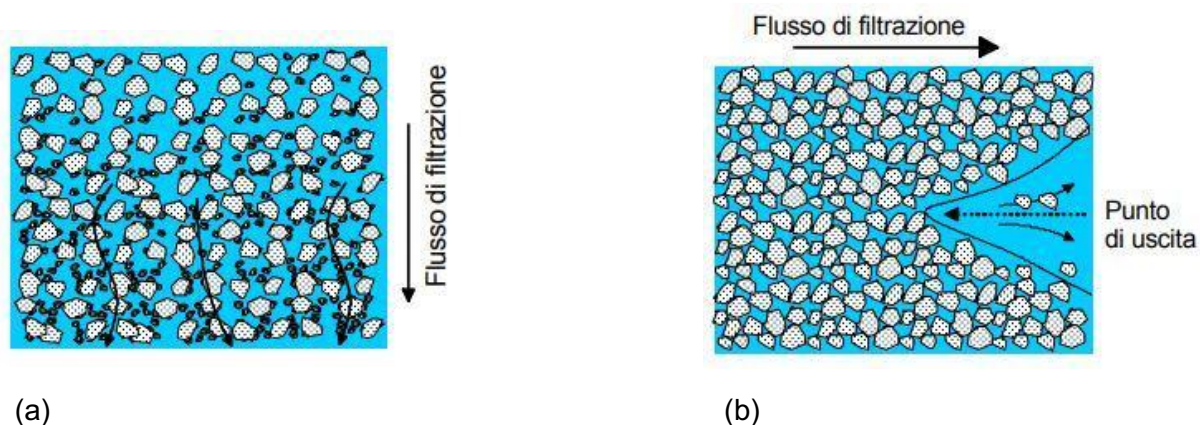


Figura 14 - Erosione retrogressiva (b) e per migrazione (a). In quest'ultima si osserva il trasporto delle particelle fini, che lascia una matrice più permeabile (Simonini et al., 2014).

## Fase di progressione

L'erosione iniziata può procedere secondo due modalità principali:

- 1) erosione progressiva: ad un certo punto l'erosione si interrompe. Affinché si completi, serve aumentare l'altezza piezometrica fino ad un livello critico;
- 2) erosione continuativa: il dislivello di altezza piezometrica iniziale è sufficiente a completare il processo erosivo.

Più le linee di flusso sono concentrate, minore è l'altezza piezometrica necessaria ad avere la progressione (Bersan, 2015).

Si raggiunge la condizione di equilibrio per una altezza piezometrica critica, il cui valore dipende dalla lunghezza del pipe, dalle caratteristiche dello strato attraversato e da altri fattori geometrici. Sellmeijer (1988) ha proposto la seguente formula per determinare l'altezza critica  $H_c$ .

$$H_c - 0.3z_c = F_R F_S F_G L$$

dove  $z_c$  è lo spessore dello strato impermeabile superficiale (di cui si considera il contributo dissipativo per la resistenza posta al flusso);

$F_R, F_S, F_G$  sono fattori rispettivamente di resistenza, di scala e di geometria;

$L$  è la lunghezza del percorso di filtrazione, per cui  $\frac{H_c}{L}$  costituisce un gradiente critico (Martínez et al., 2016).

## Fase di allargamento

Appena si ottiene connessione idraulica tra fiume e campagna, si ha un rapido incremento del carico idraulico e del flusso d'acqua, e questo comporta maggiore erosione. Tuttavia, per lo scarso diametro del pipe è frequente esso venga bloccato dal materiale eroso nel percorso verso campagna, portando infine alla formazione di nuovi percorsi.

Per questo dal lato campagna non è immediata l'osservazione di un aumento del flusso e dell'erosione, ed è dunque difficile determinare il momento esatto del completamento della connessione. Il processo di allargamento può impiegare alcuni giorni (Bersan, 2015).

## Fase di collasso

Il piping è stato responsabile del collasso arginale con particolare frequenza nei Paesi Bassi (fiume Rhine), in Cina (fiume Yangtze), negli Stati Uniti (fiume Mississippi). Si può giungere al collasso secondo due meccanismi principali:

- 1) Collasso per perdita di resistenza e slittamento, avviene dopo circa 20 minuti dalla completa connessione del pipe.
- 2) Deformazione dell'argine che occlude il pipe. Segue la formazione di un nuovo percorso di piping che può eventualmente portare al collasso (Van Beek et al., 2013).

## Modellizzazione del pipe

Poiché lo sviluppo del piping si innesca superata una certa soglia di velocità di filtrazione, quindi di carico idraulico, durante gli eventi di piena è possibile questo fenomeno modifichi molto rapidamente il regime di filtrazione. Nelle simulazioni numeriche dei processi di filtrazione, è necessario un approccio al transitorio dove evolvono nel tempo non solo i parametri idraulici, ma pure le proprietà materiali (in particolare la permeabilità). E' quanto è stato fatto per esempio da Cesali et al. (2020), modellizzando il pipe come una regione più permeabile che cresce nel tempo verso il lato fiume.

### 2.2.2 Valutazione delle variabilità del materiale

#### La modellazione stocastica booleana: un'applicazione

Le indagini geotecniche per stabilire le proprietà del terreno non possono essere condotte con il massimo dettaglio spaziale per convenienza economica ed efficienza. La maggiore incertezza non deriva dalla precisione degli strumenti ma dal fatto che le misure svolte sono puntuali (Bossi et al., 2016). Una stima imprecisa per esempio della permeabilità può compromettere la validità dei risultati della modellizzazione della filtrazione. In particolare nel caso studio presentato da (Cola et al., 2021), il terreno di fondazione è di origine alluvionale e, conseguentemente ai lavori di rettificazione del fiume, è in diversi punti attraversato dal paleo-alveo. Questa caratteristica porta una presenza diffusa di lenti di materiale più grossolano dunque più permeabile all'interno degli strati superficiali. Poiché la distribuzione di queste lenti non può essere indagata con precisione, il loro possibile effetto sul regime di filtrazione è stato valutato ricorrendo ad un modello numerico stocastico booleano (Bossi et al., 2019).

Nella geometria dell'argine modellizzato sono generate in modo stocastico delle regioni rettangolari, con permeabilità, spessore e quantità fissati, mentre la loro larghezza orizzontale e la loro distribuzione spaziale è generata casualmente. Il modello così modificato (in centinaia di diverse configurazioni possibili) viene applicato ad un evento di piena di cui è noto l'idrogramma e le misurazioni dell'altezza piezometrica nel tempo. Così è possibile confrontare l'andamento calcolato della pressione dell'acqua interstiziale con quello misurato dai piezometri; si determina la configurazione più probabile eseguendo una best-fit con i dati sperimentali. Nel caso studiato da Bossi et al. (2019) l'aggiunta nel modello di queste

eterogeneità restituisce un risultato più aderente alle misurazioni. E' utile osservare come la presenza di lenti moderatamente più permeabili abbia un effetto sul calcolo dell'altezza piezometrica, che risulta 50cm maggiore di quella senza lenti nella fase di massima (Bossi et al., 2019).

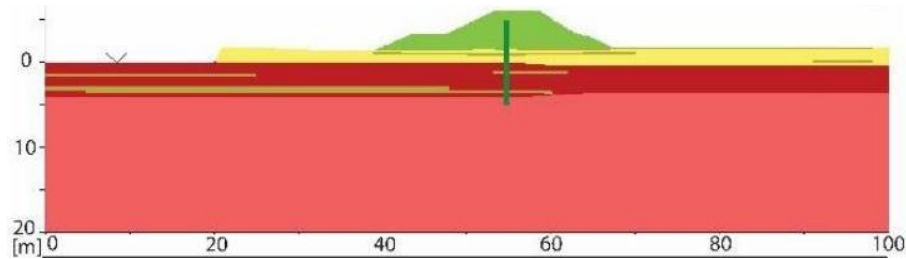


Figura 16 - Proprietà di conducibilità di una sezione di un argine. Sono visibili delle lenti permeabili generate secondo il metodo stocastico (nello strato compreso tra 0 e 5 metri di profondità). (Bossi et al., 2019)

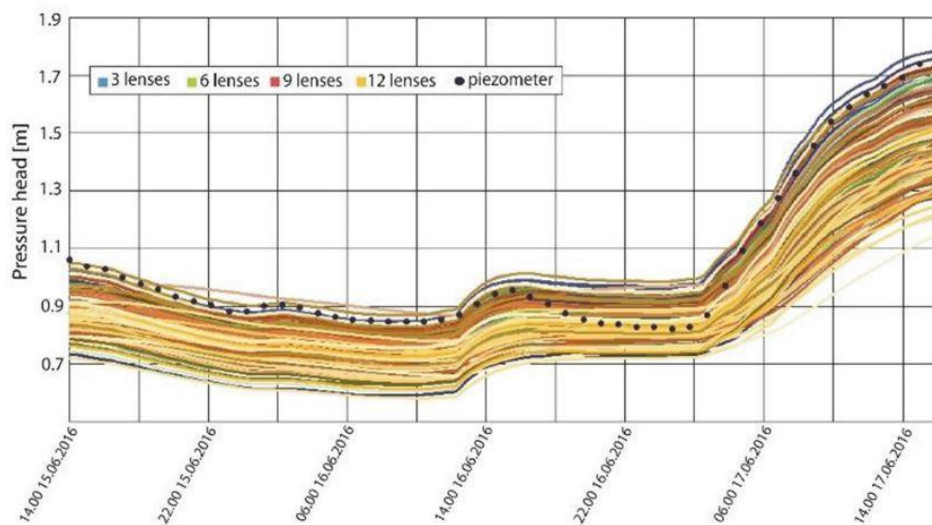


Figura 17 - Diagramma dei carichi idraulici ottenuti da diverse simulazioni con diverse configurazioni di lenti permeabili. La linea tratteggiata in nero rappresenta i valori misurati. (Bossi et al., 2019)

## Altri metodi probabilistici

Un altro metodo per modellizzare tenendo in considerazione le incertezze sui parametri geotecnici del terreno impiega la loro varianza. Un esempio è presente in Amabile et al. (2020), con il metodo del First Order Second Moment (FOSM), utilizzato per calcolare un range per il fattore di sicurezza alla *slope stability*. I parametri considerati sono l'angolo d'attrito, la permeabilità e i parametri della curva di Van Genuchten; nella simulazione sono stati valutati i valori medi, più due valori pari alla media +/- la deviazione standard. Vengono condotte simulazioni per tutte le combinazioni possibili, così da individuare quella con il minore fattore di sicurezza e fare una stima più cautelativa.

## 2.3 I possibili effetti della filtrazione sulla resistenza al taglio del materiale

La filtrazione può aumentare la vulnerabilità degli argini non solo compromettendone direttamente la struttura attraverso l'erosione interna, ma anche variandone le proprietà di resistenza.

E' stato dimostrato sperimentalmente (Kayadelen et al., 2007) che la resistenza al taglio diminuisce all'aumentare del grado di saturazione; la stessa tendenza si riscontra applicando la teoria delle tensioni efficaci, perché secondo il criterio di Mohr-Coulomb avviene uno spostamento verso sinistra (quindi verso l'involuppo di rottura) del cerchio di Mohr delle tensioni efficaci (Wise et al., 2023).

Uno dei primi modelli adottati per la stima della resistenza al taglio in condizioni insature si deve a Bishop:

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)\tan\phi']$$

con  $\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)$  sempre secondo la formulazione semplificativa di Bishop.

Si individuano due contributi:

il primo,  $(\sigma - u_a)$ , costante, legato alla resistenza in condizioni sature;

il secondo,  $(u_a - u_w)\tan\phi'$ , variabile secondo il parametro  $\chi$ , dipendente dalla saturazione.

$u_a - u_w$  è la differenza tra le pressioni interstiziali rispettivamente dell'aria e dell'acqua, ed è pari alla tensione matriciale (o suzione) (Zeng & Shao, 2022). Questa seconda componente risulta non lineare, con andamento vicino al logaritmico, in accordo con i risultati sperimentali rappresentati in Figura 18 (Kayadelen et al., 2007).

Dai risultati sperimentali si riscontra che diminuendo il grado di saturazione aumenta la resistenza di picco e residua, a parità di tensione efficace media. Il campione di terreno sottoposto al test in Figura 19 è un terreno argilloso (con 95% di passante al vaglio #200,  $\phi'=21$  e  $c'=14.8$  kPa).

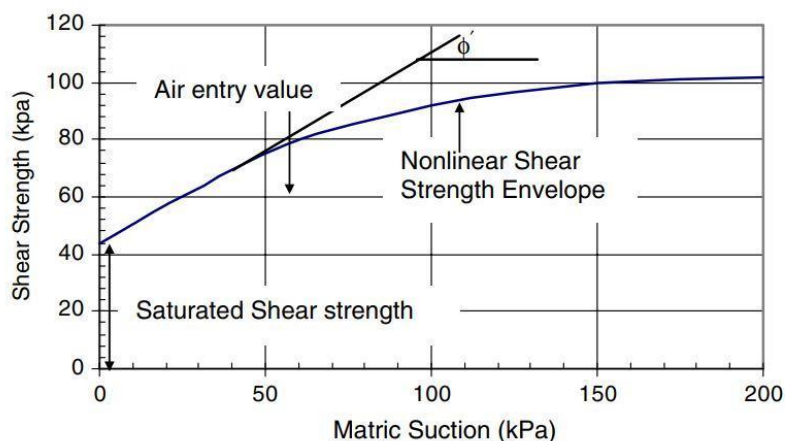


Figura 18 - Aumento non lineare della resistenza al taglio con la suzione (Kayadelen et al., 2007)

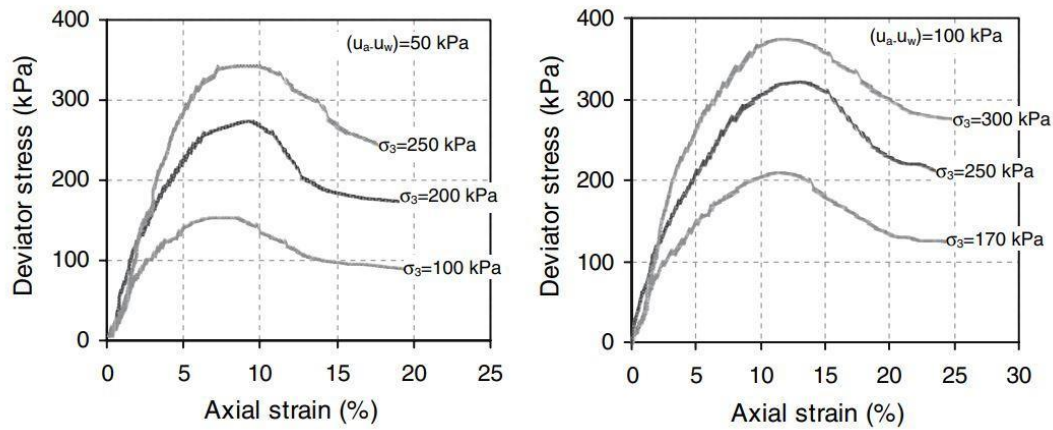


Figura 19 - Confronto delle curve tensione deviatorica-deformazione con suzione pari a 50kPa a sinistra, 100kPa a destra (Kayadelen et al., 2007).

## 2.4 Esempi reali di collasso arginale provocato dalla filtrazione

### Fiume Foenna (2006)

Nel gennaio 2006 il fiume Foenna (Toscana) ha visto una rottura dell'argine a seguito di una piena (caratterizzata da 70mm di precipitazioni in 24h che hanno accresciuto il livello idrometrico di 3 metri) La causa del collasso è stata individuata nella presenza di tane di istrice: senza tale discontinuità la linea di saturazione sarebbe rimasta al di sotto del limite del corpo arginale, e l'indice di fragilità stimato in condizioni di argine privo di tane non poteva giustificare il collasso. La presenza della cavità (passanti l'intero corpo arginale, secondo alcune osservazioni) ha permesso l'innescarsi di un flusso d'acqua all'interno dei tunnel che rapidamente ha eroso internamente l'argine e in seguito ha portato la sommità a sprofondare diversi centimetri, attivando il processo erosivo del sormonto che infine ha condotto ad una rottura trapezoidale (Camici et al., 2015).

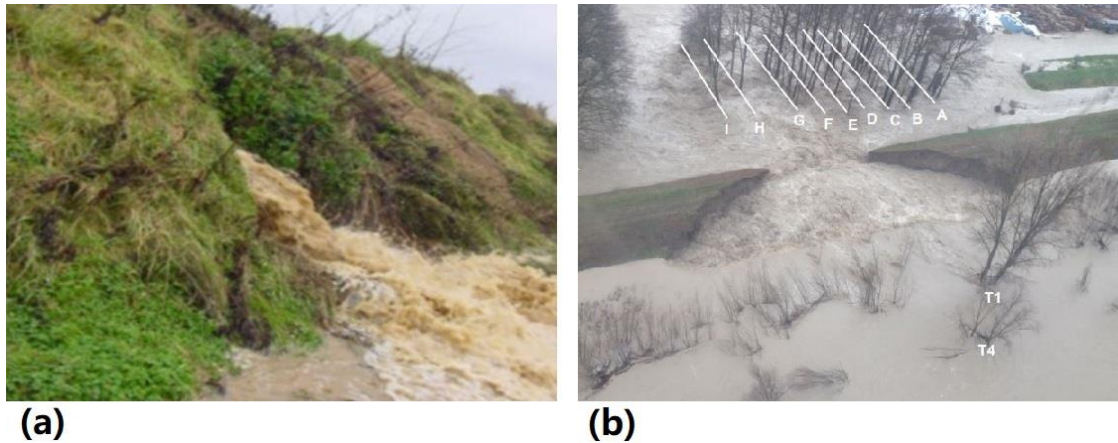


Figura 20 – (a) Flusso d’acqua attraverso il corpo arginale, imputabile a tane passanti; (b) rotta trapezoidale (Camici et al., 2015)

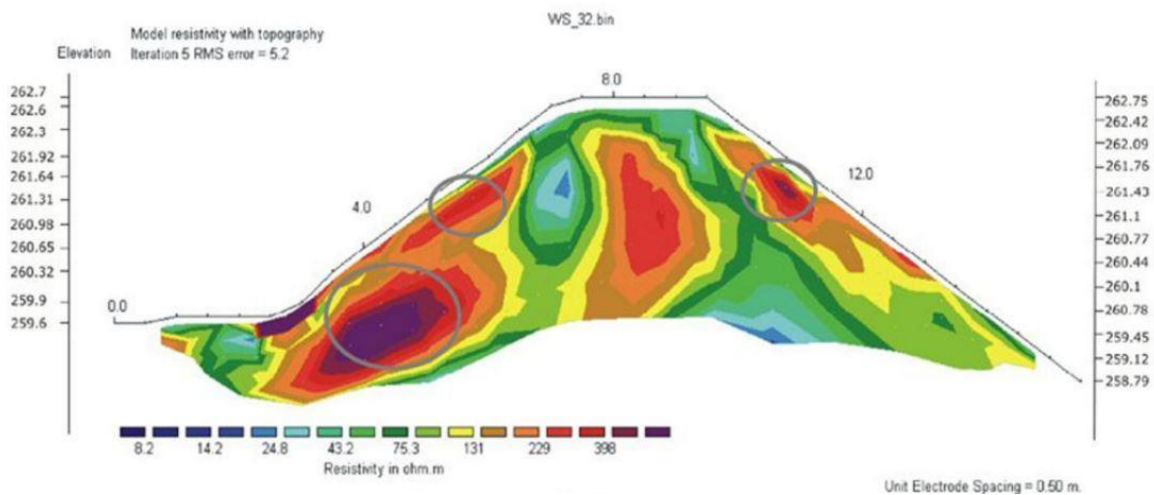


Figura 21 - Indagine ERT su una sezione dell’argine del fiume Foenna mostra alcune aree molto resistive, interpretabili come cavità (Camici et al., 2015).

## Fiume Secchia (2014)

Si è riscontrata una simile dinamica con il collasso degli argini dei fiumi Secchia e Panaro (2014) (D’Alpaos et al., 2014). L’evento di piena era inserito in un periodo di intense precipitazioni, con un picco di 125mm in 24h, che hanno portato un aumento del livello idrometrico medio di 7 metri per il Secchia. Si è analizzata nel dettaglio la stratigrafia (molto fine, limosa, fino una profondità di oltre 15 metri) escludendo così l’opzione del sifonamento come causa del collasso. Pure l’erosione esterna è stata esclusa: non si è raggiunto un livello tale da causare sormonto e il fatto che la vegetazione lato alveo non sia stata asportata, mostra che pure l’erosione dovuta alla corrente non è stata significativa. Dunque anche in questo caso il principale fattore ad aver aumentato la fragilità dell’argine è stata la presenza di tane, che hanno portato un innalzamento della linea di saturazione e conseguente riduzione della

resistenza, molto più rapidamente che nel caso privo di cavità; non si esclude la possibilità che le tane fossero passanti (come nel caso del fiume Foenna) (D'Alpaos et al., 2014).

La ripetizione in tempi brevi di due o più eventi di pioggia intensa, è un fattore che aumenta la fragilità perché può portare alla completa saturazione degli argini. E' quanto avvenuto per il fiume Secchia, ma anche nel 2009 con il fiume Serchio e nella recente alluvione in Emilia Romagna (2023).

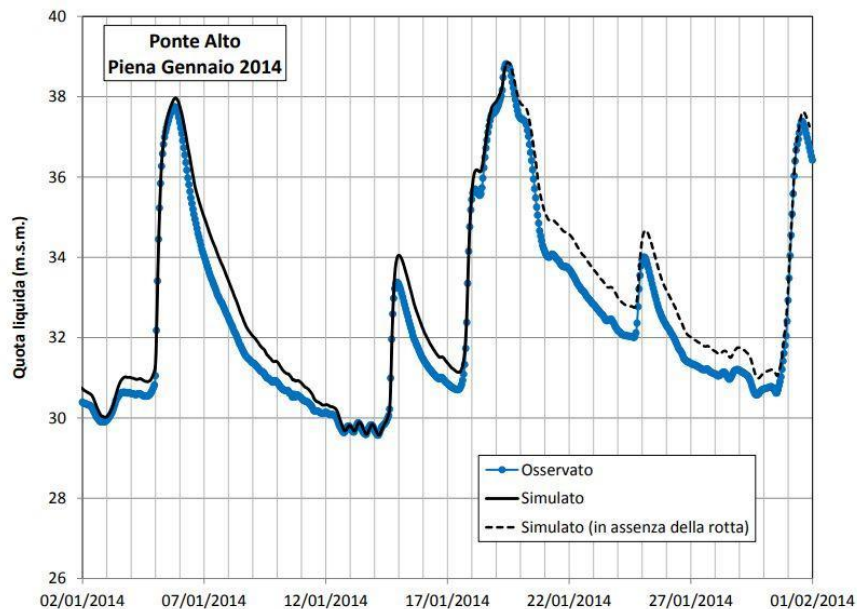


Figura 22 - Esempio di due eventi di piena consecutivi: livello idrometrico del fiume Secchia dal 2 gennaio 2014 (D'Alpaos et al., 2014).

## Fiume Serchio (2009)

La vulnerabilità del fiume Serchio è stata valutata da Cosanti et al. (2014) a seguito del collasso avvenuto nel dicembre 2009. Gli strati superficiali della fondazione e il corpo dell'argine hanno composizione limosa, dunque non dovrebbero essere particolarmente soggetti ad erosione interna. Tuttavia in corrispondenza di una delle rotte si è riscontrata proprio la formazione di un pipe, a metà dell'altezza dell'argine. Le cause ipotizzate possono essere la presenza di eterogeneità nel corpo dell'argine (la costruzione risale al XVIII secolo) oppure lo stress indotto dal congelamento e successiva fusione del ghiaccio nel terreno; infatti le temperature erano scese sotto zero appena una settimana prima della piena. Gli autori suggeriscono due interventi per rendere più sicuri tali argini: l'installazione di un diaframma, che bloccherebbe le vie preferenziali di filtrazione attraverso alcuni sottili strati permeabili; la costruzione di una berma, per rafforzare l'argine lato campagna e prolungare il percorso di filtrazione.

## **3 Impiego, limiti e vantaggi della DFOS:** **analisi della letteratura**

### **3.1 La necessità di un monitoraggio distribuito**

L'individuazione e la quantificazione di processi di filtrazione pericolosi per la struttura arginale richiede un monitoraggio distribuito nello spazio e nel tempo. La distribuzione spaziale delle misure è importante perché molto spesso fenomeni di erosione interna sono concentrati solo in alcune aree (per esempio dove si hanno eterogeneità, come tratti più permeabili). Anche la risoluzione spaziale deve essere elevata: basti considerare che un pipe può influenzare il reticolo di filtrazione entro un raggio di solo 1 metro (Bersan et al., 2018). Le misure devono pure essere continue nel tempo, per poter analizzare la risposta ad un evento di piena e fare confronti con le condizioni di magra del fiume.

In generale, per analizzare le dinamiche di filtrazione, si è fatto uso di modelli fisici (per es. Gottardi et al. (2016)) oppure modelli numerici (tra cui D'Alpaos et al., (2014), Martínez et al. (2016), Tracy et al. (2016), Yosef et al. (2017))

Entrambe queste strategie richiedono una valutazione il più dettagliata possibile delle caratteristiche fisiche del terreno (permeabilità, porosità, contenuto d'acqua e pure proprietà meccaniche). In più entrambi i modelli andranno calibrati con i dati sperimentali misurati in sito, affinché la relazione tra livello idrometrico e altezza piezometrica sia coerente nel tempo con quanto osservato sperimentalmente.

I dati solitamente utilizzati per la calibrazione sono tratti da piezometri, in quanto l'altezza piezometrica è una misura diretta dello stato dei fenomeni di filtrazione, e da misure del livello idrometrico.

In seguito (paragrafo 4 *Descrizione: il modello implementato in FeFlow*), verrà approfondito un esempio di un metodo basato su un modello numerico calibrato con dati distribuiti di temperatura misurati da sensori in fibra ottica e con dati piezometrici puntuali.



### 3.1.1 Monitoraggio distribuito tramite ERT

Le indagini ERT (tomografia per resistività elettrica) permettono di ottenere una distribuzione spaziale della resistività elettrica del terreno  $\rho$ , ad una sezione scelta.

La resistività dipende da diverse variabili: principalmente granulometria e contenuto d'acqua, ma pure temperatura, porosità e concentrazione di ioni nell'acqua (Amabile et al., 2020).

La  $\rho$  diminuisce all'aumentare del contenuto d'acqua  $\theta$ , e aumenta all'aumentare della dimensione dei grani.

#### ERT: principio di funzionamento

L'ERT è un metodo geofisico non invasivo, che funziona creando un campo elettrico nel suolo attraverso elettrodi.

Si installa infiggendo elettrodi secondo un passo regolare lungo la linea che corrisponderà alla sezione di indagine. La profondità mappata corrisponde all'incirca ad  $\frac{1}{5}$  della lunghezza del *chainage*.

Nel caso in cui si voglia indagare un'area molto vasta (per es. la sezione longitudinale di un argine), questa modalità "tradizionale" dell'indagine ERT risulta troppo laboriosa: conviene ricorrere al CCM (*capacitively coupled method*) che non prevede l'infissione di elettrodi a diretto contatto con il terreno (Amabile et al., 2020).

Per un'efficace fruizione dei dati dell'ERT è fondamentale la fase di calibrazione: infatti «litotipi diversi possono avere la stessa  $\rho$  in base al loro stato fisico» (Simonini et al., 2014, p.237); questa calibrazione può basarsi su sondaggi in situ.

In linea generale la prova ERT risulta utile a dare una valutazione qualitativa della stratigrafia e della presenza di eterogeneità, specialmente nelle situazioni dove la transizione tra due strati sia più netta (Simonini et al., 2014). Un esempio del risultato dell'indagine ERT è riportato in Figura 21.

