

Indice

Introduzione	4
1.0 I rilevati arginali	5
1.1 Dissesti arginali	12
1.1.1 Rimedi tipici ai dissesti arginali	13
1.1.1.1 Nuclei impermeabili	13
1.1.1.2 Diaframmi	13
1.1.1.3 Filtri	14
1.1.2 Dissesti da animali	14
1.1.2.1 Animali tipici degli argini	16
1.1.2.2 Condizioni del terreno per costruire le tane	18
1.1.2.3 Caratteristiche delle tane	18
1.1.2.4 Interventi per la protezione degli argini dalle tane	19
1.2 La filtrazione	21
1.2.1 Coefficiente di permeabilità	22
1.2.1.1 Misura coefficiente di permeabilità	22
1.2.2 Reticoli idrodinamici	24
1.2.2.1 Costruzione grafica del reticolo idrodinamico	26
1.2.3 Effetti della filtrazione	29
1.2.3.1 Fenomeno del piping	29
1.2.3.1.1 Soluzioni ai problemi di piping	31
1.2.3.4 Fenomeno dell'heaving	32
1.2.3.4.1 Teoria di Terzaghi	32
1.2.3.4.1.1 Gradienti e coefficienti di sicurezza	32
1.2.3.4.2 Teoria di Lane	33
2.0 Terreni soggetti a parziale saturazione	36
2.1 Suzione totale, osmotica e di matrice	40
2.1.1 Misurazione della suzione	41
2.2 Curve di ritenzione idrica	42
2.2.1 Equazioni curve SWCC	45
2.2.2 Cicli di drying e wetting	47

3.0 Caratteristiche fiume	49
3.1 Premessa	49
3.2 Il fiume e le sue caratteristiche	49
3.3 Eventi che hanno portato all'alluvione	49
3.4 Indagini geotecniche	50
3.4.1 Prove penetrometriche (CPTE)	50
3.4.1.1 Risultati delle prove CPTE	54
3.4.2 Sondaggi e piezometri	56
3.4.3 Prove di laboratorio	58
3.4.3.1 Analisi granulometrica	58
3.4.3.2 Limiti di Atterberg	69
4.0 Simulazione matematica della filtrazione negli argini del fiume	71
4.1 Descrizione generale del modello	72
4.1.1 Stratigrafia	73
4.1.2 Proprietà idrauliche dei terreni	75
4.1.3 Le alterazioni, caratteristiche e tipologie	78
4.1.4 Condizioni al contorno	80
4.1.5 Mesh dell'argine	83
4.2 Tipologie di analisi	85
4.2.1 Analisi stato stazionario	85
4.2.1.1 Livello a riposo	86
4.2.1.1.1 Sezioni senza alterazioni	86
4.2.1.1.2 Sezioni con alterazioni semplici	87
4.2.1.1.3 Sezioni con alterazioni a T	88
4.2.1.2 Livello intermedio	90
4.2.1.2.1 Sezioni senza alterazioni	90
4.2.1.2.2 Sezioni con alterazioni semplici	91
4.2.1.2.3 Sezioni con alterazioni a T	93
4.2.1.3 Livello di piena	95
4.2.1.3.1 Sezioni senza alterazioni	95
4.2.1.3.2 Sezioni con alterazioni semplici	96
4.2.1.3.3 Sezioni con alterazioni a T	98
4.2.2 Analisi in stato transitorio	100
4.2.2.1 Sezioni prive di alterazioni	100

4.2.2.2 Sezioni con alterazioni semplici	107
4.2.2.3 Sezioni con alterazioni a T	122
4.2.2.4 Analisi particolareggiate	138
4.2.2.4.1 Doppia tana a T	138
4.2.2.4.2 Doppia tana a T ravvicinata	140
4.2.2.4.3 Variazione del livello di massima piena	143
4.2.2.4.4 Impermeabilizzazione lato fiume dello strato sede dell'alterazione	145
4.2.2.4.5 Variazione della permeabilità	149
4.2.2.5 Grafici riassuntivi	150
4.2.2.6 Variazioni del grado di saturazione dell' argine	152
5.0 Conclusioni	154
Bibliografia	156

Introduzione

La tesi in esame ha la finalità di capire come ed in che misura le alterazioni nei corpi arginali, dovute alla presenza di tane e cunicoli prodotti dalla fauna, possano influire in merito ai fenomeni di filtrazione e quindi ai conseguenti problemi legati all'asportazione di materiale dal corpo arginale.

Lo studio avviene tramite modellazione ed analisi numerica tridimensionale, per capire a fondo le zone d'influenza delle tane nel corpo arginale studiandolo sia trasversalmente che longitudinalmente.

L'interesse in merito a questo studio è dovuto ai fenomeni idrici che nel Novembre 2010 hanno interessato la regione Veneto ed i suoi corsi d'acqua, con particolare riferimento alla rottura dell'argine di un fiume.

Si propone prima una descrizione generica riguardante gli argini, le loro proprietà e problematiche; si presentano poi le alterazioni dovute alla presenza delle tane scavate dalla fauna selvatica ed infine una descrizione delle caratteristiche meccaniche dei terreni e dei diversi materiali che costituiscono l'argine.

Sono poi state poi condotte numerose elaborazioni numeriche tramite il software *GTSMidas*, simulando diverse situazioni di analisi stazionarie e transitorie, su argini con o senza alterazioni.

1.0 I rilevati arginali

L'argine è un'opera complessa che consente di contenere le piene, ed evitare esondazioni nel territorio, aumentando la capacità di portata del corso d'acqua. E' composto principalmente da un rilevato di forma trapezoidale, avente, normalmente, il paramento lato fiume maggiormente inclinato rispetto a quello lato campagna, il quale può essere ampliato mediante la realizzazione di banche e petti per migliorarne le caratteristiche di stabilità e filtrazione. L'argine viene realizzato ponendo in opera degli strati successivi di materiale compattato con spessore di 30-40 cm fino a raggiungere un'altezza pari alla quota di massima piena aumentata di un franco di sicurezza pari o superiore ad 1 m. Il corpo arginale può subire diversi fenomeni di danneggiamento ed instabilità - fig.1.1 - dovuti ad esempio all'erosione al piede, al dilavamento, all'urto meccanico di un natante, al sifonamento, allo scavo di tane da parte di animali e allo scivolamento della scarpata, i quali devono essere prevenuti realizzando degli appositi interventi.

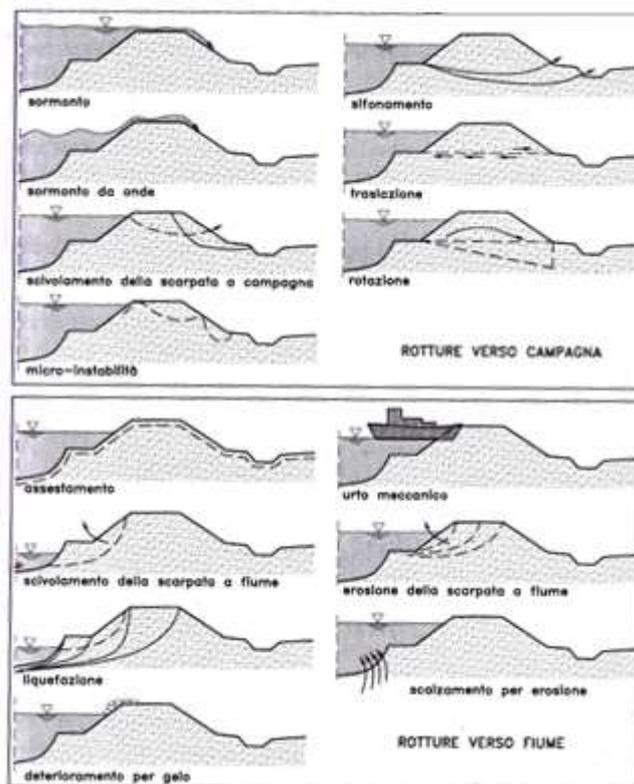


Figura 1.1 : Possibili casi di rotture e dissesti arginali (da Da Deppo, Datei, Salandin)

I rilevati arginali sono realizzati quando sia necessario proteggere aree in cui sono presenti attività produttive, abitative o di interesse storico culturale, per le quali il rischio

idraulico derivante da inondazioni, possa comportare danni ingenti o l'interruzione delle attività.

Nei tratti superiori dei corsi d'acqua, zone di montagna o collinari, gli argini sono naturali, più ripidi nella parte vicina alla sorgente e bassi nella sezione collinare.

Nei tratti pianeggianti gli argini sono tipicamente più alti, costruiti e mantenuti efficienti all'uomo per evitare esondazioni.

In una sezione trasversale di un corso d'acqua arginato si distinguono due zone di deflusso idrico:

- una detta 'alveo di magra', circoscritta da piccoli argini detti 'golenali' capace di contenere le portate ordinarie;
- una detta 'golena', circoscritta da grossi argini detti 'maestri', che contiene il livello di massima piena.

L'insieme dell'alveo di magra e delle golene individua l'alveo di piena.

In alcuni casi potrebbe essere assente la zona golenale, l'argine così presente sarebbe detto 'in frodo' , cioè sarebbe perennemente a contatto con l'acqua presente nel fiume comportando così una maggior esposizione alla capacità erosiva del fiume stesso.

Di seguito - fig.1.2 -vengono illustrate le nomenclature specifiche per le arginature come pubblicato dal Ministero dei Lavori Pubblici:

Mentre per assicurare l'opera rispetto al sifonamento, oltre che alla stabilità, va attentamente progettata la geometria della sezione trasversale. Questa è di forma tipicamente trapezoidale per argini di altezza modesta mentre è dotata di una serie di banche e petti per arginature di maggior importanza tali da garantire la copertura dell'eventuale superficie freatica che può stabilirsi nel corpo arginale a partire dalla quota di massima piena

Per far sì che il rilevato sia preservato da pericolosi moti di filtrazione, il paramento esterno deve essere sagomato in maniera tale che la linea freatica sia costantemente ricoperta da uno spessore di terreno non inferiore di (0,80÷1,00) m.

Un criterio empirico di prima approssimazione, frequentemente utilizzato nella pratica e apprezzato dal Corpo del Genio Civile del Ministero dei LL.PP., è quello di ipotizzare che la linea freatica abbia andamento rettilineo - fig.1.3 - a partire dal livello di massima piena, con pendenza di 1/6

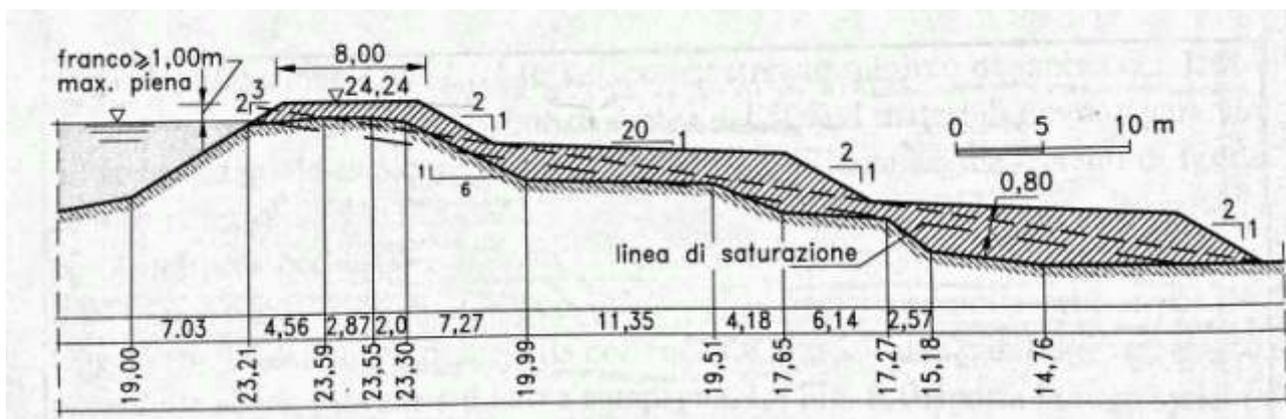


Figura 1.3 :Esempio di rialzo di un corpo arginale al fine di garantire il ricoprimento della linea teorica d'infiltrazione (da Da Deppo, Datei, Salandin)

Infine, per quanto riguarda la costruzione degli argini in terra, come detto in precedenza, sono costituiti da strati di terra il più possibile omogenea di (30÷40) cm e costipati strato per strato.

Infatti, se la costruzione avvenisse rapidamente, in un unico blocco, si andrebbero a generare elevate sovrappressioni, che renderebbero la fase costruttiva critica nei confronti della stabilità del rilevato stesso.

Per ovviare a ciò, è possibile adottare l'accorgimento di suddividere la costruzione del rilevato in più fasi successive. Oltre a questo la stesura di strati singoli di limitato spessore ne permette un miglior costipamento e compattazione con i mezzi meccanici classici.

La compattezza di un materiale viene fissata in base al suo contenuto d'acqua valutato con prove di laboratorio affinché si abbia il massimo costipamento del terreno (prova proctor). E' evidente, quindi, l'importanza che riveste la scelta del materiale che costituisce il corpo arginale: deve possedere elevate caratteristiche meccaniche affinché possa resistere a lungo a fenomeni di erosione e rottura ma deve anche essere facilmente reperibile in loco per contenere gli oneri dovuti al trasporto alla realizzazione dell'arginatura.

Affinché sia garantita la copertura della linea freatica, si fissa la pendenza del paramento lato campagna pari a valori prossimi a 1/2, mentre il paramento lato fiume ha pendenza variabile 1/2 o 2/3 per assicurare l'opera allo scivolamento.

Il coronamento ha una larghezza tipicamente pari a 4÷5 m o maggiore, deve avere una leggera convessità o una pendenza trasversale verso fiume del (2÷3) % per garantire lo scolo delle acque piovane; è bene che sul coronamento non vi siano installate strade di alcun genere eccetto quelle per la viabilità dei mezzi di emergenza e manutenzione dell'argine stesso.

Gli argini sono tipicamente eseguiti in terra omogenea limosa-argillosa (tipologia tra A6 e A4 della classificazione CNR-UNI 10006).con contenuto in sabbia variabile tra il 15 e il 50 %, potendo così garantire un consono valore di permeabilità e allo stesso tempo un adeguato grado di sicurezza alla stabilità.

Pertanto, le proprietà meccaniche richieste ad un materiale terroso perché sia idoneo per la costruzione di un argine sono:

- permeabilità modesta: non superiore a $10^{-6} \div 10^{-8}$ m/s, per contenere i problemi legati ai moti di filtrazione;
- peso specifico elevato: per assicurarne la stabilità allo scivolamento;
- buona compattazione: assicura una maggiore tenuta e stabilità.

E' opportuno che anche il terreno d'appoggio dell'arginatura abbia buone caratteristiche meccaniche, simili a quelle del rilevato; affinché ciò sia possibile è buona norma sbancare parte dello strato superficiale del terreno e andare a sostituirlo con materiale di idonee caratteristiche. Questa operazione garantisce, tra l'altro, un opportuno collegamento dell'argine al terreno di fondazione evitando che si abbiano delle discontinuità. Tale operazione serve anche a prevenire eventuali e pericolosi cedimenti differenziali che inficerebbero il corretto funzionamento dell'argine.

Inoltre, secondo le indicazioni dettate dal Ministero dei Lavori Pubblici con Decreto Ministeriale del 21 Marzo 1988 numero 449, deve :

- essere valutata la stabilità dell'insieme manufatto - terreno di fondazione, sia nelle fasi costruttive sia durante l'esercizio

- essere calcolati i cedimenti dovuti alle deformazioni dei terreni di fondazione e dei materiali costituenti il rilevato.

L'analisi statica viene condotta ricercando tra le diverse superfici potenziali di rottura, generalmente assunte di forma circolare, quella a cui corrisponde il minimo valore del coefficiente di sicurezza: tale valore deve risultare superiore a quello del coefficiente di sicurezza prescelto.

In particolare, la stabilità degli argini dipende anche dal regime dei moti di filtrazione (seepage) che possono interessare il rilevato, il terreno di fondazione oppure l'insieme rilevato arginale terreno di fondazione allorché le caratteristiche geotecniche dei materiali risultassero omogenee .

La linea di saturazione, dovuta alla filtrazione all'interno del corpo arginale, partendo dal valore di massima piena, andrebbe determinata considerando condizioni di moto vario poiché durante le piene il livello d'acqua nel fiume varia nel tempo.

Tuttavia, lavorando a vantaggio della sicurezza, spesso si ipotizzano condizioni di moto permanente corrispondenti al massimo livello di piena, assunto costante per un tempo tendente all'infinito, ottenendo comunque rappresentazioni adeguate dell'evento.

In fig. 1.4 viene rappresentata la differenza tra moto permanente e moto stazionario.

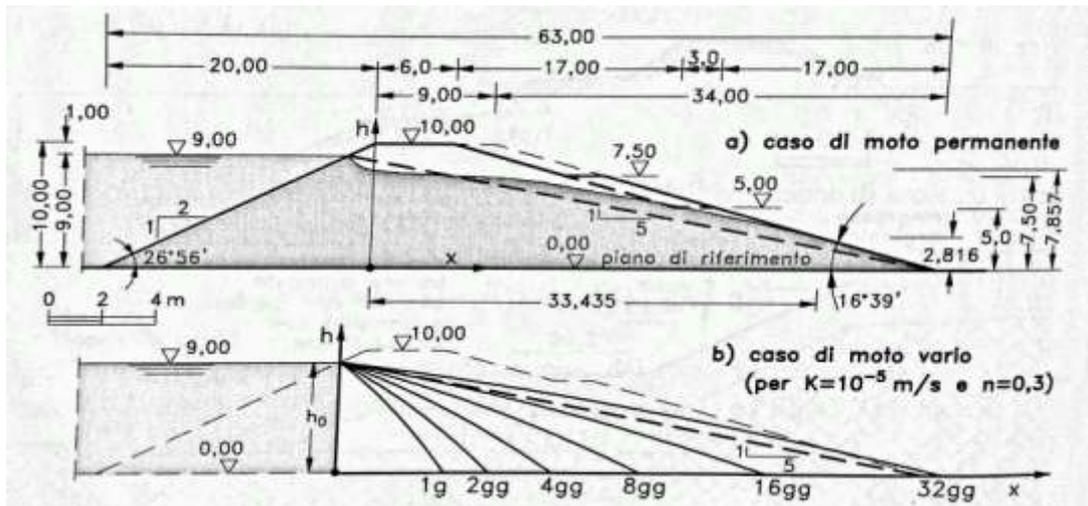


Figura 1.4 :Linea di infiltrazione a moto permanente e a moto vario in un arginatura (da Da Deppo, Datei, Salandin)

Particolarmente importante è la fase di gestione e manutenzione dei rilevati arginali che consiste essenzialmente negli sfalci stagionali delle erbe che vegetano sul loro paramenti e dal controllo visivo di eventuali problematiche legate alla filtrazione e alla stabilità.

I rilevati arginali non devono essere sede di strade, tale divieto viene però spesso disatteso, comportando nel tempo la creazione di vere e proprie strade sul coronamento dell'argine.

Il carico dovuto al traffico stradale comporta un continuo ed eccessivo avanzamento dei cedimenti arginali dovuti alla costipazione del terreno, con il conseguente aumento della probabilità di esondazione per la pericolosa riduzione del franco. Interventi periodici di controllo ed eventualmente ricarico del rilevato potrebbero essere un'idonea, anche se onerosa, soluzione per ripristinare la quota ed evitare pericolose esondazioni.

1.1 Dissesti arginali

Diversi sono i motivi per cui può avvenire la tracimazione di un rilevato arginale.

- Transito di una portata di piena superiore alla portata di progetto;
- rigurgito dovuto ad un ostacolo presente nel corso del fiume;
- assenza o diminuzione del franco di sicurezza a seguito di cedimenti.

La tracimazione di un rilevato può avvenire come conseguenza di eventi di rottura dovuti ai moti di filtrazione che possono causare un progressivo sviluppo di cavità, le quali ingrandendosi favoriscono il crollo del terreno sovrastante, provocando l'abbassamento puntuale del coronamento con l'apertura di una breccia superficiale che dà origine alla tracimazione.

Un rimedio provvisorio è il sopralzo del ciglio arginale mediante la posa di sacchetti di sabbia tenendo sotto controllo il livello delle acque del fiume in procinto di tracimare.

Maggiore attenzione va posta ai dissesti causati dai moti di filtrazione.

L'acqua che si infiltra attraverso l'ammasso arginale non è visibilmente percepibile e di conseguenza i danni che può provare (piping e instabilità arginale) sono difficilmente prevedibili. Prima di tutto interessa quantificare l'acqua filtrante nel rilevato ovvero conoscere il regime di pressioni neutre che si sono sviluppate durante un evento di piena sia nel corpo arginale che nel terreno di fondazione, per poi costruire un reticolo idrodinamico in funzione della permeabilità dei materiali costituenti l'argine ed il terreno di fondazione.