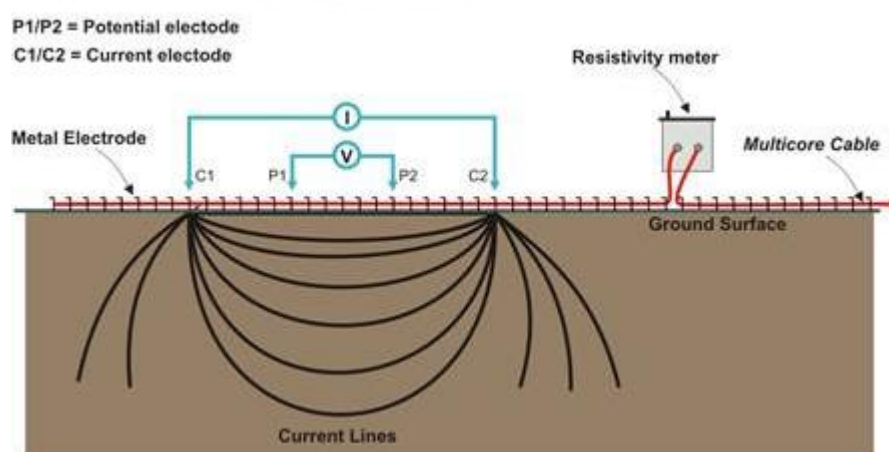


Figura 23 - Schematizzazione del funzionamento dell'ERT. Sono mostrate le linee di corrente, le coppie di elettrodi per la misura della corrente e quelli per la misura del voltaggio. I dati sono raccolti tramite un cavo multi-core (TerraDat, 2020).

## Applicazione ERT al monitoraggio della filtrazione

Tramite ERT è possibile operare pure un monitoraggio della filtrazione. Noti i dati riguardanti temperatura e stratigrafia, è possibile - tramite formule empiriche calibrate da test di laboratorio - costruire un modello che elabora i dati sulla  $\rho$  per restituire dati sul contenuto d'acqua  $\theta$  (Amabile et al., 2020).

Un altro metodo si basa invece sull'interpretazione dell'indagine ERT rispetto alle medie stagionali: infatti la variazione stagionale della composizione in ioni dell'acqua interstiziale ha riscontro nell'ERT. Disponendo di una base dati di riferimento è possibile individuare anomalie nella  $\rho$ , che molto spesso sono attribuibili ad anomalie nella porosità, quindi a vie privilegiate di filtrazione ed erosione interna (Simonini et al., 2014).

L'applicazione dell'ERT al monitoraggio della filtrazione riscontra però alcuni limiti, principalmente per la risoluzione spaziale poco dettagliata e per il grande livello di incertezza associato all'interpretazione dei dati.

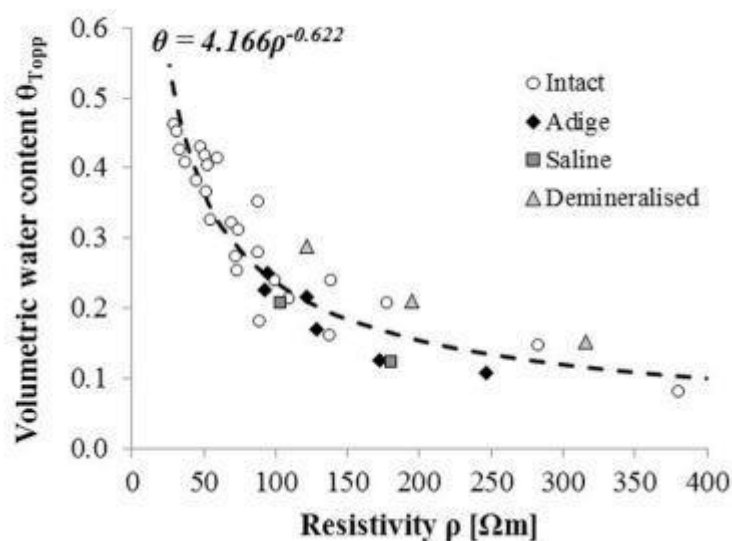


Figura 24 - Relazione tra resistività e contenuto d'acqua  $\theta$ , con set di dati a diversa composizione di ioni. Acqua più salina è meno resistiva (Amabile, et al., 2020).

## 3.2 DFOS: distributed fibre optic sensing

La fibra ottica (di seguito, FO) è una tecnologia che permette la misura distribuita nello spazio e nel tempo di temperatura, deformazioni e possibilmente altri parametri. La particolare efficacia di questo strumento di misura risiede proprio nella sua caratteristica di offrire dati su tratti molto estesi (nell'ordine delle centinaia di metri) e con una buona risoluzione spaziale (molto spesso inferiore al metro).

Sono sfruttate le proprietà ottiche di questo materiale, il quale agisce diffondendo la radiazione che lo attraversa secondo intensità e frequenze diverse in base alle condizioni ambientali in cui si trova il terreno in cui è inserito.

### 3.2.1 Principio di funzionamento

La strumentazione per questo sistema di misura prevede come componenti principali:

- La fibra, rivestita da una guaina e presente in realtà in più “copie” per garantire continuità in caso di malfunzionamento.
- Il filtro, per selezionare le frequenze di interesse.
- L’interrogatore, composto da un generatore di impulsi laser e da un lettore del segnale retrodiffuso. La frequenza di lettura è ciò che determina la risoluzione spaziale della misura (Figura 26).

In base alla grandezza che si vuole misurare, va scelta la frequenza dello spettro su cui concentrare la rilevazione. Per la deformazione, si tratta dei fotoni prodotti dalla diffrazione di tipo *Brillouin* mentre per la temperatura da quelli della diffrazione *Raman*.

Entrambe queste categorie di fotoni hanno origine da un processo fisico di diffrazione detta *anelastica*. La maggior parte dei segnali generati dalla diffrazione sono invece elastici, di tipo *Rayleigh*. L’elasticità viene dal fatto che il processo di interazione dei fotoni con le molecole della fibra infine non varia il loro stato energetico, quindi mantengono la stessa frequenza una volta diffuse. Invece nei casi Brillouin e Raman l’interazione con le molecole porta una transizione energetica del fotone che non ritorna allo stato iniziale: per questo è detta anelastica (Ghafoori et al., 2020).

In particolare, si distinguono due componenti nella diffrazione anelastica, originate da due distinti processi:

- Componente Stokes (S): è il fotone emesso quando l’elettrone (all’interazione con il fotone) viene portato dallo stato fondamentale ad uno virtuale, per poi cadere in uno stato eccitato. L’intensità di questa componente non dipende dalla temperatura della fibra.
- Componente Anti-Stokes (AS): è il fotone emesso quando l’elettrone si trova già in uno stato eccitato, viene promosso ad uno stato virtuale per poi cadere allo stato fondamentale. Questa componente è l’unica a dipendere dalla temperatura.

Si individuano componenti Stokes ed Anti-Stokes sia nella diffrazione Raman che in quella Brillouin, con la differenza che mentre nella Raman la temperatura varia l’intensità della radiazione, nella Brillouin le variazioni di deformazione variano la frequenza con una relazione lineare (Figura 25) (Simonini et al., 2014).

Nell’ambito del monitoraggio di opere in terra, possono essere impiegati entrambi i principi, Raman e Brillouin. E’ stata monitorata la diffrazione Brillouin per esempio in Bertulesi et al. (2020), dove la fibra è stata utilizzata innestata ad una rete metallica, per misurare le deformazioni dovute all’attrito dell’acqua nel caso di sormonto (*overtopping*) e non solo.

Per monitorare la filtrazione, la misura di maggiore interesse è quella della temperatura, che viene svolta con lo studio della diffrazione di tipo Raman.

Poiché è solo l’intensità della componente AS a variare con la temperatura, il rapporto R tra intensità AS e intensità S è proporzionale alla temperatura, secondo una formula empirica come può essere la formula di Long di seguito riportata (Ghafoori et al., 2020).

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp\left(-\frac{hc\nu_n}{KT_c}\right)$$

dove  $\lambda_s$ ,  $\lambda_{as}$  sono le lunghezze d'onda delle componenti Stokes e Anti-Stokes;

$h$ ,  $K$ ,  $c$ ,  $\nu_n$  sono costanti fisiche;

$\nu_n$  dipende dalle frequenze del segnale incidente e del segnale diffuso;

$T_c$  è la temperatura assoluta.

Si ricava la distribuzione longitudinale delle radiazioni Raman, dunque la distribuzione della temperatura, nota la velocità di propagazione e il tempo trascorso tra l'emissione del segnale laser e la sua ricezione.

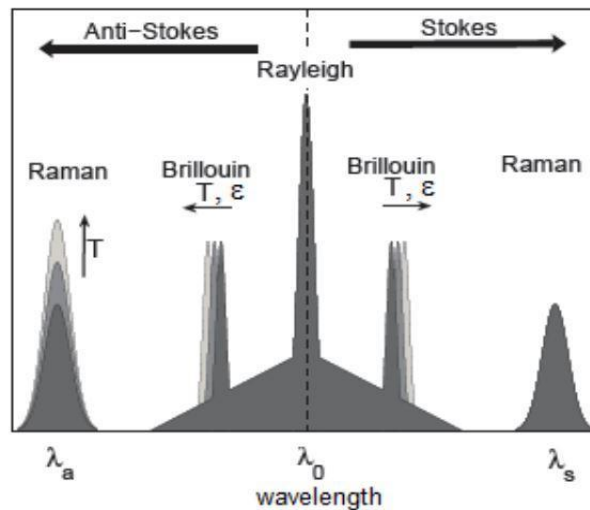


Figura 25 - Schematizzazione del fenomeno di diffrazione anelastica. Si nota la variabilità nella frequenza per la radiazione Brillouin e la variabilità nell'intensità (asse verticale) per la radiazione Raman (Khan A.A.,2009).

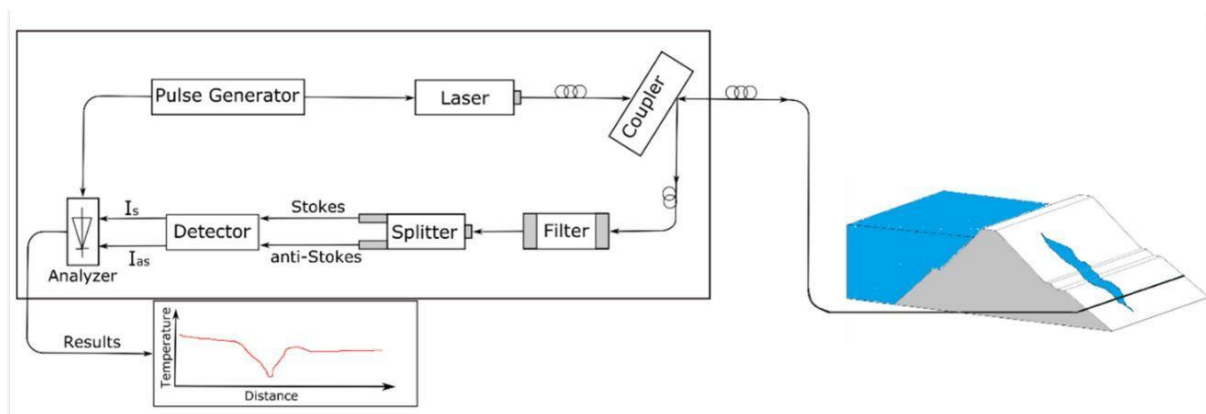


Figura 26 - Schema delle componenti di un sistema di monitoraggio DFOS (Ghafoori et al., 2020).

### 3.2.2 Calibrazione

Un passaggio essenziale per ottenere dati corretti è la calibrazione, che viene svolta individuando dei tratti di riferimento (in cui la temperatura è nota e mantenuta costante) che possono essere ad esempio delle vasche d'acqua in cui immergere la fibra. Il processo di

calibrazione agisce su alcuni parametri di trasmissione del cavo in modo che i valori di temperatura misurati in questi tratti siano uguali alla temperatura della vasca, nota e misurata tramite un altro strumento. In più, i dati rilevati dall'interrogatore vanno processati tenendo in considerazione l'attenuazione spaziale dell'intensità del segnale (più accentuata per fotoni AS che per gli S). L'attenuazione del segnale infatti non è trascurabile, e limita la lunghezza massima utilizzabile per la fibra a circa 10km (Ghafoori et al., 2020).

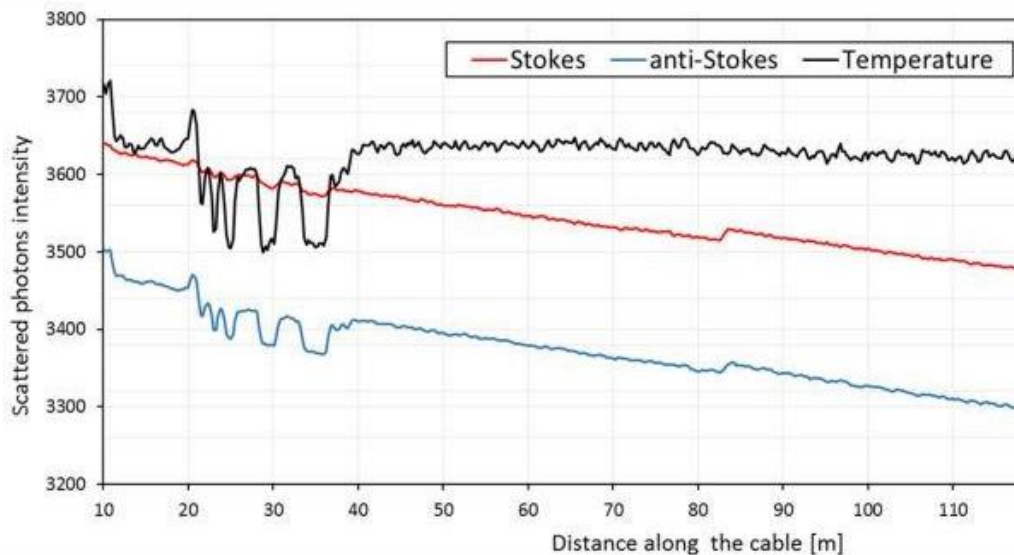


Figura 27 - Attenuazione dell'intensità della radiazione Raman sulla distanza (Ghafoori et al., 2020).

### 3.2.3 Installazione

Lo scopo più comune dell'uso della fibra ottica nel monitoraggio arginale è l'individuare di eventuali vie privilegiate della filtrazione. Per questo le fibre vengono installate in modo da monitorare le regioni della struttura arginale ritenute più vulnerabili o soggette a filtrazione. E' possibile installare fibre verticalmente, fino profondità anche maggiori di 15m (Fabbian et al. (2022), Schenato et al. (2022), Abbasimaedeh et al. (2021)) oppure orizzontalmente (Cola et al. (2021), Bersan et al. (2018), Yosef et al. (2017)).

Nel primo caso (fibra verticale) l'installazione avviene trivellando dei pozzi, nei quali si inserisce una protezione rigida con all'interno la fibra ed eventualmente altri sensori; la protezione viene poi rimossa per garantire un contatto ottimale fibra-terreno. Questa installazione risulta particolarmente utile per misurare lo spostamento della linea di saturazione (Schenato et al., 2022).

Nel secondo caso (fibra orizzontale) si scavano delle trincee avendo cura di porre la fibra ben a contatto con il terreno indisturbato, e ricompattando la parte rimaneggiata. Questa installazione invece è utile per individuare quale sezione dell'argine sia soggetta a maggiore filtrazione (per esempio a causa di eterogeneità localizzate).



Figura 28 - Escavazione di una trincea per l'installazione di un sistema di DFOS longitudinale, presso l'argine del fiume Adige (Cola et al., 2021).

### 3.2.4 I metodi passivo e attivo

Viene definito *metodo passivo* (o termometrico) l'uso della DFOS per misurare direttamente la temperatura del terreno; invece nel *metodo attivo* (o heat-up) si usa un cavo ibrido nel quale alla fibra ottica è affiancato uno o più cavi metallici impiegati per produrre calore tramite effetto Joule.

#### Il metodo passivo

Nel metodo passivo per monitorare il regime di filtrazione attraverso le misure della temperatura è necessario assumere un modello interpretativo consolidato. Infatti, la filtrazione non agisce sempre allo stesso modo sulla distribuzione della T, e possono esserci altri fattori a produrre anomalie (per es. delle eterogeneità nelle proprietà termiche del terreno). Per questo sono state elaborate diverse tecniche di interpretazione. Per citarne alcune:

- La tecnica del lag-time, che individua le vie privilegiate della filtrazione dove la variazione stagionale della temperatura è più rapida e più marcata.
- La tecnica della individuazione della singolarità, un metodo statistico che individua variazioni della temperatura nel tempo, non coerenti con il trend medio.
- La tecnica IRFTA valuta in modo accoppiato il moto dell'acqua e il trasferimento di calore, basandosi parametri fisici come le temperature dell'aria e dell'acqua e il loro rispettivo "peso" nel punto di misura (Ghafoori et al., 2020).

## Il metodo attivo

Il *metodo attivo* è in grado di rilevare efficacemente la presenza di flussi di filtrazione. Infatti il calore prodotto dal cavo metallico può essere diffuso per conduzione o per avvezione o simultaneamente per conduzione e avvezione; tuttavia, in presenza di un moto dell'acqua la propagazione per avvezione prevale, e si riscontra una dissipazione più rapida del calore come mostrato in Figura 29 (Schenato et al., 2022). Questo metodo ha il vantaggio, rispetto a quello passivo, di non richiedere una base dati stagionale. In più, come sarà approfondito nel paragrafo successivo, può essere applicato «dove manca un'adeguata escursione termica stagionale e dove non c'è un sufficiente gradiente di temperatura tra il corpo arginale e l'acqua del bacino» (Ghafoori et al., 2020).

In Su & Kang (2013) è presentato un modello della propagazione del calore immesso nel cavo, in un dominio 2D, stazionario, approssimando che il trasporto avvenga solo per avvezione (Figura 30). Si individuano due possibili soluzioni pratiche: l'installazione di una singola fibra affiancata al cavo elettrico, o l'installazione di due fibre, una adiacente e una distaccata dal cavo elettrico.

Si ricava la velocità di filtrazione attraverso un metodo detto *di inversione*. Nel caso a doppia fibra, si dispone inizialmente di quattro informazioni:  $T_0$  (temperatura iniziale del materiale),  $T_1$  (misurata dalla fibra vicina al cavo),  $T_2$  (misurata dalla seconda fibra),  $q$  (la potenza immessa nel cavo). Si assume un valore di primo tentativo per la velocità di filtrazione  $v'$ , e si calcola la  $T_2'$  che sarebbe stata misurata con tale  $v'$  (risolvendo numericamente l'equazione differenziale del trasporto del calore, riportata nel paragrafo 3.3.2 *Equazioni del trasporto di calore in mezzo poroso*). Se  $T_2'$  differisce da  $T_2$  si re-itera il processo (Su & Kang, 2013).

Sperimentalmente questo metodo ha buona precisione, in particolare nella configurazione doppia rispetto quella singola. Inoltre maggiore è la potenza elettrica immessa (quindi maggiore è il calore dissipato dal cavo), maggiore è la precisione (Su et al., 2018).

Alternativamente il metodo attivo può essere usato per ricavare informazioni sulla conducibilità termica del terreno: questo approccio permette di individuare un'eventuale presenza di filtrazione (che si manifesta come un valore anomalo di conducibilità molto elevata) e localizzarla nello spazio (Figura 29), ma non una sua quantificazione precisa (Bossi et al., 2018).

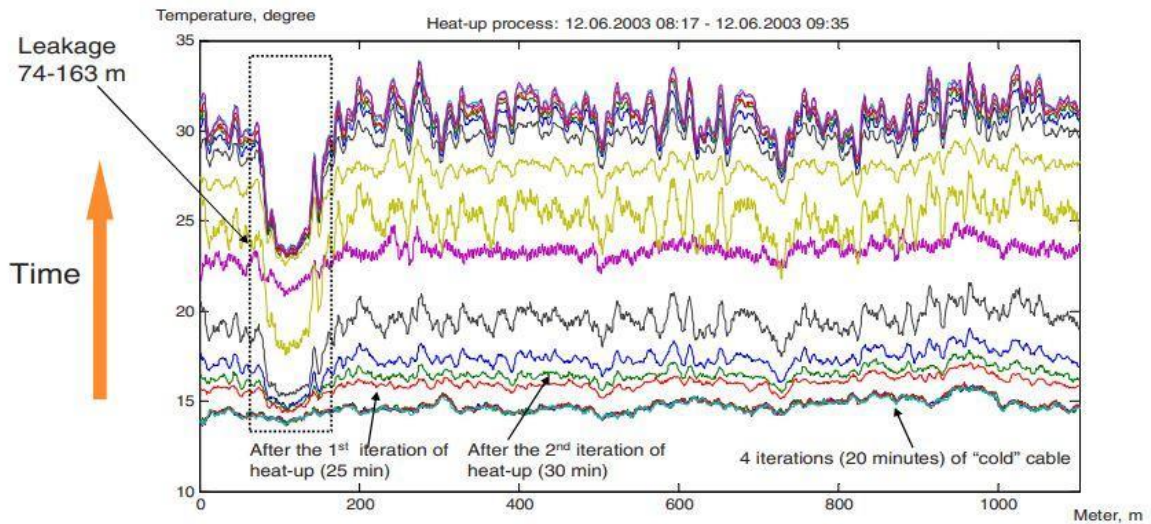


Figura 29 - Dati di temperatura da un sistema DFOS attivo a singola fibra. Ogni serie rappresenta un tempo diverso dall'inizio del riscaldamento del cavo. Si individua come anomalia una temperatura marcatamente inferiore nel tratto tra 64 e 163 metri, e quindi in questo tratto viene identificata la presenza di un flusso di filtrazione più marcato (Pyayt et al.,2013).

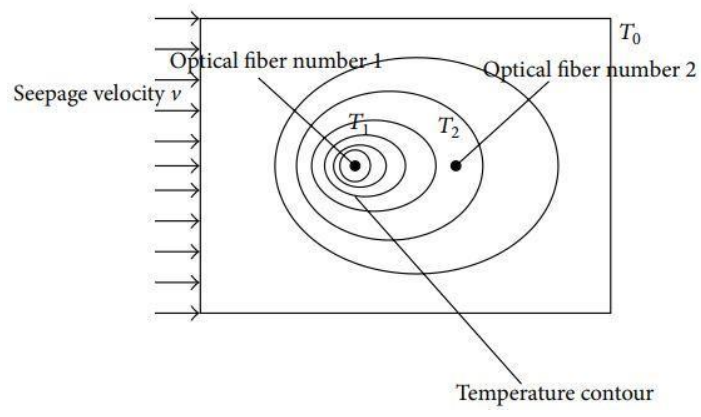


Figura 30 - Schema bidimensionale della configurazione per il metodo attivo a due fibre. Il flusso avviene in direzione orizzontale e la propagazione del calore è rappresentata tramite linee isoterme (temperature contour) (Su & Kang, 2013)



### 3.2.5 Impiego DFOS: analisi dei risultati dalla letteratura

La DFOS è stata impiegata per monitorare argini fluviali con caratteristiche e problematiche anche molto diverse tra loro.

#### Salorno

A Salorno (BZ) lungo l'argine sinistro del fiume Adige sono state installate DFOS sia orizzontali che verticali. Nel primo caso (Figura 31) la DFOS orizzontale ha permesso di individuare la posizione di alcune vie preferenziali della filtrazione. Utilizzando i dati delle indagini geotecniche, emerge che tali vie preferenziali si trovano in corrispondenza dei tratti dove l'argine interseca il percorso dei paleo-canali, caratterizzati da terreno più grossolano (Cola et al., 2021).

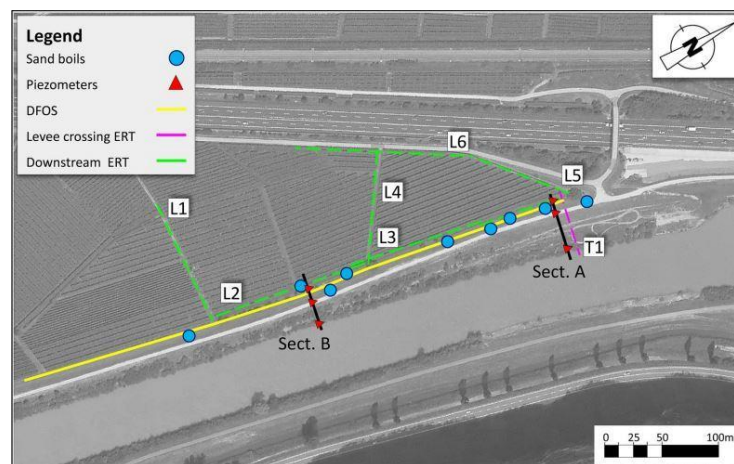


Figura 31 - Pianta dell'installazione orizzontale della DFOS lungo l'argine sinistro dell'Adige a Salorno. Sono riportati pure i fenomeni di sand boil storicamente osservati (Cola et al., 2021).

Nel secondo caso, la DFOS verticale viene impiegata al fine di monitorare la filtrazione e come *early warning* in caso di eventi di piena pericolosi per la stabilità dell'argine. Infatti questo uso delle fibre permette di individuare anomale variazioni della temperatura e l'avanzare del fronte di saturazione (Schenato et al., 2022) (Figura 32).

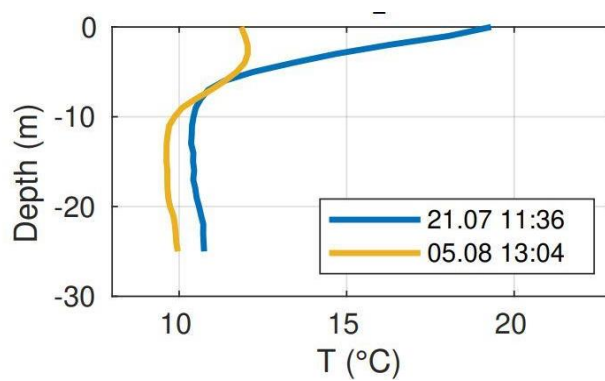


Figura 32 - Profilo verticale della temperatura, misurato tramite DFOS fino alla profondità di 25m, durante un periodo di magra (linea blu) e durante una piena (linea gialla) (Schenato et al., 2022).

## Ijkdijk

Bersan et al. (2018) descrivono il sito sperimentale di Ijkdijk, nei Paesi Bassi, dove è stato costruito un argine artificiale appositamente per simulare una piena (Figura 33). Per il monitoraggio sono stati impiegati svariati strumenti, tra i quali DFOS longitudinali per la misura della temperatura; ben cinque linee di FO sono state installate all'interno dell'argine, in fase di costruzione.

Dato il materiale sabbioso della fondazione, erano previsti fenomeni di piping e sand boil al piede. Si sono effettivamente osservati sand boil, mentre non si è giunti alla completa formazione di pipe. La DFOS ha permesso di osservare la propagazione dell'acqua del bacino (più calda di quella interstiziale originariamente presente nell'arginatura) e la posizione di tre punti in cui il gradiente spaziale della temperatura è risultato più elevato (Figura 35 e Figura 36). In questi punti si è ipotizzata la presenza di vie preferenziali di filtrazione, che avrebbero potuto condurre a piping. Tuttavia la scarsa risoluzione spaziale non ha permesso di individuare con precisione il percorso di tali vie.



Figura 33 – Il sito sperimentale di Ijkdijk nei Paesi Bassi (Bersan et al., 2018).

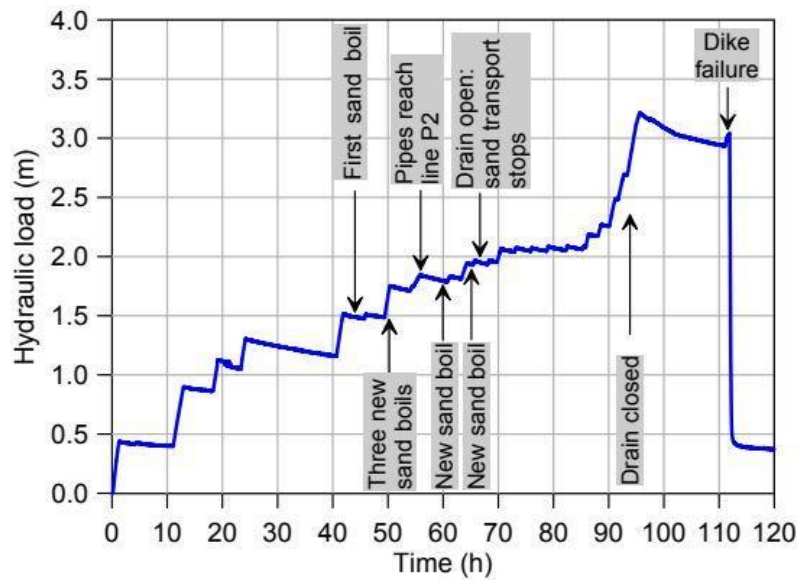


Figura 34 - Andamento del carico idraulico durante il test nel sito sperimentale di Ijkdijk, fino all'istante del collasso. (Bersan et al., 2018)

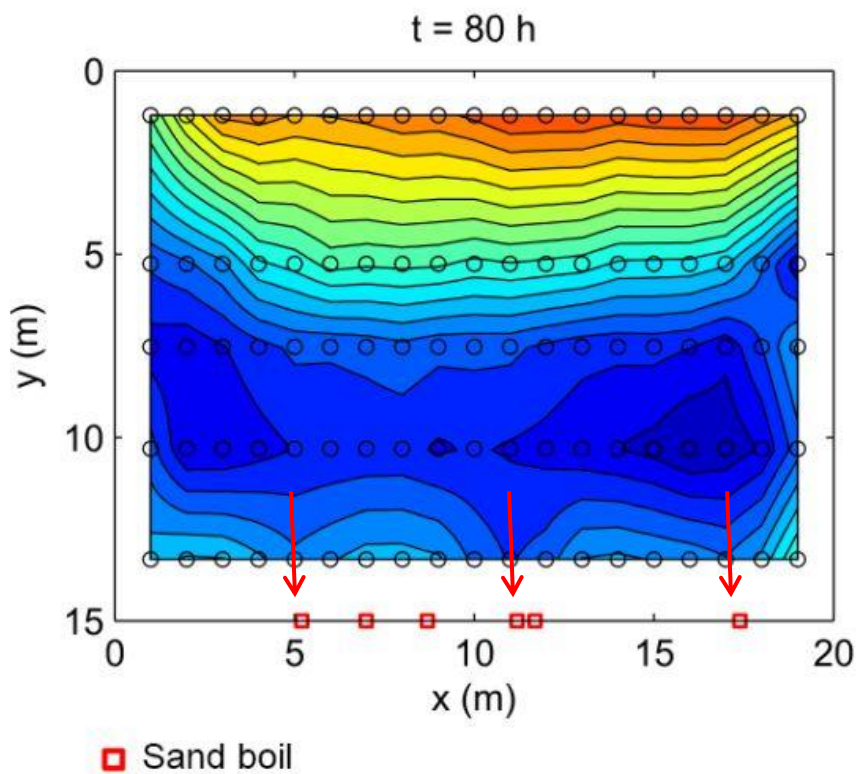


Figura 35 - Diagramma posizione/profondità costruito sui dati di otto DFOS verticali, all'ottantesima ora di simulazione, quando si sono già manifestati diversi casi di sand boil. Il colore indica la temperatura. Si osservano le vie preferenziali di filtrazione come quelle a più rapida variabilità della T dall'inizio della piena. (Bersan et al., 2018).

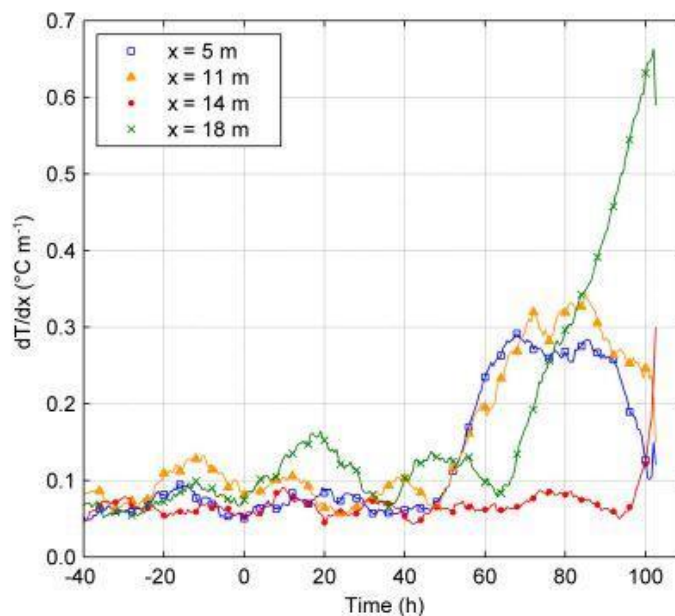


Figura 36 - Interpretazione dei punti soggetti a maggiore filtrazione tramite calcolo del gradiente termico. I sensori posti a 5,11 e 18 metri lungo x segnalano la presenza di vie preferenziali (Bersan et al., 2018).

## Cavarzere

A Cavarzere (Dalla Santa et al., in press) è stata impiegata DFOS verticale per monitorare l'andamento della temperatura nel tempo, per stabilire quale dei due corsi d'acqua (Adige o Gorzone) fosse responsabile di fenomeni accentuati di filtrazione. I sensori raggiungono una profondità di 20m, attraversando così due acquiferi sabbiosi. Tuttavia il profilo delle temperature ottenuto non risulta utile ad individuare la filtrazione: essa è concentrata su un sottile strato più superficiale che per la piccola estensione sfugge alla risoluzione spaziale della fibra ottica, pari a 1m.

## Avignone

Anche ad Avignone (Francia) è stata applicata la DFOS per il monitoraggio della filtrazione. Lungo un canale vicino ad un bacino idroelettrico sul Rodano, è stata individuata l'area più soggetta alla filtrazione nel seguente modo. Prima si è installata della FO orizzontalmente per una lunghezza di 400m, ad una profondità di 50cm; così è stato possibile individuare l'area maggiormente soggetta a filtrazione dove si osservava una netta anomalia negativa della temperatura in diversi momenti dell'anno (Figura 38). Poi si sono installate 16 fibre verticali nei 100 metri di interesse, per visualizzare a quale profondità si concentrasse la filtrazione. La gran parte della filtrazione risulta concentrata tra 8 e 10 metri di profondità (Figura 37). Per questo gli autori suggeriscono l'installazione di un diaframma (Abbasimaedeh et al., 2021).

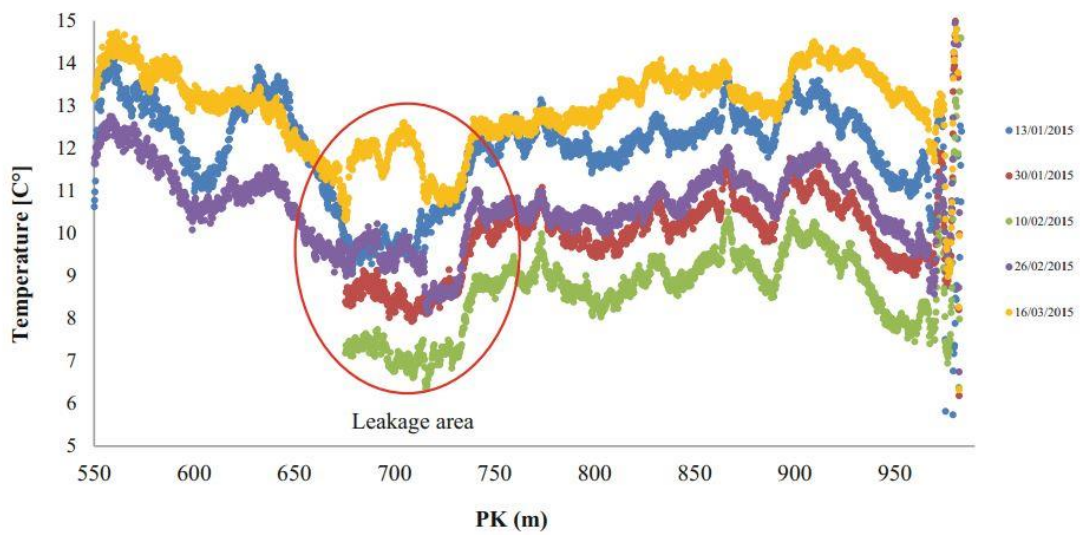


Figura 38 - Anomalia termica attribuita alla filtrazione. Rilevazioni da DFOS orizzontale, in diversi momenti dell'anno (Abbasimaedeh et al., 2021).

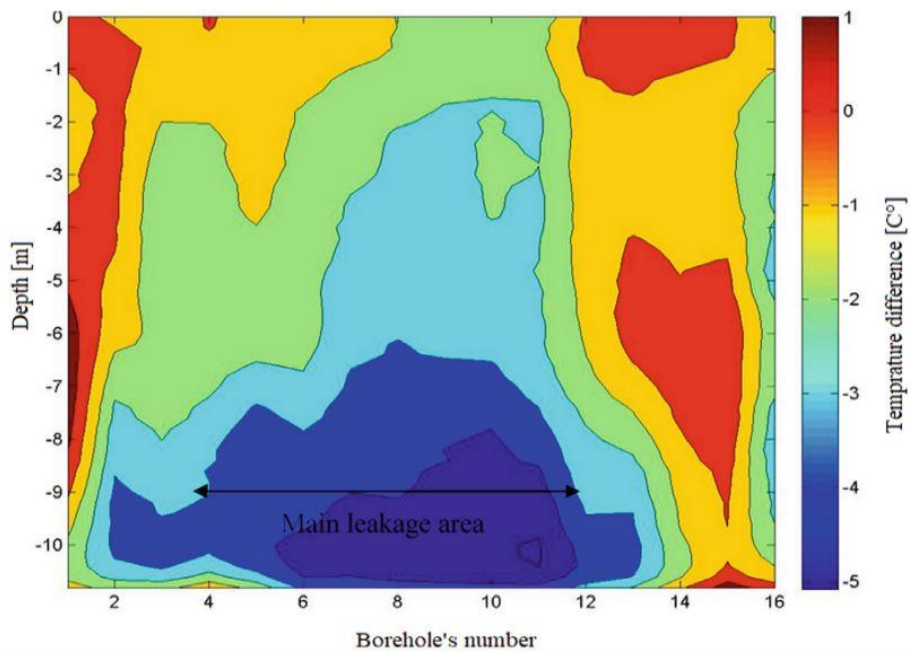


Figura 37 - Distribuzione verticale della anomalia della temperatura in 16 sensori allineati. Alla profondità di 10 metri si osserva una regione con temperature fino a 5 gradi inferiori al valore di riferimento (Abbasimaedeh et al., 2021).

## Dinamiche di temperatura osservate – valutazioni generali

Le temperature misurate nel terreno di fondazione o nel corpo dell'argine sono influenzate da due modalità di trasporto dell'energia: la conduzione e l'avvezione. Il ruolo rispettivo della conduzione e della avvezione dipende dalla posizione del punto di misura rispetto alle linee di flusso, dalle proprietà termiche del terreno, dalla profondità. Di seguito sono sintetizzati alcuni esempi delle dinamiche di temperatura osservate sperimentalmente nella letteratura analizzata, che potrebbero avere una valenza generale.

- La temperatura dell'aria influenza quella del terreno solo negli strati più superficiali. L'oscillazione giorno-notte non è rilevata se non entro una profondità di un metro. Invece l'andamento stagionale ha un'influenza fino alla profondità di circa 10m, seppur molto variabile in base al tipo di terreno. Tuttavia solo entro 2-3 metri questa influenza è significativa (Abbasmaedeh et al., 2021): aumentando la profondità l'oscillazione stagionale è limitata a pochi gradi (4°C alla profondità di 10m, secondo i dati di Dalla Santa et al. (in press)) e in più acquista un ritardo anche di diversi mesi rispetto alla temperatura superficiale.
- L'infiltrazione della pioggia influenza la temperatura secondo un meccanismo avvertivo. Per quantificare questo contributo è importante conoscere la permeabilità del terreno, oltre che la durata e l'intensità dell'evento di pioggia. Secondo i dati di Fabbian et al. (2022) l'infiltrazione dell'acqua piovana ha influenzato la temperatura fino ad una profondità di 4m (nell'arco di circa 24 ore di precipitazioni, Figura 32) attraversando uno strato di media permeabilità (sabbia fine e limo). È importante considerare questo dato perché i sensori DFOS orizzontali sono posti spesso a scarsa profondità (anche meno di 1 metro). È il caso di (Cola et al., 2021), il quale però non riscontra questa problematica essendo lo strato superficiale limoso a bassa permeabilità e inizialmente insaturo. Il legame permeabilità-saturazione è meglio descritto nel paragrafo 3.3 *Teoria del trasporto di fluido e calore in un mezzo poroso*.
- L'acqua interstiziale eventualmente presente nella fondazione può rendere più complessa l'interpretazione dei dati termici. In Bersan et al. (2018) la migrazione dell'acqua residente (più fredda di quella del bacino) che viene spinta dalla massa d'acqua in moto di filtrazione, porta un raffreddamento al sensore lato campagna, quando i sensori prossimi al bacino misurano un rapido riscaldamento (Figura 40). In Fabbian et al. (2022) invece l'acqua interstiziale (più calda di quella del fiume) nel momento della piena ha portato a misurare nei sensori più profondi un aumento di temperatura nell'ordine di 1 o 1.5 °C, quando la temperatura dell'acqua del fiume è rimasta complessivamente stabile (Figura 39). Si è potuto inferire che tale riscaldamento fosse dovuto alla filtrazione perché lo stesso sensore ha misurato allo stesso tempo un aumento del carico idraulico.
- In alcuni casi, l'evento di piena influenza la temperatura anche a grandi profondità (oltre i 20m in Fabbian et al. (2022)) per esempio nei casi dove vi sono spessi strati ad elevata permeabilità alla base dell'argine.

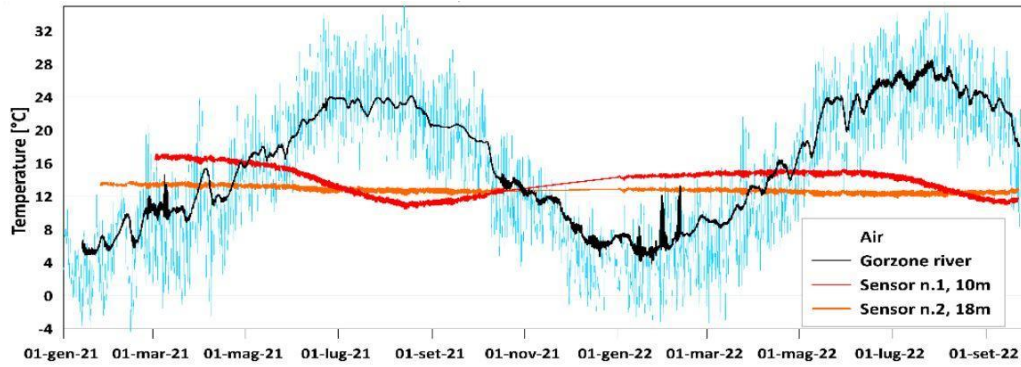


Figura 41 - Andamento annuale della temperatura da sensori posti: in superficie (colore azzurro), alla profondità di 10m (rosso) e 18m (arancione). (Dalla Santa et al., in press)

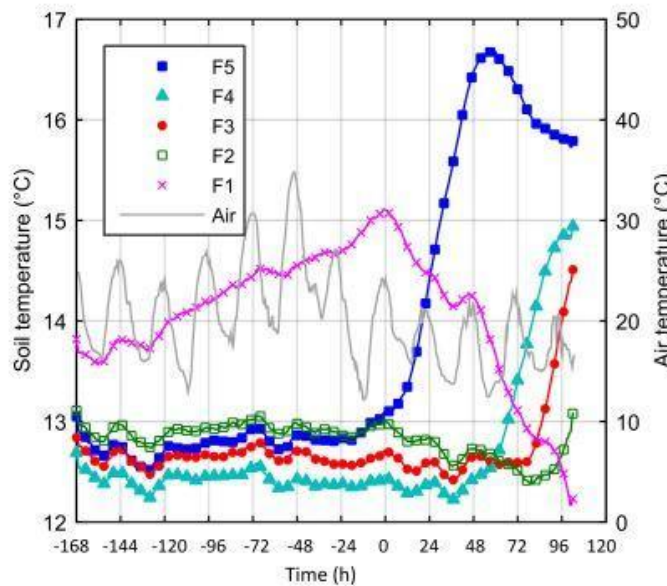


Figura 40 - Temperature misurate da sensori interni al corpo arginale. Si vede come il sensore F1 (lato campagna) misura un raffreddamento immediato, l’F5 (lato bacino) misura un riscaldamento immediato, l’F2 (a metà del corpo arginale) misura prima un leggero raffreddamento, poi un riscaldamento. (Bersan et al., 2018)

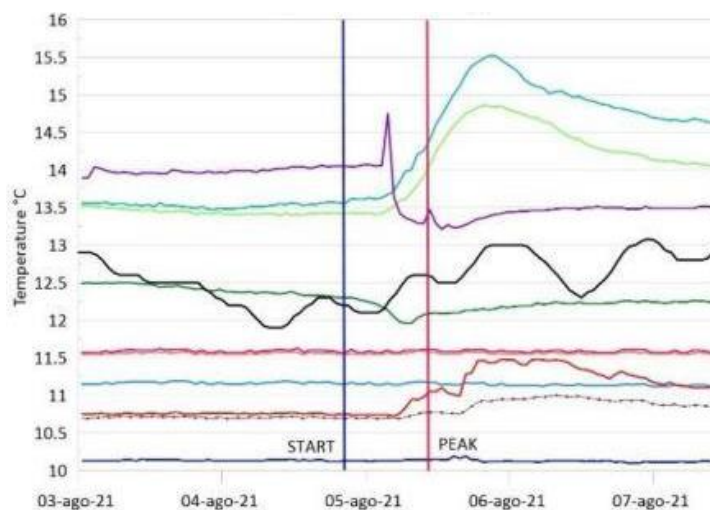


Figura 39 - Andamento delle temperature misurate a diverse profondità, durante un evento di piena. A fronte di una modesta variazione della T dell’acqua del fiume (linea nera), diversi sensori misurano un aumento anche superiore ai 2°C (Fabbian et al. (2022))

## Considerazioni finali sull'efficacia delle DFOS

L'uso della DFOS per il monitoraggio della filtrazione ha avuto sviluppo in tempi abbastanza recenti, per cui c'è ancora molto da sperimentare e approfondire. Il sito sperimentale di Ijkdijk (descritto anche in Simonini et al. (2014) e Cesali et al. (2020)) è stato il primo caso di simulazione di applicazione della DFOS in scala reale.

I diversi vantaggi di questo strumento sono già stati anticipati nel paragrafo 3.2 *DFOS: distributed fibre optic sensing*.

Possiamo sintetizzarli in questa lista:

- Hanno bassi costi di installazione, se si escludono i costi della strumentazione per il rilevamento.
- Richiedono limitate operazioni di manutenzione nei primi 20 anni di vita (Cola et al., 2021).
- Forniscono misure spazialmente distribuite e con buona risoluzione spaziale (generalmente di 1m), potenzialmente continue nel tempo e monitorabili in tempo reale (Pyayt et al., 2013).
- Se opportunamente calibrati, permettono una adeguata precisione nella misura della temperatura (Ghafoori et al., 2020).

Rimangono diversi limiti all'applicazione della DFOS, alcuni dei quali stanno venendo approfonditi solo recentemente. Se consideriamo ora solo il metodo passivo, un limite importante si riscontra quando è troppo piccola la differenza di temperatura tra l'acqua filtrante e quella del punto di misura, oppure tra l'acqua prima e dopo la piena. E' quanto è stato riscontrato in Cola et al. (2021) e Fabbian et al. (2021). Nel primo articolo, la problematica è stata superata perché, avendo installato tre linee di FO a tre diverse profondità, le aree soggette a filtrazione sono state individuate in quanto caratterizzate da un'inversione del gradiente di temperatura con la profondità (la fibra più profonda qui misurava la temperatura inferiore, quando nel resto della linea avveniva l'opposto (Figura 42)). Nel secondo articolo invece ciò che ha permesso di trarre ugualmente delle informazioni utili è stato il fatto che l'acqua residente nei terreni di fondazione fosse più calda di quella del fiume: così la migrazione dell'acqua residente indotta dall'acqua filtrante ha portato comunque una variazione della temperatura ai sensori (Figura 41). Come è stato precedentemente osservato, queste criticità possono essere in buona parte superate utilizzando DFOS con metodo attivo.

Un'altra criticità può emergere quando i pipe in formazione sono localizzati e di dimensioni troppo limitate: l'anomalia termica da loro creata può sfuggire alla risoluzione spaziale della DFOS, come visto in Bersan et al. (2018) e Dalla Santa et al. (in press).



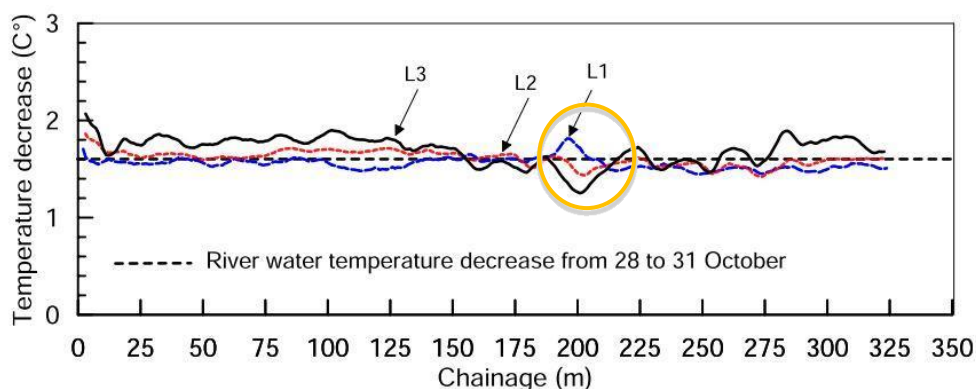


Figura 42 - Variazione di temperatura dall'inizio della piena al picco, misure da fibra ottica orizzontale lato campagna. Si osserva un'inversione del gradiente tra m 175 e m 200, dove lo strato più profondo (L1) si è raffreddato di più di quello superficiale (Cola)

Infine bisogna prestare particolare attenzione alla calibrazione delle misure con FO tramite interrogatore e a possibili fonti di disturbo. Come già accennato, la FO non restituisce una misura diretta della temperatura: essa viene ricavata a partire dai dati di intensità delle componenti Stokes e Anti-Stokes; queste richiedono l'uso di alcuni parametri che vanno stabiliti tramite calibrazione manuale (inserendo la fibra in un *bagno termico* ovvero un tratto dove la temperatura è costante e nota da altre misurazioni) (Ghafoori et al., 2020).

Per quanto riguarda i fattori che potrebbero alterare i risultati, è possibile individuare:

- una variazione delle proprietà del terreno e del reticolo di filtrazione a causa delle operazioni di scavo in fase di installazione (Cola et al., 2021);
- un non adeguato contatto tra il cavo e il terreno indisturbato (Cola et al., 2021);
- la presenza di altri flussi di filtrazione non valutati nell'interpretazione, come l'infiltrazione dell'acqua di pioggia o la comunicazione con strati di acquiferi (Dalla Santa et al., in press).

Una soluzione per assicurare maggiore accuratezza dei dati da DFOS consiste nell'affiancare alle FO strumenti di misura puntuali, come possono essere i piezometri (per la misura delle pressioni neutrali o delle altezze piezometriche) impiegati in Cola et al. (2021), Bersan et al. (2018), Dalla Santa et al. (in press) oppure i sensori TDR (*time-domain-reflectometry*) come in Abbasimaedeh et al. (2021). I piezometri possono confermare la completa formazione di un pipe se misurano un brusco calo della pressione neutrale (Bersan et al., 2018), oppure l'avanzamento della linea di saturazione se misurano al contrario un innalzamento della altezza piezometrica (Simonini et al., 2014). Il TDR invece misura il contenuto d'acqua, e può quindi individuare le vie preferenziali di filtrazione verso campagna.

## 3.3 Teoria del trasporto di fluido e calore in un mezzo poroso

Per elaborare i dati di temperatura ottenuti da DFOS e per costruire modelli numerici di filtrazione è fondamentale tenere presenti le equazioni che governano il trasporto di materia e di calore nel terreno.

### 3.3.1 Equazioni del trasporto di fluido in mezzo poroso

L'equazione che descrive il trasporto di un fluido in un mezzo poroso è il risultato della combinazione dell'equazione di Darcy (equazione 2) con l'equazione di conservazione della massa (equazione 1) (Yosef et al., 2017):

$$\frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_w u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$u = -K \nabla h = -K \nabla \left( \frac{p}{\rho_w g} + z \right) \quad (2)$$

che per la direzione  $i$  ha componente:

$$u_i = \frac{k_{ij}}{\mu} \left( \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_w g_i \right) \quad (3)$$

Dove  $u_i$  è la velocità di filtrazione in m/s,  $p$  è la pressione del fluido,  $h$  il carico idraulico,  $\rho_w$  la densità del fluido,  $\mu$  la viscosità dinamica (in  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $k_{ij}$  è la conducibilità idraulica intrinseca,  $g_i$  è la componente  $i$  dell'accelerazione di gravità,  $\theta$  è il contenuto d'acqua.

Il risultato per un mezzo saturo in condizioni stazionarie ( $\frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} = 0$ ) è il seguente (Yosef et al., 2017):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_w k_{ij} g_j \right) = 0 \quad (4)$$

Mentre il caso generico, non-stazionario e con una matrice parzialmente satura è la nota equazione di Richards, che per un flusso monodirezionale assume la forma dell'equazione (5); in tale equazione è considerata la dipendenza della permeabilità dalla suzione, dunque dal contenuto d'acqua  $\theta$  (Pachepsky et al., 2003).

La corrispondenza con l'equazione (4) è immediata se si considera misurata in metri la  $\Psi$  (il contributo della capillarità all'energia potenziale),  $K_h = \frac{g \rho}{\mu} k$  per la conducibilità idraulica e si pone  $x_i \equiv z'$ :

$$-\frac{\partial K_h(\theta)}{\partial z'} - \frac{\partial}{\partial z'} \left[ K_h(\theta) \cdot \left( \frac{\partial \Psi(\theta)}{\partial z'} \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5)$$

nella quale la pressione  $p$  è espressa come somma del contributo di gravità e della pressione di suzione  $\Psi$  (o potenziale matriciale), l'accelerazione di gravità ha unicamente componente  $z$  e la permeabilità  $K_h$  dipende dal contenuto d'acqua  $\theta$ .

La dipendenza  $K_h - \theta$  è frequentemente espressa in modo semplificato, per esempio attraverso il modello di Van Genuchten (esposto in Van Genuchten (1980) e utilizzato da Song & Yosef, (2017)). Tuttavia spesso i parametri necessari al modello di Van Genuchten non sono misurabili attraverso le indagini geotecniche più comuni. Per questo sono state elaborate ulteriori semplificazioni, che richiedono come unici parametri del terreno: la permeabilità alla saturazione, l'indice di plasticità, la curva granulometrica (Gao & Chai, 2022).

Nel modello numerico per stimare con precisione il processo di filtrazione è evidente l'importanza di questa relazione di Van Genuchten: mentre il terreno si satura, esso aumenta la propria conducibilità idraulica dunque incrementa la velocità di filtrazione e infine l'estensione dell'area satura (Tracy et al., 2016).

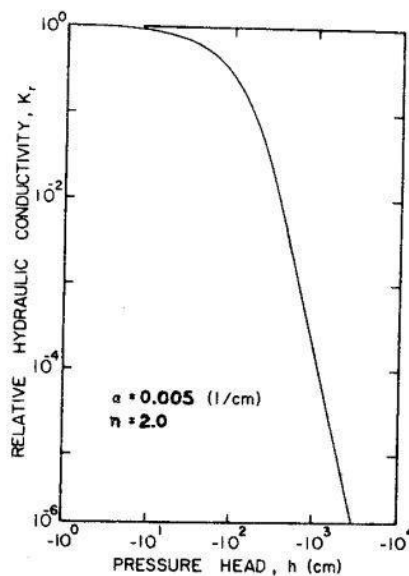


Figura 43 - Curva di Van Genuchten che mette in relazione la permeabilità con la pressione di suzione  $\Psi$  (dunque con il contenuto d'acqua) (Van Genuchten, 1980).

### 3.3.2 Equazioni del trasporto di calore in mezzo poroso

Il problema in esame richiede pure la soluzione dell'equazione del trasporto del calore in un mezzo poroso. In condizioni di transitorio essa si presenta nella forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \left( \frac{\rho_w c_w}{C} u T \right) = \nabla \left( \frac{\lambda}{C} \nabla T \right) \quad (6)$$

Dove  $c_w$  è il calore specifico del fluido,  $C$  è la capacità termica di volume,  $\lambda$  è la conducibilità termica del terreno,  $T$  è la temperatura (Bersan et al., 2018).