Tale schematizzazione, però, non rispecchia la situazione reale, in quanto non tiene conto del fatto che gli argini ed il terreno di fondazione sono interessati da un livello d'acqua che è variabile nel tempo per cui il flusso d'acqua andrebbe studiato in condizioni di moto vario. Comunque l'esperienza mostra ('Le reti idrauliche', G. Supino) che considerare una situazione di regime ci pone in condizioni di sicurezza in quanto la linea di involuppo corrispondente a condizioni di moto vario risulta essere sempre più bassa della linea di saturazione che si ottiene in condizioni di moto permanente. La linea di involuppo risulta,

inoltre, anche più bassa della linea di infiltrazione stimata empiricamente con pendenza (1:5÷1:6).

1.1.1 Rimedi tipici ai dissesti arginali

Un classico rimedio, rispetto alle problematiche dovute ai moti di filtrazione, è quello di creare sezioni arginali miste, zonate oppure realizzare delle diaframature o, ancora, dei pozzi drenanti.

1.1.1.1 Nuclei impermeabili

La creazione di sezioni arginali zonate è spesso effettuata per la limitata disponibilità di materiale di bassa permeabilità presente in loco, per cui si costruiscono particolari sezioni formate da materiali omogenei ed impermeabili, si crea così un nucleo di argilla all'interno del rilevato.

Per evitare un regime di filtrazione nel terreno di fondazione si può prolungare il nucleo o aggiungere sotto di esso un taglione in calcestruzzo o in acciaio fino a raggiungere lo strato impermeabile.

1.1.1.2 Diaframmi

Simile alla costruzione di un taglione è la realizzazione di un diaframma. Le diaframature hanno difatti, come i taglioni, lo scopo di prolungare il percorso dei moti di filtrazione in modo da poter dissipare quanta più energia possibile fino a valori ottimali per la stabilità delle arginature. Le diaframature possono essere realizzate con elementi prefabbricati ed infissi (palancole) in materiali metallici o di calcestruzzo oppure con tecniche tipo jet-grouting; anche se quest'ultima tecnica non garantisce la perfetta impermeabilità del diaframma

1.1.1.3 Filtri

Un'ulteriore soluzione per evitare erosione all'interno del rilevato arginale o del terreno di fondazione, è la creazione di filtri orizzontali mediante la posa in opera di veri e propri strati di terreno più permeabili al di sotto del rilevato per richiamare l'acqua verso di essi, oppure creare dei filtri verticali ovvero dei pozzi drenanti che, come i drenaggi orizzontali, hanno lo scopo di indirizzare il moto di filtrazione nel sottosuolo.

1.1.2 Dissesti da animali

Un altro fenomeno di dissesto, non meno pericoloso di quelli analizzati in precedenza, è causato dalle escavazioni di tane da parte di alcune particolari famiglie di roditori originari del Sud America, le nutrie, ma anche da altri animali tipici delle nostre zone come la volpe il tasso e i conigli. Il forte impatto sugli argini e sulle sponde fluviali è causato dalla loro abitudine di scavare tane profonde e molto articolate nel terreno favorendo la probabilità di collasso degli argini e delle rive durante le piene; l'onda di piena allaga le tane favorendo l'imbibimento del corpo centrale dell'argine, il quale diventato instabile potrebbe collassare.

Gli argini sono spesso trascurati e coperti di cespugli. Per questi motivi le difese arginali, le sponde dei fiumi e dei canali di drenaggio della falda freatica affiorante costituiscono spesso un habitat ideale per vivere e riprodursi.

Gli animali coinvolti sono quindi 4 diversi tipi di mammiferi: il tasso, la volpe, il coniglio selvatico e la nutria.

Il tasso e la volpe da sempre sono un patrimonio faunistico della pianura. Più recente è l'arrivo del coniglio selvatico e, recentissimo, è l'arrivo della nutria.

La caratteristica di questi animali, che ha un forte impatto sugli argini e sulle sponde, è la loro abitudine di scavare tane profonde e molto articolate nel terreno favorendo la possibilità di collasso degli argini e delle rive durante le piene.

Il processo avviene come indicato in fig. 1.5



Figura 1.5 : Possibile processo di collasso arginale per tane di nutrie

L'onda di piena allaga le tane favorendo l'imbibimento del corpo centrale dell'argine e il suo successivo collasso quando l'acqua si ritira. Naturalmente, perché questi animali possano scavare le loro tane nel corpo degli argini, è necessario che trovino le condizioni ambientali adatte per poterlo fare.

1.1.2.1 Animali tipici degli argini

I seguenti animali risultano essere tipici del nostro territorio e sono indicati come i principali colpevoli dell'instabilità di molti argini.

-Le nutrie:

Utilizzano tane di altri animali come rifugio, oppure scava sistemi di cunicoli che variano da semplici tunnel a complessi di camere e passaggi che si estendono per oltre 15 metri.

Le tane delle nutrie sono quasi sempre costruite a non più di un metro dallo specchio d'acqua o del canale dove vivono e sempre scavate all'interno della sponda.

Le tane delle nutrie- fig. 1.6 -possono essere semplici o complesse, una tana complessa può avere diverse gallerie e accessi a diversi livelli nell'argine. Un sistema di tana conterrà comparti (che vanno dai 30 ai 50cm di diametro) per il riposo, l'alimentazione, e il riparo dalle intemperie e dai predatori. Il tunnel può avere 4-6 metri di lunghezza.

Per il controllo delle nutrie diverse sono le soluzioni proposte, dalla caccia alle trappole.

L'unica soluzione non dannosa per gli animali è la posa di reti metalliche, meglio se inox di maglia quadrata 6x6 o 8x8 cm² adeguatamente ancorata in testa e al piede e con una sovrapposizione di almeno 20cm tra 2 reti cucite tra loro con filo metallico.

Questa soluzione non evita il problema ma tende a far spostare le nutrie da una zona ad un'altra.



Figura 1.6 :Nutria con tana dalle dimensioni considerevoli

-La volpe

Rappresentano una grande minaccia per dighe di terra, possano causare danni allargando tane di altri animali per poterli cacciare o creando tane per la prole. Le volpi e le loro tane-fig. 1.7 -possono essere tenute sotto controllo attraverso il monitoraggio dei roditori (loro prede abituali) e la gestione della vegetazione.

Si può in oltre ricorrere alla caccia o all'avvelenamento nei casi in cui si dovesse presentare necessaria tale pratica.

Anche se in casi particolari sono state accertate densità massime fino a 5-8 volpi/km² (Lloyd, 1980; Ables, 1975), in Italia le densità medie più probabili sono state valutate nell'ordine di 1-2,5 volpi/km² nel tardo inverno, non escludendo valori anche più alti per aree ristrette (Boitani&Vinditti, 1998)

Tipicamente gli accessi delle loro tane distano una ventina di metri l'uno dall'altro

Altri animali che possono causare danni agli argini sono il tasso - fig.1.8 - e le talpe; le precauzioni da prendere per tali animali sono simili a quelle dovute alle volpi.

E' da sottolineare che le tane delle nutrie sono tipicamente posizionate lato fiume mentre quelle di voli conigli, volpi, tassi e talpe si trovano nella sponda lato campagna dell'argine.



Figura 1.7 :Volpe rossa con tana



Figura 1.8 :Tasso con tana

1.1.2.2 Condizioni del terreno per costruire le tane

Le tane di questi animali, sebbene abbiano caratteristiche diverse, necessitano di condizioni ambientali simili e in particolare servono luoghi poco disturbati, copertura di arbusti e piante possibilmente con fitto sottobosco. Mentre la golena viene intensamente coltivata per cui non esistono luoghi adatti alla costruzione di tane con caratteristiche adeguate all'animale, gli argini sono spesso trascurati e coperti da fitti cespugli. Di conseguenza, l'unico ambiente adatto alle loro necessità risultano proprio le difese arginali contro le alluvioni e le sponde del fiume o dei canali di drenaggio della falda freatica affiorante.

1.1.2.3 Caratteristiche delle tane

In genere si tratta di strutture piuttosto complesse ed articolate; per quanto riguarda il coniglio selvatico, esse sono composte da veri e propri labirinti che ospitano colonie molto numerose. Le tane del tasso e della volpe sono piuttosto ampie e profonde. La volpe molto spesso approfitta di tane lasciate da altri animali e, qualche volta, convive con loro; in particolare con il tasso. Le nutrie costruiscono tane negli argini lato fiume, perché necessitano della vicinanza dell'acqua. Per cui, le tane delle nutrie saranno quasi sempre costruite a non più di un metro dallo specchio d'acqua o dal canale vicino al quale esse vivono e, in particolare, saranno quasi sempre scavate nella sponda. Il loro impatto sarà principalmente sulle rive e sulle difese spondali immediatamente vicine all'acqua.

1.1.2.4 Interventi per la protezione degli argini dalle tane

Prima di fare un'analisi degli interventi che si possono effettuare per ridurre l'impatto di questi animali sugli argini e sulle sponde di fiumi e canali, è bene premettere alcune cose:

- il tasso e la volpe sono animali territoriali; oltre ad un certo numero di animali per unità di territorio non possono essere presenti;
- essi fanno parte della fauna autoctona della pianura Padana e, nel recente passato, grazie ad una accurata gestione delle difese da parte dell'uomo, il loro impatto sugli argini era praticamente nullo;
- il tasso, essendo un animale protetto, non può essere cacciato (Legge 11/02/1992, n.157. E' inoltre considerato specie protetta dalla Convenzione di Berna (Legge 5/8/1981, n.503).; la caccia alla volpe è regolamentata dalla legge 11/02/1992, n°157; essa è annoverata tra le specie cacciabili ma nei periodi indicati;
- la presenza della volpe sul territorio mantiene il numero dei conigli selvatici e, in modo particolare, dei topi entro limiti fisiologici;
- il tasso, oltre che di frutti, si alimenta di arvicole e parassiti. Entrambe questi animali risultano utili alla gestione dell'agricoltura in modo biologico.

Il primo e più importante intervento da effettuare per ridurre i danni da costruzione di tane, è la pulizia degli argini. La mancanza di copertura di alberi e cespugli, quindi di difese, scoraggerà la maggior parte di questi animali dal costruire una tana sulle sponde degli argini.

Il grande problema resta comunque la gestione della golena con un'agricoltura di tipo intensivo senza che vengano lasciati spazi minimi per creare habitats adatti a questi animali.

Oltre alla pulizia degli argini da piante ed arbusti, sarebbe opportuno che in golena vengano costituite aree, anche di superficie limitata, con copertura di cespugli in modo tale che tassi, volpi e conigli trovino un ambiente adatto alla costruzione delle loro tane. La forma ideale per questi spazi è, molto probabilmente, la siepe campestre- fig. 1.9 -. Questa forma di piantumazione è compatibile con la gestione agricola della golena e, nello stesso tempo, può costituire fonte di reddito per l'agricoltore e difesa delle colture adiacenti alla siepe stessa.



Figura 1.9 :Esempio di siepe campestre

Le numerose funzioni delle siepi campestri possono essere riassunte brevemente come segue:

- difendono le colture dal vento,
- sono ambienti di vita ideali per animali utili all'agricoltore,
- consolidano il suolo; in golenia possono essere utilizzate in aree particolarmente soggette alle correnti di piena per ridurre la forza erosiva del fiume,
- esercitano degli effetti benefici sui corsi d'acqua,
- producono legna da ardere e legname da lavoro,
- abbelliscono il paesaggio,
- offrono ospitalità alla fauna selvatica,
- offrono prodotti alimentari.

Un altro intervento importante potrebbe essere la riduzione dell'attività venatoria nelle aree golenali e, soprattutto, l'interruzione del rilascio annuale di specie cacciabili alcuni mesi prima dell'inizio dell'attività venatoria. Questo tipo di attività ha un forte impatto sulla densità delle volpi che, in presenza di cibo abbondante e facilmente accessibile, riducono l'ampiezza del loro territorio incrementando il numero di animali per chilometro quadrato e aumentano il numero dei nuovi nati per cucciolata.

Infine, una maggior attenzione alla gestione dei rifiuti potrebbe migliorare sensibilmente l'aspetto degli argini e della golenia e, nello stesso tempo ridurre la densità degli animali che se ne cibano sia direttamente sia tramite le catene alimentari (es: volpi che mangiano

direttamente i rifiuti lasciati in golena oppure rifiuti favoriscono l'incremento di topi e arvicole che costituiscono il cibo principale delle volpi e dei tassi). In particolare, potrebbe essere utile che i pescatori riducessero le operazioni di pasturazione del pesce evitando soprattutto di lasciare residui alimentari lungo le rive del fiume o degli stagni che, oltre ad alimentare direttamente topi e ratti, favoriscono la proliferazione delle nutrie.

1.2 La filtrazione

Con il termine filtrazione si intende il moto di un fluido in un mezzo poroso. Il moto del fluido all'interno delle cavità del terreno risulta essere molto lento ed il contributo dell'energia cinetica all'energia totale posseduta dal fluido è per questo spesso trascurato.

La filtrazione dell'acqua nei terreni pone vari problemi di tipo ingegneristico, che possono causare il collasso o compromettere la funzionalità di manufatti per effetto di fenomeni di:

- erosione dell'alveo in prossimità delle spalle dei ponti,
- sifonamento in prossimità di diaframmi e palancole,
- sollevamento del fondo scavo in corrispondenza di scavi,
- instabilità ed erosione in corrispondenza di dighe in terra,
- instabilità in corrispondenza di argini fluviali,
- ribaltamento o sollevamento di opere di sostegno per effetto della spinta e della sottospinta idraulica.

L'energia di ogni punto nel terreno attraversato dal fluido viene espressa secondo la quota piezometrica h^* :

$$h^* = h + p/\gamma$$

Dove h è l'altezza in metri del fluido, p è il valore della pressione nel punto considerato e γ è il peso specifico.

L'energia piezometrica risulta essere costante lungo la verticale al moto poiché si ha distribuzione idrostatica della pressione. Il secondo membro della seconda equazione di Eulero risulta infatti nullo perché il quadrato della velocità, essendo di piccola entità, è trascurabile rispetto agli altri termini dell'equazione.

Il moto di filtrazione avviene poiché vi è un gradiente di quota piezometrica h^* nella direzione del moto.

La legge che descrive come avviene il moto di filtrazione all'interno di un mezzo poroso è la Legge di Darcy, un'equazione lineare che relaziona la velocità alla dissipazione di energia tramite una costante k detta coefficiente di permeabilità.

$$V = ki$$

Dove "i" è il gradiente idraulico e "k" il coefficiente permeabilità (o di conducibilità idraulica).

1.2.1 Coefficiente di permeabilità

Il coefficiente di permeabilità k , che dimensionalmente è una velocità, può assumere diversi valori in funzione delle caratteristiche geotecniche del terreno e rappresenta la capacità di un terreno di opporsi al moto di filtrazione del fluido:

mezzo poroso	k (m/s)
Ghiaia	$10^{-2} - 10$
Sabbia mista a ghiaia minuta	$10^{-3} - 10^{-2}$
Sabbia pulita	$10^{-5} - 10^{-3}$
Argilla	$10^{-8} - 10^{-4}$
Limo	$10^{-8} - 10^{-6}$

Tabella 1.1 : Valori tipici di permeabilità per diversi tipi di terreno

1.2.1.1 Misura coefficiente di permeabilità

Il coefficiente k può essere stimato tramite prove di laboratorio o in sito.

In laboratorio si può utilizzare un particolare dispositivo detto permeametro- fig. 1.10 -. Questo strumento, è costituito da un tubo in cui viene inserito un campione del terreno, prelevato cercando di mantenerlo il più possibile indisturbato, che viene fatto attraversare per gravità da una portata liquida.

All'inizio ad alla fine del campione vengono posti due piezometri il cui dislivello di quota piezometrica (h_1 ; h_2) indica quanta energia si è dissipata durante la filtrazione.

Dal rapporto tra il dislivello di quota piezometrica e la lunghezza del provino otteniamo il valore del gradiente idraulico. La velocità di filtrazione è determinata dividendo il valore della portata di filtrazione Q , misurata con idoneo strumento, per l'area A della sezione del tubo. Tramite la legge di Darcy si determina infine il valore del coefficiente di filtrazione:

$$i = \frac{h_1 - h_2}{L}$$

$$k = \frac{V}{i} = \frac{QL}{A(h_1 - h_2)}$$

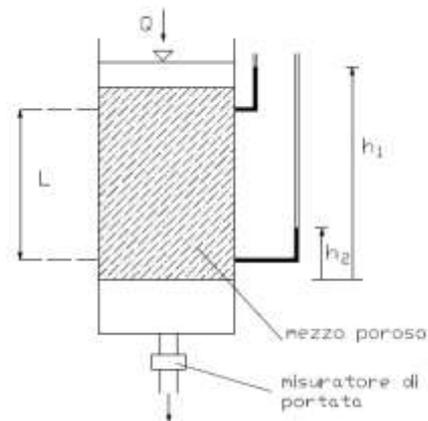


Figura 1.10 :Permeametro

Esistono poi permeametri differenti in base al diverso tipo di terreno che si deve analizzare: permeametri a carico costante per i terreni sabbiosi, permeametri a carico variabile per i terreni limo-argillosi.

In sito, invece, il coefficiente di filtrazione può essere stimato con il metodo classico che consiste nel misurare le quote piezometriche di una falda in tre pozzi, relativamente vicini, in modo da poter determinare, interpolando i valori, l'andamento della falda. La velocità di filtrazione viene stimata introducendo un fluido tracciante nel pozzo di monte e misurando il tempo che occorre al tracciante nel passare negli altri due pozzi. Nota la distanza tra i due pozzi ed il tempo impiegato al tracciante per raggiungerli discende la componente della velocità e quindi il valore della velocità stessa. Da questo valore e dalla stima del gradiente idraulico, mediante la legge di Darcy, si calcola il coefficiente di filtrazione k .

1.2.2 Reticoli idrodinamici

La filtrazione ed i suoi moti possono essere studiati con la costruzione di reticoli idrodinamici.

Assumendo un ipotesi di omogeneità ed isotropia del valore del coefficiente di filtrazione k , costante in ogni direzione ed in ogni punto del mezzo poroso, è possibile per una qualsiasi direzione s generica scrivere la legge di Darcy nel seguente modo:

$$V = k i = k \frac{\delta h}{\delta s} = \frac{\delta kh}{\delta s}$$

La genericità della direzione s permette l'introduzione della funzione potenziale di velocità:

$$\phi = k h + \cos t$$

per cui essendo:

$$\frac{\delta \phi}{\delta s} = \frac{\delta kh}{\delta s} = k \frac{\delta h}{\delta s}$$

si può esprimere la velocità con la seguente espressione:

$$V = \frac{\delta \phi}{\delta s}$$

Una linea per cui Φ è costante è denominata linea equipotenziale. Indicata con n la normale ad una linea equipotenziale si ha:

$$\frac{\delta \phi}{\delta n} = 0$$

Con riferimento alla - fig 1.11 - se si considerano due percorsi diversi s_1 ed s_2 si ottengono due valori diversi delle velocità, in quanto anche se abbiamo che il salto di potenziale $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ per i due percorsi risulta essere uguale si ha che se $s_1 < s_2$ allora $V_1(\Delta\Phi/s_1) > V_2(\Delta\Phi/s_2)$ ed $i_1(V_1/k) > i_2(V_2/k)$. Poiché l'acqua, a parità di dissipazione di energia segue la strada a maggiore pendenza, ovvero a maggiore gradiente idraulico, la velocità di filtrazione risulta essere perpendicolare alla linea equipotenziale. Di conseguenza le linee equipotenziali e le linee di corrente (o di flusso) sono tra loro ortogonali.

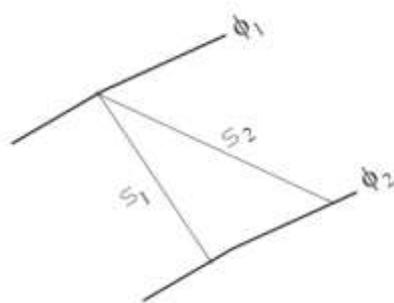


Figura 1.11

L' introduzione delle linee equipotenziali e delle linee di corrente permette di tracciare il reticolato di flusso.

Il reticolato di flusso è costituito dall' involuppo di tutte le linee equipotenziali e di corrente relativo ad un determinato moto di filtrazione.

In particolare se si considerano due linee equipotenziali, con potenziali diversi tra loro, tracciando due linee di corrente distanti tra loro di un determinato valore si ottiene una maglia del reticolo di flusso. Questa maglia ha la particolare proprietà di avere le diagonali congiungenti i vertici opposti tra loro perpendicolari in modo che la lunghezza e la larghezza della maglia coincidano. La maglia, essendo delimitata da due linee di corrente, si può considerare come un tubo di flusso.

1.2.2.1 Costruzione grafica del reticolo idrodinamico

Per la determinazione grafica di come varia il carico piezometrico, una volta assegnate le condizioni al contorno, si disegna il reticolo di filtrazione - fig.1.12 -, costituito dalle due famiglie di curve che si intersecano ad angolo retto:

-le linee di flusso, cioè i percorsi dei filetti fluidi nella sezione trasversale considerata, tangenti in ogni punto alla velocità del fluido

-le linee equipotenziali, cioè le linee di uguale energia potenziale e quindi di uguale carico idraulico.