In tale equazione è stato trascurato il contributo di trasporto dispersivo (ovvero legato al moto localizzato in direzioni diverse da quelle del flusso principale) come è ragionevole sulla base di evidenze sperimentali. Rimangono così due termini differenziati nello spazio: a sinistra, il termine avvevativo, a destra quello conduttivo.

Il termine avvevativo esprime la quantità di calore trasportato attraverso il moto del fluido, e dipende dalla velocità di Darcy  $u$ . Dunque è chiaro come, in presenza di moto del fluido, la soluzione dell'equazione del trasporto termico sia legata a quella dell'equazione della filtrazione, attraverso i parametri  $K$  e  $\theta$ .

Possiamo ricavare tale equazione in modo semplificato, per esempio partendo da un dominio 2D (Figura 44), come da Su & Kang (2013).

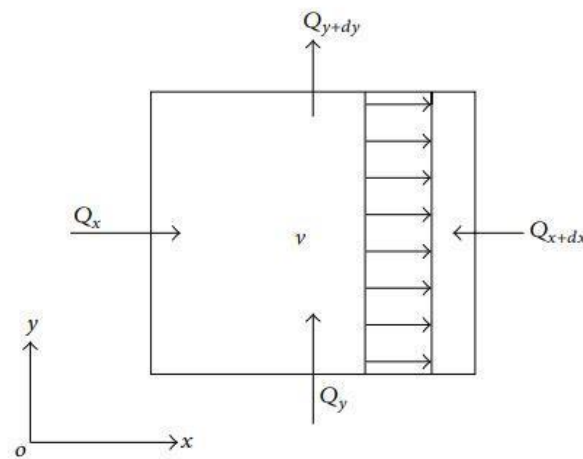


Figura 44- Scambi termici per un dominio rettangolare sottoposto a filtrazione lungo la direzione x (Su & Kang, 2013)

Il flusso di calore  $Q$  che transita attraverso il contorno di un'area rettangolare  $dx dy$  sarà dato dal termine conduttivo (calore scambiato grazie al gradiente di temperatura, e legato al parametro  $\lambda$ ) e da quello avvevativo, ovvero il calore scambiato dall'ingresso/uscita di fluido ad una data  $T$  (per questo legato al calore specifico dell'acqua  $c_w$  e alla sua densità  $\rho_w$ ). In ingresso in direzione  $x$  avremo:

$$Q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} dy + c_w \gamma_w v T dy \quad (7)$$

Considerando il flusso netto di calore nel dominio considerato, rimangono solo termini differenziali:  $Q_{x+dx} - Q_x = (Q_x + dQ_x) - Q_x = dQ_x$  e lo stesso in direzione  $y$ .

Raccogliendo poi nel parametro  $d$  i parametri  $c_w, \gamma_w, \lambda$  e la variabile  $v$ ,  $d = \frac{v c_w \gamma_w}{\lambda}$ , otteniamo la seguente forma dell'equazione differenziale alle derivate parziali per il trasporto di calore, in condizioni stazionarie (Su & Kang, 2013):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - d \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

La permeabilità  $K_h$  dipende dalla viscosità  $\mu$  e dalla densità, ovvero due variabili temperatura-dipendenti. Abbiamo dunque che la soluzione dell'equazione del trasporto di materia richiede la soluzione dell'equazione del trasporto di calore per la determinazione del valore di  $K_h$ ; ma allo stesso tempo l'equazione del trasporto di calore richiede di determinare la variabile  $v$ . Per questo motivo le due equazioni vanno risolte simultaneamente (Yosef et al., 2017), ed è questa la caratteristica che definisce *accoppiato* questo modello (Bersan, 2015).

## Il numero di Péclet e la conducibilità

Spesso il calore viene trasportato in modo prevalente secondo una sola delle due dinamiche (avvezione o conduzione) dipendentemente dalla presenza o meno di moti di filtrazione. Per esempio, se il gradiente idraulico è molto piccolo, o se il suolo è omogeneo e poco permeabile, prevarrà la conduzione sull'avvezione perché la velocità del fluido sarà molto bassa. Il numero di Péclet è un parametro adimensionale usato per esprimere il contributo della avvezione rispetto quello della conduzione (Bersan et al., 2018).

$$Pe = \frac{u l \rho_w c_w}{\lambda}$$

Dove  $l$  è la lunghezza caratteristica del moto e  $\lambda$ , la conducibilità termica del terreno, dipende principalmente dalla porosità e dal contenuto d'acqua  $\theta$ , ma è influenzata anche dalla densità, dalla composizione mineralogica e dalla temperatura.

Il contenuto d'acqua è la variabile più influente perché l'acqua ha  $\lambda$  100 volte maggiore dell'aria, per cui terreni saturi hanno  $\lambda$  molto maggiori. L'aumento di  $\lambda$  con il contenuto d'acqua è molto più rapido nei terreni grossolani (ad esempio le sabbie) che nelle argille (Bersan, 2015).

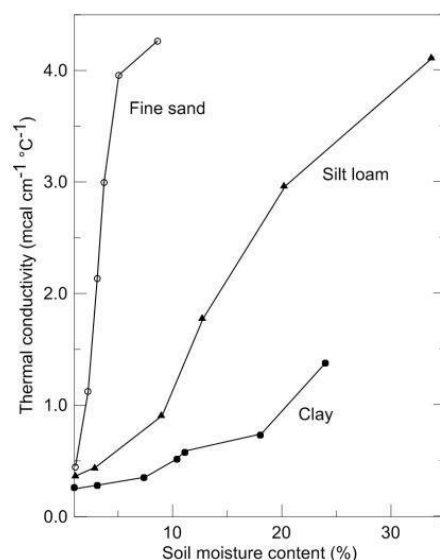


Figura 45 - Conducibilità termica di diversi terreni al variare del contenuto d'acqua del terreno (Bersan, 2015)

## Capitolo 2

### *Sito sperimentale di Salorno e modellizzazione numerica*

# 1 Obiettivo

In questo capitolo viene analizzato nel dettaglio un caso studio di un argine fluviale del fiume Adige soggetto a *sand boil* e per questo sottoposto ad indagini e monitoraggio, anche tramite un sistema di DFOS. I dati rilevati durante una piena nel 2018 sono stati impiegati per calibrare un modello agli elementi finiti che rappresenta la struttura arginale nella sua geometria e caratteristiche materiali e ne analizza il regime di filtrazione e le variazioni di temperatura, con i seguenti scopi:

- Integrare le informazioni ricavate da misure puntuali (piezometri) con quelle da misure distribuite (DFOS);
- Verificare la coerenza tra i dati sulle proprietà del terreno e i valori simulati per il carico idraulico e per la temperatura durante l'evento di piena.
- Analizzare il contributo di diversi regimi di filtrazione sulla distribuzione della temperatura, per facilitare l'interpretazione dei dati misurati.

## 2 Introduzione al caso studio: l'Adige a Salorno

### 2.1 Caratteristiche geografiche e morfologiche

Il sito monitorato si trova 1 km a sud della cittadina di Salorno, in provincia di Bolzano alla quota di circa 210 mslm. Il contesto territoriale è quello della valle dell'Alto Adige, dominato da coltivazioni di frutta e una presenza distribuita di insediamenti residenziali e artigianali/commerciali.





Figura 46 - Collocazione geografica del sito di monitoraggio presso Salorno.

Il suolo della valle dell'Adige è costituito da sedimenti glaciali, fluviali e lacustri, ai quali si aggiungono contributi di frane, che rendono la stratigrafia ricca di eterogeneità (Cola et al., 2021). Nel XIX secolo il corso del fiume, allora meandriforme, è stato reso rettilineo con la costruzione di argini. I punti di intersezione tra il precedente corso naturale del fiume e il nuovo percorso rettificato costituiscono le aree di maggiore vulnerabilità (Simeoni et al., 2011). Da allora, si sono verificate diverse rotte dell'argine, particolarmente disastrose quelle del 1966 in più punti, uno dei quali vicino Trento e del 1981, vicino Salorno (Provincia Autonoma Di Bolzano, 2023).

Per ridurre la filtrazione attraverso l'argine e attraverso il terreno di fondazione, nel tratto in esame negli anni '90 è stato installato un diaframma profondo 10m, a partire da una profondità di circa 1.5m al di sotto della sommità dell'argine. Esso però non è stato del tutto sufficiente ad interrompere la filtrazione: si sono osservati accentuati fenomeni di *sand boil* durante le piene del 2018 e 2021 (Schenato et al., 2022).





Figura 47 - Visione dell'argine presso il sito di monitoraggio; a destra il fiume Adige.

## 2.2 Indagini geotecniche

Il CNR-IRPI, in collaborazione con l'Università di Padova e con il contributo della provincia autonoma di Bolzano, ha realizzato un sito di monitoraggio della filtrazione tramite DFOS vicino a Salorno.

Sono state condotte le seguenti indagini geotecniche e geofisiche, come riportato da Cola et al. (2021):

- 6 carotaggi fino a profondità di 9-10m, effettuati alla sommità dell'argine e alla berma lato campagna presso 3 sezioni (la sezione A, la B e una intermedia), che hanno permesso di costruire la distribuzione granulometrica lungo la verticale (Figura 48).
- Campionamenti di terreno disturbato e indisturbato, effettuati lungo la trincea scavata per installare la FO, alle profondità di 30cm, 70cm e 120cm; di questi è stata pure ricostruita la distribuzione granulometrica.
- Indagini ERT eseguite lungo sezioni sia trasversali che longitudinali all'argine, con gli elettrodi installati secondo passi diversi (tra 0.75m e 2m) così da analizzare diverse profondità e risoluzioni (pianta visibile in Figura 31).

Negli strati insaturi, l'ERT individua le regioni più resistive, dunque più grossolane; corrispondono ad un tratto di paleo-canale, come è stato ricostruito anche da studi geomorfologici.

La permeabilità è stata stimata in due modi. Per gli strati grossolani, è stata applicata la formula di Hazen, usando i dati della curva granulometrica ottenuta dai campioni estratti nei

6 carotaggi. Per lo strato limoso, è stata usata una pompa di flusso in laboratorio, usando i campioni indisturbati ricavati durante l'escavazione della trincea.

Oltre ai paleo-canali, esistono altre eterogeneità: dai campioni ricavati nello scavo della trincea, sono state individuate lenti di materiale più grossolano situate nella parte inferiore dello strato limoso e generate da particolari processi di deposito di sedimenti fluviali (Cola et al., 2021). La loro presenza risulta concentrata in particolare nel tratto compreso nella lunghezza tra i 150 e i 210 metri. Il ruolo di queste lenti permeabili può influenzare molto il regime di filtrazione (Amabile et al., 2020), come è stato anticipato nel paragrafo 2.2.2 *Valutazione delle variabilità del materiale*.

I risultati dell'indagine ERT confermano la stratigrafia ricostruita attraverso i carotaggi e il campionamento della trincea, e in più danno informazioni sulla forma nello spazio del paleo-alveo parzialmente visibile in Figura 49.

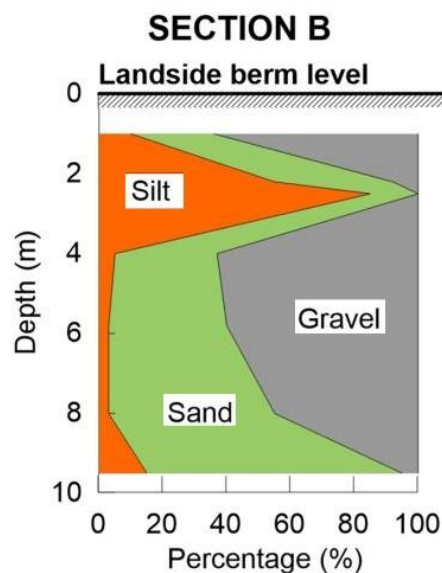


Figura 48 - Distribuzione granulometrica dai carotaggi alla berma della sezione B

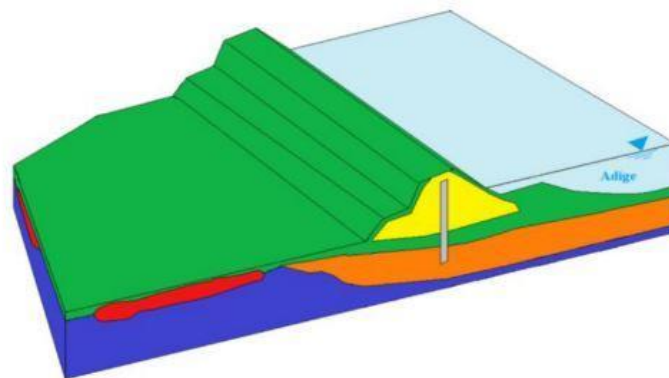


Figura 49 - Ricostruzione della stratigrafia dell'argine: in rosso lo strato permeabile in corrispondenza di un paleo-alveo. In arancione e blu gli strati sabbiosi e di sabbia ghiaiosa nella fondazione. In verde lo strato superficiale in limo argilloso. In giallo il corpo arginale in Tout Venant.

## Sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è costituito da 4 piezometri alle sezioni A e B (alcuni dei quali pure affiancati da termometri), e dalle 3 linee di sensori in fibra ottica orizzontale (Figura 52).

I piezometri sono posti uno presso l'alveo del fiume (nominato PB0), due attraverso il corpo arginale ai due lati del diaframma (PB1 quello lato fiume, PB2 quello lato campagna), uno lato campagna (PB3). Il piezometro PB0 è il più superficiale, con una profondità di soli 50cm; PB1 e PB2 raggiungono una profondità di circa 4 metri; PB3 è a due livelli, uno profondo 50cm, uno 7m.

Tutti registrano le misure con continuità, ad intervalli temporali di 1 ora.

Il sistema di misura a fibra ottica ha un interrogatore che garantisce una risoluzione spaziale di 2m e una frequenza di misura di 120 secondi.

La trincea (Figura 50) è lunga 350m, e al suo interno sono stati interrati tre livelli di FO, alle profondità di 50cm (F1), 100cm (F2), 180cm (F3). La fibra installata è uno stesso cavo che percorre tutti i tre livelli, quindi per una lunghezza totale di 1100m.



Figura 50 - Installazione del cavo della FO nella trincea

## 2.3 Geometria e stratigrafia

Il corpo dell'argine ha un'altezza di circa 4 m, ed è composto da una miscela di ghiaia, sabbia e limo. La fondazione ha superficialmente un sottile strato di limo sabbioso (di spessore leggermente variabile tra le sezioni, all'incirca pari a 2 m). Più in profondità il terreno è di sabbia ghiaiosa. Ad ottobre 2018, prima dell'evento di piena, la linea di falda era ad una quota di 206 ms.m.m. (ovvero una profondità di poco meno di 3 m, dunque nello strato di sabbia ghiaiosa).

Usando i dati ottenuti dalle indagini geotecniche riportate da Cola et al. (2021) (per permeabilità, densità, angolo d'attrito) con alcuni valori ragionevolmente assunti (per porosità, conducibilità e capacità termica), si è compilata la tabella:

Tabella 1 - Proprietà geotecniche e geotermiche della stratigrafia del sito in esame.

Strato	permeabilità [ $\times 10^{-7}$ m/s]	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	angolo d'attrito [°]	porosità	conducibilità termica [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	Capacità termica di volume [MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> ]
Limo sabbioso	2	1985	27	0.25	3	2.3
Sabbia ghiaiosa	1000	1936	33	0.3	2.8	2.6
Ghiaia sabbiosa	1000	1936	33	0.35	2.5	2.6
Tout- Venant	10	1936	34	0.4	2.5	2.2
Diaframma Jet- Grouting	0.01	2000	-	0	1.5	1.8

## **3 Materiali e metodi**

### **3.1 Teoria della modellizzazione numerica agli elementi finiti**

La soluzione su un dominio spaziale delle equazioni del trasporto del calore e della filtrazione attraverso un mezzo poroso (due equazioni differenziali alle derivate parziali), può essere raggiunta tramite metodi numerici.

#### **3.1.1 Il metodo variazionale di Galerkin**

Il metodo numerico più efficace per questa categoria di problemi è il metodo agli elementi finiti di Galerkin, un metodo variazionale.

I metodi variazionali ricercano una soluzione  $u_n$  che approssimi la soluzione esatta  $u$ , dove  $u$  è la funzione incognita (in base al problema, può coincidere con la temperatura, con il potenziale idraulico...).  $u_n$  è un vettore le cui componenti sono ciascuna una soluzione approssimata alla PDE in diversi punti del dominio spaziale (punti che chiameremo *nodi* della mesh).

$u_n$  è un'approssimazione perché viene ricercata all'interno di un sottospazio dello spazio funzionale cui appartiene la soluzione esatta. Scelto il sottospazio, è possibile definire  $n$  funzioni linearmente indipendenti  $\xi$  (chiamate funzioni base) che lo generano. Così la soluzione  $u_n$  può essere espressa come combinazione lineare delle funzioni base  $\xi$ :

$$u_n = \sum_{j=1}^n \alpha_j \xi_j(x)$$

e la soluzione del problema si riduce alla soluzione dei coefficienti  $\alpha_j$  della combinazione lineare; con l'obiettivo di ridurre la distanza tra la soluzione approssimata  $u_n$  e quella esatta.

Dunque i metodi variazionali rendono discreto un problema continuo, andando ad approssimare direttamente la soluzione  $u$ .

Il metodo variazionale adottato dalla maggior parte dei software FE (tra cui FeFlow) è il metodo di Galerkin (Diersch, 2014). Esso restituisce la soluzione  $u_n$  minimizzando non l'errore  $u_n - u$  (che evidentemente è impossibile da calcolare, essendo  $u$  incognita) bensì il residuo  $A \cdot u_n - f$ . Dove  $A$  è l'operatore differenziale (come può essere la divergenza o il laplaciano, presenti nelle PDE del nostro problema);  $f$  è il vettore dei termini noti.

La formula così scritta però è vettoriale: per quantificare il residuo si usa il suo prodotto interno con un vettore  $w$  appartenente ad uno spazio test. Così il metodo si traduce nella

soluzione di  $n$  equazioni che esprimono l'ortogonalità tra il vettore residuo e il rispettivo vettore  $w$  (dette *condizioni di Petrov-Galerkin*).

$$\int_{\Omega} (Au_n - f) \cdot w_i \cdot d\Omega = 0 \text{ per } i = 1, 2, \dots, n$$

Galerkin assume che gli ogni  $w_i = \xi_i$  (cioè che spazi trial e test coincidono). Grazie a questa proprietà, possiamo formulare il problema dell'ortogonalizzazione dei residui nel modo seguente (detta *formulazione debole*).

$$\alpha_i \int_{\Omega} \xi_j \cdot A\xi_i \cdot d\Omega = \int_{\Omega} f \cdot \xi_i \cdot d\Omega \text{ per } i = 1, 2, \dots, n$$

Si tratta di un sistema di  $n$  equazioni (dove  $n$  è il numero di nodi) che possiamo esprimere in forma matriciale.

$$H \cdot \hat{\alpha} = f$$

Dove  $H$  è detta matrice della rigidità, e non dipende dalle variabili incognite bensì solo dalla geometria della discretizzazione del dominio.

### 3.1.2 Soluzione di un problema agli elementi finiti

#### Discretizzazione triangolare

Il tipo di discretizzazione del dominio influisce la velocità di convergenza e l'errore del metodo. Nel modello utilizzato è stata adottata una discretizzazione spaziale triangolare, come è più comune per domini 2D.

Elementi finiti triangolari permettono di coprire in modo adeguato domini di forme anche molto irregolari. In più permettono di ottenere in modo semplice le componenti della matrice di rigidità, specie se si utilizzano funzioni base lineari.

$$h_{ij}^{(e)} = \frac{1}{4\Delta} (b_i b_j + c_i c_j)$$

esprime la componente  $i$ - $j$  della matrice di rigidità per un singolo elemento.  $\Delta$  è l'area dell'elemento,  $b_k$  e  $c_k$  sono coefficienti tratti dalle formule delle funzioni base espresse come piani nello spazio.

Utilizzando elementi triangolari, l'errore della soluzione approssimata tende a zero con il quadrato della dimensione caratteristica dell'elemento (Gambolati & Ferronato, 2015).

Il modello genera automaticamente la mesh triangolare, applicando il criterio di Delaunay che procede massimizzando l'ampiezza dell'angolo più acuto di ciascun triangolo, e garantisce che nessun triangolo possa essere totalmente incluso nella circonferenza circoscritta ad un altro elemento (Diersch, 2014).

La migliore convergenza è garantita per triangoli che si avvicinano all'essere equilateri. Triangoli con angoli ottusi o molto acuti generano instabilità nel metodo.

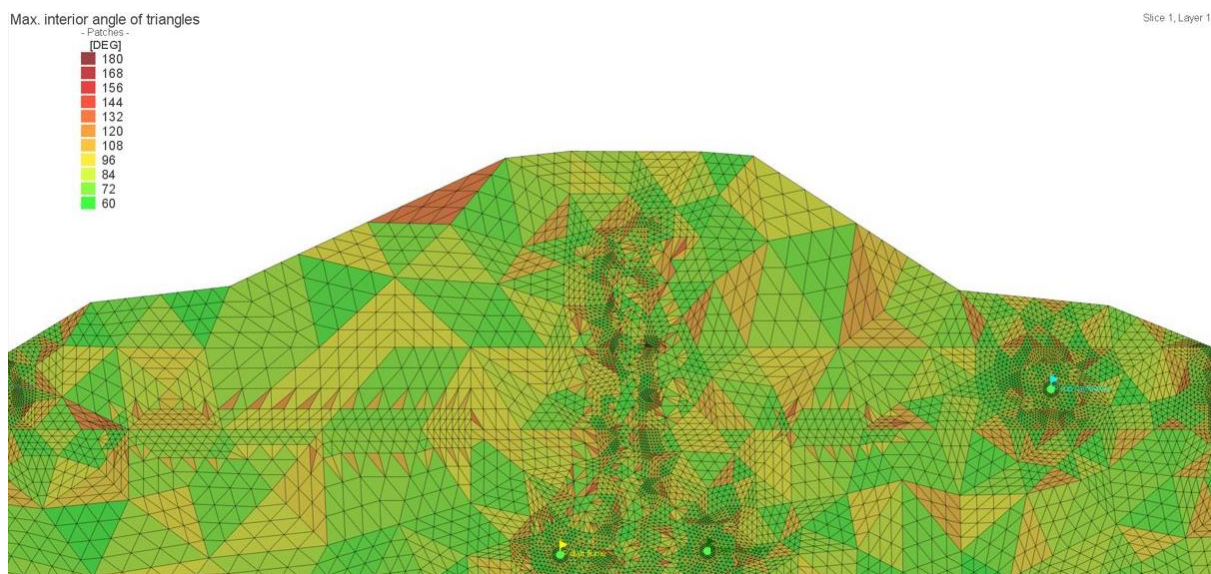


Figura 51 - Mesh ad elementi triangolari, con segnalati in rosso quelli che violano il criterio di Delaunay (triangoli distanti dalla forma equilatera).

## Condizioni al contorno

Ogni problema per essere ben posto richiede la definizione di opportune condizioni al contorno (BC), imposte al dominio di calcolo dall'esterno (per es., il livello del fiume, la temperatura dell'aria...).

Così come la geometria del dominio e le caratteristiche dei materiali, le BC dovranno essere note in fase di stesura del modello numerico.

Esse sono delle soluzioni del problema note alla frontiera del dominio. Spesso vengono da informazioni fisiche sul dominio del problema. Si classificano:

- BC di Dirichlet: valori noti per la funzione  $u$
- BC di Neuman: valori noti per la derivata di  $u$  normale alla frontiera
- BC di Cauchy: valori noti per la somma di  $u$  e della sua derivata

Quando il valore assegnato è nullo si dice che le condizioni sono omogenee. (Gambolati & Ferronato, 2015, p.400)

## Soluzione numerica

Quando il problema che si vuole risolvere si trova in condizioni stazionarie, l'applicazione del metodo di Galerkin si traduce nella soluzione di un sistema di  $n$ -equazioni non lineari. Per risolverlo, si procede prima calcolando la matrice della rigidità  $H$  (in modo esatto, come permette di fare un dominio discretizzato con elementi triangolari); poi si applica un metodo numerico per la soluzione dei sistemi lineari, per ricavare il vettore dei coefficienti  $\alpha$ . Per esempio metodi iterativi come quello di Richardson, oppure metodi proiettivi come il gradiente coniugato o il GMRES.

L'equazione di Laplace per la filtrazione in condizioni stazionarie è un esempio di PDE ellittica.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

## Soluzione in condizioni transitorie

Spesso la realtà fisica non si trova in condizioni di equilibrio (stazionarie) ma variabili nel tempo. Le PDE potranno essere così di tipo parabolico, apparendo pure uno o più termini dipendenti dal tempo.

Due esempi possono essere le PDE della filtrazione in un mezzo poroso (PDE parabolica dove la funzione  $u$  è il potenziale idraulico, e  $K = \frac{k}{S_s}$ ) o la PDE della trasmissione del calore (PDE sempre parabolica se il corpo è omogeneo, isotropo e in equilibrio, dove  $u$  è la temperatura e  $K = \frac{\lambda}{\rho c_s}$ ) (Gambolati & Ferronato, 2015, p. 401).

$$\frac{\partial u}{\partial t} - K \nabla^2 u = 0$$

Questo complica il metodo, dovendo lavorare su un dominio esteso sia nello spazio che nel tempo, e in più potenzialmente illimitato.

L'operatore non è più una semplice divergenza o laplaciano, ma include la derivata temporale: questo lo rende non autoaggiunto, con la conseguenza che non è garantita l'efficacia del metodo di Galerkin.

Per questo viene seguito un procedimento alternativo: si risolve il problema per istanti di tempo scelti, in modo discreto. La derivata temporale [formula] andrà espressa tramite un metodo di derivazione numerica, per esempio [formula]; il termine all'istante corrente è noto e potrà dunque essere incluso nel termine noto. Il termine successivo invece è ancora l'incognita. Da qui è possibile costruire la formula ricorrente di Newmark, "ricorrente" perché prevede di aggiornare il termine noto ad ogni passo temporale.

$$\left( \vartheta H + \frac{P}{\Delta t} \right) u_{t+1} - \left[ \frac{P}{\Delta t} - (1 - \vartheta) H \right] u_t = \vartheta f_{t+1} - (1 - \vartheta) f_t$$

## Condizioni iniziali

Un problema al transitorio richiede la definizione, oltre che delle BC, anche delle condizioni iniziali, ovvero i valori assunti dalla funzione incognita  $u$  su tutto il dominio spaziale, all'istante  $t=0$ .



## 3.2 Il software FeFlow

FeFlow è un software per la modellazione dei moti dell'acqua nel suolo, sviluppato da DHI. Permette di analizzare non solo la filtrazione di fluidi, ma anche il trasporto di inquinanti e di calore. Permette inoltre di operare in condizioni sature oppure in saturazione parziale.

In particolare, attraverso il software è possibile generare una mesh di elementi finiti, assegnare proprietà materiali (quali conducibilità idraulica, porosità, conducibilità termica...) eseguire simulazioni in condizioni transitorie e infine salvare i risultati in forma grafica e in forma di foglio di calcolo.

## 3.3 Elaborazione dei dati

I dati prodotti da FeFlow sono stati salvati in formato *.xlsx* ed elaborati attraverso fogli di calcolo di Microsoft Excel®. I dati sperimentali invece sono stati forniti dalle misure eseguite in sito dall'Università di Padova, dal CNR-IRPI e dalla Provincia Autonoma di Bolzano, assieme ai dati meteorologici rilevati dalla stazione meteo e dall'idrometro di Salorno.

# 4 Descrizione: il modello implementato in FeFlow

Il modello numerico costruito tramite il software FeFlow è stato calibrato basandosi sui dati sperimentali ottenuti tramite DFOS orizzontale (metodo passivo) nel sito sopra identificato. Per la natura di questi dati - relativi alla temperatura, non alle pressioni neutrali - il modello non potrà risolvere esclusivamente le equazioni della filtrazione, ma dovrà svolgere una modellazione accoppiata di trasporto termico e trasporto di materia.

## 4.1 Geometria e mesh

Per realizzare il modello di filtrazione, è stata riprodotta una sezione trasversale dell'argine sinistro dell'Adige, circa a due chilometri a sud di Salorno. Si tratta di un argine alto circa 4.50m, costruito nel XIX secolo, di stratigrafia nota, restituita dai risultati ottenuti dalle indagini geotecniche e geofisiche già precedentemente eseguite in sito, caratterizzato dalla presenza di un diaframma profondo 10m in jet grouting, inserito a partire dalla profondità di 1.50m dalla sommità. L'argine presenta berme ad entrambi i lati. Nella geometria sono inseriti i quattro piezometri presenti (secondo le informazioni riportate nel paragrafo 2.2 *Indagini geotecniche*) e le tre linee di fibra ottica longitudinale. La disposizione di questi strumenti è illustrata in Figura 52.

## 4.1.1 Mesh

Una volta definito il dominio di calcolo tramite la geometria della sezione arginale, è stata realizzata

Realizzata tramite il software una mesh di 27578 elementi triangolari (e 13400 nodi), con dimensione caratteristica di circa 1m e angolo interno minimo pari a 25°. In seguito la mesh è stata raffinata

nelle zone in cui è necessario maggior dettaglio nella risoluzione a causa di una discontinuità delle proprietà dei materiali o per una variazione delle condizioni al contorno, dove quindi si concentra la filtrazione specie nel picco della piena, e cioè nell'area centrale del corpo arginale e in prossimità del diaframma (dove si concentra la filtrazione specie nel picco della piena). La mesh è stata raffinata pure in corrispondenza dei sensori di livello piezometrico e delle fibre ottiche.

Per non incorrere in problemi di convergenza la mesh è stata infittita anche all'interfaccia tra strati di permeabilità marcatamente diversa, e così pure su tutto il confine del diaframma. Per esempio rappresentare il diaframma con  $K < 10^{-11}$  m/s, quando il resto della sezione ha permeabilità diversi ordini di grandezza maggiore, ostacola la convergenza del software.

Dato che viene calcolata una soluzione al transitorio, pure delle rapide variazioni delle BC nel tempo potrebbero creare instabilità; questo rischio è limitato dal fatto che FeFlow stabilisce in modo automatico la grandezza dei passi temporali, riducendoli in caso di rapide variazioni.

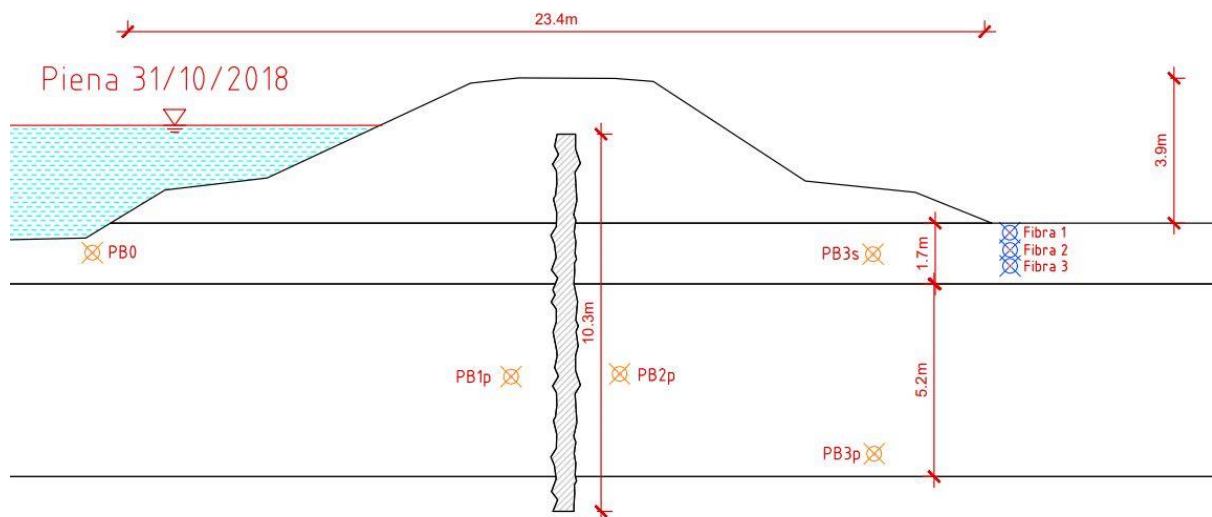


Figura 52 - Sezione dell'argine: geometria dal progetto AUTOCAD, con segnalate le posizioni dei sensori (piezometri e fibra ottica).

## 4.1.2 Proprietà materiali

Si è assunta la stratigrafia riportata da (Cola et al., 2021) con le proprietà riportate in **Tabella 1**. Nella successiva analisi di sensibilità, sono riportate configurazioni con differenti proprietà fisiche.

La permeabilità del corpo arginale in tout venant è ricavata da Bossi et al. (2018), mentre quella del jet grouting da (Gurpersaud et al., 2013). Quest'ultima in particolare è un dato considerato abbastanza incerto, perché la modalità di realizzazione, che prevede miscelazione di cemento con il terreno, può condurre a risultati sensibilmente diversi, con un intervallo di permeabilità  $10^{-6} < K < 10^{-9}$ .

I valori di porosità utilizzati sono quelli riportati in **Tabella 2**, assunti in base alle altre informazioni sulla stratigrafia.

Le conducibilità e diffusività termiche della componente solida del terreno sono state assunte distinte per ciascun strato, sulla base di considerazioni sulla granulometria e la composizione mineralogica. Come spiegato nel paragrafo *3.3 Teoria del trasporto di fluido e calore in un mezzo poroso (CAP.1)*, la conducibilità termica varia al variare della saturazione, per cui il modello integra questi dati con i dati sulla saturazione e sulla porosità, dunque il software aggiorna il suo valore durante l'intera simulazione.

Infine la capacità termica di volume è stata pure assunta da valori tratti dalla letteratura. Essa esprime la quantità di energia necessaria a scaldare un dato volume di terreno. Varia generalmente tra 1 e 4 MJ K<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>: in base al contenuto d'acqua, alla densità e alla granulometria. In particolare, la capacità termica cresce all'aumentare di  $\theta$ , all'aumentare di  $\rho$  e al diminuire del diametro dei grani (Abu-Hamdeh, 2003).

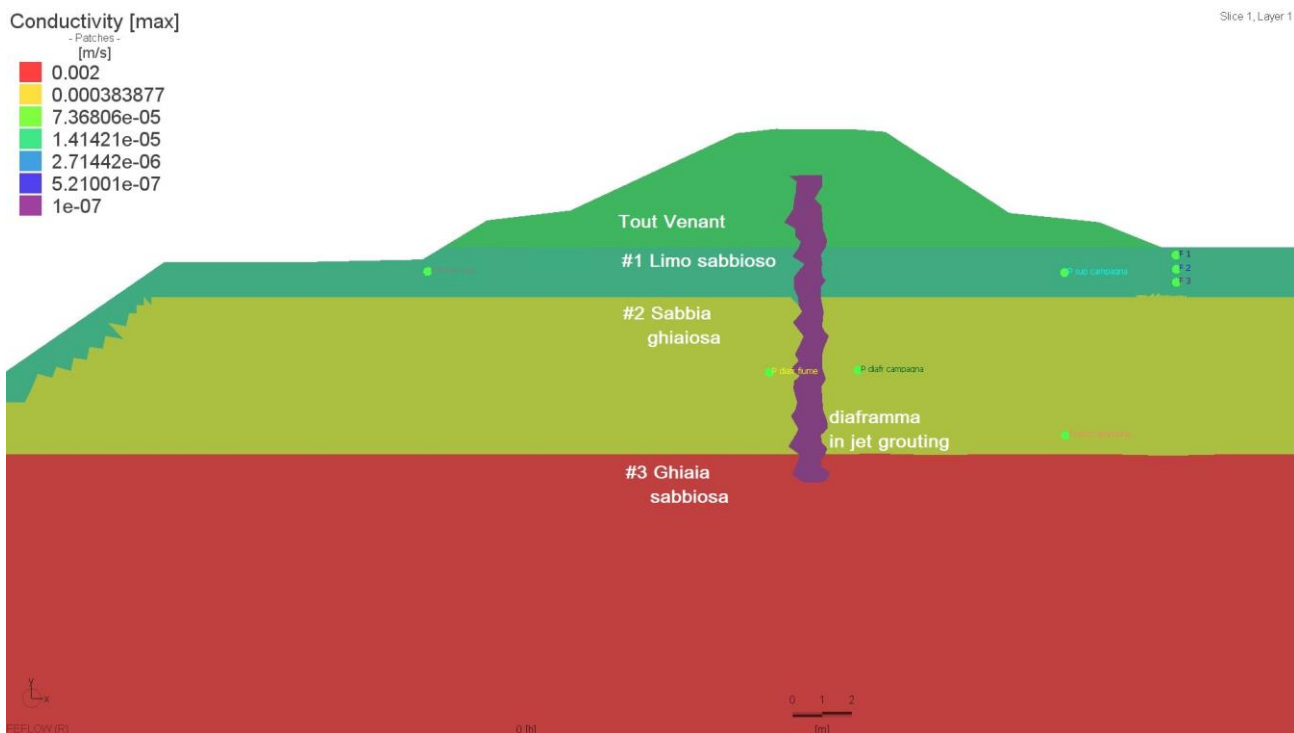


Figura 53 - Conducibilità idraulica della sezione dell'argine a Salerno

Tabella 2 - Proprietà materiali degli strati (con permeabilità già calibrata).

Stato	Permeabilità [ $\times 10^{-7}$ m/s]	porosità	conducibilità termica [ $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	Capacità termica di volume [ $\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ]
#1 Limo sabbioso	50	0.25	3	2.3
#2 Sabbia ghiaiosa	2000	0.3	2.8	2.6
#3 Ghiaia sabbiosa	20000	0.35	2.5	2.6
Tout-Venant	200	0.4	2.5	2.2
Diaframma Jet-Grouting	1	0	1.5	1.8

### 4.1.3 Condizioni al contorno imposte

Le condizioni al contorno (BC) imposte riguardano il livello idrometrico del fiume e la temperatura dell'aria (lungo il confine superficiale) e dell'acqua (al lato sinistro del paramento, Figura 56). In più è stata aggiunta una BC relativa alla trasmissione di massa fluida, per includere nel modello il contributo delle precipitazioni superficiali.

La BC per il livello idrometrico è stata assegnata lungo il paramento dell'argine e alla sezione verticale lato fiume. E' una BC variabile nel tempo, secondo i dati riportati dall'idrometro di Salorno.

La BC "temperatura" è stata assegnata sulla superficie superiore e sul confine inferiore della sezione. Le temperature superficiali sono distinte tra quella a contatto con l'aria - alle quali è assegnata la stessa temperatura misurata dalla stazione meteo di Salorno - e quella a contatto con l'acqua del fiume.

Al confine inferiore è fissata la temperatura di 12°C, nella fase stazionaria iniziale. Esso si trova ad una profondità di circa 30m, per cui è stato estrapolato il dato da quanto misurato con fibre ottiche installate verticalmente in un sito vicino, riportato in (Fabbian et al. (2022)). Questa misura è stata svolta nel mese di luglio, mentre la simulazione considera una piena avvenuta a fine ottobre; questo non è problematico perché a tale profondità le oscillazioni termiche stagionali sono trascurabili (Dalla Santa et al., in press). Per quanto riguarda il gradiente termico positivo rispetto alla profondità, pure esso risulta trascurabile data la posizione superficiale e la breve lunghezza (a profondità maggiori di 60m si ha un gradiente  $\frac{dT}{dy} \simeq +0.02^\circ C m^{-1}$ ) (Bersan, 2015).

L'altezza piezometrica è la grandezza  $h = \frac{p}{\gamma_w} + z$ , ovvero la somma della componente di pressione e della quota. Esprimendo la pressione come  $p = \gamma_w \cdot \Delta z$  con  $\Delta z = z_{PL} - z$ , cioè come differenza di quota tra il pelo libero e la posizione scelta, si ottiene che  $h$  è costante lungo la verticale e pari a  $z_{PL}$ . Questo ci permette di assegnare lo stesso valore di BC lungo i confini verticali.

Quindi sono state fissate BC per altezza piezometrica al confine lato fiume, arrivando fino alla sommità dell'argine, e al confine lato campagna. Le prime corrispondono ai valori per il livello idrometrico misurati dall'idrometro; le seconde sono state assunte secondo l'andamento in Figura 54.

Infatti per l'intensità dell'evento di pioggia considerato sarebbe stata un'approssimazione poco realistica assumere costante il livello della falda freatica: come da figura si nota che un evento di pioggia può portare all'innalzamento della falda di oltre 1 m, seppur con un certo ritardo rispetto all'andamento dell'idrogramma. Ulteriori considerazioni su questa BC sono presentate nel paragrafo 5.3 *Analisi di sensitività*.

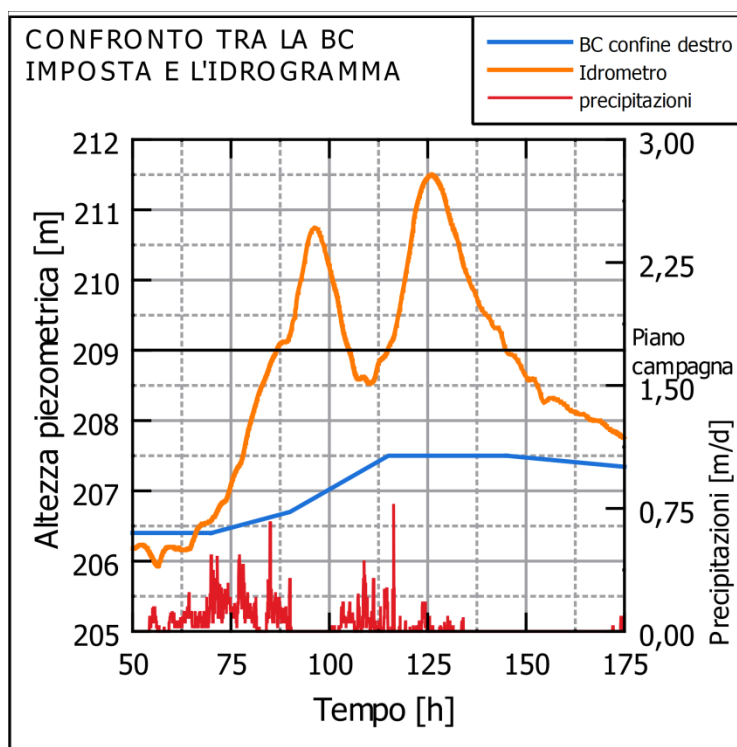


Figura 54 – BC carico idraulico. Andamento misurato del livello idrometrico (arancione) e andamento stimato della linea di falda (blu).

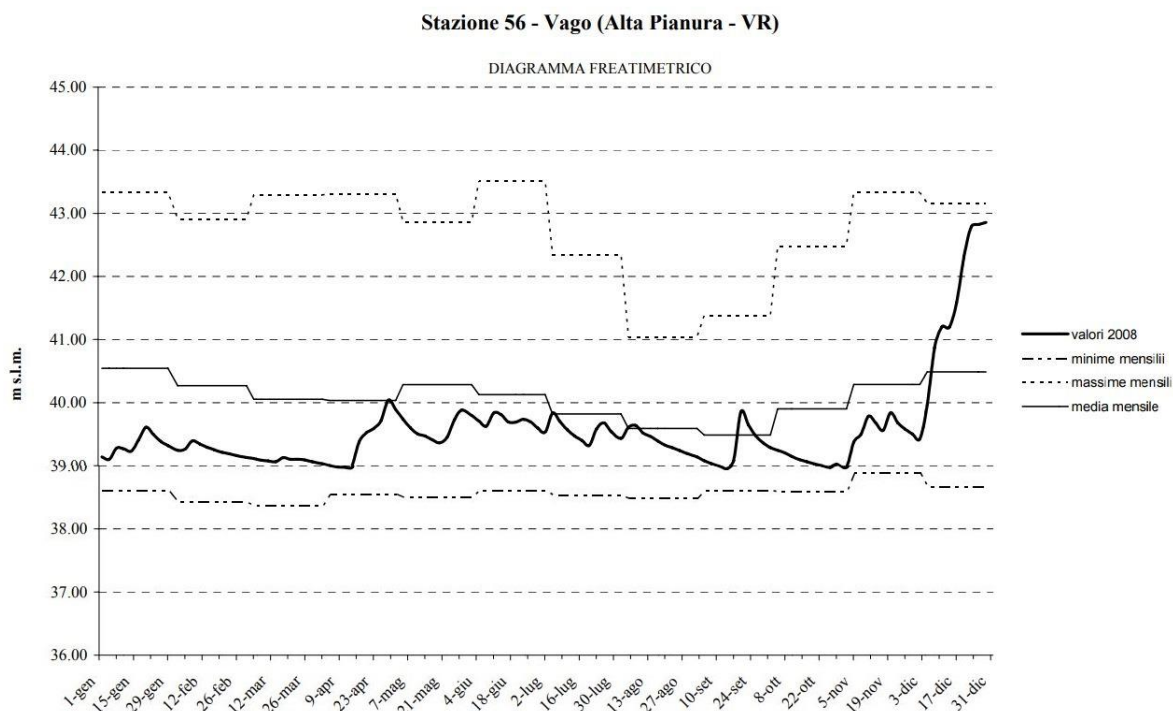


Figura 55 - Esempio di annale freaticometrico, dove è visibile l'aumento dell'altezza di falda durante eventi di pioggia (ARPAV, 2012).

Infine è stata assegnata la BC che rappresenta il flusso superficiale generato dall'acqua di pioggia che si infiltra al suolo; si tratta di una BC del secondo tipo (di Neuman). Data la bassa permeabilità dello strato superficiale del terreno questo contributo si potrebbe ipotizzare trascurabile, dato che il sensore più superficiale si trova a 30cm di profondità. Tuttavia l'evento di pioggia della serie dati analizzata è stato molto intenso, con oltre 150mm piovuti in 48 ore, dunque si è deciso di tenerne conto attraverso l'imposizione di questa BC; il suo effetto è analizzato più nel dettaglio nel paragrafo *5.3 Analisi di sensitività*.

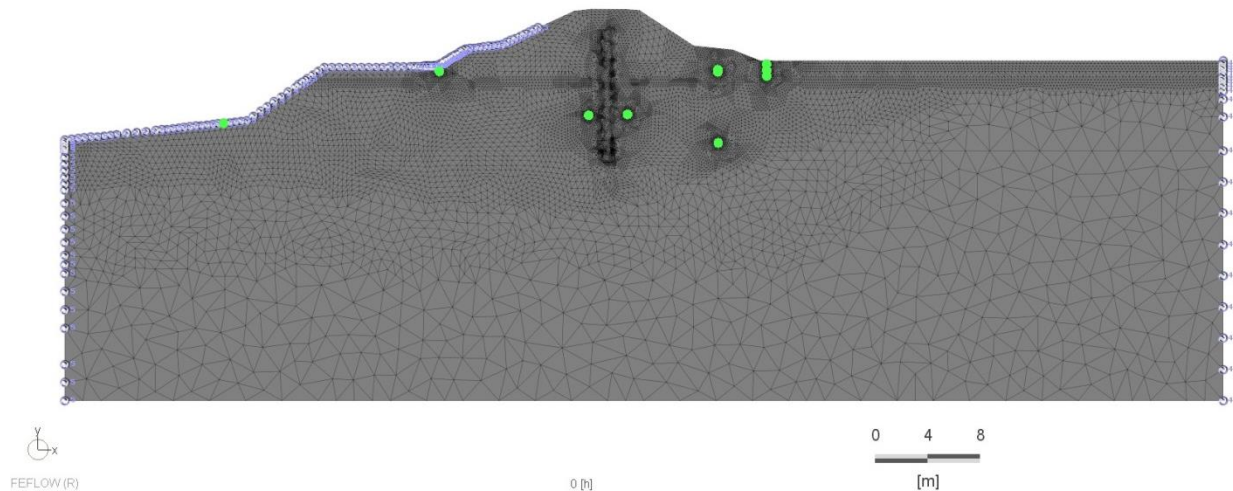


Figura 56 - Condizioni al contorno per il carico idraulico: a sinistra (lato fiume) BC livello idrometrico; a destra (lato campagna) BC altezza di falda.

#### 4.1.4 Condizioni iniziali imposte

Il modello simula un particolare evento di piena, dunque risolve le equazioni del trasporto al transitorio. Per questo motivo è necessario che le condizioni iniziali siano il più vicino possibile alla realtà. Una condizione iniziale particolarmente importante è la saturazione del terreno, legata alla posizione della linea di falda; questo perché influenza molto la permeabilità, la conducibilità termica e la pressione interstiziale. Secondo (Cola et al., 2021) prima della piena la linea di falda è posizionata alla quota di circa 206m, cioè ad una profondità di circa 3m rispetto al piano campagna. Altre condizioni iniziali distribuite nello spazio (come la temperatura) possono essere stabilite compiendo una simulazione allo stazionario (usando come BC quelle all'istante iniziale dell'evento di piena).

Per l'importanza della distribuzione della temperatura ai fini dell'interpretazione dei risultati, la condizione iniziale è stata ottenuta attraverso una simulazione con i dati meteo dei 5 mesi precedenti, con il seguente risultato (Figura 57).

Per la saturazione è stata assunta come condizione iniziale  $s=0.6$  sopra la linea di falda,  $s=1$  al di sotto.

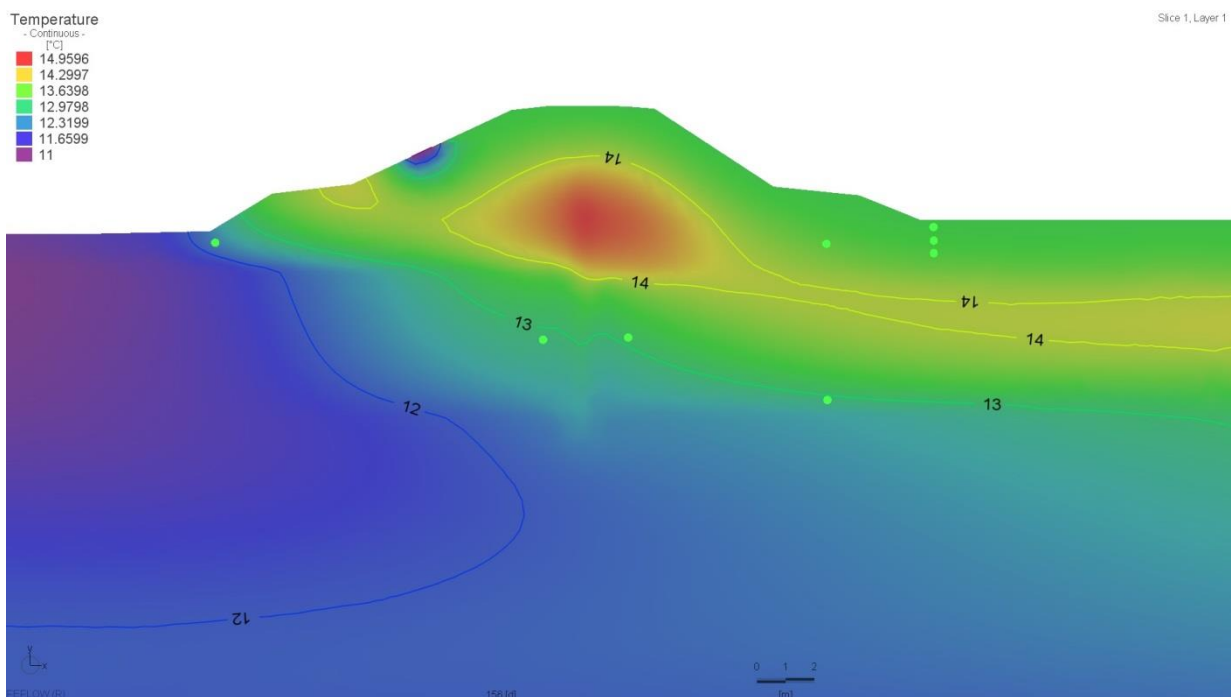


Figura 57 - Distribuzione della temperatura risultate da una simulazione con i dati meteo dei 5 mesi precedenti alla piena del 28/10/2018

## 5 Risultati

### 5.1 Calibrazione

Nella prima fase della calibrazione si è analizzato l'andamento dell'altezza piezometrica ottenuta al variare della permeabilità degli strati, per ottenere un risultato coerente con le misure sperimentali. Poiché non sono installati piezometri lontani dall'alveo, la condizione al contorno per l'altezza di falda non è nota nel suo andamento durante l'evento di piena. Per questo, pure questa BC è stata aggiustata in fase di calibrazione. La simulazione più fedele ai dati sperimentali presenta una BC per l'altezza di falda variabile durante la piena e caratteristiche di permeabilità riportate in Tabella 3.

L'andamento del carico idraulico ai piezometri segue in modo preciso l'andamento dell'idrogramma, come del resto osservato da (Cola et al., 2021) «l'altezza piezometrica cresce nell'intero campo della filtrazione secondo il livello della piena, suggerendo l'esistenza di una comunicazione diretta tra il fiume e il terreno adiacente». In più osserva che la maggiore dissipazione avviene dal fiume al piezometro PB1p (diaframma lato fiume), e in misura minore da PB1p a PB2p (da un lato all'altro del diaframma).

Sempre Cola et al. (2021) osserva che «durante la decrescita della piena il carico idraulico rimane più alto nei piezometri superficiali»; pure questo dato è riscontrato nella simulazione: in Figura 60 si osserva come il valore misurato in PB3s superi quello di 3 altri piezometri dopo il picco della piena, a partire all'incirca da h.140.



La calibrazione dei parametri di permeabilità ha permesso non tanto la regolazione delle altezze piezometriche (esse sono determinate principalmente dalle BC, come visto nel paragrafo 5.3.2 *Condizione al contorno per la linea di falda*), quanto la regolazione del ritardo dei picchi simulati rispetto ai picchi del livello idrometrico. In Figura 59 si osserva come nella configurazione iniziale, la minore permeabilità del Tout Venant e dello strato #1 creava un ritardo tale da cancellare il primo picco al piezometro PB3s (lato campagna, superficiale); molto probabilmente questo effetto è dovuto pure ad un ritardo nella saturazione alla profondità del sensore, come descritto nel paragrafo 5.3.1 *Relazione tra l'andamento della saturazione e l'andamento dell'altezza piezometrica*.

Rispetto alla versione iniziale è stata aumentata pure la permeabilità del diaframma, secondo le considerazioni presentate nel paragrafo 5.3.4 *Il ruolo del diaframma*.

Tabella 3 - Permeabilità degli strati assunte nel modello FeFlow, prima e dopo la calibrazione.

	versione iniziale	versione definitiva
Strato	Permeabilità K [ $\times 10^{-7}$ m/s]	
#1 Limo sabbioso	2	50
#2 Sabbia ghiaiosa	5000	2000
#3 Ghiaia sabbiosa	5000	20000
Tout-Venant	10	200
Diaframma Jet-Grouting	0.01	1

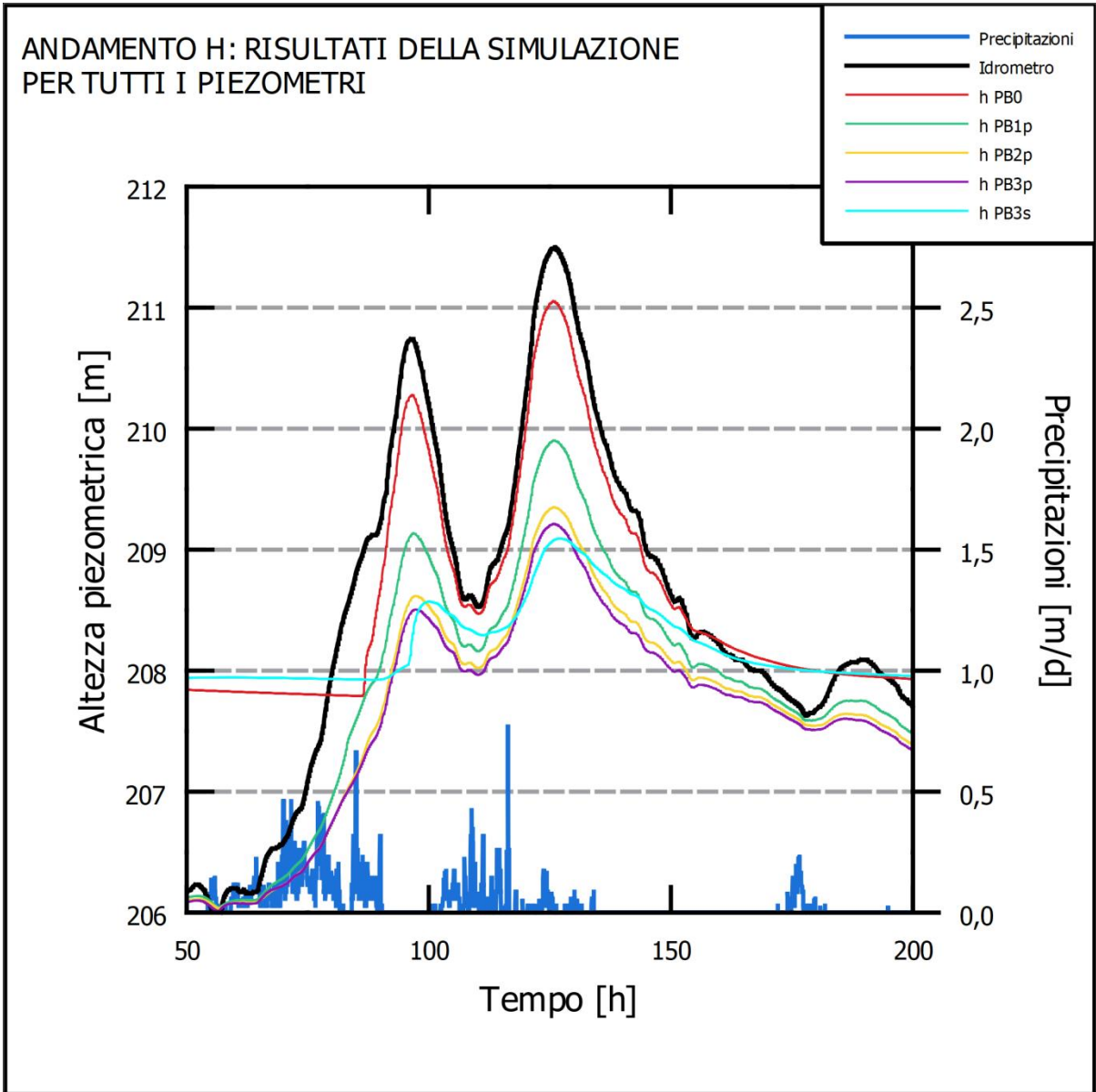


Figura 58 - Risultati della simulazione. Ogni linea è riferita ad un sensore in una posizione diversa (si veda la legenda).