La costruzione grafica non è univocamente determinata, ma si effettua soggettivamente, nel rispetto di alcuni principi fondamentali, per tentativi. L'imprecisione nel calcolo della portata di filtrazione derivante dall'approssimazione è comunque minore dell'incertezza sul valore del coefficiente di permeabilità.

Le linee di flusso ed equipotenziali sono infinite nella soluzione grafica se ne scelgono un numero limitato. Lo spazio tra due linee di flusso consecutive si chiama canale o tubo di flusso, attraverso il quale scorre una portata costante Δq .

La distanza tra due linee di equipotenziali consecutive misura la perdita di energia Δh del fluido nell'attraversare lo spazio tra esse compreso. L'area delimitata da due linee di flusso successive e da due linee equipotenziali successive si chiama campo.

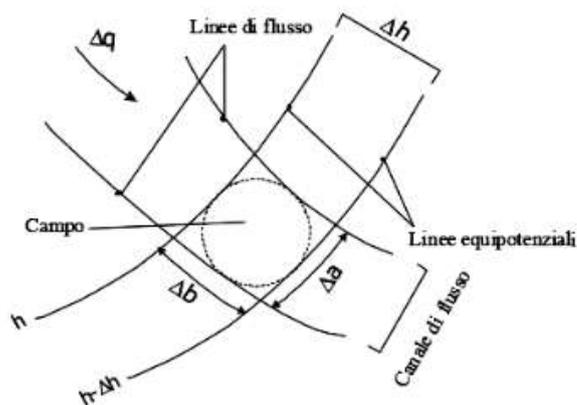


Figura 1.12 :costruzione del reticolato di flusso

Per la costruzione del reticolo di filtrazione, e la scelta quali e quante linee di flusso ed equipotenziali rappresentare, occorre che i canali di flusso abbiano eguale portata Δq , che la perdita di carico fra due linee equipotenziali successive Δh sia costante e che i campi

flusso consecutive e Δb la distanza media tra due linee equipotenziali successive, risulta che: il gradiente idraulico per un singolo campo

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta b} = \frac{h}{N \cdot \Delta b}$$

la velocità di filtrazione in un singolo campo:

$$v = k \cdot i = \frac{k \cdot h}{N \cdot \Delta b}$$

la portata di filtrazione per ogni canale di flusso

$$\Delta q = v \cdot \Delta a = \frac{k \cdot h \cdot \Delta a}{N \cdot \Delta b} \cong \frac{k \cdot h}{N}$$

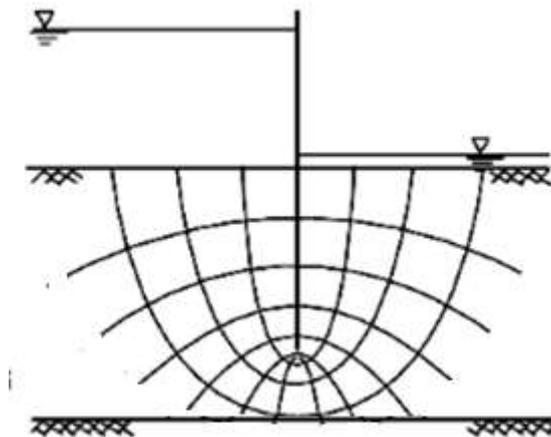


Figura 1.14 : Reticolato di flusso

Naturalmente la procedura è iterativa, in quanto una volta disegnate le linee equipotenziali di primo tentativo, nel disegnare le linee di flusso in modo che siano rispettate le condizioni precedenti, occorrerà modificare più volte la disposizione delle linee equipotenziali.

1.2.3 Effetti della filtrazione

Un moto di filtrazione che si instaura attraverso un corpo arginale può dare origine a fenomeni di instabilità e l'eventuale presenza di tane o, più in generale di vie preferenziali di deflusso, forniscono un ulteriore grado di rischio.

Si possono formare inizialmente dei fenomeni localizzati, chiamati tipicamente “fontanazzi”, al piede dei rilevati arginali sul lato campagna.

In seguito all’instaurarsi di fenomeni di erosione interna le aperture si possono allargare fino a provocare il cedimento, per fenomeni di scivolamento, dei paramenti lato campagna oppure l'eventuale sprofondamento della parte sommitale dell'argine all'interno della cavità precedentemente formatasi nel corpo arginale.

L’origine dei fenomeni di instabilità è quasi sempre riconducibile ai moti di filtrazione generatisi all'interno degli argini.

Le possibili cause di rotture arginali dovute ai moti di filtrazione (*seepage*) vengono indicate genericamente, nella classica letteratura italiana, col nome di “sifonamento”.

In altri paesi, con maggiore rigore, tali fenomeni vengono più specificatamente indicati col nome di “piping”, caratterizzato dall’erosione e dal trasporto di materiale all’interno dell’argine o “heaving”, caratterizzato dal sollevamento del terreno di fondazione dove il gradiente idraulico e la velocità di filtrazione assumono valori critici.

1.2.3.1 Fenomeno del piping

Uno dei principali problemi di erosione è il piping - fig. 1.15 -, un fenomeno dinamico che si sviluppa generalmente all’interno del terreno di fondazione o del rilevato o tra rilevato e fondazione.

Tale fenomeno causa la rimozione delle particelle di terreno, iniziando con la frazione più fina o con quella di minore peso specifico, fino ad arrivare all’asportazione dei materiali più grossolani .

Ha inizio sul lato campagna sotto forma di piccole sorgenti di acqua e terreno chiamati “fontanazzi”.

Il fenomeno di erosione tende ad estendersi verso monte andando ad autoalimentarsi con un meccanismo di tipo regressivo. Infatti l’asportazione di materiale di piccola dimensione permette la creazione di un piccolo canale nel quale la velocità d’acqua cresce all’aumentare del materiale asportato; più materiale viene eroso maggiore è la dimensione

del canale e maggiore è la velocità dell'acqua che più facilmente andrà ad asportare altro materiale ingrandendo ulteriormente il canale.

Il tutto può portare alla creazione di grosse cavità nell'argine e alla sua conseguente instabilità.

L'unico provvedimento possibile, in questi casi, consiste nell'arginare la sorgente lato campagna tramite l'utilizzo di opere provvisoriale in terra o mediante l'ausilio di sacchetti in juta o plastica riempiti con sabbia o materiale diverso.

Tale procedimento permette di ottenere la riduzione del dislivello idraulico che aveva innescato il processo di piping.

Il sistema di sacchettatura deve essere considerato solo provvisorio e di emergenza, infatti una volta fermato il processo di erosione si deve intervenire con opere di diaframmatatura o impermeabilizzazione vere e proprie.

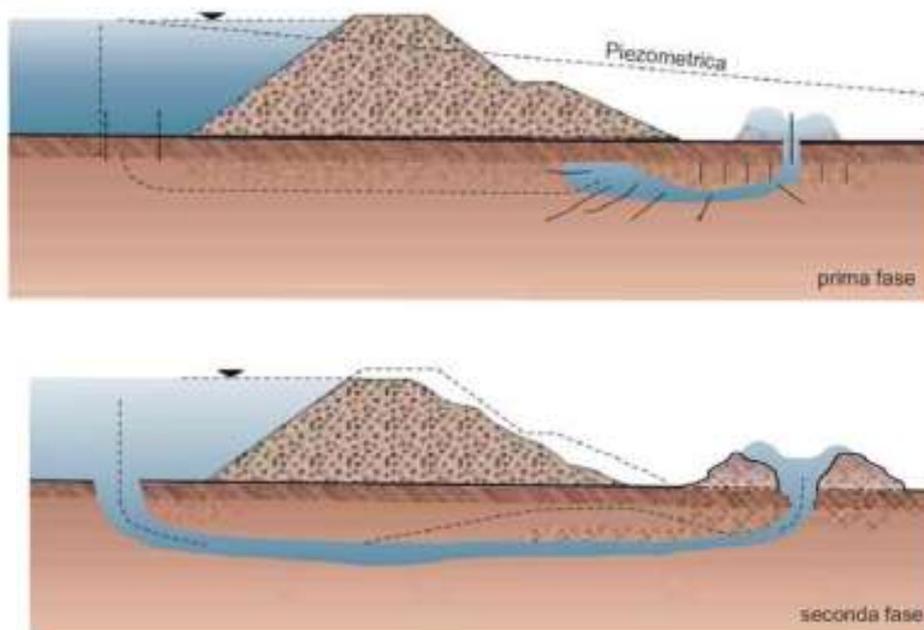


Figura 1.15 : Fenomeno del piping

E' possibile individuare la condizione di innesco del piping valutando il valore del gradiente idraulico ovvero quando esso raggiunge il suo valore critico.

Esistono diversi studi nonché diverse pubblicazioni fatte sull'argomento che trattano in maniera più o meno approfondita il fenomeno del piping.

Alcuni studi condotti da J.L.Sherard hanno dimostrato il fenomeno dell'auto alimentazione del piping che trasforma piccoli tubi di infiltrazione in vere e proprie gallerie sotterranee.

Altri come Zyl e Harr, Bligh (1927) e Lane (1935) e Casagrande hanno condotto vari studi per capire il comportamento e i motivi d'insuccesso del piping e dei valori del gradiente idraulico .

Una formula tipicamente utilizzata per il calcolo del gradiente critico è la seguente:

$$i_c = \frac{\tau_c}{2,828\gamma_w} \left(\frac{n}{k} \right)^{0,5}$$

dove n rappresenta la porosità; k rappresenta la permeabilità intrinseca del materiale, $\gamma_w = 9806 \text{ N/m}^3$ è il peso specifico dell'acqua e ζ che rappresenta la tensione di taglio critico ricavabile per terreni granulari con la formula proposta da Lane $\zeta_c = 10d_5$ (dove è espresso in millimetri il diametro).

Studi più moderni condotti da Sellmeijer (1988) e da Sellmeijer e Koenders (1991) hanno permesso di affermare che il pericolo di rottura dell'argine legato al piping risulta essere rilevante quando la lunghezza del canale eroso, che si è sviluppato partendo dal lato-campagna dell'argine, è più grande della metà della lunghezza della base del rilevato.

1.2.3.1.1 Soluzioni ai problemi di piping

Come detto in precedenza un miglioramento ed un eventuale soluzione al problema di sicurezza legato al piping può essere ottenuto con l'uso di diaframmi, i quali permettono di allungare il percorso delle linee di corrente andando così a ridurre il gradiente idraulico. Una riduzione del gradiente idraulico può essere ottenuta anche grazie alla posa di filtri alla base degli argini, permettendo di indirizzare e controllare la filtrazione ed il suo gradiente.

1.2.3.4 Fenomeno dell'heaving

1.2.3.4.1 Teoria di Terzaghi

I primi studi sull'heaving furono condotti da Terzaghi (1929) che sviluppò criteri semplici e basilari per poter effettuare le verifiche delle opere, tipicamente scavi con diaframmi, in sicurezza dai moti di filtrazione.

Il suo studio si basa sul controllo del gradiente idraulico critico rapportato a quello medio.

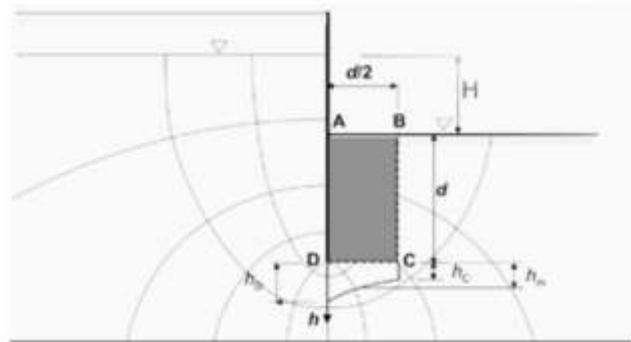


Figura 1.16 :Heaving secondo Terzaghi

1.2.3.4.1.1 Gradienti e coefficienti di sicurezza

Il gradiente critico (i_c) è dato dal rapporto tra il peso specifico (γ') del terreno secco ed il peso specifico dell'acqua (γ_w)

$$i_c = \gamma' / \gamma_w$$

Il gradiente medio (i_m) è il rapporto tra il carico da dissipare (h_m) e la lunghezza di terreno disponibile per la dissipazione (d).

$$i_m = h_m / d$$

Si avrà così che il coefficiente di sicurezza al sollevamento (FS) risulta essere pari a

$$FS = i_c / i_m$$

Per avere condizioni di sicurezza accettabili FS dovrà essere maggiore di un determinato valore.

Diversi autori hanno elaborato differenti valori del coefficiente di sicurezza che vengono di seguito elencati:

- FS = 2,0 (G. Supino, "Le reti idrauliche", 1965);
- FS = 2,54 (U. Maione: "La sistemazione dei corsi d'acqua montani", 1998);
- FS = 3-5 ("Manuale di Ingegneria Civile" – Sezione Terza, 1983);
- FS = 4-5 (Da Deppoet. al., "Sistemazione dei corsi d'acqua", 1997);
- FS = 6-7 per sabbia media e fine (Khosla, Bose e Taylor, "Design of Weirs on Permeable Foundations", New Delhi, 1954)

Allo stesso risultato si giunge facendo il rapporto tra il peso efficace dell'elemento di terra asciutta soggetto al sollevamento (colorata in grigio nella - fig. 1.16-) e la spinta dell'acqua, che agisce dal basso verso l'alto, su metà della profondità di infissione del diaframma ($d/2$).

$$FS = \frac{\frac{1}{2}\gamma' d^2}{\gamma_w h_w d/2}$$

Per il calcolo di h_w occorre tracciare, preliminarmente, il reticolo idrodinamico nel mezzo poroso in cui sta avvenendo la filtrazione.

In caso di terreni argillosi-limosi il problema del sollevamento in genere non si presenta, poiché grazie anche a piccoli valori di coesione presenti nel terreno si genera l'impossibilità all'asportazione del terreno.

1.2.3.4.2 Teoria di Lane

Un altro principio per studiare il fenomeno del heaving è la teoria di Lane, soprattutto quando si vanno a considerare opere dotate di taglioni, quali ad esempio le traverse fluviali.

I taglioni servono ad allungare i percorsi di filtrazione e diminuire il gradiente idraulico medio.

I primi studi in questo campo furono condotti da Bligh (1910) che semplicemente valutò il coefficiente di filtrazione come il rapporto tra la lunghezza del percorso ed il carico idraulico

$$C = \frac{L}{h}$$

Si confronta poi il valore di C con la seguente tabella in base ai tipi di materiali.

Fango o limo	20
Sabbia fine	15
Sabbia medio-grossa	10
Ghiaia	5
Argilla media	6
Argilla compatta	3

Tabella 1.2 : Valori tipici coefficiente di Bligh

In base al tipo di terreno in esame, per non avere i fenomeni di heaving, è necessario che il valore C ottenuto dalla formula risulti essere maggiore del valore di C presente nella tabella.

Lane (1935) successivamente andò a rielaborare la precedente formula tenendo conto della diversa permeabilità degli strati a seconda che la filtrazione avvenga in senso verticale od orizzontale.

Infatti la permeabilità orizzontale di un materiale risulta essere, in media, un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella verticale.

Lane elaborò quindi la seguente formula:

$$C = \frac{1/3 L_o + L_v}{h}$$

Dove L_o e L_v rappresentano la lunghezza dei percorsi orizzontali e verticali e h è il carico idraulico.

Il coefficiente C viene poi confrontato con la seguente tabella

Sabbia molto fine o limo	8.5
Sabbia fine	7.0
Sabbia media	6.0
Sabbia grossa	5.0
Ghiaia fine	4.0
Ghiaia media	3.5
Ghiaia grossa con ciottoli	3.0
Massi con ciottoli e ghiaia	2.5
Argilla molle	3.0
Argilla media	2.0
Argilla compatta	1.8
Argilla molto compatta	1.6

Tabella 1.3 : Valori tipici coefficiente di Lane

Anche in questo caso, per non avere fenomeni di heaving, il coefficiente ottenuto dalla formula deve risultare superiore al rispettivo coefficiente in tabella.

Come si può notare il coefficiente per le argille risulta essere molto basso, quindi la verifica risulta essere quasi sempre soddisfatta.

Tipicamente si va a progettare seguendo la formula proposta da Lane ed a verificare con il metodo di Terzaghi.

2.0 Terreni soggetti a parziale saturazione

Quanto precedentemente detto sullo studio degli argini in condizioni di saturazione totale, quindi attraverso le condizioni di moto stazionario, risulta essere un'errata rappresentazione della realtà.

Infatti anche se lo studio in condizioni sature risulta essere più facile, diretto e veloce non va a rappresentare il corretto comportamento di un argine.

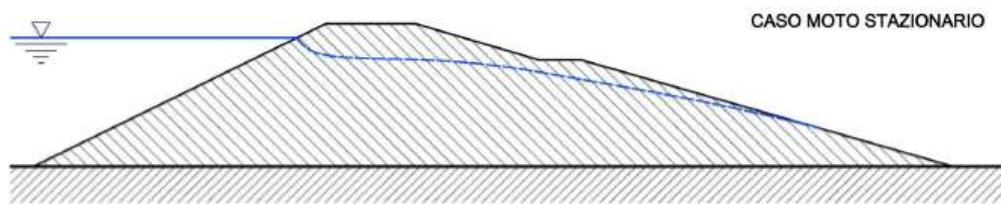


Figura2.1 :Linea piezometrica in moto stazionario

L'argine nella maggior parte dei casi risulterà essere privo di acqua al suo interno e solo in caso di piena prolungata per un adeguato numero di giorni la linea d'infiltrazione seguirà lo schema in - fig.2.2-.

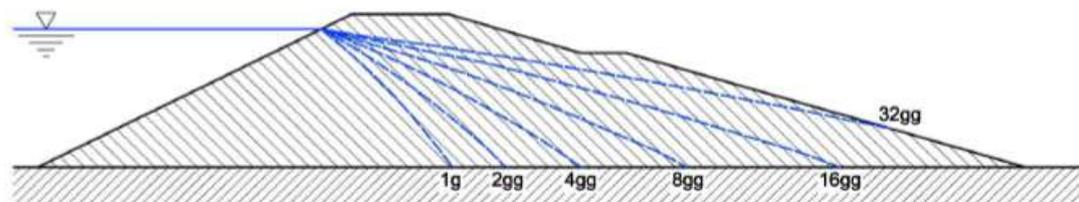


Figura2.2 :Linea piezometrica in moto transitorio

L'acqua che si infila attraverso l'ammasso arginale non è visibilmente percepibile e di conseguenza i danni che può provare (piping e instabilità arginale) sono difficilmente prevedibili. Prima di tutto interessa quantificare l'acqua filtrante nel rilevato; ovvero conoscere il regime di pressioni neutre che si sono sviluppate durante un evento di piena, sia nel corpo arginale che nel terreno di fondazione, per poi costruire un reticolo idrodinamico in funzione della permeabilità dei materiali costituenti l'argine ed il terreno di fondazione.

Le classiche teorie sullo studio dei terreni, ad esempio quella di Terzaghi, si basano sul fatto che il terreno risulti essere o saturo o asciutto, nella realtà queste due condizioni

rappresentano solo gli estremi di un range di possibili valori che tipicamente il terreno può assumere

Nel caso di teoria alla Terzaghi, con falda freatica, la variabile principale risulta essere la tensione efficace principale (σ') la quale sotto il livello della falda in condizione di totale saturazione risulta essere pari a:

$$\sigma' = \sigma - u_w$$

dove σ è la tensione totale e u_w il valore della pressione dell'acqua nel terreno.

Se si considera ora la zona sopra il livello della falda in condizioni di parziale saturazione bisogna considerare due differenti variabili, tra loro indipendenti.

- $\sigma - u_a$ nota come tensione netta
- $u_a - u_w$ nota come suzione di matrice

Dove la u_a rappresenta il valore della pressione dell'aria nei pori del terreno.

Di conseguenza nei terreni in parziale saturazione è di fondamentale importanza il valore della pressione dell'aria e dell'acqua.

Una delle prime relazioni del comportamento meccanico di un terreno soggetto a parziale saturazione è stata proposta da Bishop (1959) ed è la seguente :

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \lambda (u_a - u_w)$$

Dove :

- $(\sigma - u_a)$ è la differenza tra la tensione totale e la pressione dell'aria
- λ è un parametro sperimentale funzione del grado di saturazione
- $(u_a - u_w)$ è la suzione di matrice

Nel caso di terreni completamente saturi ($u_a = 0$) la relazione di Bishop torna a coincidere con quella proposta da Terzaghi

Un esempio classico di zona a parziale saturazione si ha in un terreno soggetto a falda freatica.

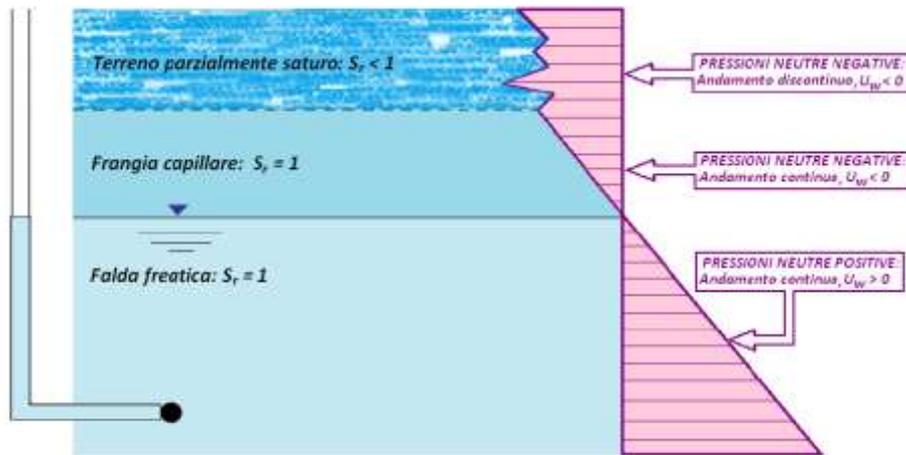


Figura 2.3 : Andamento delle pressioni neutrali

Come si vede nella - fig. 2.3 - l'andamento delle pressioni al di sotto della falda è positiva ed il terreno è saturo mentre, al di sopra di essa, la pressione interstiziale risulta essere negativa, ovvero minore della pressione atmosferica.

La porzione di terreno al di sopra della falda è chiamata zona parzialmente satura o vadosa.

In particolare al di sopra della falda bisogna andare a distinguere due zone :

- una immediatamente al di sopra del livello di falda, detta frangia capillare interessata dal fenomeno di capillarità, è caratterizzata da un grado di saturazione elevato spesso superiore dell'85 % ed ha uno spessore molto variabile da pochi ad una decina di metri a seconda della tipologia di terreno e delle condizioni ambientali;

- un ulteriore porzione di terreno, nella quale sia la fase aerea che quella liquida possono coesistere con livelli di saturazione variabili dal 20 all' 80 % è la zona della doppia fase.

Il terreno al di sopra di questa fase diventa sempre più asciutto fino al valore di saturazione nullo.

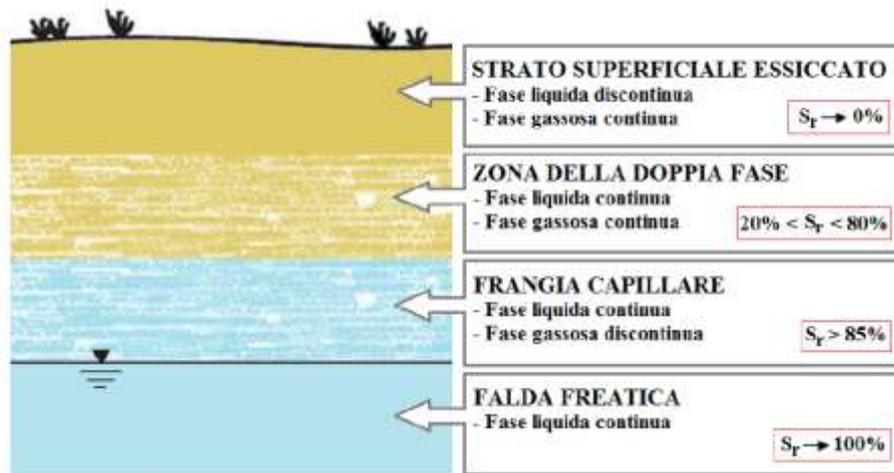


Figura2.4 :Suddivisione in zone a diversa saturazione

La posizione della falda freatica, e quindi delle zone sovrastanti, risulta essere influenzata notevolmente dalle condizioni climatiche; variando notevolmente di posizione a seconda del clima della zona, spingendosi in prossimità della superficie in zone temperate o umide ed allontanandosi in profondità nelle zone secche e calde.

Dunque i cambiamenti climatici e le caratteristiche della vegetazione, che tramite le loro radici permettono di attirare verso la superficie il livello della falda, inducono fenomeni di contrazione e rigonfiamento dei depositi di terreno, e cioè grandi varietà di distribuzioni delle pressioni dell'acqua dei pori in funzione della profondità. Ciò è materia di indagine geotecnica in quanto tali fenomeni influenzano in maniera considerevole le condizioni al contorno che riguardano la stabilità delle opere di ingegneria superficiali interagenti con la zona vadosa.

Come già detto, in un terreno parzialmente saturo, a causa della tensione superficiale, la pressione dell'acqua nei pori (u_w) risulta essere sempre inferiore alla pressione dell'aria nei pori (u_a). La differenza tra la pressione dell'aria, che in condizioni naturali è pari alla pressione atmosferica, e la pressione dell'acqua nei pori è detta suzione di matrice:

$$s = (u_a - u_w)$$

dove:

$u_w < u_a$ e posto $u_a = 0$, risulta $s = -u_w > 0$.

2.1 Suzione totale, osmotica e di matrice

Un terreno non saturo posto a contatto con acqua libera e pura a pressione atmosferica tende a richiamare acqua per effetto della suzione totale, ϕ .

La suzione totale, ϕ , ha due componenti:

- la prima componente è la suzione di matrice, s , associata al fenomeno della capillarità;
- la seconda componente è la suzione osmotica, π , dovuta alla presenza di sali disciolti nell'acqua interstiziale e quindi alla differenza di potenziale elettro-chimico tra l'acqua interstiziale e l'acqua libera:

$$\phi = s + \pi$$

In definitiva

- la suzione totale, ϕ , è la pressione negativa (ovvero inferiore alla pressione atmosferica) cui deve essere soggetta l'acqua pura in modo da essere in equilibrio attraverso una membrana semipermeabile (permeabile cioè alle sole molecole d'acqua ma non ai sali) con l'acqua interstiziale;
- la suzione di matrice, s , è la pressione negativa cui deve essere soggetta una soluzione acquosa identica in composizione all'acqua interstiziale, in modo da essere in equilibrio, attraverso una membrana permeabile con l'acqua interstiziale;
- la suzione osmotica, π , è la pressione negativa cui deve essere soggetta l'acqua pura in modo da essere in equilibrio, attraverso una membrana semipermeabile con una soluzione acquosa identica in composizione all'acqua interstiziale.

La suzione osmotica è presente sia nei terreni saturi che nei terreni parzialmente saturi, e varia con il contenuto salino dell'acqua, ad esempio come conseguenza di una contaminazione chimica, producendo effetti in termini di deformazioni volumetriche e di variazioni di resistenza al taglio.

Tuttavia la maggior parte dei problemi di ingegneria geotecnica che coinvolgono terreni non saturi sono riferibili a variazioni della sola suzione di matrice, come ad esempio gli effetti della pioggia sulla stabilità dei pendii o sui cedimenti delle fondazioni superficiali.

In - fig.2.5 - sono messe a confronto le variazioni di suzione totale, ϕ , suzione di matrice, s , e suzione osmotica, π , con il contenuto d'acqua, w , di un'argilla: si osserva che π rimane pressoché costante al variare di w , e quindi per un assegnata variazione di contenuto d'acqua Δw si ha $\Delta \phi \approx \Delta s$.

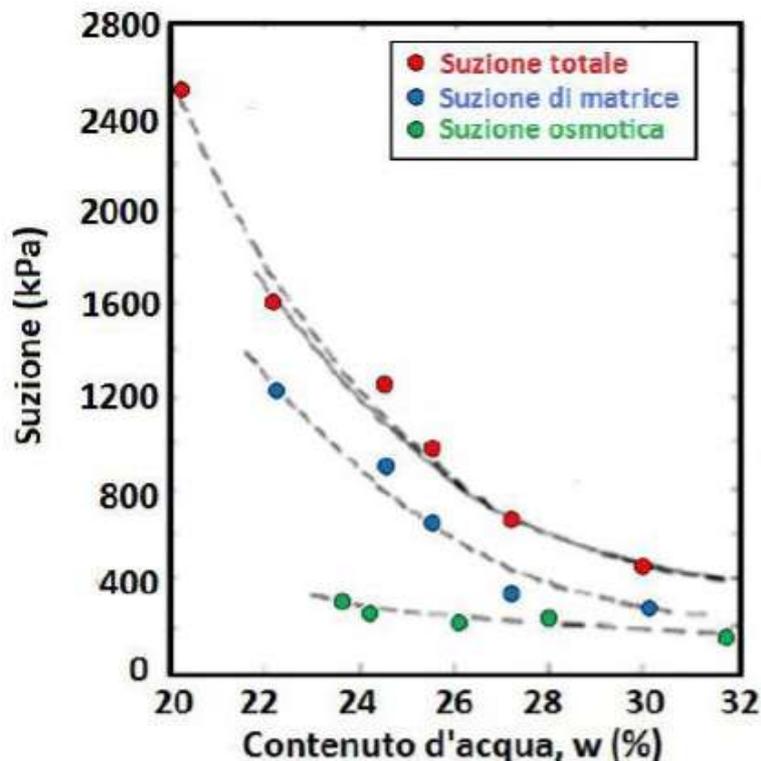


Figura2.5 :Suzione e contenuto d'acqua

2.1.1 Misurazione della suzione

Uno dei metodi per la misura della suzione di matrice in sito è quello dei tensiometri. Il tensiometro è composto da un tubo avente ad una estremità una punta in materiale ceramico poroso, ed all'altra un serbatoio sigillato contenente acqua. La punta del tensiometro è infissa nel terreno. L'acqua contenuta nel tubo, per effetto della suzione, filtra attraverso la ceramica porosa e determina una depressione nel serbatoio dell'acqua, rilevabile con un manometro. La pressione di equilibrio del sistema corrisponde alla suzione nel terreno.

Il metodo è semplice, ma il campo di misura della suzione è limitato, a circa 80-90 kPa, dalla possibilità di cavitazione dell'acqua nel tensiometro.

Esistono diverse tecniche di misura della pressione negativa dell'acqua (manometri acqua-mercurio, trasduttori elettrici di pressione, ecc..), in generale gli strumenti di maggiore sensibilità hanno tempi di risposta più lunghi.

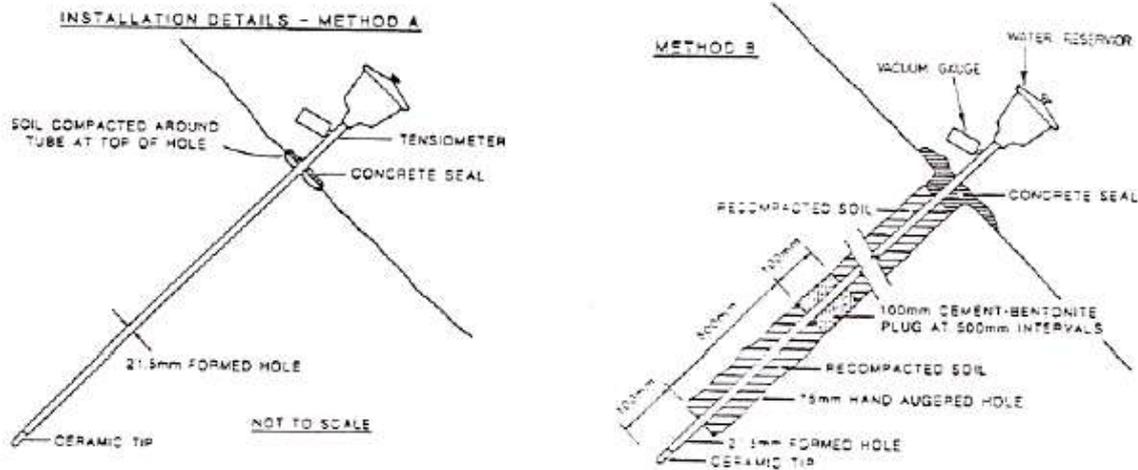


Figura 2.6 : Strumenti per la misurazione della suzione

2.2 Curve di ritenzione idrica

La curva di ritenzione idrica SWRC (Soil Water Retention Curve), anche nota come SWCC (Soil Water Characteristic Curve) definisce la relazione fra la suzione di matrice e una misura della quantità di acqua presente nel terreno, che può essere opportunamente scelta fra:

- il contenuto d'acqua in peso: $w = P_w/P_s \times 100$
- il contenuto d'acqua in volume: $\theta = V_w/V = S_r \times n$
- il grado di saturazione: $S_r = V_w/V_v \times 100$

La curva di ritenzione idrica è generalmente rappresentata in un piano semilogaritmico, avente in ascissa il valore della suzione e in ordinata il valore della variabile di misura della quantità d'acqua nel terreno.

La forma tipica di una SWCC è rappresentata in - fig. 2.7-

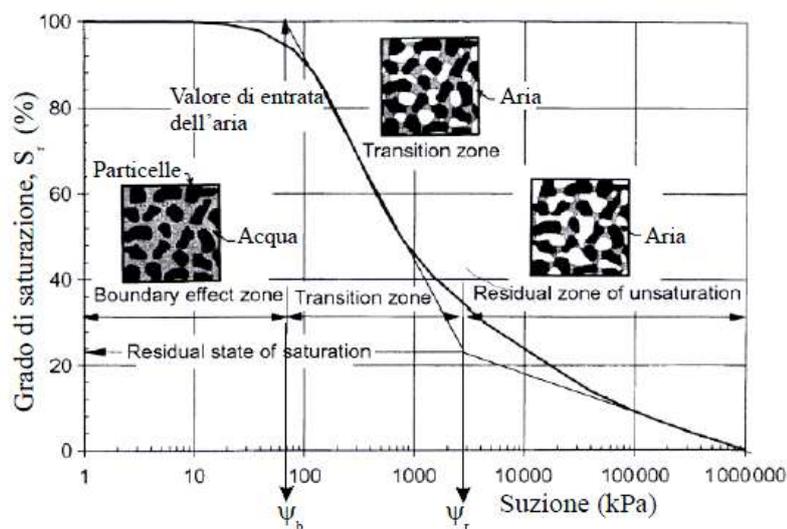


Figura2.7 :Forma tipica di una curva SWCC

Al crescere della suzione si individuano tre differenti parti della curva.

Nella prima parte, boundary effect zone, dove sono bassi i valori di suzione, il terreno è saturo e un aumento di suzione non produce diminuzioni significative del grado di saturazione, si ha così un andamento pressoché orizzontale della curva.

La prima parte ha termine per quel valore della suzione che corrisponde alla formazione delle prime bolle d'aria nei pori più grandi del terreno. Tale valore, detto "di entrata dell'aria", air-entry value, è indicato con il simbolo $(u_a - u_w)_b$, o anche Ψ_b .

Nella seconda parte, detta di transizione, transition zone, la fase liquida diviene discontinua al crescere della suzione e la quantità d'acqua nel terreno si riduce.

Nella terza parte, detta residua di non saturazione, residual zone of unsaturation, l'andamento di suzione e della quantità d'acqua non è più diretto; a grandi incrementi di suzione corrispondono piccole riduzioni della quantità d'acqua nel terreno. Il valore della suzione corrispondente al passaggio dalla seconda alla terza parte della curva, ovvero alla quantità d'acqua residua, è indicato con il simbolo Ψ_r .

La forma della curva di ritenzione dipende dalla dimensione dei pori e quindi dalla composizione granulometrica e dallo stato di addensamento del terreno

Essa si differenzia infatti a seconda la tipologia di terreno:

- nei terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie), che hanno pori interconnessi e di grandi dimensioni, si hanno bassi valori di Ψ_b e Ψ_r , e l'andamento della curva è molto ripido nella zona di transizione;

- nei terreni caratterizzati da forti legami elettro-chimici come le argille o nei terreni a grana fine in generale, la curva è caratterizzata da alti valore della suzione di entrata dell'aria, Ψ_b , e da una minore pendenza zona di ritenzione ed in quella di transizione. Inoltre, per i terreni argillosi, spesso non è definibile la quantità d'acqua residua, e quindi il valore di Ψ_r .

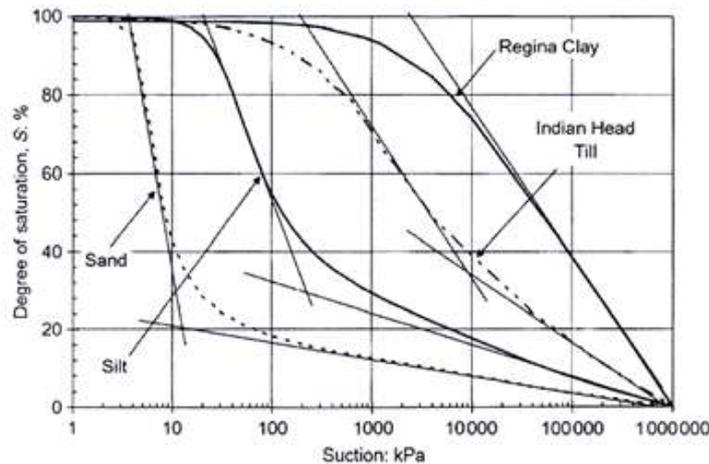


Figura 2.8 :Andamenti diversi delle SWCC in base al tipo di materiale

Per la formulazione matematica delle curve di ritenzione idrica è spesso utilizzato il contenuto in acqua volumetrico normalizzato:

$$W = \frac{w - w_r}{w_s - w_r}$$

Dove

W è il contenuto d'acqua

w_s è il contenuto in acqua volumetrico corrispondente al terreno saturo,

w_r è il contenuto in acqua volumetrico residuo.

Se si assume $w_r = 0$, risulta $W = S_r$.

2.2.1 Equazioni curve SWCC

Esistono numerose equazioni, sviluppate negli anni, che permettono di studiare il rapporto tra suzione e contenuto d'acqua.

Il contenuto d'acqua, indicato con "w" espresso in funzione della suzione "ψ" è messo in relazione con alcuni parametri caratteristici del terreno, in genere legati alla distribuzione di pressione dei pori.

Tali parametri generalmente sono tre:

- a legato al valore di entrata dell' aria (*air-entry value*),
- n legato alla zona di transizione,
- m che permette di avere una flessibilità ed un adattamento migliore delle curve SWCC.

Tra le rappresentazioni più note è bene citare:

- *Equazione di Gardner (1958)*

$$w(\psi) = \frac{w_s}{1 + a\psi^n}$$

o espressa in funzione del contenuto d'acqua:

$$\psi = \left[\frac{1}{a} \left(\frac{w_s}{w} - 1 \right) \right]^{1/n}$$

- *Equazione di Brooks e Corey (1964)*

$$\begin{cases} w(\psi) = w_s & \psi < \psi_{ae} \\ w(\psi) = w_s \left(\frac{\psi}{a} \right)^{-n} & \psi \geq \psi_{ae} \end{cases}$$

Dove ψ_{ae} è il valore di suzione di air-entry

- *Equazione di Brutsaert (1966)*

$$w(\psi) = \frac{w_s}{1 + (\psi/a)^n}$$

o espressa in funzione del contenuto d'acqua:

$$\psi = a \left(\frac{w_s}{w} - 1 \right)^{1/n}$$

- *Equazione di Van Genuchten (1980):*

E' generalmente la più usata e da tutti considerata l'equazione che meglio approssima l'andamento reale delle curve, sfrutta tutti e tre i parametri a, n, m.

$$w(\psi) = \frac{w_s}{[1 + (a\psi)^n]^m}$$

o espressa in funzione del contenuto d'acqua:

$$\psi = \frac{1}{a} \left[\left(\frac{w_s}{w} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n}$$

Esistono poi equazioni più recenti sviluppate verso la fine del 900 come quelle di *Fredlund e Xing (1994)*

$$w(\psi) = C(\psi) \frac{w_s}{\{\ln[e + (\psi/a)^n]\}^m}$$

Dove C è ricavato come segue:

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1000000/\psi_r)]}$$

Negli anni 2000 furono sviluppate le equazioni di *Fredlund (2000)* o *Fredlund e Pham (2006)*.

$$w(\psi) = w_r + \frac{w_s - w_r}{[1 + (\psi/c)^b]^a}$$

o espressa in funzione del contenuto d'acqua:

$$\psi = c \left[\left(\frac{w_s - w_r}{w - w_r} \right)^{1/a} - 1 \right]^{1/b}$$

2.2.2 Cicli di drying e wetting

La relazione suzione - contenuto d'acqua viene tipicamente ricavata in laboratorio seguendo due possibili modalità, una di essiccamento o una di imbibizione.

Con l'imbibizione si parte da un campione di terreno posto in uno stato di saturazione nulla e di suzione elevata che via via viene ridotta, il campione è connesso con un volume d'acqua che ne permette la saturazione.

Durante l'essiccamento si parte da un campione saturo e si aumenta la suzione.

Durante un processo di riduzione del contenuto d'acqua dalle condizioni sature, quindi di aumento della suzione, il terreno segue una curva di ritenzione detta curva principale di essiccamento (*maindrying*), diversa rispetto alla curva di ritenzione che il terreno segue nel processo inverso di aumento del contenuto in acqua, quindi di riduzione della suzione. Quest'ultima curva, detta curva principale di imbibizione (*mainwetting*), non raggiunge la completa saturazione del terreno perché una certa quantità di aria (residual air content) rimane comunque intrappolata nei vuoti del terreno.