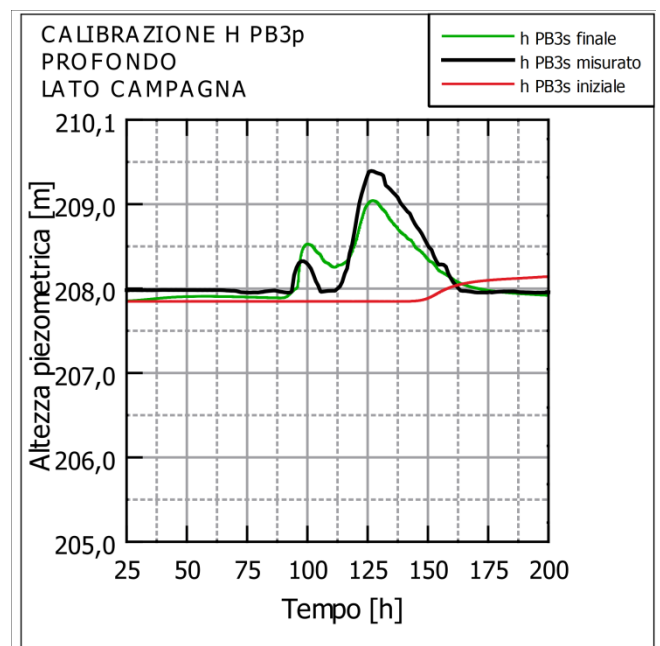
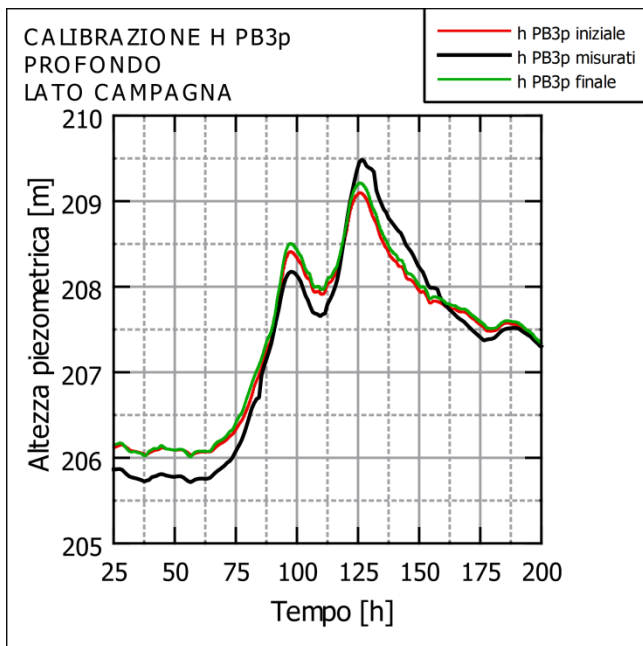


Figura 59 - Confronto tra il risultato della simulazione FeFlow e i dati misurati (in nero).

## Fase stazionaria

Per stabilizzare la simulazione e rendere le condizioni iniziali più realisticamente distribuite, si è elaborata una distribuzione iniziale per T, saturazione e altezza piezometrica svolgendo una simulazione allo stazionario e usando i dati noti.

Come mostrano i risultati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (per carico idraulico) e in Figura 61 (per la T), può essere sufficiente un tempo tra le 25 e le 50 ore per raggiungere un regime stazionario con le condizioni iniziali imposte.

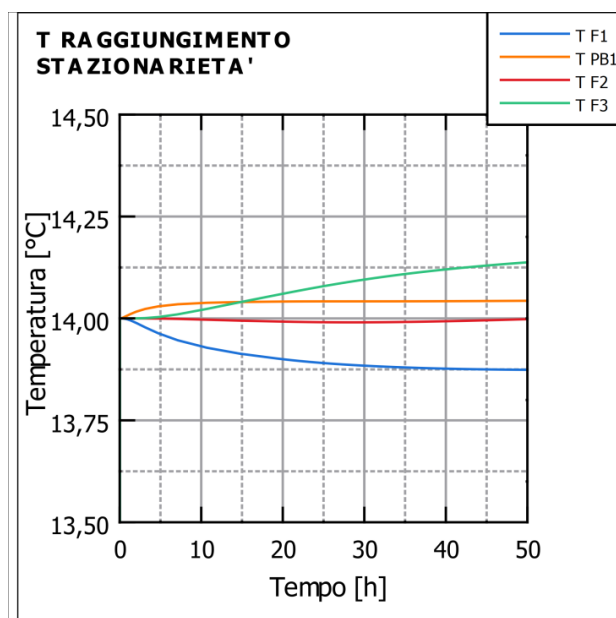


Figura 61- Raggiungimento delle condizioni stazionarie per la temperatura, presso le tre FO e il piezometro PB1p.

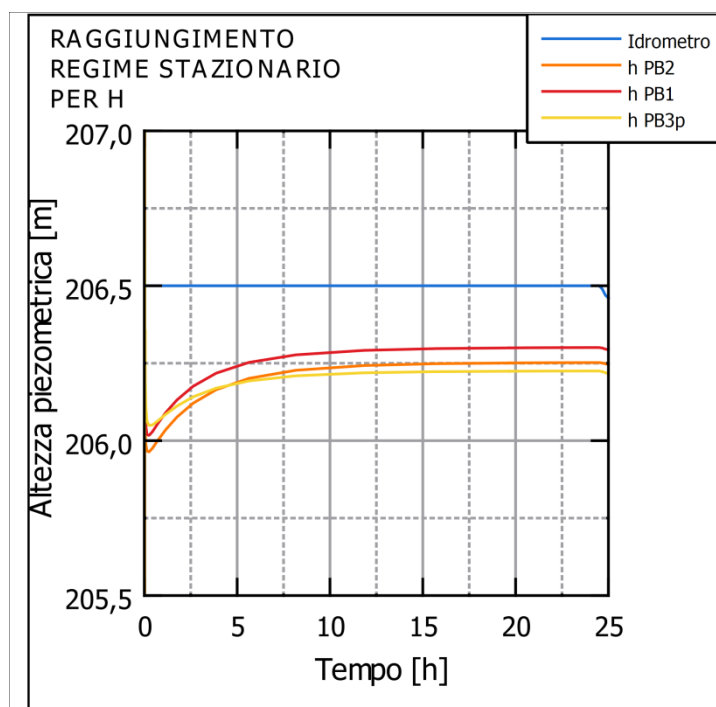


Figura 62 - Raggiungimento delle condizioni stazionarie per la temperatura. Risultati alle tre FO e al piezometro PB1p.

## 5.2 Dinamica di temperatura osservata

La temperatura presso le FO registra, nel modello come nella realtà, una riduzione di poco inferiore ai 2°C. La variazione più rapida si registra dopo h.75, quando lo strato superficiale inizia a saturarsi per l'infiltrazione della pioggia e si ha contemporaneamente una riduzione della temperatura dell'aria di circa 3°C. L'effetto delle variazioni della temperatura dell'aria è attenuato e ritardato all'aumentare della profondità, risultando comunque influente anche oltre la profondità di 130cm (Figura 63).

Considerando l'intera sezione, si osserva la diffusione di un fronte freddo dal letto del fiume verso campagna, lungo gli strati #2 e #3, il quale però non arriva ad influenzare direttamente la misura effettuata dalle FO. Questo flusso ha invece un effetto indiretto, quello di sospingere verso la superficie l'acqua più calda ( $T > 14^{\circ}\text{C}$ ) presente nello strato #2. Questo è parzialmente visibile dall'avanzamento delle isolinee in Figura 65, ma più chiaramente in Figura 78, dove il risultato ottenuto è confrontato con una simulazione con stesso andamento di T dell'aria ma con un livello idrometrico costante: a seguito del secondo picco della piena, alla fibra si misura un lieve riscaldamento rispetto al caso privo di flusso ascendente.

In Figura 63 sono evidenziate pure le temperature misurate dalle tre fibre agli istanti  $t=82\text{h}$  e  $t=155\text{h}$ , segnate con i tre punti giallo, rosso e verde rispettivamente per le fibre F1 (superficiale), F2 (intermedia), F3 (profonda). Sfortunatamente si dispone solo di queste misure puntuali, e non della completa serie temporale delle temperature misurate dalle FO.

Si può comunque osservare che diversi valori simulati differiscono da quelli misurati fino quasi  $1.5^{\circ}\text{C}$  (come nel caso della  $T_{F1}$  nell'istante  $t=82\text{h}$ ). Non è immediato individuare la ragione di queste differenze, perché molti fattori simultaneamente influiscono sul trasporto del calore. Tra le ipotesi che si possono formulare:

- Un'imprecisione nelle condizioni iniziali (per temperatura e saturazione): nel modello, la distribuzione della temperatura alla sezione è il risultato di una simulazione costruita su misure puntuali e sulle condizioni al contorno, per cui non è definita con sicurezza su tutta la geometria; lo stesso vale per la saturazione, la quale è una variabile che può influire sull'andamento della temperatura, per esempio per il fatto che la conducibilità idraulica (e pure quella termica) è maggiore per un terreno saturo.
- Un'imprecisione nelle proprietà materiali: la conducibilità e la diffusività termiche e la porosità non erano note dalle indagini svolte in sito, per cui si è dovuto assumerle sulla base di valutazioni sulle tipologie di terreno, in modo non rigoroso.

In più, l'imprecisione dei tre dati all'istante  $t=82\text{h}$  è in parte giustificabile per il fatto che in quel momento la curva della temperatura ha un'alta pendenza, quindi un'imprecisione anche piccola nei parametri della calibrazione può comportare un grande errore nel risultato per tale istante di tempo.

Infine, si può notare che, pur non essendoci una soddisfacente corrispondenza tra  $T$  misurate e  $T$  simulate, è invece sempre rispettata la relazione di grandezza tra le  $T$  nelle tre FO ( $T_{F3} > T_{F2} > T_{F1}$  vale sia nei dati misurati che in quelli simulati) ed è sempre rispettato l'andamento nel tempo (presso tutte le FO la  $T$  diminuisce tra  $t=82\text{h}$  e  $t=154\text{h}$ ) (Figura 63).

Nel paragrafo *5.3.6 La presenza di pipe* è riportato il risultato di una simulazione in cui si ipotizza la presenza di un pipe che porta una maggiore connessione idraulica (quindi anche termica) tra l'acqua del fiume e la superficie lato campagna.

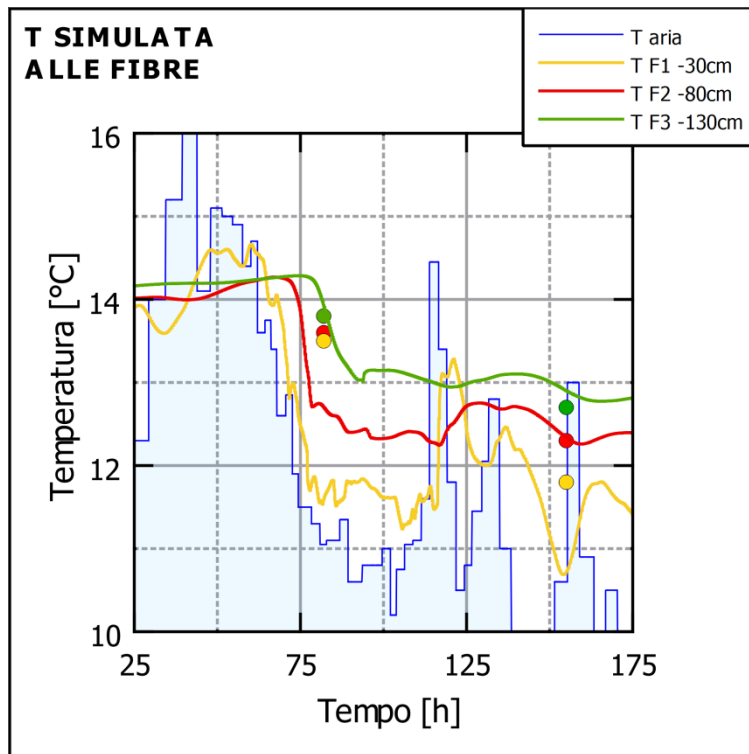


Figura 63 – Simulazione dell’andamento della temperatura alle tre fibre ottiche e (in blu) la temperatura dell’aria. I punti verde, rosso e giallo rappresentano i valori misurati a due diversi momenti (t=82h e t=154h).

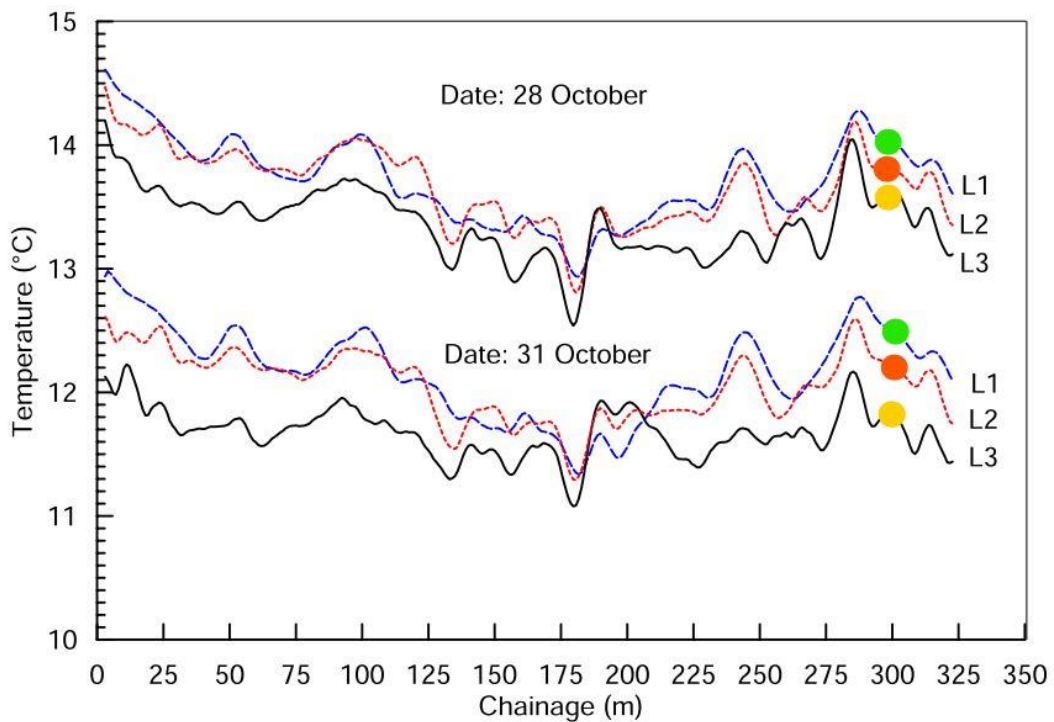
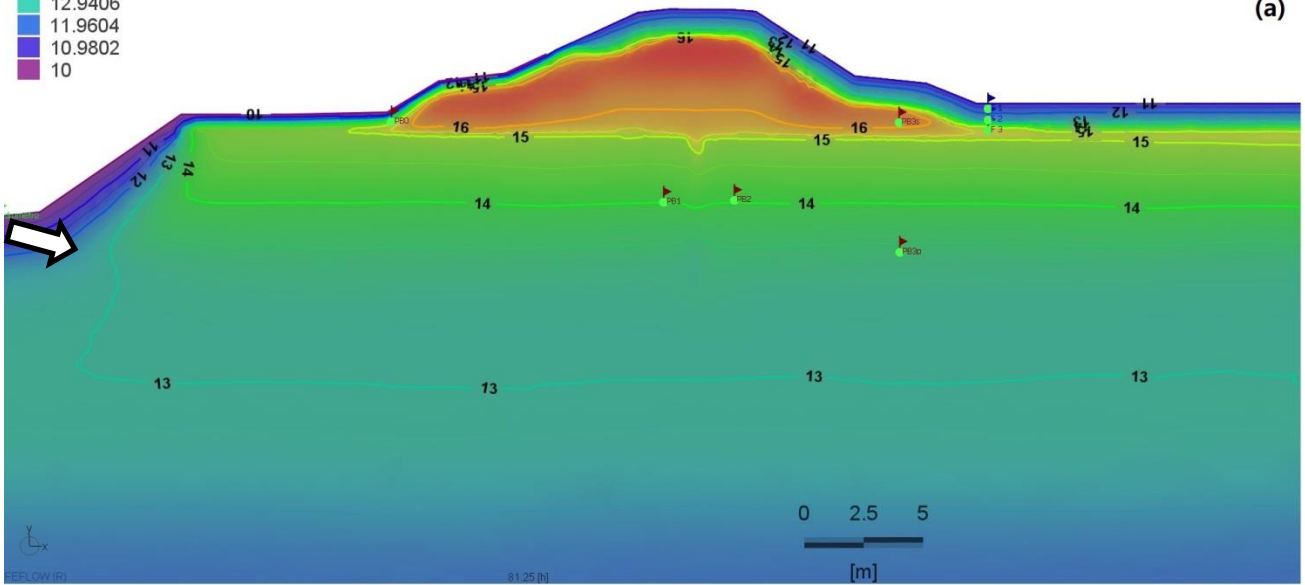


Figura 64 - Distribuzione spaziale (longitudinale) della temperatura appena prima della piena (28 ottobre - h.82) e subito dopo il secondo picco (31 ottobre - h.154). Si nota l’inversione del gradiente della T sulla profondità alla posizione di 190m circa. Da questa serie dati sono ricavati i valori di T per la sezione B, riportati come punti in verde, rosso e giallo pure in altri grafici.

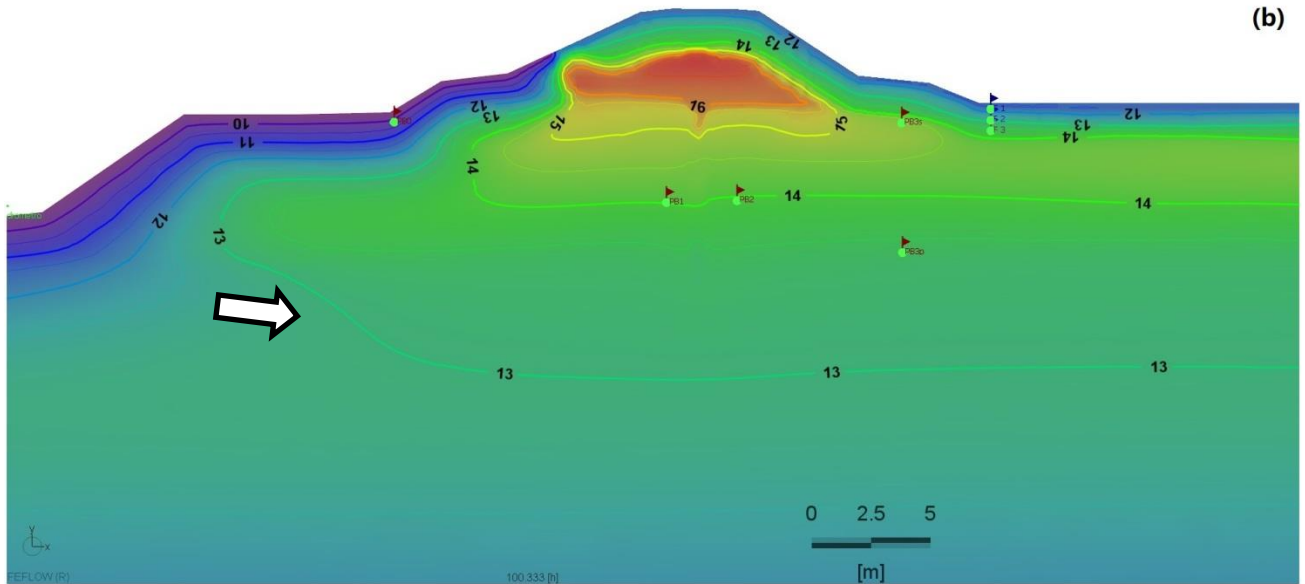
Temperature

- Continuous - (°C)
- 16.8615
- 15.8813
- 14.901
- 13.9208
- 12.9406
- 11.9604
- 10.9802
- 10

(a)



(b)



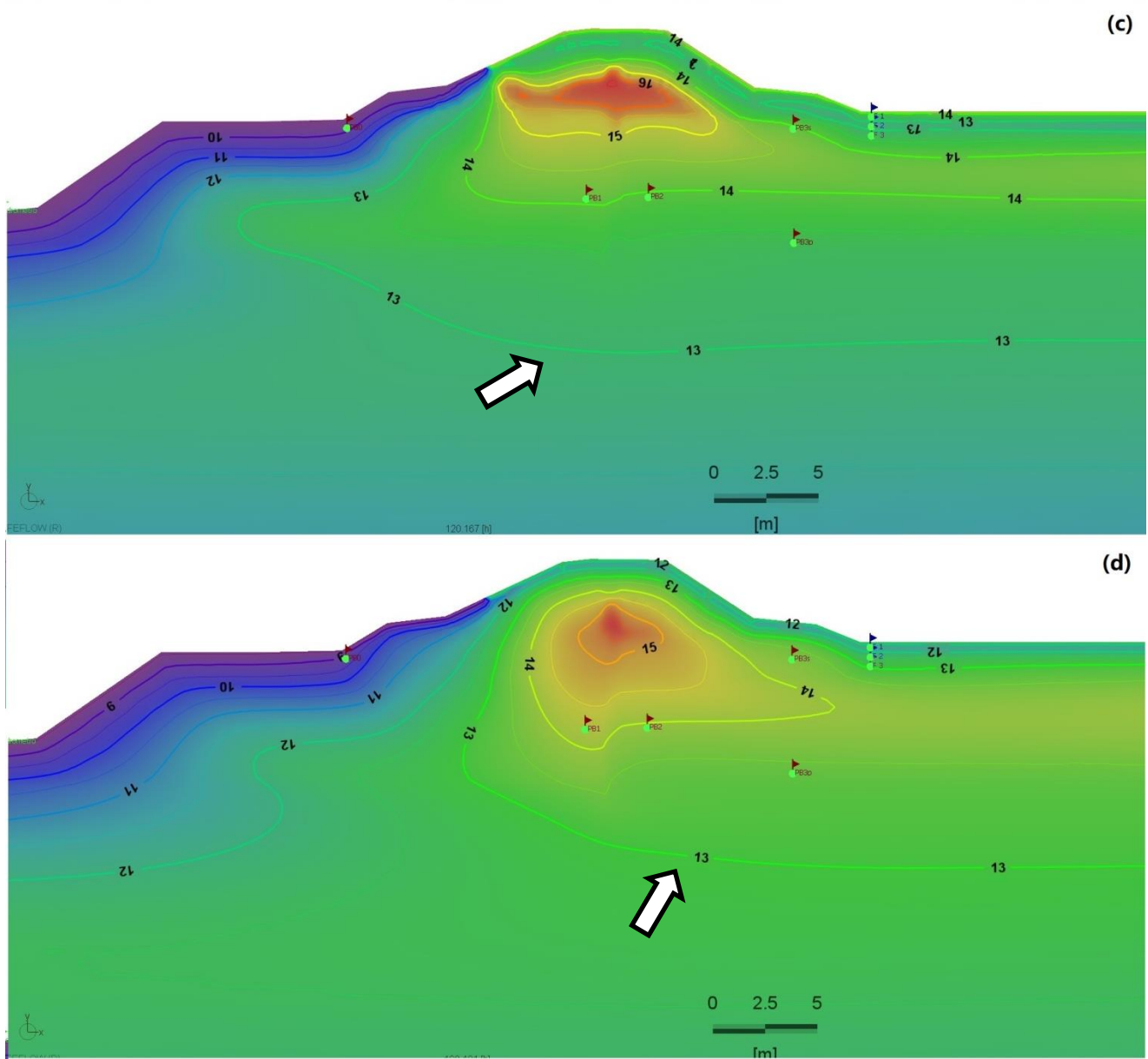


Figura 65 – Campo della temperatura (a) prima della piena, (b) durante il primo picco, (c) durante il secondo picco, (d) a piena esaurita.



## 5.3 Analisi di sensitività

### 5.3.1 Relazione tra l'andamento della saturazione e l'andamento dell'altezza piezometrica

Il piezometro PB3s, posto vicino alla superficie, lato campagna, misura un aumento del carico idraulico con un ritardo rispetto il picco della piena; questo in modo più accentuato nel modello FeFlow, ma anche nelle misure sperimentali.

Il motivo risiede nella saturazione: solo in terreno saturo si ha la connessione idraulica con il fiume; finché essa non viene raggiunta, non si misura l'effetto della piena.

La differenza tra il valore misurato e quello simulato si può attribuire a:

- un'impresione locale nelle condizioni iniziali di saturazione;
- la presenza di eterogeneità (come lenti di materiale più permeabile) all'interno dello strato limoso.

La permeabilità nel modello è stata incrementata rispetto al valore ricavato dalle indagini geotecniche (da  $2 \cdot 10^{-7}$  a  $5 \cdot 10^{-6}$  m/s), anche per meglio approssimare l'andamento del carico idraulico in corrispondenza di questo sensore superficiale.