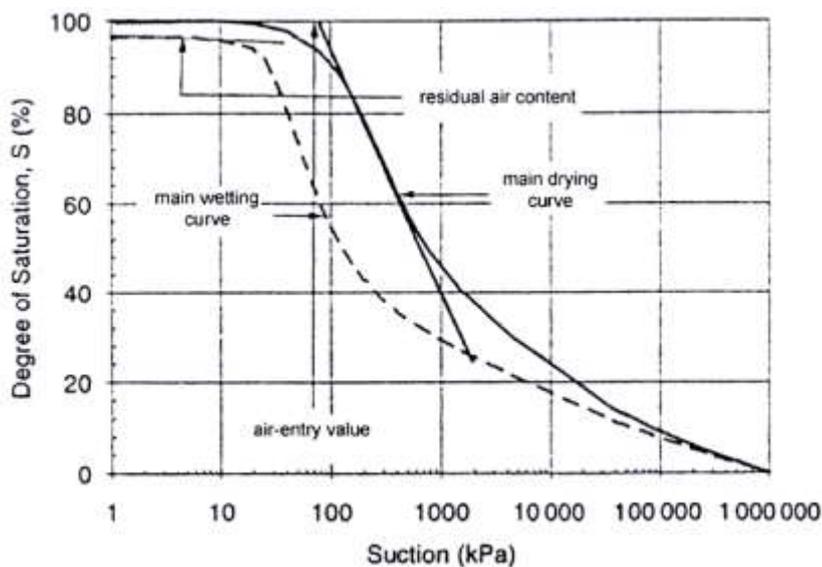


Figura2.9 :Curva di drying e wetting

Il fatto che attraverso un processo di essiccamento e imbibizione non si seguano le stesse curve comporta che si venga a creare un processo di isteresi.

Tutte le curve sono comprese tra le due curve principali di essiccamento e imbibizione che delimitano i possibili stati del terreno. I percorsi da una all'altra delle curve

principali(scanning curves) sono pressoché reversibili e sono in ogni caso contenuti all'interno dell'area compresa tra i due processi. Tale zona è appunto il dominio di isteresi.

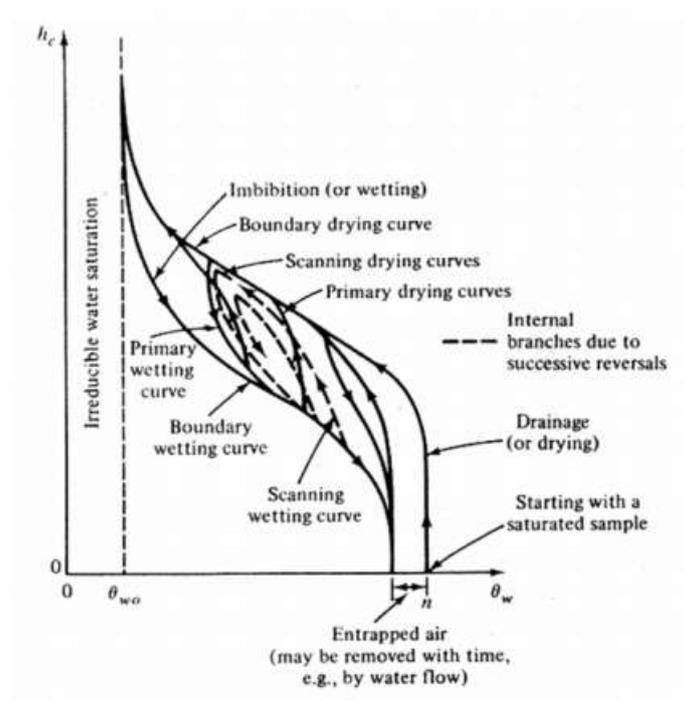


Figura2.10 :Isteresi delle curve di drying e wetting

3.0 Caratteristiche fiume

3.1 Premessa

Il lavoro di modellazione di questa tesi si basa su eventi accaduti in un fiume veneto all'inizio del mese di Novembre 2010.

La piena avvenuta in quel periodo ha portato al crollo del paramento arginale e all'inondazione delle campagne circostanti.

Sono state notate, dopo l'evento, la presenza di numerose alterazioni costituite da tane di animali nel corpo arginale, si cercherà quindi ora di capire se e come queste alterazioni possano aver influito o meno sugli eventi accaduti.

3.2 Il fiume e le sue caratteristiche

È un canale di origine artificiale che, presso Borgofrassine di Montagnana, raccoglie in se le acque provenienti dal Guà deviandole verso est.

Segna per un tratto il confine con la provincia di Vicenza quindi, in comune di Este.

Ai piedi dei colli Euganei le sue acque vengono indirizzate e convogliate nel canale Brancaglia, successivamente nel canale Santa Caterina che in ultima sfocia nel Gorzone.

3.3 Eventi che hanno portato all'alluvione

Le cause dell'alluvione del Novembre 2010 sono da ricondurre ad una serie di eventi accaduti nei giorni precedenti all'alluvione che hanno portato ad una rapida crescita dei livelli d'acqua nei fiumi.

Precipitazioni di 200mm sul bacino che defluisce corso d'acqua, avvenute nei giorni precedenti, sommate a scioglimento delle neviccate avvenute in alta montagna verso la fine del mese di Ottobre hanno generato una serie di condizioni sfavorevoli che come conseguenza hanno causato il versamento all'interno del corso d'acqua di una notevole quantità di volume liquido che il fiume non è riuscito a contenere, rompendo gli argini nel comune di Megliano San Fidenzio, con una falla da prima di piccole dimensioni poi estesasi fino a circa 90-100 metri di lunghezza, riversando nei comuni circostanti 23 milioni di metri cubi d'acqua.



Figura3.1 :Immagine aerea dell'area soggetta all'alluvione del Novembre 2010

3.4 Indagini geotecniche

Successivamente agli eventi, per l'individuazione e la caratterizzazione dei terreni, sono state eseguite una serie di prove ed indagini geotecniche direttamente sull'argine:

- sondaggi per prelevare campioni a diverse profondità;
- prova CPT (*Cone Penetration Test*);

ed una serie di classiche prove di laboratorio geotecniche condotte presso il laboratorio geotecnico dell'Università di Padova.

3.4.1 Prove penetrometriche (CPTe)

Sono state eseguite 2 distinte prove penetrometriche statiche (CPTe) nei punti segnati nell'immagine di cui - fig.3.2 -



Figura3.2 :Collocazione delle prove CPTe

La prova penetrometrica statica con punta elettrica (CPTe) consiste nell'infissione a pressione nel terreno una punta conica, dotata di sensore, alla quale è connesso un sistema di acquisizione dati. L'infissione avviene ad una velocità costante di 2 cm/sec e i dati vengono registrati a distanze di 2,5 cm oppure 20 cm, in base alle specifiche richieste.

Tipicamente vengono misurati:

- resistenza alla punta (q_c)
- attrito laterale
- parametri necessari alla correzione della resistenza alla punta.
- deviazione dalla perpendicolare

La prova CPT ha permesso la misura della resistenza q_c alla penetrazione nel terreno della punta standardizzata usata dallo strumento. I grafici ricavati da tale prova mostrano la possibilità di avere una misura continua della grandezza q_c fino ad una profondità di circa 25 metri. Grazie alla prova CPT è stato possibile risalire, per i terreni incoerenti, agli

angoli di attrito dei livelli sabbiosi. Esistono infatti correlazioni fra la resistenza alla punta q_c e la densità relativa (DR) e fra la stessa DR e l'angolo di attrito ϕ .

Le figure sottostanti mostra la correlazione fra q_c , σ'_{v0} e DR. E' opportuno notare che il legame si riferisce a sabbie normalmente consolidate mentre per le sabbie sovra consolidate o cementate si potrebbe avere, con l'utilizzo di tale grafico, una sopravvalutazione della DR.

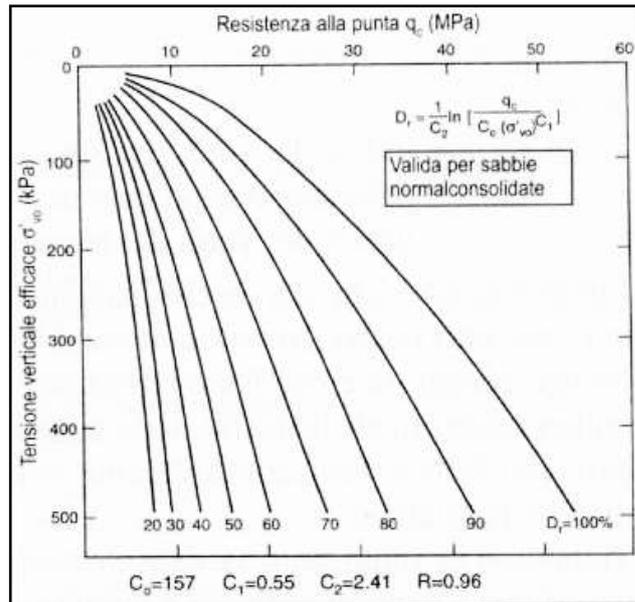


Figura 3.3 : correlazione fra q_c e DR

La figura seguente mostra la successiva correlazione fra DR e ϕ .

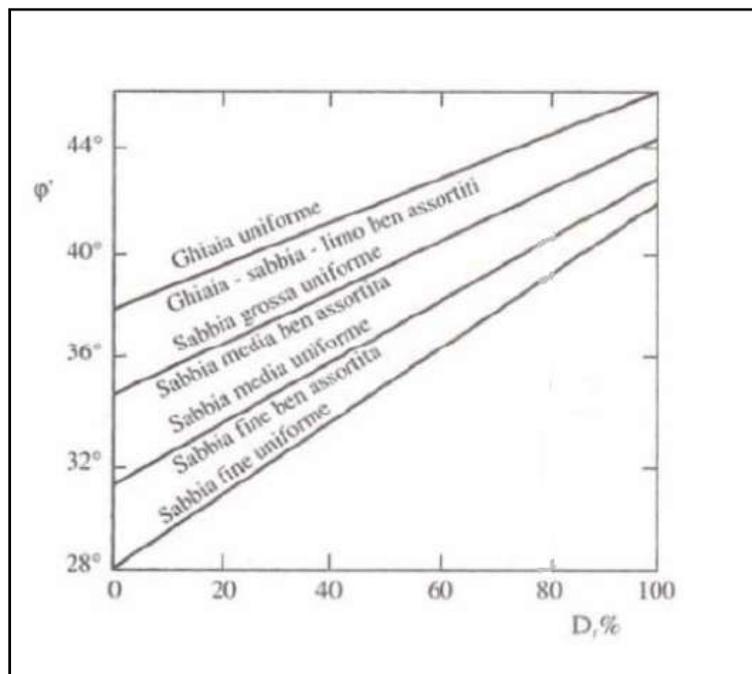


Figura 3.4 : correlazione fra DR e ϕ

Una relazione diretta fra la resistenza di punta q_c e l'angolo di attrito ϕ è rappresentata di seguito. E' da segnalare comunque che tale correlazione è influenzata da diversi fattori, quali la non linearità dell'involuppo di rottura, la deformabilità del terreno e la rottura dei grani. Per questo motivo si preferisce procedere per passi, usando in successione i diagrammi precedentemente descritti.

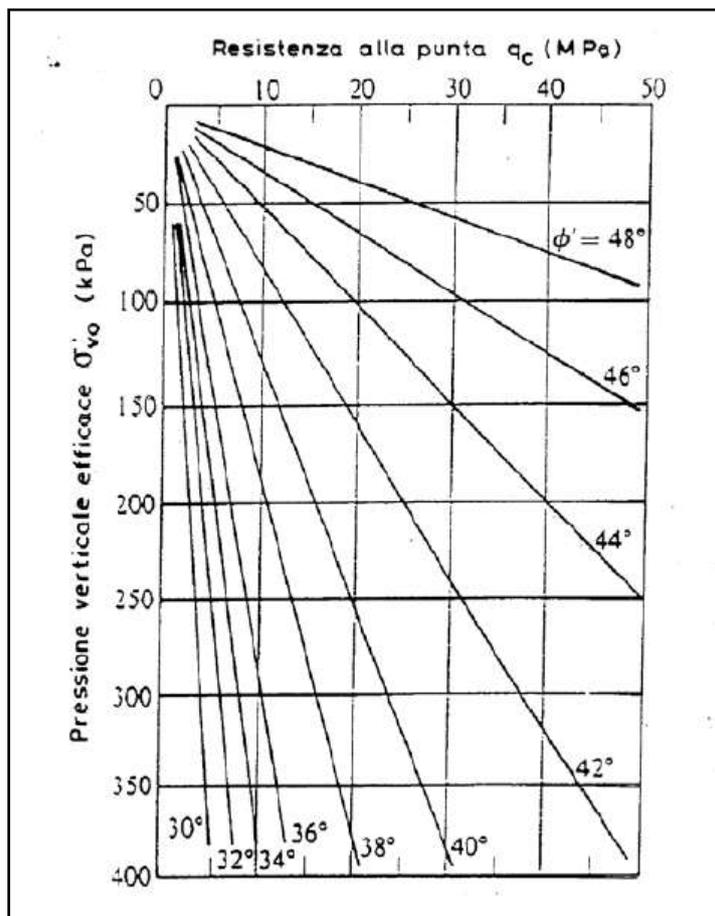


Figura 3.5: correlazione diretta fra q_c e ϕ

I metodi fin qui descritti, per individuare le proprietà meccaniche dei terreni, sono validi solamente nel caso di terreni incoerenti. Nei terreni coesivi, invece, è necessario usare la seguente formula che permette di legare il valore di q_c con la pressione totale citostatica σ_v e con la coesione non drenata c_u :

$$c_u = \frac{q_c - \sigma_v}{N_c}$$

I risultati ottenuti da tale prova sono spesso affidabili, la procedura risulta inoltre essere economica, veloce ed affidabile per la determinazione della stratigrafia e delle caratteristiche dei materiali quale l'angolo d'attrito, la densità relativa e la resistenza a taglio nei terreni coesivi.

3.4.1.1 Risultati delle prove CPTE

Dalle analisi condotte successivamente agli eventi del Novembre 2010 sono stati determinati opportuni diagrammi di cui in - fig. 3.6 – si riporta un esempio.

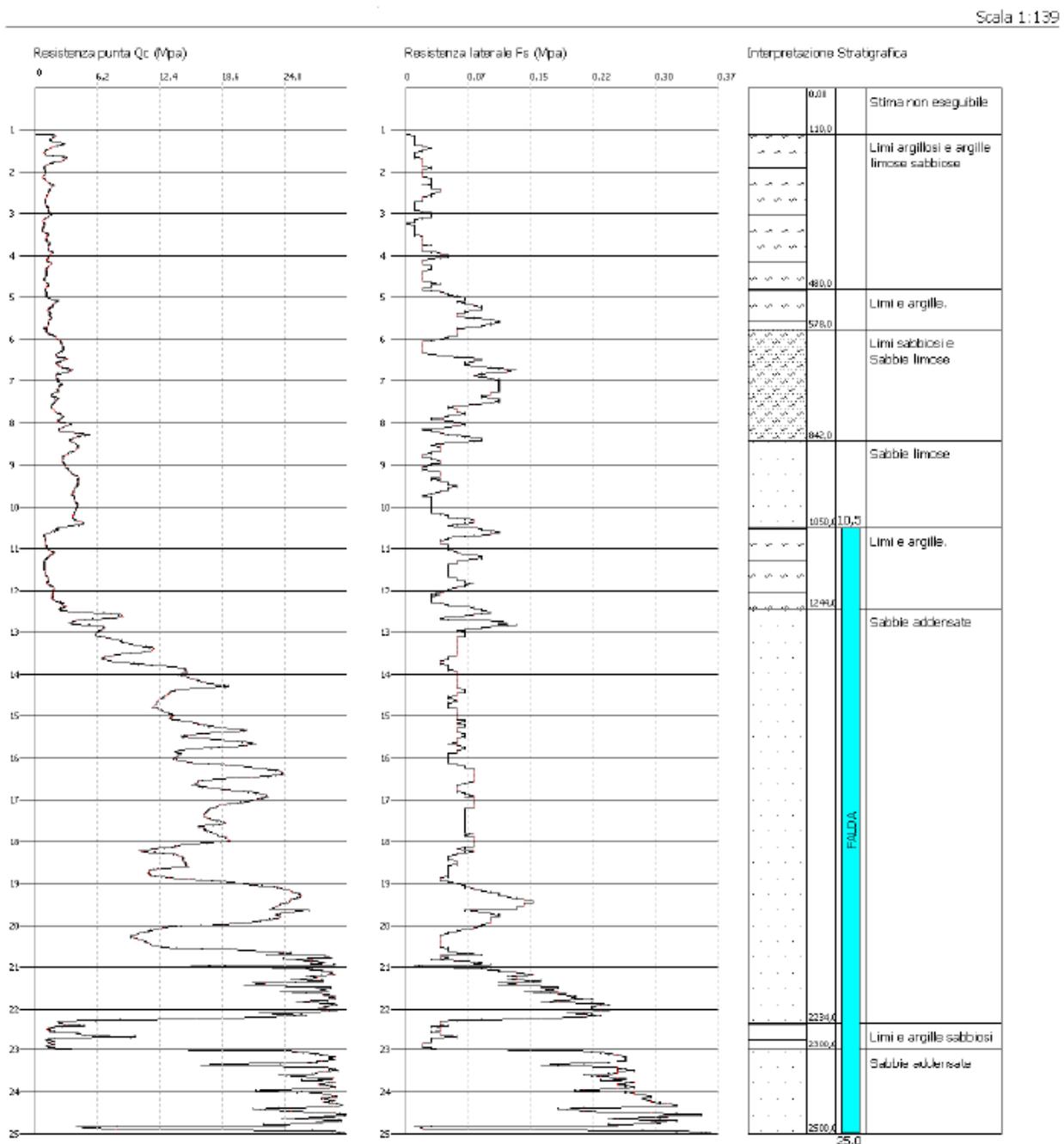


Figura 3.6: andamento resistenza di punta e resistenza laterale della CPTE 1

Dai grafici di detti diagrammi si possono ricavare le due seguenti tabelle, che contengono una prima stratigrafia e le caratteristiche dei materiali.

CPTE 1

Profondità m	tipo	C_u kPa	ϕ	E_{ed} MPa	γ KN/m ³	γ_{sat} KN/m ³	K m/s
0.00-3.00	Limi e argille	67	0	4.7	18.7	19.4	3.1 E-11
3.00-4.00	Limi e argille	67	0	4.7	18.7	19.5	3.1 E-11
4.00-5.00	Limi e argille	70	0	4.7	18.7	19.5	1.56 E-11
5.00-8.40	Limi sabbiosi	0	30	12.6	17.7	20.6	1.86 E-07
8.40-10.40	Sabbia limosa	0	31	11.3	18.6	21.6	2.07 E-05
10.50 -12.44	Limi e argille	67	0	4.7	18.6	19.4	8.63 E-10
12.44-22.34	Sabbia	0	37	26	18.6	21.6	1.64 E-05
22.34 -23.00	Limi e argille	91	0	4.9	18.7	20.5	1.88 E-10
23.00 -25.00	Sabbia	0	38	41.1	18.8	21.6	1.55 E-05

Tabella 3.1: Stratigrafia da CPTE 1

CPTE 2

Profondità m	tipo	C_u kPa	ϕ	E_{ed} MPa	γ KN/m ³	γ_{sat} KN/m ³	K m/s
0.82 - 4.38	Sabbia limosa	0	30.2	7.3	18.6	21.6	5.4 E-05
4.38 - 12.40	Limi e argille con sabbie	59	0	4.6	18.4	19.2	2.29 E-10
12.40 - 23.28	Sabbia	0	35	22.1	18.6	21.6	1.63 E-05

Tabella 3.2: Stratigrafia da CPTE 2

3.4.2 Sondaggi e piezometri

Oltre alle precedenti CPTe, nelle zone attigue, sono stati eseguiti 2 sondaggi e la posa di 3 piezometri che hanno permesso di ricavare ulteriori dati utili allo studio delle caratteristiche dei terreni, alla stratigrafia e alle condizioni di falda.



Figura 3.7: collocazione dei sondaggi e dei piezometri

I sondaggi (S1, S2) sono stati eseguiti con carotatore continuo, di diametro tale da lasciare i provini di terreno il più possibile indisturbati. In sommità sono poi stati dotati di piezometro.

L'estrazione della carote di terreno è avvenuta avendo cura di posare le stesse nelle apposite cassette catalogatrici- fig. 3.8 - .



Figura 3.8: Cassette catalogatrici

Oltre ai sondaggi sono stati messi in opera 3 piezometri (P3, P4, P5) , disposti a profondità sempre maggiori.