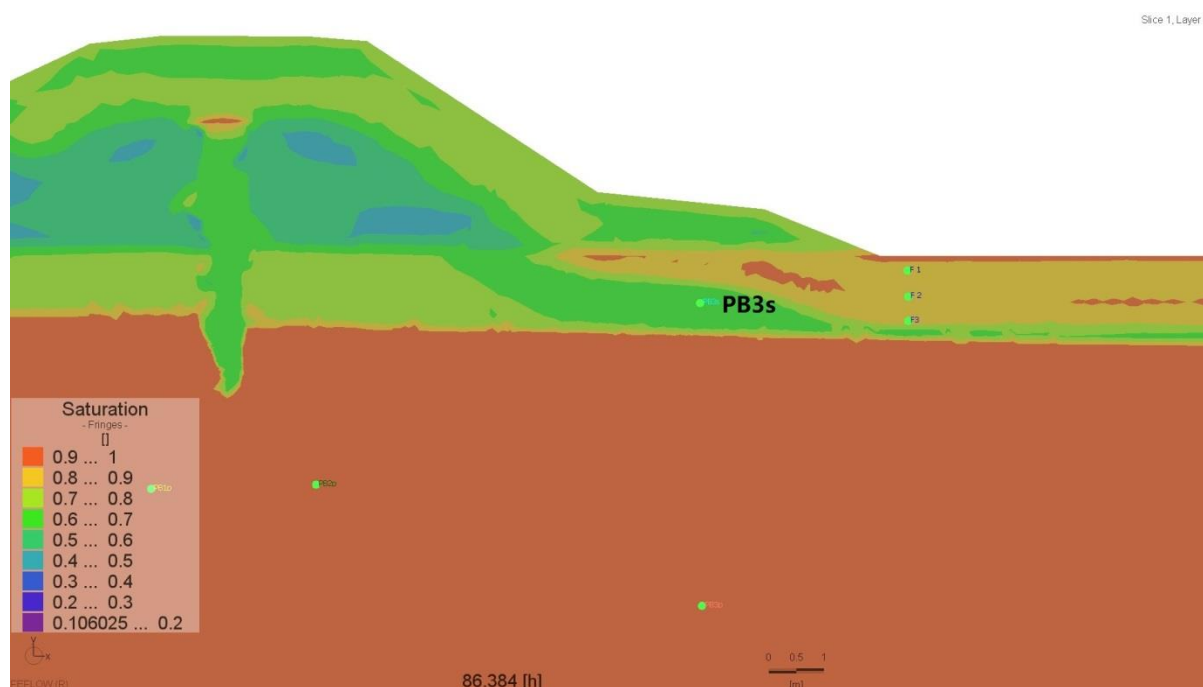


Figura 66 - Distribuzione della saturazione a h.86, quando la piena è in fase di crescita. Si nota come il piezometro PB3s si trovi ancora in una area parzialmente saturata.

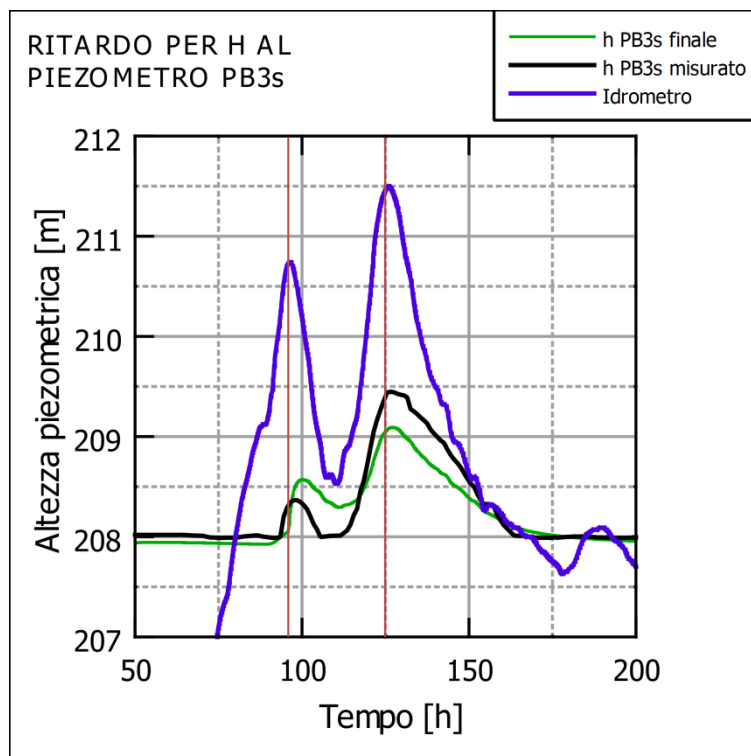


Figura 67 - Altezza piezometrica al piezometro PB3s. Le due linee verticali rosse indicano i due massimi all'idrometro. Si osserva un ritardo rispetto al picco della piena, ma anche rispetto al momento in cui inizia a variare  $h$  (per PB3s  $h$  inizia ad aumentare da  $t=90h$ , mentre per altri piezometri  $h$  aumenta quasi simultaneamente rispetto alla piena).

### 5.3.2 Condizione al contorno per la linea di falda

La geometria e la stratigrafia del problema sono tali da concentrare la maggior parte della filtrazione negli strati di fondazione dell'argine e non attraverso il corpo rilevato. Per questo assumere la corretta BC al confine lato campagna della mesh (ovvero la BC "altezza di falda") è determinante. In Cosanti et al. (2014) essa è stata applicata come una BC statica; si trattava però di una configurazione molto diversa: il corpo arginale era limoso con eterogeneità sabbiose, mentre la fondazione era limoso-argillosa fino ad una profondità di oltre 6 m; dunque era prevista una filtrazione prevalentemente attraverso il corpo arginale, mentre gli strati inferiori costituivano una barriera quasi impermeabile.

Anche per la scarsa permeabilità degli strati superficiali, risultava ragionevole assumere che il livello di falda non risentisse delle precipitazioni nell'immediato.

La configurazione presso il sito di Salerno invece è caratterizzata da un flusso di filtrazione a profondità maggiore (al di sotto del diaframma), con la linea di saturazione che attraversa il corpo arginale solo nelle fasi di massima. Come anticipato nel paragrafo 4.1.3 *Condizioni al contorno*, per l'intensità dell'evento di pioggia è ragionevole assumere un aumento generalizzato del livello di falda; è stato individuato un aumento di 1.1m, in quanto è il valore che garantisce allo stesso tempo la corretta altezza piezometrica durante il secondo picco della piena e un andamento realistico nella fase di decrescita. Questo, come si nota in Figura

68, rende il risultato molto più vicino ai valori misurati: emerge che è proprio l'aumento del livello di falda a rendere il secondo picco tanto maggiore del primo in tutti i piezometri.

La differenza tra i due picchi è pari a 70cm all'idrometro, mentre arriva a 120cm al piezometro PB1p (secondo i dati misurati).

L'aumento del livello di falda contribuisce pure a rendere la fase di "svuotamento" della piena più graduale lato campagna, tanto che da h.150 il carico idraulico al piezometro superficiale PB3s supera quello del piezometro profondo e lato fiume PB1p.

Si è considerato un ritardo dell'innalzamento della falda rispetto alle precipitazioni perché l'infiltrazione si innesca dopo un'iniziale saturazione del terreno, come schematizzato nel modello di infiltrazione SCS (del *curve number*) (Baiamonte, 2019).

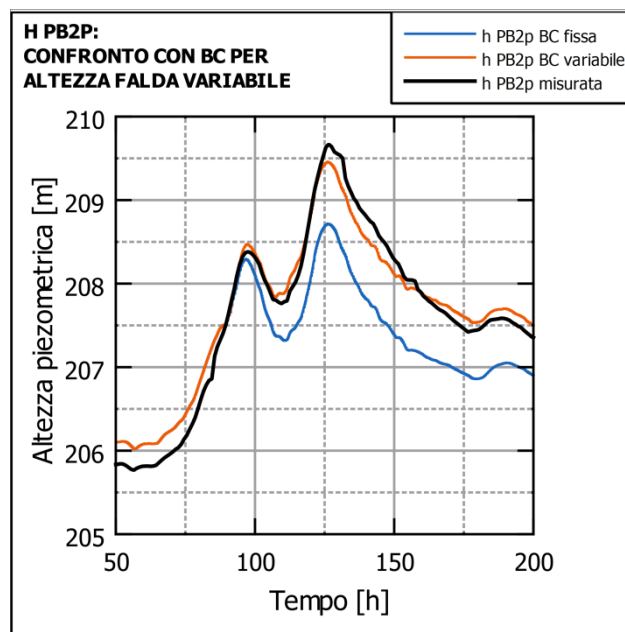


Figura 68 - Altezza piezometrica al sensore PB2p: confronto tra una simulazione con BC altezza di falda costante (in blu) e variabile secondo le precipitazioni (in arancione)

### 5.3.4 Il ruolo del diaframma

Il diaframma in jet grouting ha lo scopo principale di allungare il percorso di filtrazione così da ridurre il gradiente idraulico e conseguentemente la forza di filtrazione verso campagna. La sua efficacia dunque può essere valutata misurando la differenza di altezza piezometrica ai due lati della parete.

(Cola et al., 2021) riporta che l'influenza del diaframma è molto limitata, con un dislivello che raggiunge valori massimi di 30cm e 24cm rispettivamente nel primo e nel secondo picco della piena, tra i due piezometri posti simmetricamente rispetto ad esso. La simulazione restituisce dislivelli lievemente maggiori, di 49 e 45cm (Figura 70).

Simulando lo stesso evento in assenza di diaframma si raggiunge un dislivello massimo di 16cm: questo rappresenta la dissipazione del percorso tra PB1p e PB2p, lungo lo strato #2.

La differenza tra dati reali e simulazione può essere dovuta a:

- una permeabilità del diaframma maggiore del valore assunto, imputabile a fratture o altre irregolarità
- una maggiore permeabilità degli strati #2 e #3, dove avviene il flusso di filtrazione per oltrepassare il diaframma

La seconda ipotesi è meno realistica, perché variando tali proprietà varierebbero sensibilmente tutti i risultati.

Si può aggiungere che in questa particolare configurazione un diaframma anche del tutto impermeabile non potrebbe ostacolare molto di più la filtrazione verso campagna: essendo gli strati di fondazione permeabili, allungare il percorso di filtrazione non aggiunge grandi dissipazioni al carico idraulico. Tuttavia è probabile che la presenza del diaframma aiuti a ostacolare il piping: infatti l'interfaccia tra gli strati #1 e #2, a granulometria molto diversa, sarebbe particolarmente soggetta erosione retrogressiva se non fosse presente l'interruzione creata dal jet grouting.

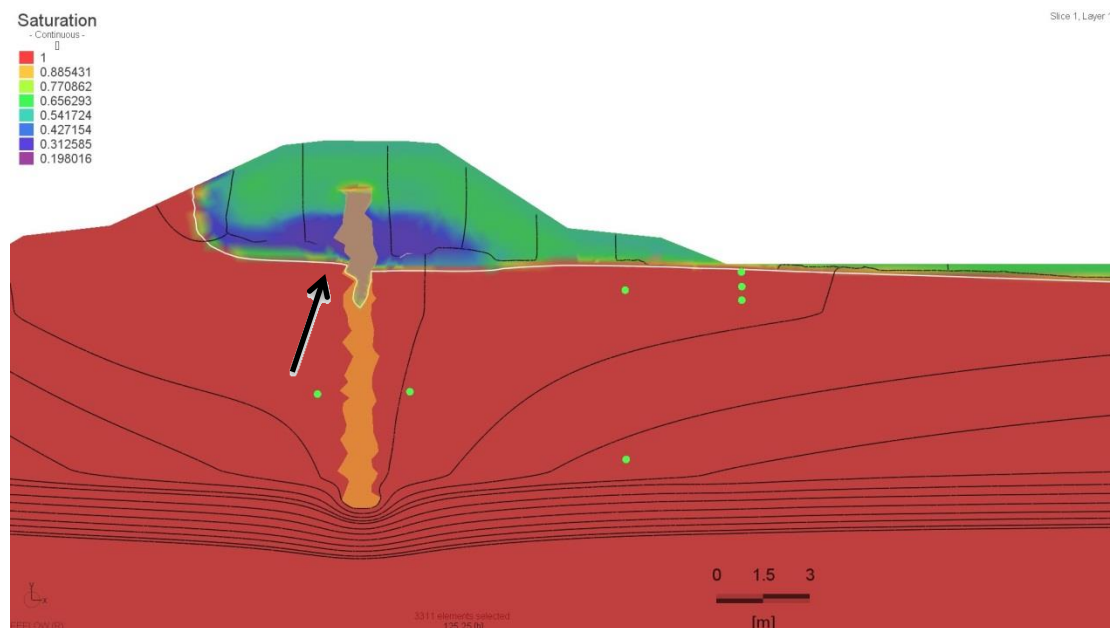


Figura 69 - Saturazione all'istante h.125 (picco della seconda piena). Si nota un lieve dislivello della linea di saturazione ai due lati del diaframma. In più si può osservare: la concentrazione delle linee di flusso nello strato inferiore più permeabile (strato #3 di ghiaia sabbiosa); il raggiungimento del piano campagna da parte della linea di saturazione, in corrispondenza del piede dell'argine.

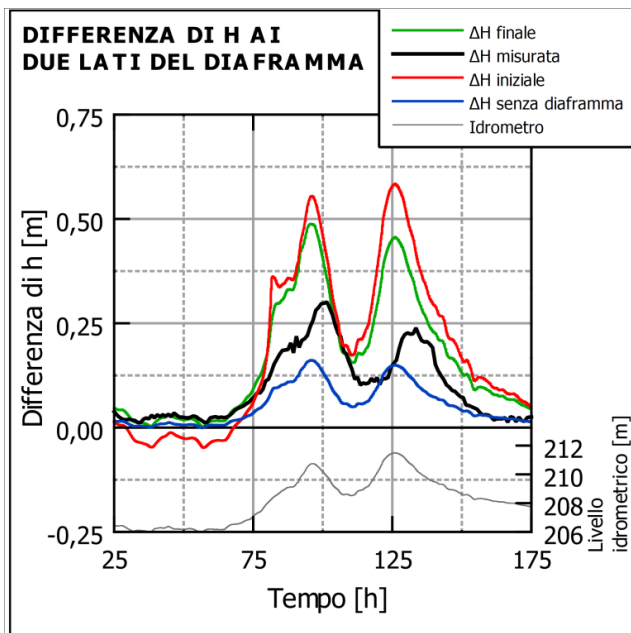


Figura 70- Differenza di altezza piezometrica ai due lati del diaframma. Si nota come essa aumenti in corrispondenza dei picchi della piena.

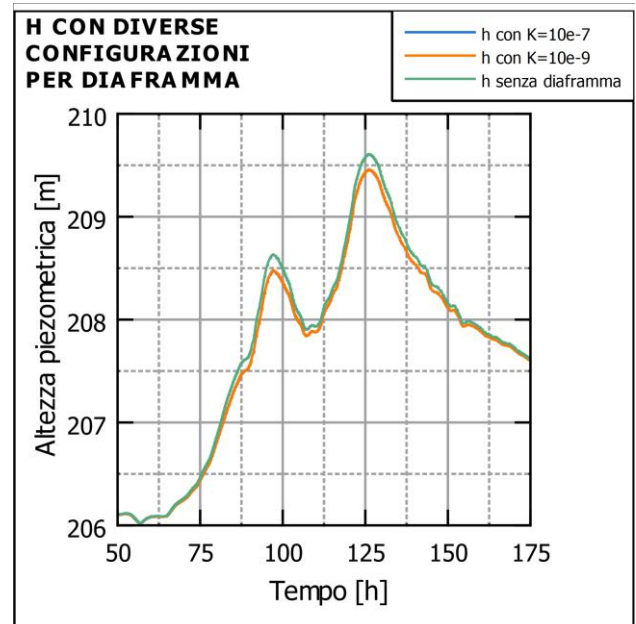


Figura 71 – Confronto dell'andamento dell'altezza piezometrica al sensore PB2p con due diverse permeabilità del diaframma e in assenza di esso. Cambiando il valore di K da  $10^{-7}$  a  $10^{-9}$  m/s la differenza non è visibile.

### 5.3.5 Il ruolo delle precipitazioni

L'infiltrazione delle precipitazioni è inclusa, come anticipato, in una BC di Neuman alla superficie. Ai piezometri profondi il suo effetto sull'andamento del carico idraulico è modesto, di pochi centimetri, mentre per i piezometri superficiali contribuisce per più di 50cm sul carico idraulico.

Nel paragrafo 5.3.7 si approfondisce l'effetto delle precipitazioni sull'andamento della temperatura alla superficie.

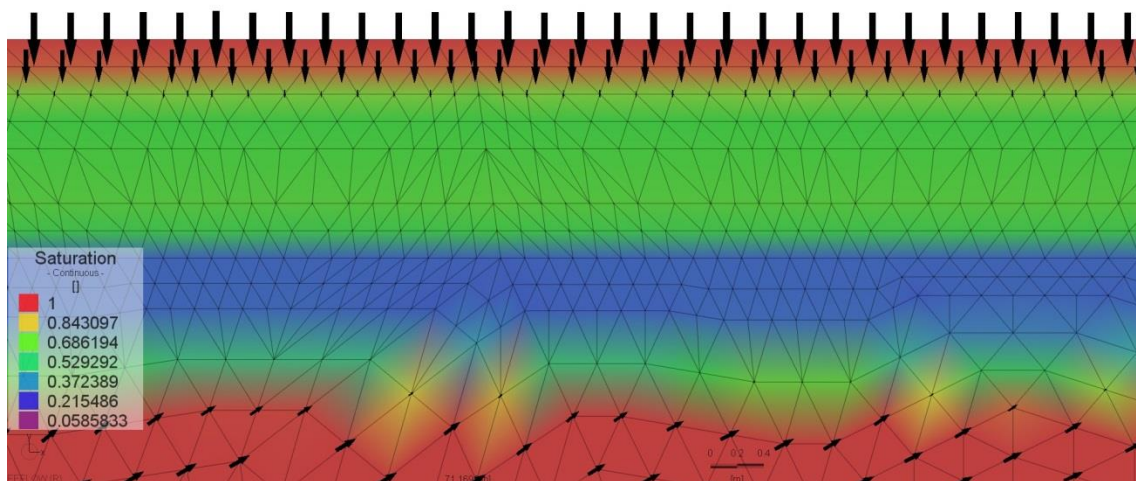


Figura 72 - Saturazione e direzioni del flusso (frecche nere) all'inizio del primo evento di pioggia (h.75).

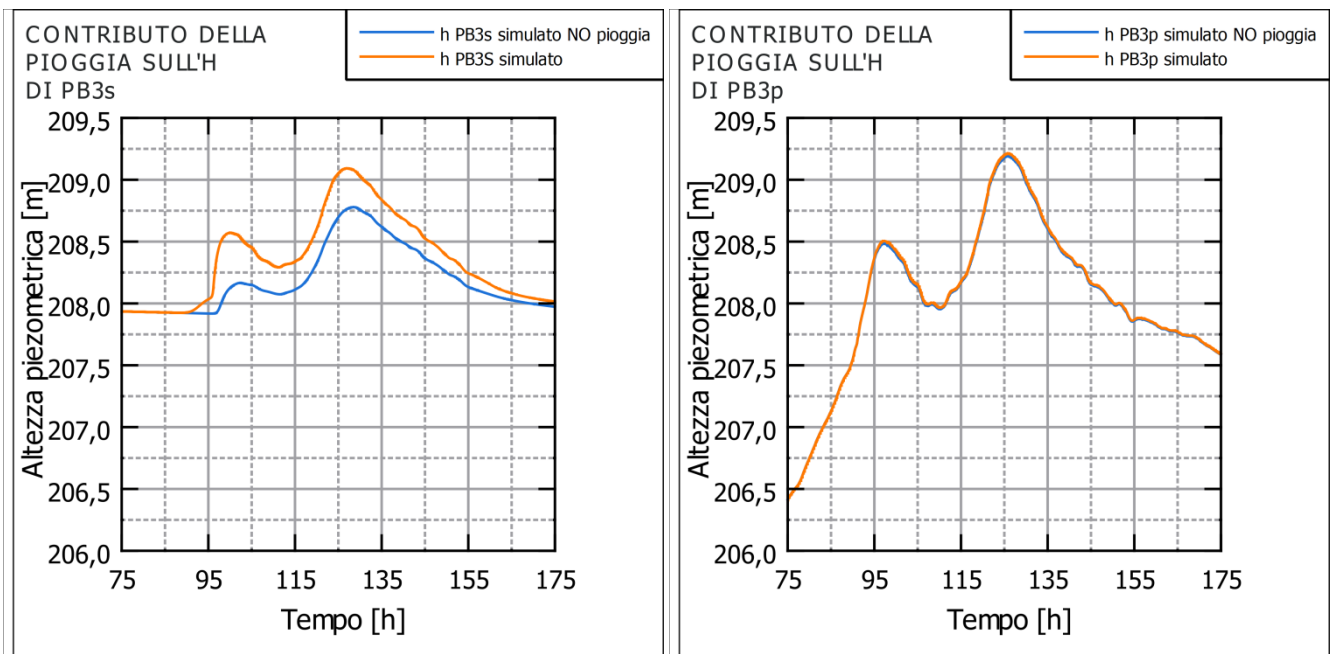


Figura 73 - Confronto dell'andamento dell'altezza piezometrica con e senza precipitazioni. Rilevazioni al sensore PB3s a sinistra, PB3p a destra.

### 5.3.6 La presenza di pipe

Sperimentalmente durante l'evento di piena si sono osservati diversi sand boil, alcuni pure in prossimità della sezione B; essi sono indice della presenza di fratture idrauliche nello strato limoso superficiale. Il fenomeno dei sand boil può condurre a piping se persistono condizioni di elevato carico idraulico lato fiume, secondo il meccanismo descritto nel paragrafo 2.2.1 // *piping*.

Cola et al. (2021) osserva che «quando il fiume ha raggiunto il picco del 31 ottobre, l'altezza piezometrica presso tutti i piezometri superava l'altezza del piano campagna, confermando la possibilità di attivazione di erosione retrogressiva». Per questo è stata svolta una simulazione modellando schematicamente un pipe, caratterizzato da  $K=0.01$  m/s.

Come precedentemente descritto, i canali di piping si sviluppano solitamente all'interfaccia tra uno strato più grossolano con uno più fine e meno permeabile; per questo è stato tracciato, in modo schematico, il percorso illustrato in Figura 74.

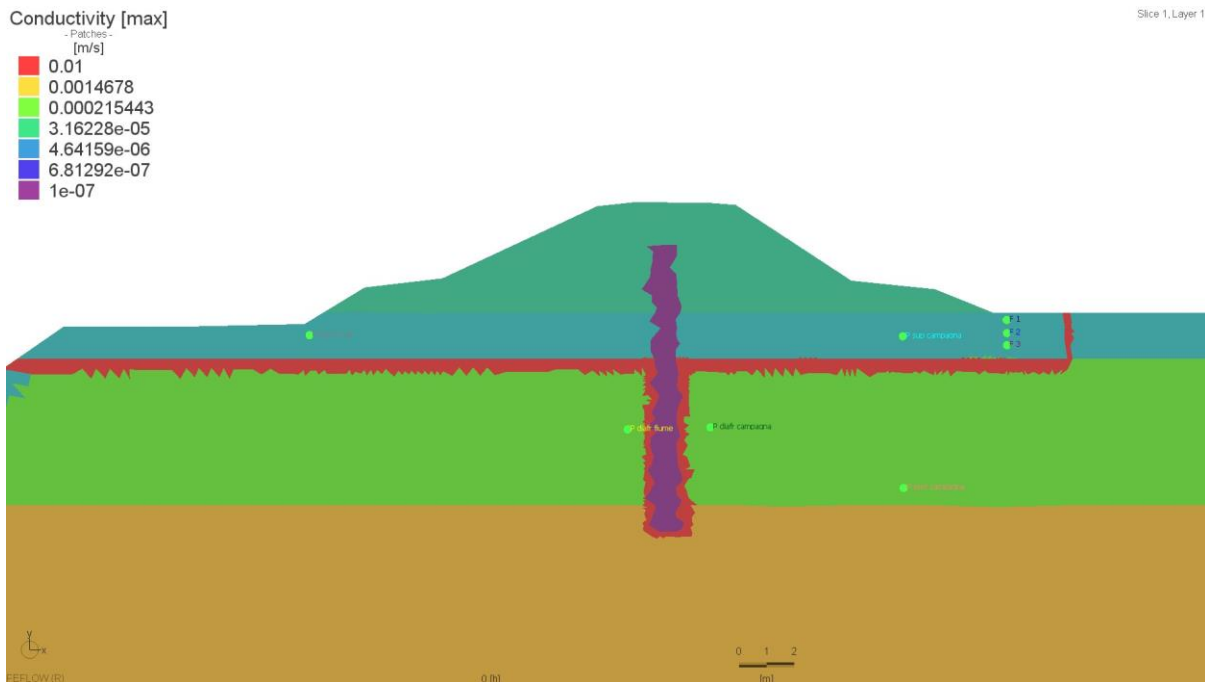


Figura 74 - Configurazione della permeabilità con aggiunta di un pipe completamente sviluppato.

Cola et al. (2021) individua come indice di piping l'inversione del gradiente di temperatura tra fibre a diversa profondità: per la maggior parte della lunghezza della DFOS si riscontra un raffreddamento di circa  $1.6^{\circ}\text{C}$  per la fibra profonda e  $1.7^{\circ}\text{C}$  per quella superficiale, mentre in un tratto in particolare si ha un raffreddamento di  $1.9^{\circ}\text{C}$  per la profonda e  $1.2^{\circ}\text{C}$  per la superficiale Figura 42: lì la FO profonda si raffredda di più, tanto da assumere una temperatura maggiore della FO superficiale, come non è mai osservato nelle altre parti della linea.

Un risultato simile viene giustificato con una filtrazione ascendente anomala permessa da un ipotetico pipe, che connette le FO - partendo da quella più profonda - con la massa d'acqua residente alla fondazione dell'argine se non direttamente con l'acqua del fiume, in base all'avanzamento del pipe. Nel modello FeFlow, utilizzando le condizioni iniziali associate alla sezione B, questa dinamica di temperatura non si osserva per un motivo principale: la temperatura dell'acqua interstiziale è troppo elevata (circa  $14^{\circ}\text{C}$ ), per cui il moto di filtrazione ascendente attivato dalla piena di fatto spinge una massa d'acqua di una temperatura maggiore di quella superficiale, come si nota in Figura 75. Anche modellizzando un pipe completamente formato, che connetta il piano campagna con il fiume, non si osserva tale inversione nel gradiente termico, molto probabilmente perché l'acqua filtrante, pur essendo inizialmente fredda, nel percorso del pipe viene riscaldata dal terreno più caldo.

Per meglio valutare l'influenza della temperatura dell'acqua del fiume sulle misure delle FO è stato simulato un caso di acqua del fiume più calda (con temperatura costante  $T=17^{\circ}\text{C}$ ), mantenendo la configurazione con il pipe passante. Dal confronto con il dato della

simulazione originale, l'effetto è presente ma poco significativo (Figura 77). Da questo si può concludere che, nella configurazione stratigrafica visibile in Figura 74 e con le condizioni iniziali come da paragrafo 4.1.4 *Condizioni iniziali*, la temperatura dell'acqua del fiume non ha un'influenza significativa sulla temperatura presso le fibre; è invece influente il contributo della filtrazione, che trasporta il calore del terreno negli strati inferiori verso la superficie, in modo più accentuato se in presenza di pipe.

Queste considerazioni, però, sono valide per la sezione B, per la quale sono note: geometria, condizioni iniziali di temperatura (seppure da dati puntuali), stratigrafia (ricavata integrando dati da indagini ERT e carotaggi). Per la sezione posta a  $x=190\text{m}$ , dove si è osservata l'inversione del gradiente, sono disponibili meno informazioni; in particolare la temperatura è nota solo come condizione al contorno ( $T$  dell'acqua del fiume e  $T$  dell'aria) e dalle misure delle FO. Per questo motivo è difficile stimare la distribuzione iniziale della temperatura all'intera sezione. Come è già stato osservato, la  $T$  assume valori variabili anche nella lunghezza dell'argine; alla sezione posta a  $x=190\text{m}$  è possibile che l'acqua interstiziale abbia sin dall'inizio una temperatura inferiore di quella alla sezione B, e questo potrebbe giustificare l'inversione del gradiente (cioè un maggiore raffreddamento della fibra profonda) come osservato da Cola et al. (2021).