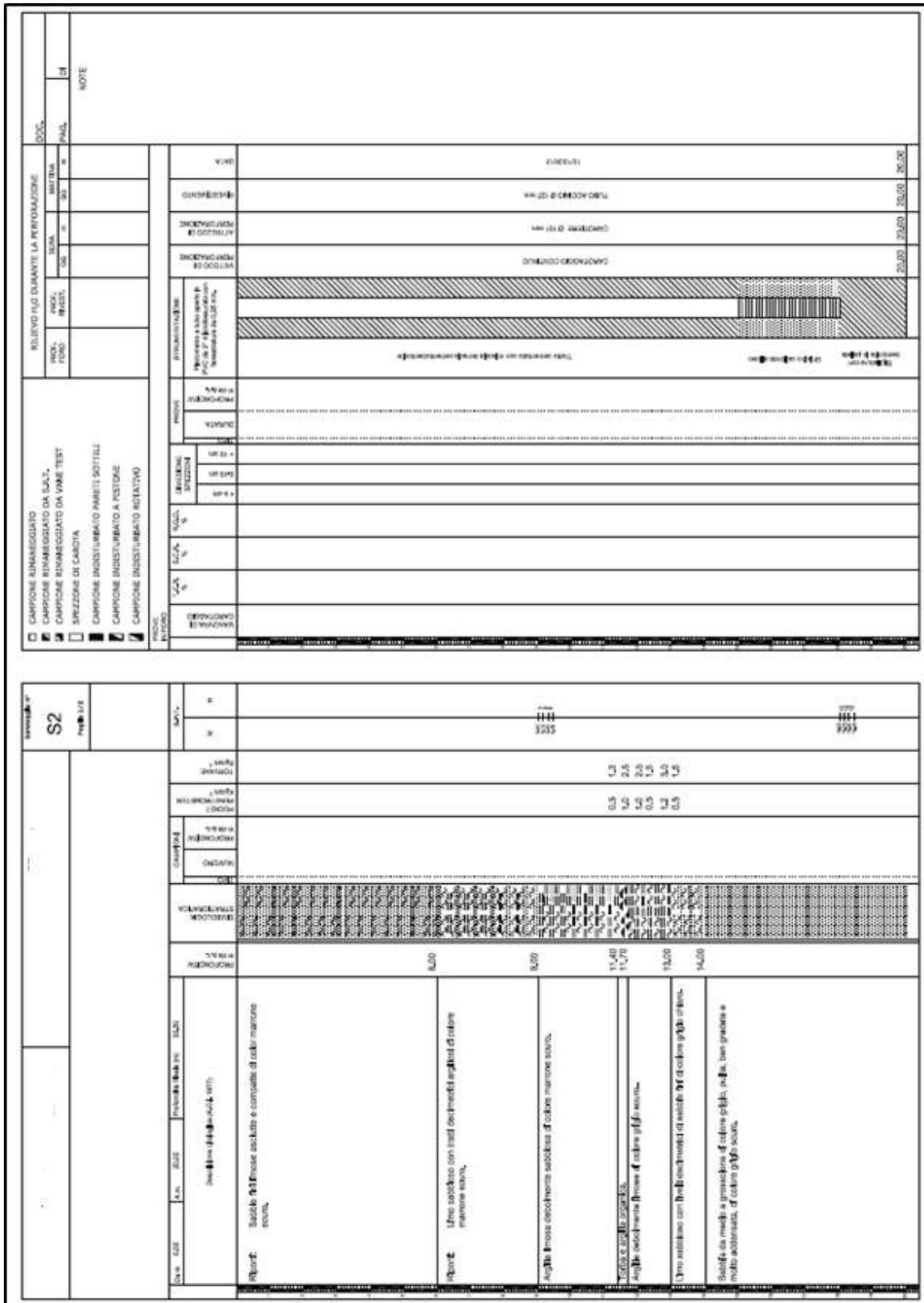


Figura 3.9: Stratigrafia del sondaggio S2

3.4.3 Prove di laboratorio

Oltre alle prove in loco sono state condotte, dal laboratorio dell'Università di Padova, anche prove di granulometria e misurazione del contenuto d'acqua dei terreni.

In particolare sono stati analizzati campioni di terreno provenienti dal sondaggio S2

3.4.3.1 Analisi granulometrica

Questa prova consiste nel determinare le dimensioni delle particelle che compongono il terreno ed a stabilire le percentuali in peso delle varie frazioni trattenute da una colonna di setacci a maglia decrescente.

La rappresentazione della curva granulometrica di un suolo è la classificazione più consueta che può essere eseguita su qualsiasi tipo di terreno. Essa consente di individuare in che percentuale sono presenti argilla, limo, sabbia, ghiaia e ciottoli e quindi di descrivere un suolo sulla base delle dimensioni dei grani che lo costituiscono e della loro quantità.

Per la parte sabbiosa e ghiaiosa di un suolo, l'analisi granulometrica viene condotta per vagliatura utilizzando una pila di setacci con maglie di diversa apertura, da $75\mu\text{m}$ fino al diametro del grano massimo del suolo analizzato. Dopo l'operazione di scuotimento, il terreno si dispone sui diversi setacci e viene pesata la quantità di materiale trattenuta da ciascun setaccio. Tali quantità, riferite alla massa totale del campione analizzato, danno la percentuale di terreno corrispondente ad una data dimensione del grano.

L'analisi granulometrica consente quindi di raggruppare in diverse classi di grandezza le particelle costituenti il terreno e suddividerle secondo lo schema proposto dall'Associazione Geotecnica Italiana, in:

- ghiaia (tra 60 mm e 2 mm),
- sabbia (tra 2 mm e $75\mu\text{m}$),
- limo (tra $75\mu\text{m}$ e $2\mu\text{m}$),
- argilla (sotto i $2\mu\text{m}$).



Figura 3.10: Setacci per analisi granulometrica

Per la parte più fine del materiale è stata eseguita una prova di sedimentazione in acqua nota come Aerometria.



Figura 3.11:Aerometria

L'aerometria utilizza la legge di Stokes:

$$v = \frac{2R^2 (d_e - d_e) g}{9\eta}$$

Dove:

v= velocità di sedimentazione;

R = raggio delle particelle disperse;

d_i = densità della fase interna;

d_e = densità della fase esterna;

g = accelerazione di gravità;

η = viscosità della fase continua



Figura 3.12: Sedimentazione in acqua

Tale prova correla le dimensioni e la percentuale delle particelle in sospensione in un liquido con la loro velocità di sedimentazione, sulla base del loro peso specifico e del peso specifico del liquido. Una massa nota di campione viene dispersa in grani elementari attraverso un miscelatore ed una soluzione disperdente, per poi essere messa in sospensione in acqua distillata. Con un densimetro vengono effettuate alcune misure di densità della soluzione acqua + campione ad intervalli di tempo prestabiliti così da ricavare la velocità di sedimentazione del campione in esame. Tale dato viene infine impiegato nella Legge di Stokes potendo così tracciare la curva granulometrica per la parte fine.

Nelle pagine seguenti vengono rappresentate a titolo d'esempio alcune curve granulometriche relative al sondaggio S2.

Queste curve sono state poi confrontate con la prova CPTe 1 per ottenere la stratigrafia finale.