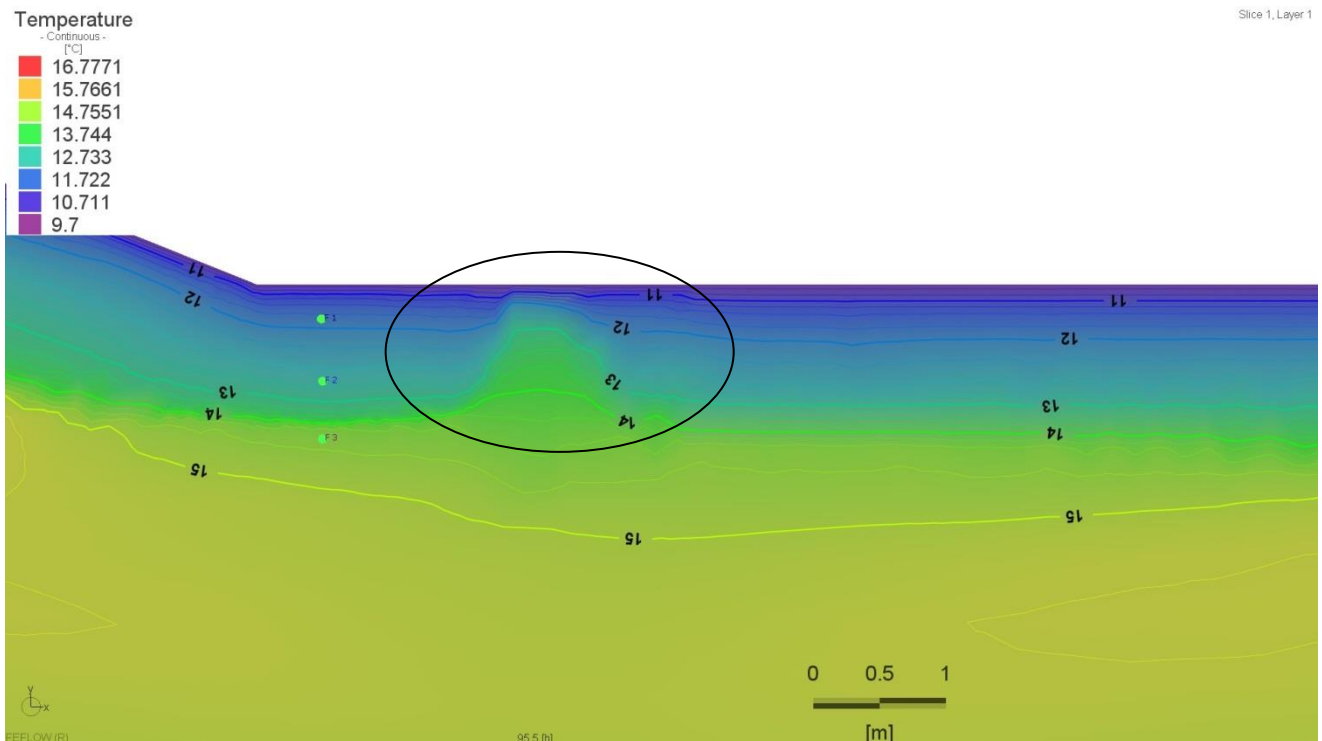


Figura 75 - Trasporto dell'acqua interstiziale calda attuato dal pipe.



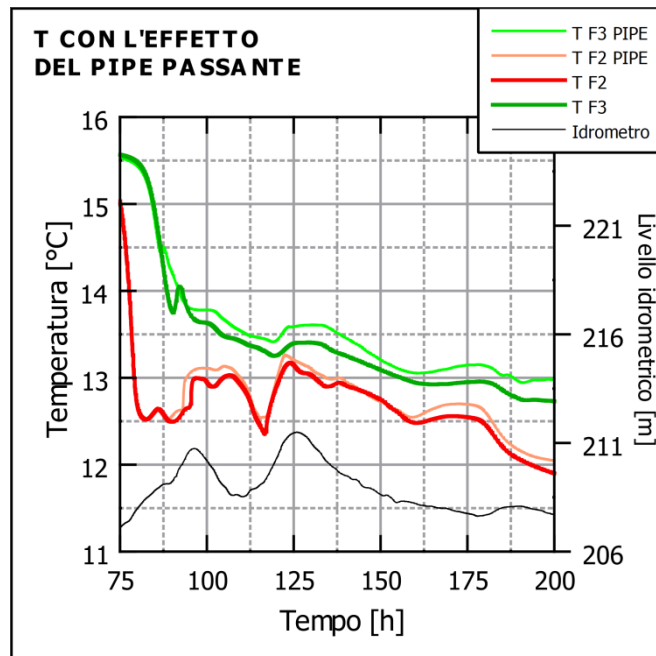


Figura 76 - Andamento della temperatura alle due fibre ottiche più profonde: confronto tra il caso iniziale e il caso con aggiunta di un pipe. Nel caso con il pipe si nota un lieve riscaldamento, più accentuato alla FO F3 più profonda.

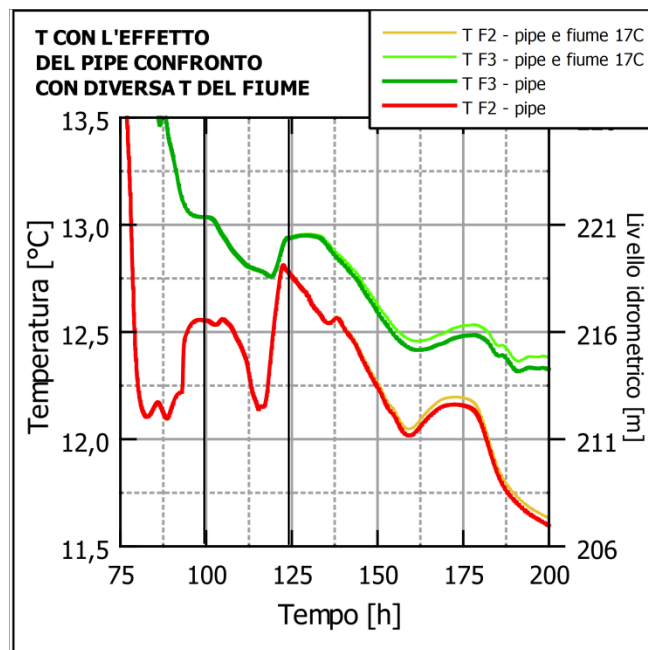


Figura 77 - Confronto tra le T misurate alle fibre ottiche, con due diverse temperature per l'acqua del fiume. Entrambe in presenza di pipe. Le due linee verticali a t=100h e t=125h indicano gli istanti dei due picchi di piena. Si nota come la temperatura dell'acqua del fiume inizi ad avere un effetto sulla T alle FO solo con grande ritardo.

### 5.3.7 Due fronti termici: dalle precipitazioni e dalla piena

Nella simulazione si osserva come alla profondità delle fibre agiscano infine due fronti termici freddi: quello dell'acqua filtrante dal fiume (dal basso) e quello dell'acqua delle precipitazioni (dall'alto).

L'infiltrazione della pioggia ha un importante effetto sull'andamento della temperatura: prima di tutto perché il moto dell'acqua che si filtra attua trasporto di calore per avvezione; secondariamente perché la pioggia saturando il terreno ne aumenta la conducibilità termica. Alla fine della simulazione la temperatura misurata alle fibre è circa 1°C inferiore nel caso con la BC "precipitazioni" attiva (Figura 79). Sono indicati nei punti verde e rosso i valori delle misure reali alle fibre F3 e F2: l'errore è nell'ordine di 1°C nel caso con le precipitazioni, mentre senza è molto maggiore.

Pur essendo molto superficiali, le fibre sono influenzate pure dal fronte termico mosso dalla filtrazione lato fiume, come testimonia Figura 78, dove viene messo a confronto il risultato della stessa simulazione con un livello idrometrico costante o variabile. Come anticipato, il moto ascendente dell'acqua sposta l'acqua interstiziale relativamente calda e per questo motivo provoca un aumento della temperatura di circa 0.3°C rispetto al caso con livello idrometrico costante.

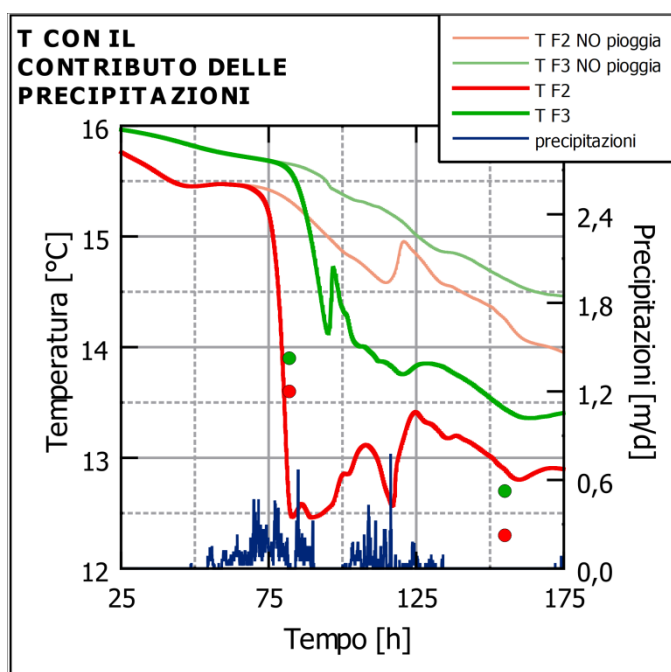


Figura 79 - Effetto della filtrazione dell'acqua di pioggia sulla temperatura presso le fibre.

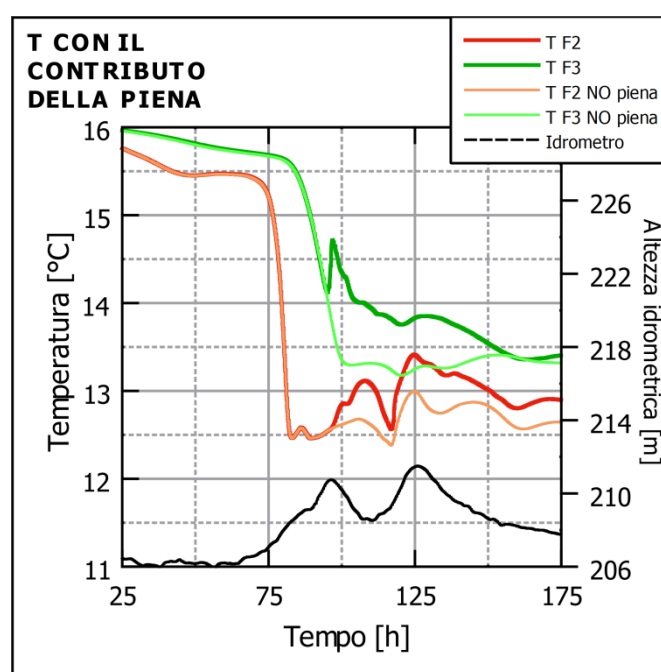


Figura 78 - Andamento simulato della temperatura presso le due fibre più profonde confrontato con il caso particolare in cui il livello idrometrico rimanga costante. Si nota come la filtrazione provocata dalla piena porti un aumento della temperatura.

### 5.3.8 Permeabilità

Una permeabilità minore comporta maggiori dissipazioni del carico idraulico, che si traducono in picchi più bassi durante la piena, come si nota in Figura 80.

Nella fase di calibrazione è stata aumentata la permeabilità dello strato più profondo per ridurre il dislivello tra il carico idraulico tra i due lati del diaframma.

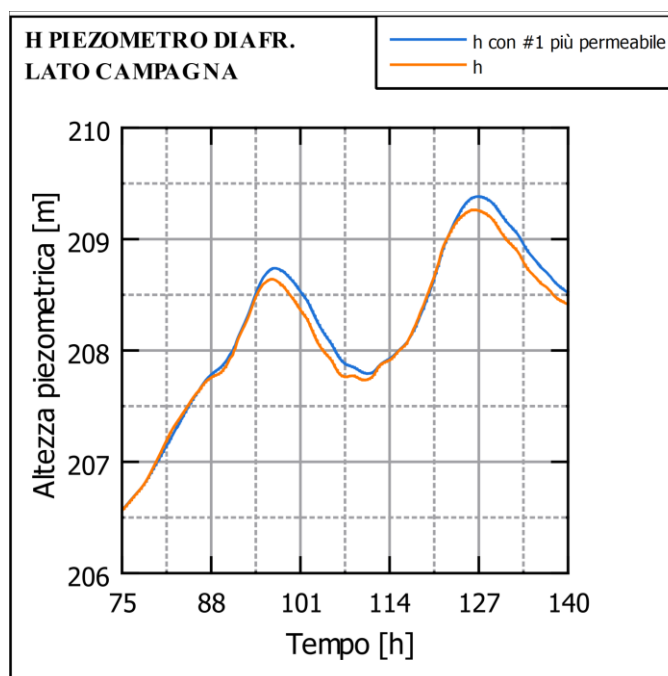


Figura 80 - Andamento dell'altezza piezometrica in due simulazioni con diversa permeabilità dello strato #1 (limo sabbioso).

## 5.4 Considerazioni conclusive

I risultati ottenuti dalla simulazione rappresentano con una soddisfacente precisione le misure sperimentali, di più per quanto riguarda l'altezza piezometrica che per la temperatura.

L'andamento della temperatura infatti non rispecchia in modo completo i risultati delle misure di Cola et al. (2021): le T ottenute alle FO dalla simulazione sono superiori dei dati misurati (con  $\Delta T = +0.1 \div 0.9$  °C).

L'effetto del pipe simulato invece di creare un'anomalia negativa alla FO profonda (come riscontrato dalle misure) ne crea una positiva.

Le ragioni ipotizzate sono le seguenti:

- Le condizioni iniziali di temperatura non sono corrette. Questo è possibile perché per la T si dispone solo di alcune misure puntuali alla sezione, dunque è possibile vi siano eterogeneità non considerate. Risulta ancor più plausibile se si osserva l'eterogeneità nella distribuzione longitudinale (con  $\Delta T \approx 1$  °C tra due diverse sezioni trasversali);
- La modellizzazione del pipe è imprecisa: come è stato detto, lo sviluppo del piping è un fenomeno dinamico molto complesso, che vede variare la geometria e le proprietà materiali in intervalli di tempo anche molto brevi durante la piena. E' possibile il percorso tracciato o la permeabilità assegnata nel modello non siano precisi.

## **6 Conclusioni**

Nella presente trattazione è stata condotta un'analisi delle dinamiche di filtrazione e di trasmissione di calore attraverso un corpo arginale, durante un evento di piena. Si è utilizzato il software FeFlow per creare una mesh di una sezione bidimensionale dell'argine e successivamente per eseguire una simulazione numerica, risolvendo le equazioni del trasporto di calore e fluido in modo accoppiato con un metodo agli elementi finiti.

Le informazioni riguardo le condizioni iniziali, condizioni al contorno e geometria della sezione sono state ricavate da dati sperimentali relativi al sito di monitoraggio dell'Adige, presso Salorno (BZ). In tale sito è installato un sistema di monitoraggio basato su DFOS (*distributed fiber optic sensing*) per la misura della temperatura del terreno al piede dell'argine. Tale sistema è impiegato principalmente per rilevare anomalie termiche attribuibili a vie preferenziali di filtrazione (come quelle prodotte dal piping).

I dati sulla temperatura possono offrire importanti informazioni aggiuntive rispetto ai sistemi di monitoraggio tradizionali. Tuttavia l'interpretazione dei dati è molto spesso complessa.

Una modellazione software come quella realizzabile in FeFlow può facilitare il processo di interpretazione. Nella simulazione condotta si sono riscontrati i seguenti pregi, molto probabilmente validi in generale.

- Note le misure puntuali del carico idraulico (per esempio svolte con piezometri) è possibile stimare con più sicurezza la permeabilità degli strati, o l'eventuale presenza di eterogeneità.
- Il modello permette di avere una visione complessiva delle dinamiche di temperatura, e approfondire le ragioni di ciascuna variazione termica, individuando i contributi delle condizioni al contorno (per esempio la temperatura dell'aria), del trasporto avvevativo del calore e della semplice conduzione.
- Il modello permette di prevedere gli effetti sulla temperatura da eventuali variazioni di permeabilità (per esempio provocate dal piping) e quindi facilita l'interpretazione dei dati misurati.

# **Bibliografia**

- Abbasimaedeh, P., Tatin, M., Lamour, V., Vincent, H., Bonelli, S., & Garandet, A. (2021). On Earth dam leak detection based on using Fiber-Optic distributed temperature sensor (Case Study: canal embankment on the Rhône River, France). In *Sustainable civil infrastructures* (pp. 44–57). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-79641-9\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-79641-9_4)
- Abu-Hamdeh, N. H. (2003). Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. *Biosystems Engineering*, 86(1), 97–102. [https://doi.org/10.1016/s1537-5110\(03\)00112-0](https://doi.org/10.1016/s1537-5110(03)00112-0)
- Amabile, A., De Carvalho Faria Lima Lopes, B., Pozzato, A., Beneš, V., & Tarantino, A. (2020). An assessment of ERT as a method to monitor water content regime in flood embankments: The case study of the Adige River embankment. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/B/C*, 120, 102930. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102930>
- Amabile, A., De Polo, F., & Tarantino, A. (2020). Probabilistic analysis of flood embankment stability: the case study of the Adige River embankment in Italy. *E3S Web of Conferences*, 195, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019501003>
- ARPAV. (2012). La rete freaticometrica. *Agenzia Regionale per La Prevenzione E Protezione Ambientale Del Veneto*. Retrieved September 18, 2023, from <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/idrologia/file-e-allegati/rapporti-e-documenti/idrologia-regionale/la-rete-freatimetrica/>
- Baiamonte, G. (2019). SCS Curve number and Green-AMPT infiltration models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001838](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001838)
- Berardi, R. (2020). *Fondamenti di geotecnica*. Nuova ediz. Cittastudi.
- Bersan, S. (2015). *Piping detection by distributed temperature sensing: Understanding the development of thermal anomalies* [PhD Thesis]. University of Padova.
- Bersan, S., Jommi, C., Simonini, P., & Koelewijn, A. R. (Eds.). (2013). *Applicability of the fracture flow interface to the analysis of piping in granular material*. COMSOL Conference Rotterdam. <https://www.researchgate.net/publication/309236859>
- Bersan, S., Koelewijn, A., & Simonini, P. (2018). Effectiveness of distributed temperature measurements for early detection of piping in river embankments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1491–1508. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1491-2018>
- Bertulesi, M., Bignami, D. F., Boschini, I., Chiarini, A., Ferrario, M., Mazzon, N., Menduni, G., Morosi, J., & Zambrini, F. (2020). Conceptualization and prototype of an Anti-Erosion sensing revetment for levee monitoring: experimental tests and numerical modeling. *Water*, 12(11), 3025. <https://doi.org/10.3390/w12113025>
- Bossi, G., Bersan, S., Cola, S., Schenato, L., De Polo, F., Menegazzo, C., Boaga, J., Cassiani, G., Donini, F., & Simonini, P. (2018). Multidisciplinary analysis and modelling of a river embankment affected by piping. In *Lecture notes in civil engineering* (pp. 234–244). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99423-9_22)

- Bossi, G., Borgatti, L., Gottardi, G., & Marcato, G. (2016). The Boolean Stochastic Generation method - BoSG: A tool for the analysis of the error associated with the simplification of the stratigraphy in geotechnical models. *Engineering Geology*, 203, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.08.003>
- Bossi, G., Schenato, L., De Polo, F., Cola, S., & Simonini, P. (2019). *Geotechnical Engineering, Foundation of the Future: Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.32075/17ECSMGE-2019-0632>
- Bui, Q. C., Zhou, Y., & Zhao, C. (2017). The capacity of active heat method in evaluation of seepage. *Heat Transfer*. <https://doi.org/10.1002/htj.21296>
- Camici, S., Barbetta, S., & Moramarco, T. (2015). Levee body vulnerability to seepage: the case study of the levee failure along the Foenna stream on 1 January 2006 (central Italy). *Journal of Flood Risk Management*, 10(3), 314–325. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12137>
- Carrera, L., Standardi, G., Koks, E., Feyen, L., Mysiac, J., & Bosello, F. (2015). Economics of flood risk in Italy under current and future climate. CMCC. Retrieved September 17, 2023, from <https://www.cmcc.it/wp-content/uploads/2016/06/rp0272-ecip-12-2015.pdf>
- Cesali, C., Cardaci, W., & Federico, F. (2020). Analysis of the effects of permeability defects on seepage flow and heat transport in embankment dams. In *Springer series in geomechanics and geoengineering*. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-46351-9\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-46351-9_33)
- Cola, S., Girardi, V., Bersan, S., Simonini, P., Schenato, L., & De Polo, F. (2021). An optical fiber-based monitoring system to study the seepage flow below the landside toe of a river levee. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(3), 691–705. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00475-y>
- Cosanti, B., Squeglia, N., & Lo Presti, D. C. (2014). Analysis of existing levee systems: The Serchio river case. *Rivista Italiana Di Geotecnica*, 4. <https://www.researchgate.net/publication/288095646>
- Dalla Santa, G., Fabbian, N., & Cola, S. (in press). Investigating the effects of water levels measured in two nearby rivers on groundwater pore pressures regime. *Dip. Geoscienze Università Di Padova*.
- Diersch, H. G. (2014). FEFLOW. Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. In *Springer eBooks*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38739-5>
- D'Alpaos, L., Fioravante, V., Gottardi, G., Mignosa, P., & Brath, A. (2014). Relazione tecnico-scientifica sulle cause del collasso dell'argine del fiume Secchia avvenuto il giorno 19 gennaio 2014 presso la frazione San Matteo. *Regione Emilia Romagna*. Retrieved September 15, 2023, from [https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/notizie/allegati/allegati-2021/prot\\_\\_02-03-2021\\_0177836-allegato-ndeg-1-relazione\\_di\\_dettaglio\\_sgn\\_-1-\\_timbrato.pdf](https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/notizie/allegati/allegati-2021/prot__02-03-2021_0177836-allegato-ndeg-1-relazione_di_dettaglio_sgn_-1-_timbrato.pdf)
- E. W. G. O. L. a. F., E. W. G. on L. and F. (2018). *European and US levees and flood defences: Characteristics, Risks and Governance*. CFBR.
- EASAC. (2018). Extreme weather events in Europe. *Royal Academies for Science and the Arts of Belgium*.
- Fabbian, N., Dalla Santa, G., Schenato, L., De Polo, F., & Cola, S. (2022). Variazioni di temperatura misurate con fibra ottica come indicatori di filtrazione arginale durante la piena dell'Adige del 5 agosto 2021. *Università Degli Studi Della Campania L. Vanvitelli*.
- Gambolati, G., & Ferronato, M. (2015). *Lezioni di metodi numerici per l'ingegneria*. Edizioni Libreria Progetto Padova.

- Gao, Z., & Chai, J. (2022). Method for predicting unsaturated permeability using basic soil properties. *Transportation Geotechnics*, 34, 100754. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100754>
- Ghafoori, Y., Vidmar, A., Říha, J., & Kryžanowski, A. (2020). A review of measurement calibration and interpretation for seepage monitoring by optical fiber distributed temperature sensors. *Sensors*, 20(19), 5696. <https://doi.org/10.3390/s20195696>
- Gottardi, G., Gragnano, C. G., Rocchi, I., & Bittelli, M. (2016). Assessing river embankment stability under transient seepage conditions. *Procedia Engineering*, 158, 350–355. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.454>
- Gurpersaud, N., Bruce, J., & Montgomery, M. (2013). An extensive jet grout test program for a low permeability barrier. *Geo-Foundations Contractors Inc.* [https://www.researchgate.net/publication/345638077\\_An\\_extensive\\_jet\\_grout\\_test\\_program\\_for\\_a\\_low\\_permeability\\_barrier](https://www.researchgate.net/publication/345638077_An_extensive_jet_grout_test_program_for_a_low_permeability_barrier)
- Kayadelen, C., Tekinsoy, M. A., & Taskiran, T. (2007). Influence of matric suction on shear strength behavior of a residual clayey soil. *Environmental Geology*, 53(4), 891–901. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0701-2>
- Khan, A. A. (2009, November 27). *Séparation de sources thermométriques*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00477455>
- Kuriqi, A., Ardicioglu, M., & Muceku, Y. (2016). Investigation of seepage effect on river dike's stability under steady state and transient conditions. *Pollack Periodica*, 11(2), 87–104. <https://doi.org/10.1556/606.2016.11.2.8>
- Martínez, M. F. G., Gragnano, C. G., Gottardi, G., Marchi, M., Tonni, L., & Rosso, A. (2016). Analysis of underseepage phenomena of River PO embankments. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.452>
- Pachepsky, Y., Timlin, D., & Rawls, W. J. (2003). Generalized Richards' equation to simulate water transport in unsaturated soils. *Journal of Hydrology*, 272(1–4), 3–13. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(02\)00251-2](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(02)00251-2)
- Provincia Autonoma Di Bolzano. (n.d.). Pericoli naturali. *Provincia Autonoma Di Bolzano - Alto Adige*. Retrieved September 18, 2023, from <https://pericoli-naturali.provincia.bz.it/it/alluvioni>.
- Pyayt, A., Kozionov, A., Mokhov, I., Lang, B., Krzhizhanovskaya, V. V., & Sloot, P. M. A. (2013). An approach for real-time levee health monitoring using signal processing methods. *Procedia Computer Science*, 18, 2357–2366. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.05.407>
- Rotunno, A. F., Callari, C., & Froiio, F. (2017). Computational modeling of backward erosion piping. In *Springer series in solid and structural mechanics* (pp. 225–234). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48884-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48884-4_12)
- Schenato, L., Fabbian, N., Santa, G. D., Simonini, P., De Polo, F., Tedesco, G., Marcato, G., & Cola, S. (2022). Distributed optical fiber sensors for the soil temperature measurement in river embankments. *IEEE*. <https://doi.org/10.1109/mn55117.2022.9887664>
- Sellmeijer, J. (1988). On the mechanism of piping under impervious structures. *TU Delft Repositories*. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:7f3c5919-1b37-4de9-a552-1f6e900eeaad>
- Simeoni, L., Zatelli, P., & Floretta, C. (Eds.). (2011). *Spatial database and web-GIS for managing and validating river embankment monitoring data*. University of Trento. [https://www.researchgate.net/publication/261472710\\_Spatial\\_database\\_and\\_web-GIS\\_for\\_managing\\_and\\_validating\\_river\\_embankment\\_monitoring\\_data](https://www.researchgate.net/publication/261472710_Spatial_database_and_web-GIS_for_managing_and_validating_river_embankment_monitoring_data)

- Soft.Lab. (2023). Le verifiche idrauliche nel calcolo geotecnico: la verifica a sifonamento. *Soft.Lab - Software per Il Calcolo Strutturale E La Geotecnica*. <https://www.soft.lab.it/le-verifiche-idrauliche-nel-calcolo-geotecnico-la-verifica-a-sifonamento/>
- Song, C. R., & Yosef, T. Y. (2017). Seepage monitoring of an embankment dam based on Hydro-Thermal coupled analysis. *Journal of Engineering Materials and Technology-transactions of the Asme*, 139(2). <https://doi.org/10.1115/1.4036020>
- Su, H., & Kang, Y. (2013). Design of system for monitoring seepage of levee Engineering based on distributed optical fiber sensing technology. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 9(12), 358784. <https://doi.org/10.1155/2013/358784>
- Su, H., Cui, S., Wen, Z., & Xie, W. (2018). Experimental study on distributed optical fiber heated-based seepage behavior identification in hydraulic engineering. *Heat and Mass Transfer*, 55(2), 421–432. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2431-2>
- TerraDat. (2020, April 20). Electrical Resistivity Tomography (ERT). *Geophysical Survey Company - TerraDat (UK) Ltd*. <https://www.terradat.co.uk/survey-methods/resistivity-tomography/>
- Tracy, F. T., Brandon, T. L., & Corcoran, M. K. (2016). *Transient seepage analyses in levee engineering practice*. ERDC. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1012946.pdf>
- Van Beek, V., Bezuijen, A., & Sellmeijer, H. (2013). Backward erosion piping. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 193–269. <https://doi.org/10.1002/9781118577165.ch3>
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Ventini, R., Dodaro, E., Giretti, D., Pirone, M., Zarattini, F., Gragnano, C. G., Fioravante, V., Gabrieli, F., Gottardi, G., & Mancuso, C. (2023). Analysis of transient seepage through a river embankment by means of centrifuge modelling. *E3S Web of Conferences*, 382, 12008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338212008>
- Wise, J., Hunt, S. L., & Dushaishi, M. F. A. (2023). Prediction of earth dam seepage using a transient thermal finite element model. *Water*, 15(7), 1423. <https://doi.org/10.3390/w15071423>
- Yang, J., Yin, Z., Laouafa, F., & Hicher, P. Y. (2019). Analysis of suffusion in cohesionless soils with randomly distributed porosity and fines content. *Computers and Geotechnics*, 111, 157–171. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.011>
- Yosef, T. Y., Song, C. R., & Chang, K. (2017). Hydro-thermal coupled analysis for health monitoring of embankment dams. *Acta Geotechnica*. <https://doi.org/10.1007/s11440-017-0571-z>
- Zeng, L., & Shao, L. (2022). Generalized Terzaghi's effective stress equation for unsaturated soil: an independent phase balance approach that considers a pore water content gradient. *Geofluids*, 2022, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2022/3971247>