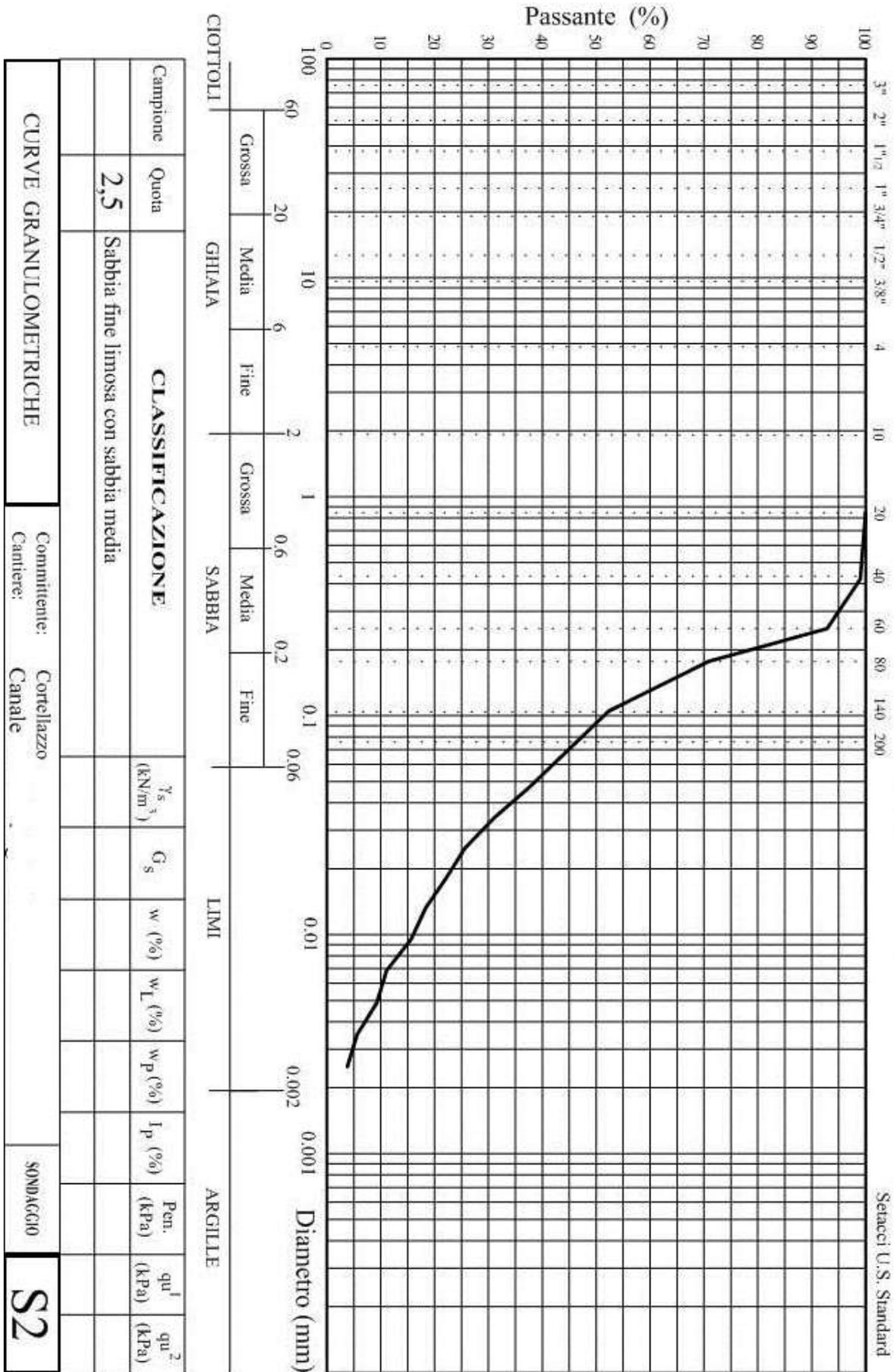


Figura 3.13: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 2.5 m

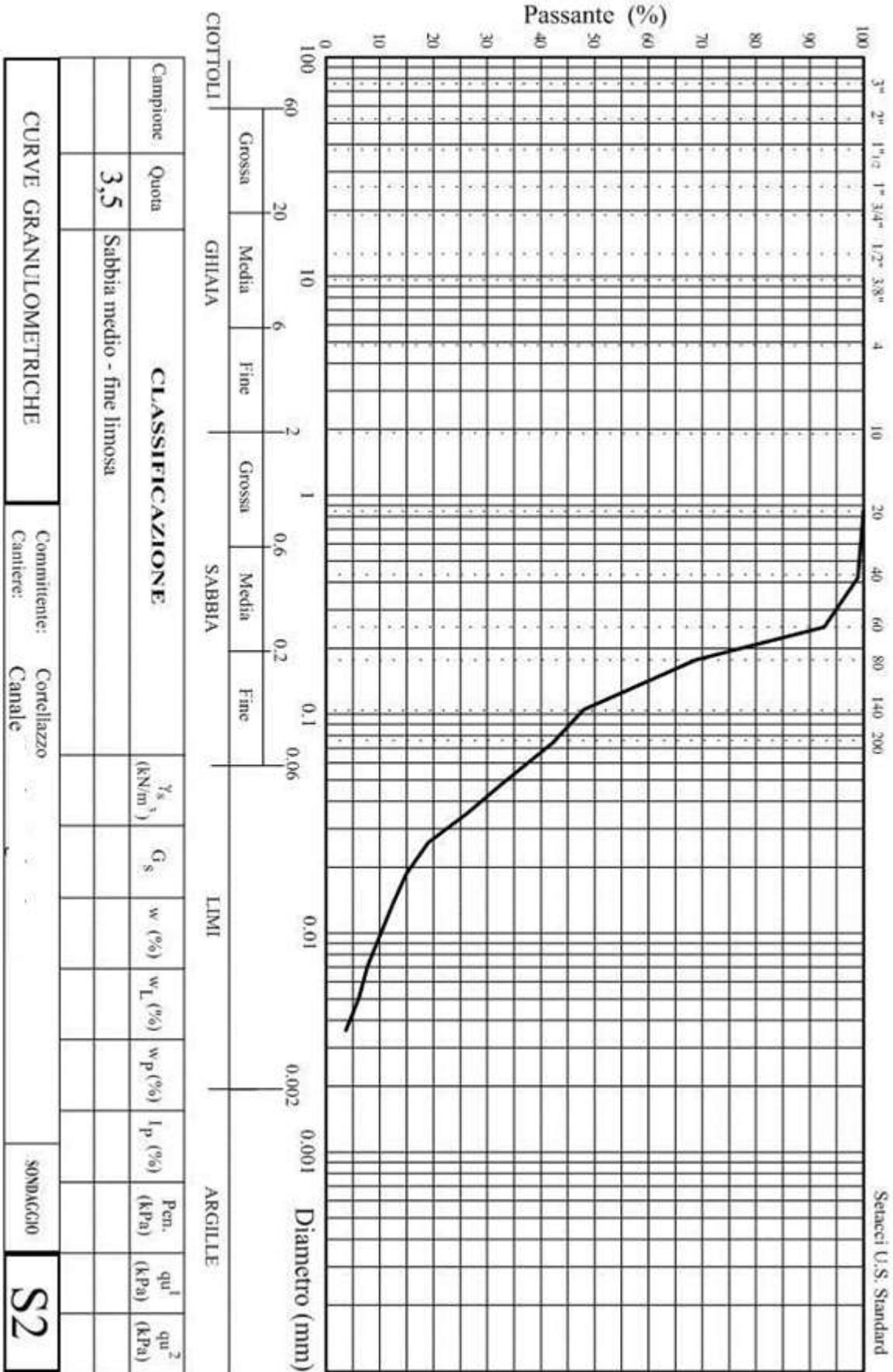


Figura 3.14: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 3.5 m

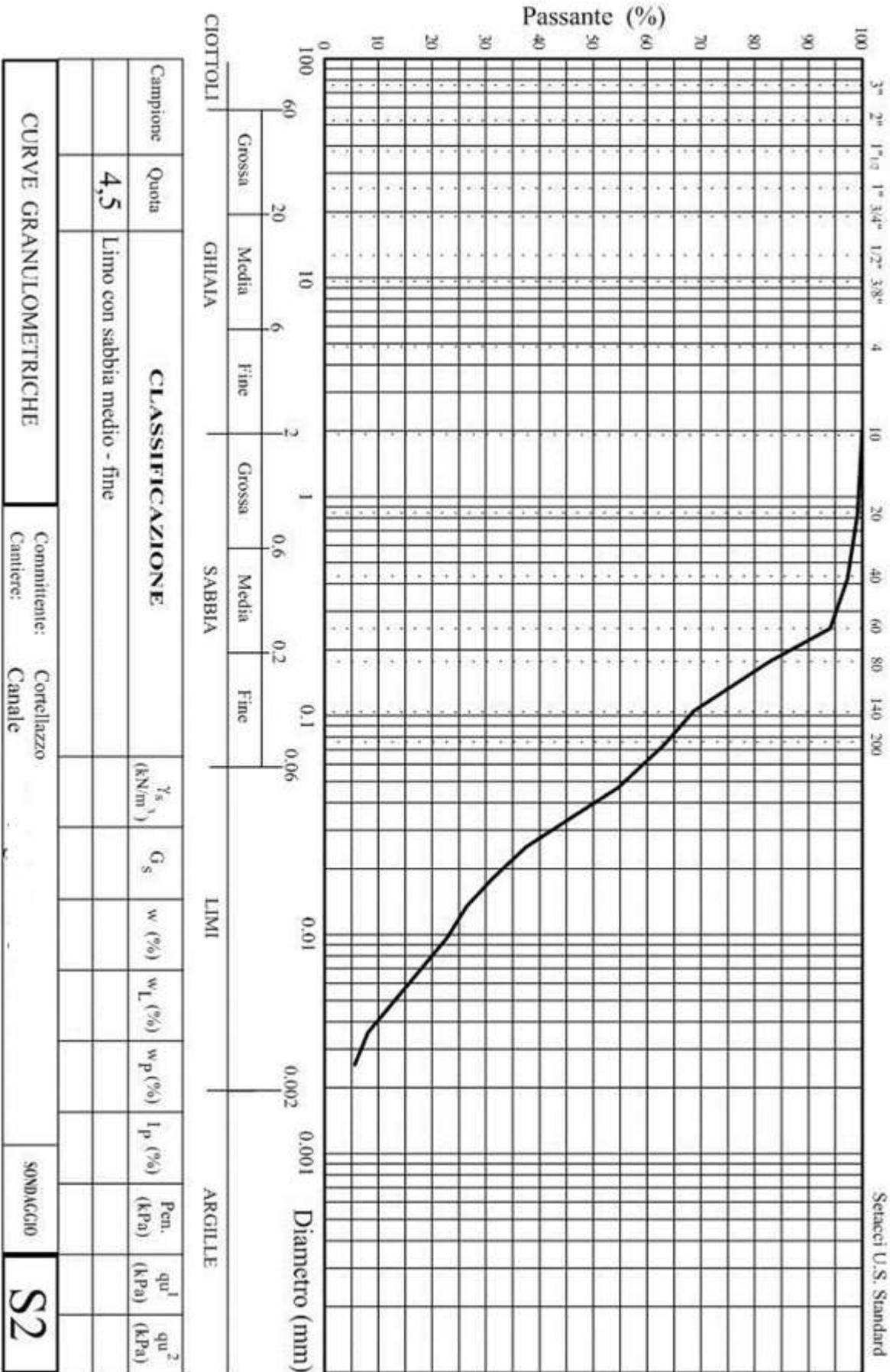


Figura 3.15: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 4.5 m

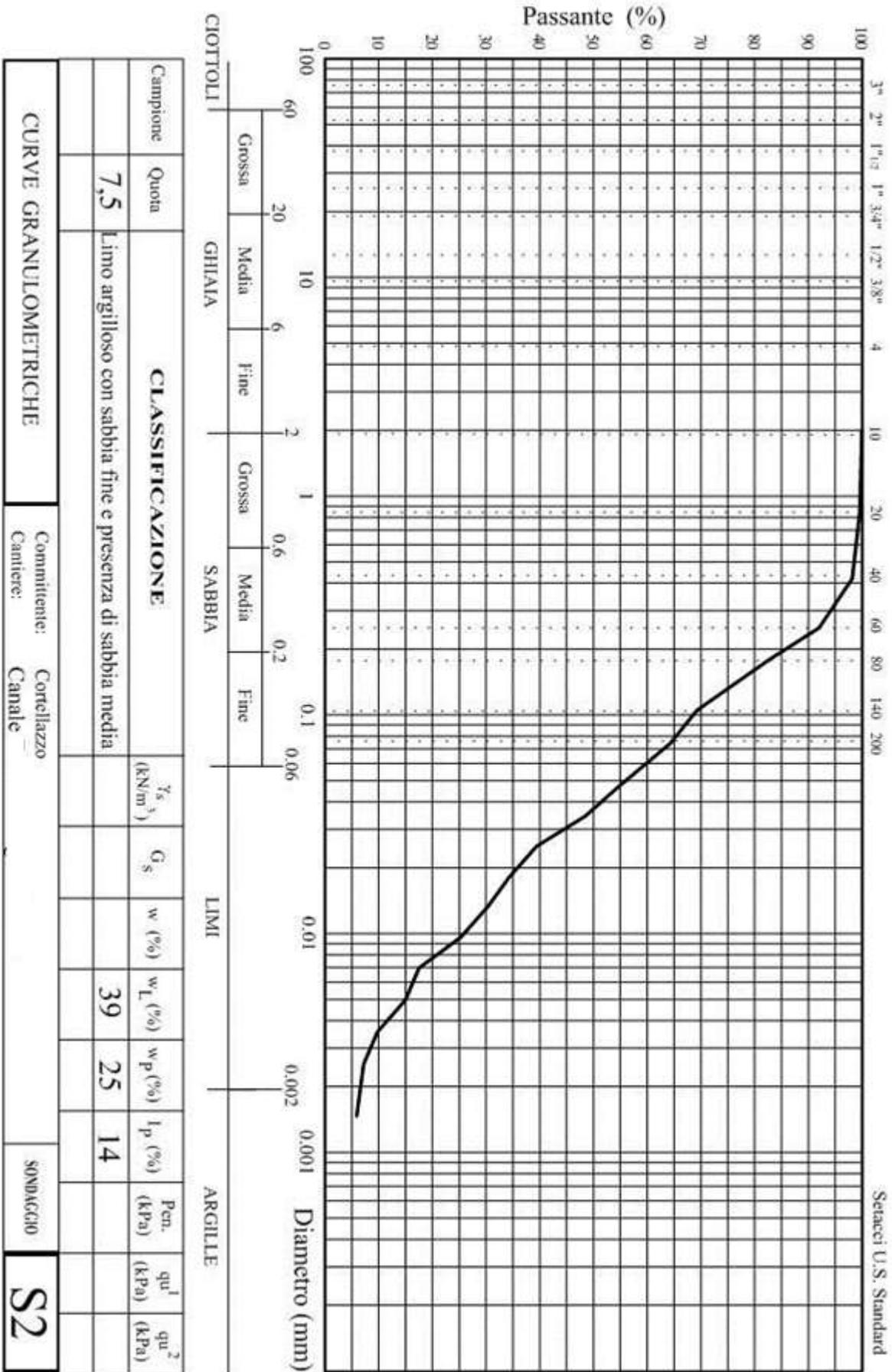


Figura 3.16: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 7.5 m

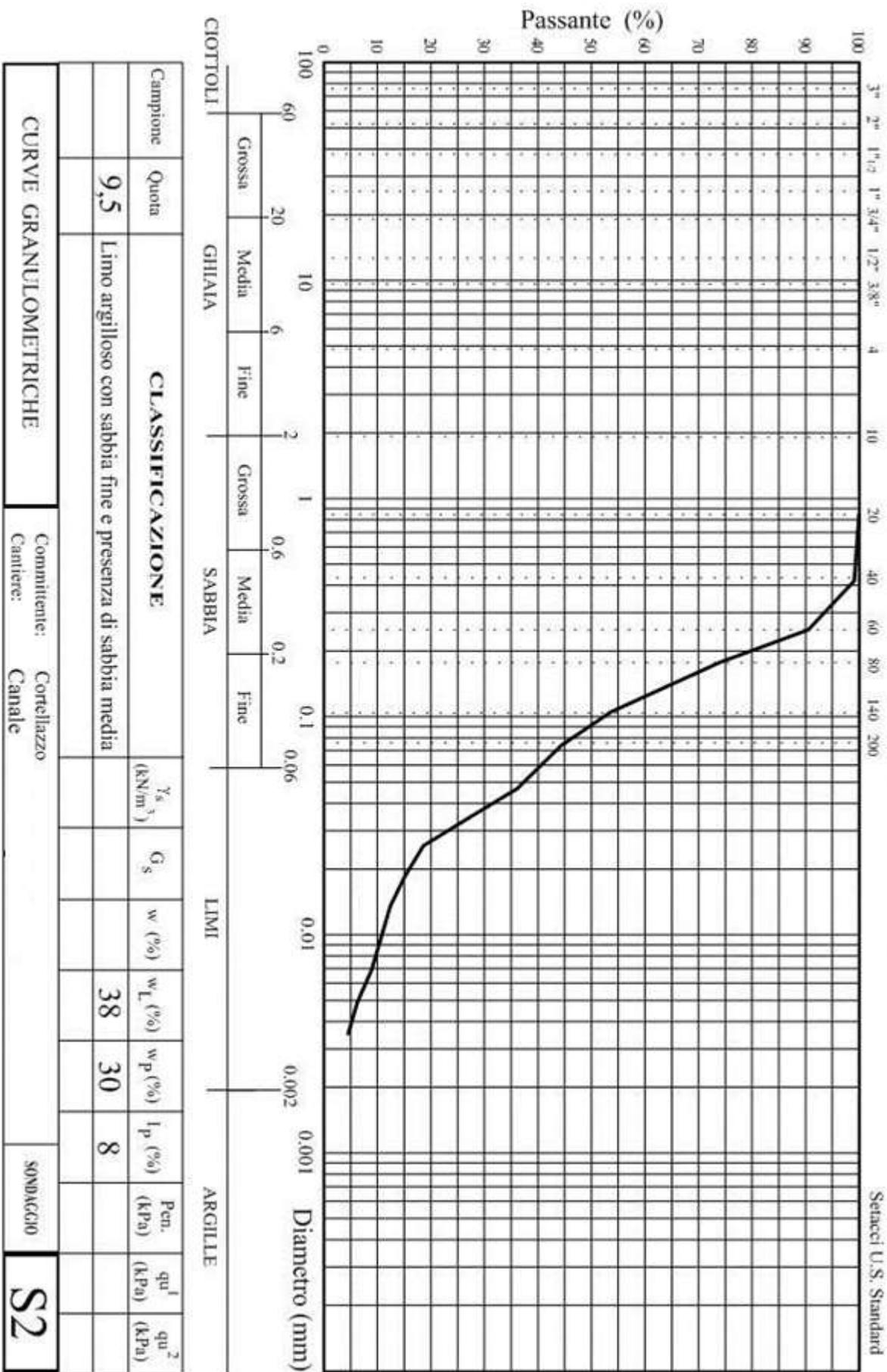


Figura 3.17: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 9.5 m

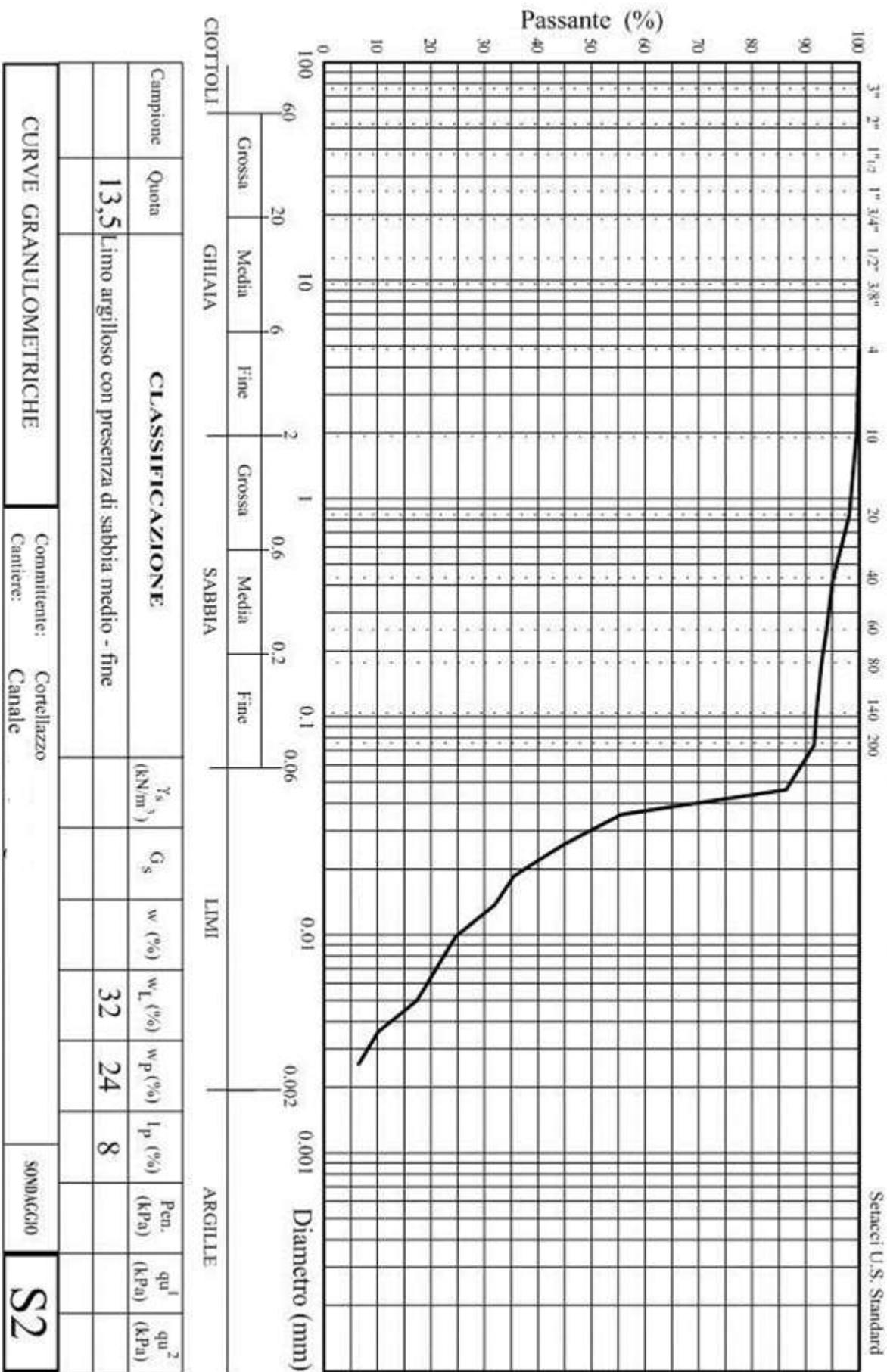


Figura 3.18: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 13.5 m

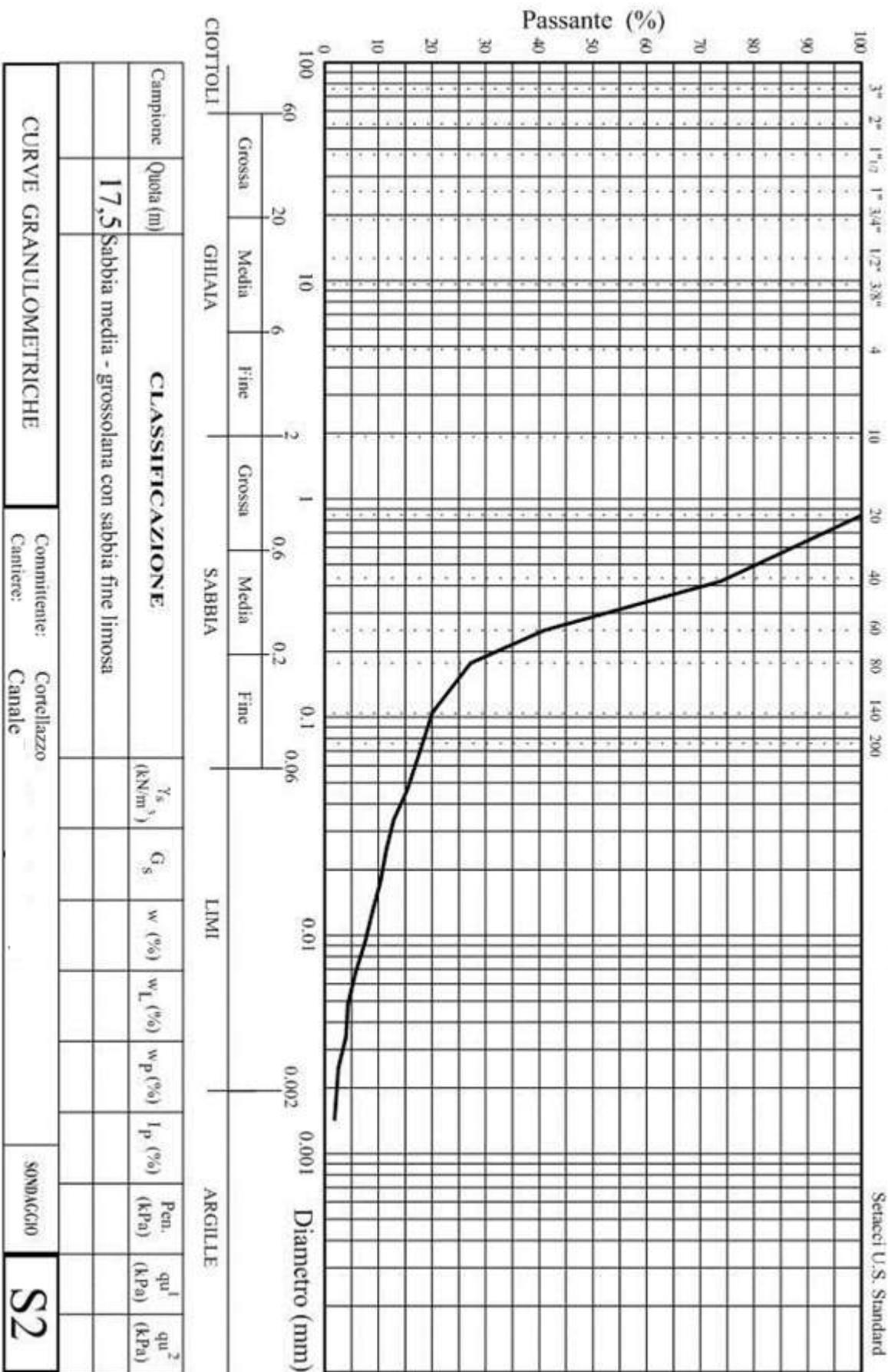


Figura 3.20: Curva granulometrica sondaggio S2 profondità 17.5 m

3.4.3.2 Limiti di Atterberg

I limiti di Atterberg indicano il valore limite del contenuto di acqua per il quale si registra una transizione dello stato fisico del terreno.

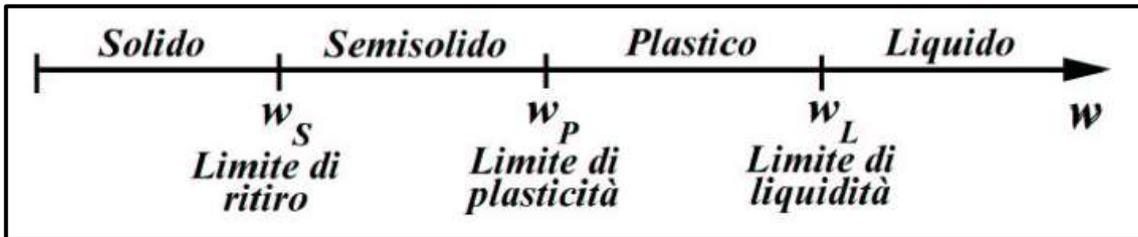


Figura 3.21: Rappresentazione grafica limiti di Atterberg

In particolare si possono distinguere quattro possibili stati fisici in funzione della consistenza, in ordine crescente del contenuto di acqua essi sono:

- solido;
- semisolido;
- plastico;
- liquido.

Il valore limite che corrisponde ad una transizione da solido a semisolido è detto limite di ritiro, gli altri due valori in ordine sono il limite plastico e il limite liquido.

-Limite di ritiro w_s : Nelle analisi geotecniche di laboratorio con termine limite di ritiro per un terreno si intende il valore del contenuto minimo in acqua al di sotto del quale una diminuzione di questo valore non produce una riduzione di volume del terreno in esame.

La sua determinazione è fatta considerando un provino che viene essiccato per passi successivi e del quale viene misurato il contenuto d'acqua ad ogni passaggio.

La determinazione del valore del limite è fatta valutando un provino indisturbato di terreno essiccato gradualmente, in una serie di sequenze, al termine di ogni sequenza viene misurato il contenuto d'acqua rimasta nel provino.

-Il limite plastico w_p : rappresenta, per un terreno, il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno inizia a perdere il suo comportamento plastico. Esso si determina formando manualmente per rotolamento su una lastra di vetro dei bastoncini di terreno di spessore di circa 3,2 mm; in corrispondenza del limite di plasticità nel campione di terreno si formano delle fessure dovute al ritiro dello stesso terreno. Non appena iniziano a

fessurarsi si misura il loro contenuto d'acqua (espresso in percentuale), che per definizione è pari al limite plastico.

-Il **limite liquido** w_L : si determina mediante il Cucchiaino di Casagrande - fig. 3.20 - , una specie di scodellina che viene ripetutamente alzata e fatta cadere da un'altezza definita dalla normativa. Posto il materiale sul cucchiaino si effettua un solco al centro di esso, mediante un utensile solcatore standardizzato, in modo tale che il materiale venga diviso in due frazioni uguali. Si contano quindi i colpi necessari da dare alle due parti di terreno per venire a contatto tra loro, per una lunghezza di almeno 13 mm; pesando il provino prima e dopo l'essiccazione in forno si ricava il suo contenuto d'acqua. Si ripete questa procedura tre volte variando il contenuto d'acqua. Riportando i 3 punti così ottenuti su un diagramma semilogaritmico, contenuto d'acqua- del numero dei colpi , tracciando la retta interpolatrice che meglio li approssima, si ricava il contenuto d'acqua corrispondente alla chiusura del solco in 25 colpi, questo valore è definito limite liquido, solitamente espresso in percentuale.

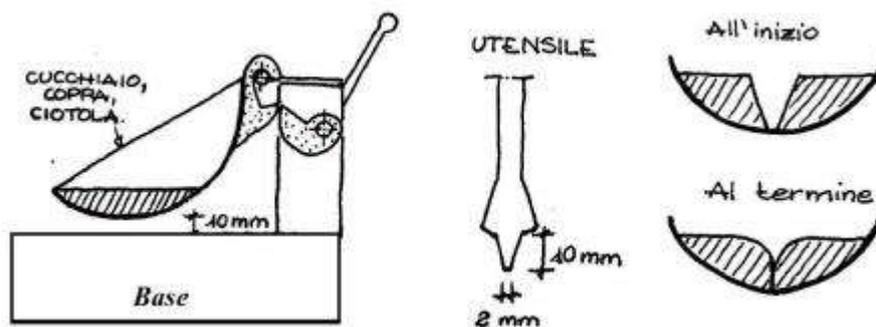


Figura 3.22: Cucchiaino di Casagrande

4.0 Simulazione matematica della filtrazione negli argini del fiume

Alla luce dei dati raccolti e descritti nel capitolo 3, si sono condotte le seguenti simulazioni ed analisi del comportamento dell'argine mediante il programma *GTS MIDAS2011*, software della famiglia *MIDAS*.

Tale programma permette di svolgere analisi 2D e 3D sulle interazioni terreno struttura, scavi, stabilità dei pendii, analisi dinamiche e sismiche, moti di filtrazione transienti e stazionari, consolidamenti, cedimenti.

Nel caso in esame sono state svolte analisi di filtrazione su un corpo arginale seguendo sia il caso più semplice di moto stazionario (*steady-state analysis*), che considerano la presenza d'acqua all'interno dell'argine per un periodo di tempo infinitamente lungo, sia le analisi più realistiche di moti transitori (*transient analysis*) legate alla presenza di acqua, nell'argine, per un periodo limitato di tempo e tenendo in considerazione anche le caratteristiche di saturazione dei terreni.

GTS MIDAS permette di ricavare come risultato delle analisi un elevato numero di dati, di cui i principali sono:

- valore di portata di filtrazione all'interno dell'argine,
- pressione dei pori,
- gradiente critico
- valori di velocità dell'acqua all'interno del corpo arginale
- andamento della linea piezometrica.

Gli argini sono stati analizzati in due diverse situazioni: senza alterazione e con alterazione data dalla presenza della tana di un animale; per poter capire come ed in che modo quest'ultima possa influire sui parametri di filtrazione e sulla sicurezza dell'argine stesso.

4.1 Descrizione generale del modello

In seguito alla rottura dell'argine del fiume, oltre alle prove geotecniche elencate nel capitolo precedente, sono state misurate una serie di sezioni tipo dell'argine; in particolare delle numerose sezioni ricavate in questa analisi ci si è concentrati su due specifiche:

- Sezione V su sponda sinistra
- Sezione 12 su sponda destra

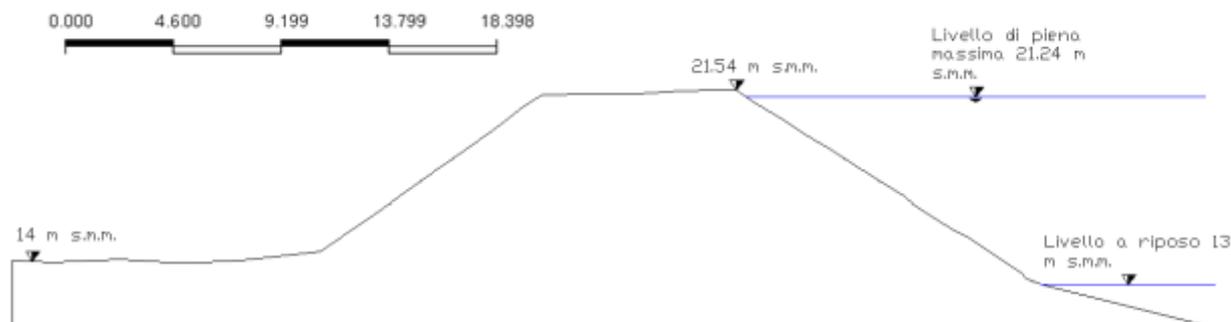


Figura 4.1: Sezione V su sponda sinistra

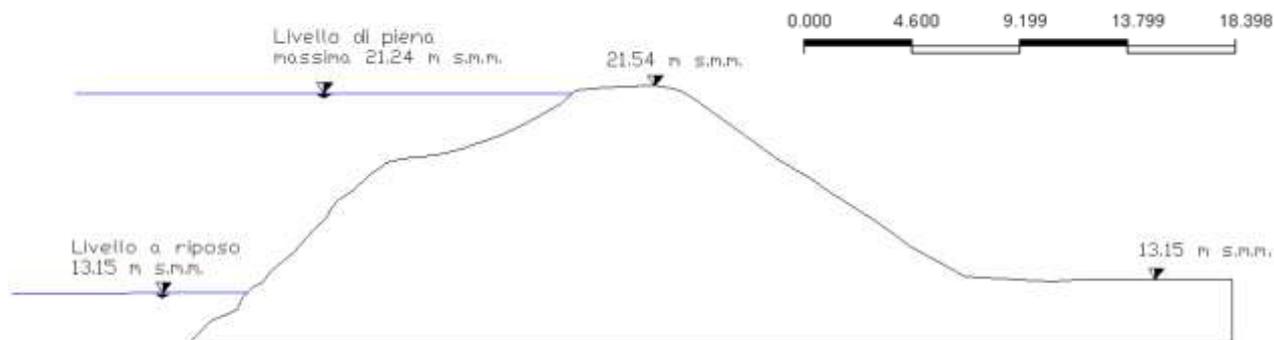


Figura 4.2: Sezione 12 su sponda destra

Sono state scelte queste 2 sezioni poiché erano quelle che presentavano sia un maggior dislivello tra il valore di magra e quello di piena, sia perché avevano i paramenti arginali soggetti a maggior pendenza e di conseguenza erano le sezioni con il maggior rischio di stabilità.

In entrambe le sezioni e lungo il fiume viene mantenuto per tutto l'anno un livello minimo di acqua tale da poter permettere la vita delle specie animali e vegetali presenti nel corso d'acqua; tale livello è variabile tra il metro ed il metro e mezzo a seconda delle condizioni climatiche e stagionali.

Dalle analisi condotte, durante le fasi di piena, è stato appurato che il livello d'acqua raggiunge una quota inferiore, di circa 30 cm, dal livello massimo dell'argine. Di conseguenza è stato usato questo valore come livello di piena.

Bisogna però ricordare che il Ministero LL. PP. richiede che in condizioni di massima piena sia garantito un franco di sicurezza paria ad almeno 50 cm dal livello massimo dell'argine.

4.1.1 Stratigrafia

Per quanto riguarda la stratigrafia dell'argine nelle due sezioni si è presa in considerazione l'interpretazione della prova penetrometrica CPTe 1, poiché era quella permetteva di avere le condizioni peggiori di impermeabilità ed il maggior rischio di filtrazione durante le fasi di piena.

La stratigrafia della CPTe 1 è inoltre confermata dalle analisi condotte successivamente tramite i sondaggi, come si può notare nel capitolo precedente.

Infatti i confronti tra i grafici della CPTe e i diagrammi della granulometria, ricavati da sondaggio 2, tendono a confermare tale stratigrafia.

In entrambi i casi quindi gli strati sono così composti:

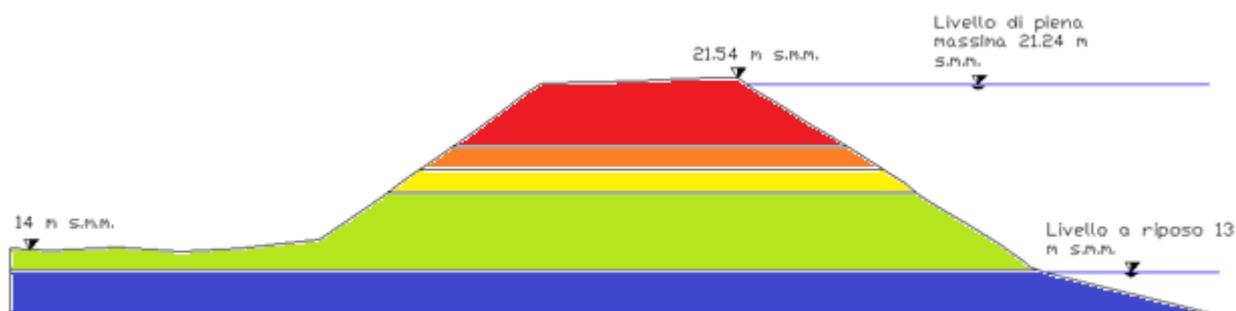


Figura 4.3: Sezione V stratigrafia

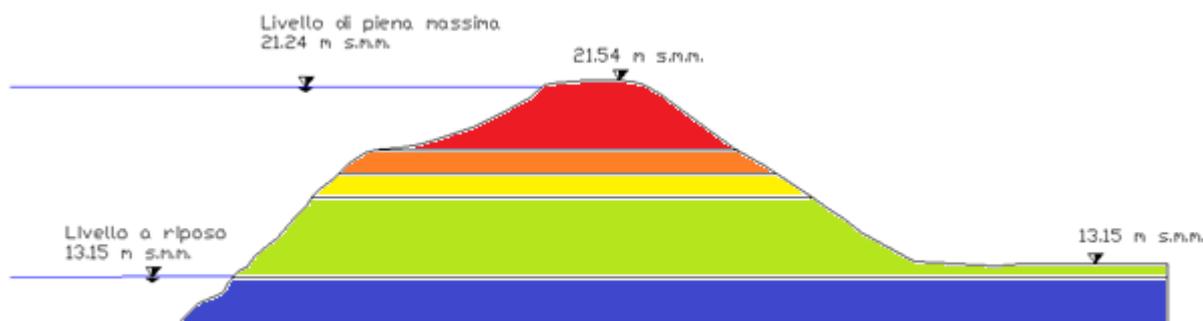


Figura 4.4: Sezione 12 stratigrafia

Rif.	Profondità m	tipo	C_u kPa	ϕ	E_{ed} MPa	γ KN/m ³	γ_{sat} KN/m ³	K m/s
	0.00-3.00	Limi e argille	67	0	4.7	18.7	19.4	3.1 E-11
	3.00-4.00	Limi e argille	67	0	4.7	18.7	19.5	3.1 E-11
	4.00-5.00	Limi e argille	70	0	4.7	18.7	19.5	1.56 E-11
	5.00-8.40	Limi sabbiosi	0	30	12.6	17.7	20.6	1.86 E-07
	8.40-10.40	Sabbia limosa	0	31	11.3	18.6	21.6	2.07 E-05

Tabella 4.1: Stratigrafia

I valori di permeabilità dei terreni ricavati tramite la prova penetrometrica sono confermati anche dalla formula di Hazen, la quale sfruttando i risultati provenienti dalle analisi granulometriche permette di ricavare il valore del coefficiente di filtrazione tramite la seguente formula:

$$k = C d_{10}^2$$

Dove

- k è il coefficiente di permeabilità del terreno espresso in m/s
- d_{10} è la larghezza della maglia del setaccio che permette il passaggio del 10% in peso del campione di materiale granulare espresso in mm
- C è una costante di proporzionalità variabile tra 0.01-0.015

Tali caratteristiche dei materiali sono state inserite all'interno del database del programma ed assegnate ai rispettivi strati.

Nelle analisi non è stato preso in considerazione il terreno al di sotto della profondità di circa 11 metri dalla sommità arginale poiché non sono mai state riscontrate eventuali problematiche di piping o fontanazzi e dalle analisi condotte la filtrazione avviene sempre all'interno del corpo arginale.

Di conseguenza per migliorare l'accuratezza e la precisione dei risultati, diminuendo gli elementi costituenti la mesh, non è stato inserito il terreno al di sotto del piano campagna se non per un sottile strato di circa 2 metri.

4.1.2 Proprietà idrauliche dei terreni

Per l'analisi transitoria è stato necessario inserire nel programma l'andamento delle curve SWCC, già descritte nel capitolo 2.

La definizione di una curva specifica mediante le funzioni di *Van Genuchten* o *Fredlund-Xing* non è stata possibile vista l'assenza dei dati prove necessari definire i parametri caratteristici e l'impossibilità a ricavarli in altro modo.

Si è quindi proceduto all'inserimento dei dati delle curve per punti tramite l'utilizzo di curve e modelli di letteratura noti. Per ogni differente tipologia di terreno, sono stati ricavati dei valori caratteristici di contenuto d'acqua e suzione, sono poi stati inseriti manualmente all'interno del modello di *MIDAS* ed assegnati ai rispettivi terreni ottenendo così una rappresentazione realistica delle curve.

La - fig.4.5 - mostra un generico andamento delle curve SWCC per diverse tipologie di terreno; si nota come le argille abbiano un tratto più lungo nella boundary zone rispetto alle sabbie o ghiaie ed una zona di transizione a minor pendenza e come risulti poi essere assente la zona di non saturazione.

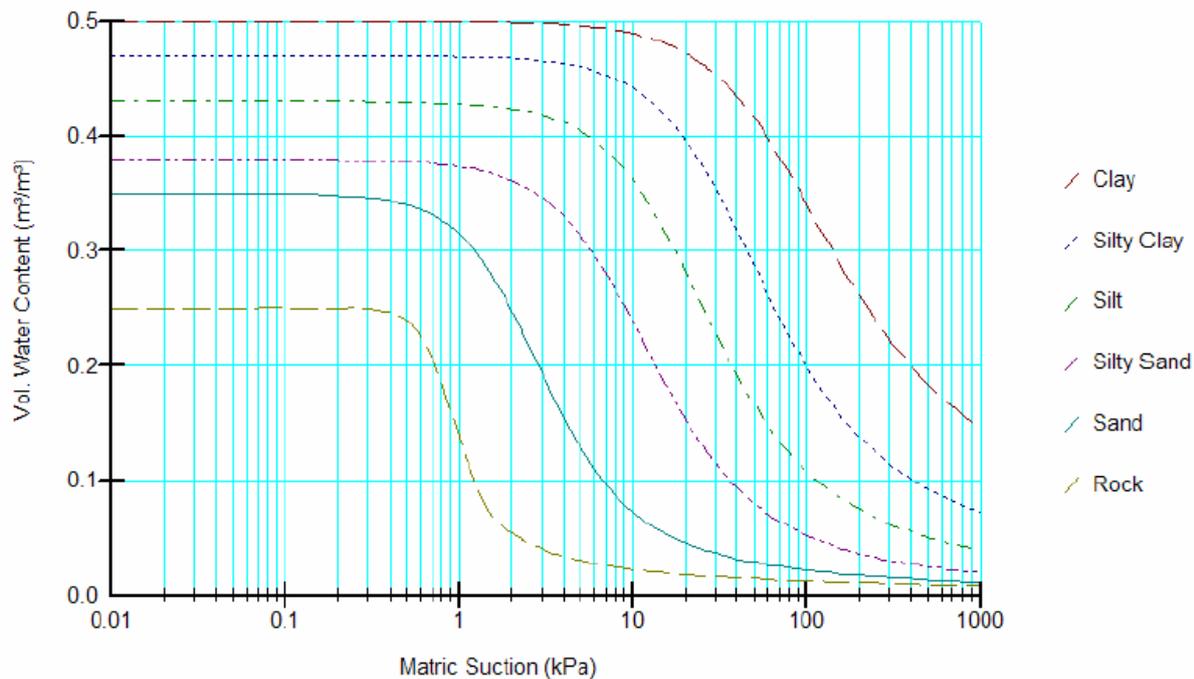


Figura 4.5: Andamento delle curve SWCC per varie tipologie di terreno

Da questo esempio e da altri modelli noti di terreni sono stati ricavati i valori in - tab. 4.2 -

Limo Argilloso		Limo sabbioso		Sabbia limosa	
Suzione (kPa)	Cont. Acqua (m ³ /m ³)	Suzione (kPa)	Cont. Acqua (m ³ /m ³)	Suzione (kPa)	Cont. Acqua (m ³ /m ³)
0,01	0,48	0,01	0,39	0,01	0,36
0,1	0,48	0,1	0,39	0,3	0,35
1	0,48	1	0,38	1	0,32
10	0,46	6	0,3	3	0,2
100	0,3	10	0,15	7	0,1
400	0,15	40	0,1	10	0,06
1.000	0,08	100	0,05	100	0,02
		1.000	0,02	1.000	0,01

Tabella 4.2: Suzione e contenuto d'acqua per i vari terreni

Da questi dati è stato possibile ricavare il grafico 4.1 che, anche se non perfettamente, ricalca l'andamento delle curve di fig. - 4.5 - con in ascissa il valore della suzione in kPa ed in ordinata i valori del contenuto d'acqua in m³/m³

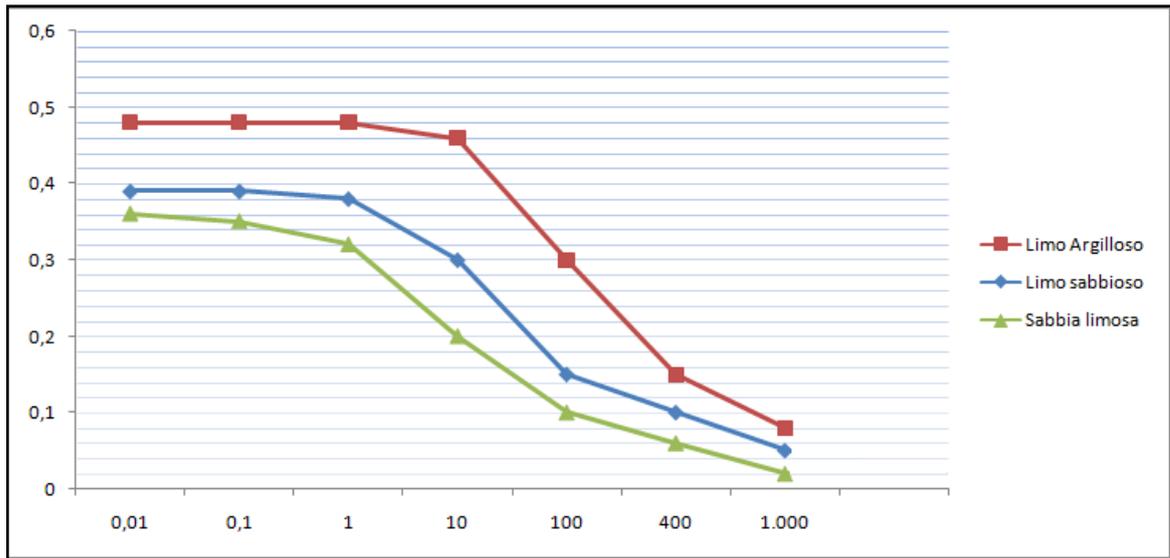


Grafico 4.1: Stratigrafia

Tutti i dati ricavati sono stati poi inseriti in *GTSMidas* ottenendo le curve SWCC, come mostrato dall'immagine - fig. 4.6 - rappresentante la curva per la sabbia limosa

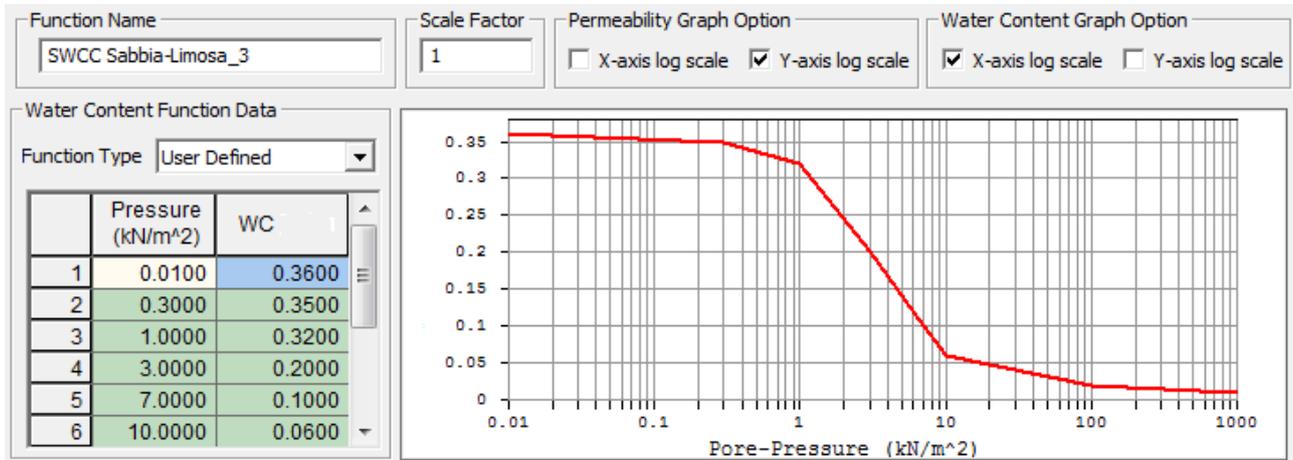


Figura 4.6: Andamento delle curve SWCC per la sabbia limosa in GTSMidas

4.1.3 Le alterazioni, caratteristiche e tipologie

Nel fiume preso in considerazione da questa analisi le problematiche legate alle alterazioni della sezione erano principalmente dovute allo scavo di cunicoli da parte di animali tipo tasso e/o volpe rossa per la creazione delle loro tane o per andare alla ricerca di cibo.

Entrambi gli animali scavano cunicoli di dimensione simile con diametri di circa 50 cm e lunghezze variabili, ma che tipicamente penetrano nell'argine per 1/3 della sua larghezza.

Le tane sono disposte, come avviene in natura, a circa 1 metro da piano campagna e contraddistinte da un interasse tipico non inferiore ai 20 metri. Interassi minori raramente si presentano in natura tra due tane, poiché tali animali sono molto territoriali e raramente invadono il territorio di un loro simile o di un'altra specie.

Le tane di entrambi gli animali si trovano lato campagna e non lato fiume come accade invece per altri animali, tipo la nutria.

Nel caso in esame si sono studiate due differenti tipologie di alterazioni:

- Tana semplice -fig. 4.7 e 4.8 - , costituita da un unico tubo cilindrico di 50 cm di diametro terminante all'interno dell'argine con una zona più ampia (la tana vera e propria) rappresentata da una sfera di circa 1 metro di diametro

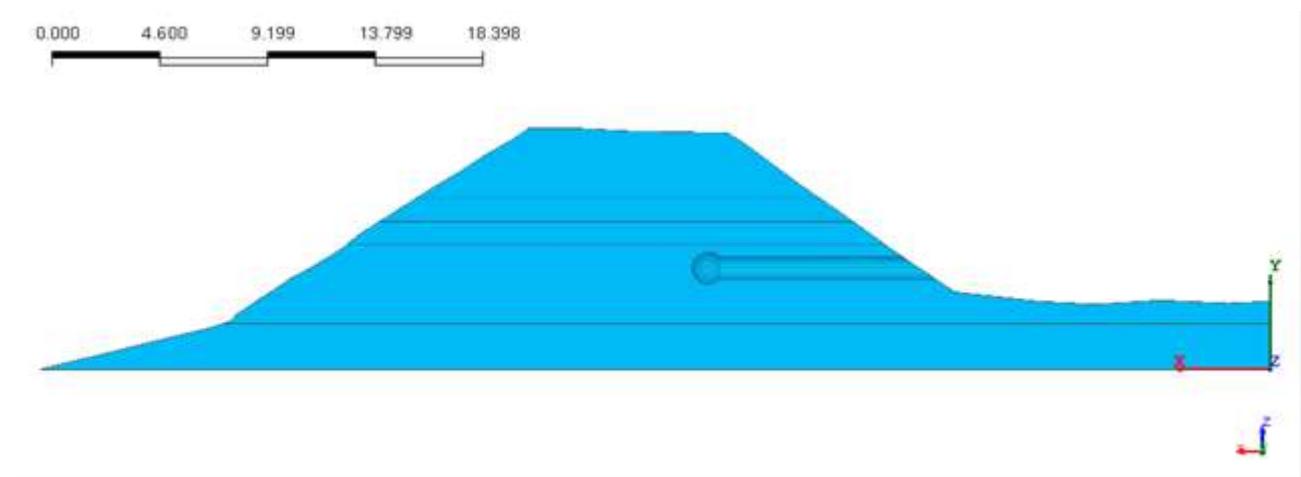


Figura 4.7: Sezione V con tana semplice

0.000 6.973 13.946 20.919 27.891

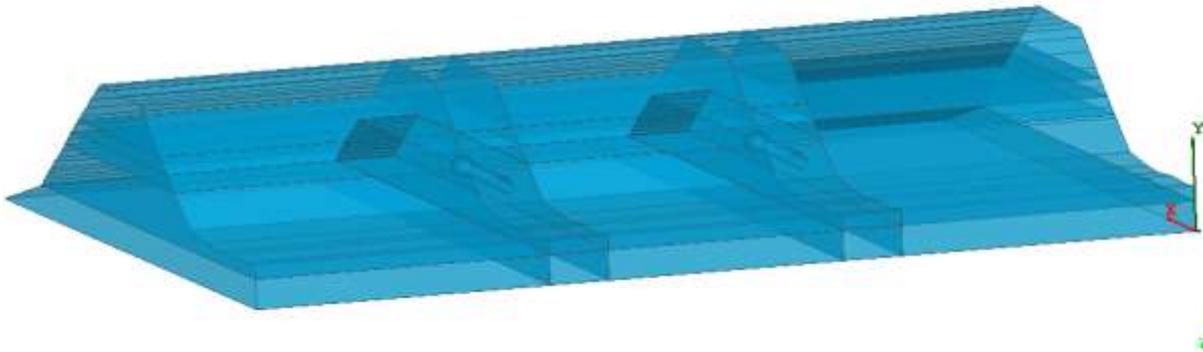


Figura 4.8:Tratto di argine sinistro con due tane semplici disposte a 20 m

- Tana a T - fig. 4.9 e 4.10 - costituita da un tubo cilindrico di 50 cm di diametro penetrante in direzione perpendicolare all'argine ed intersecato da un tubo di dimensioni simili disposto parallelamente all'argine stesso.

0.000 6.513 13.025 19.538 26.051

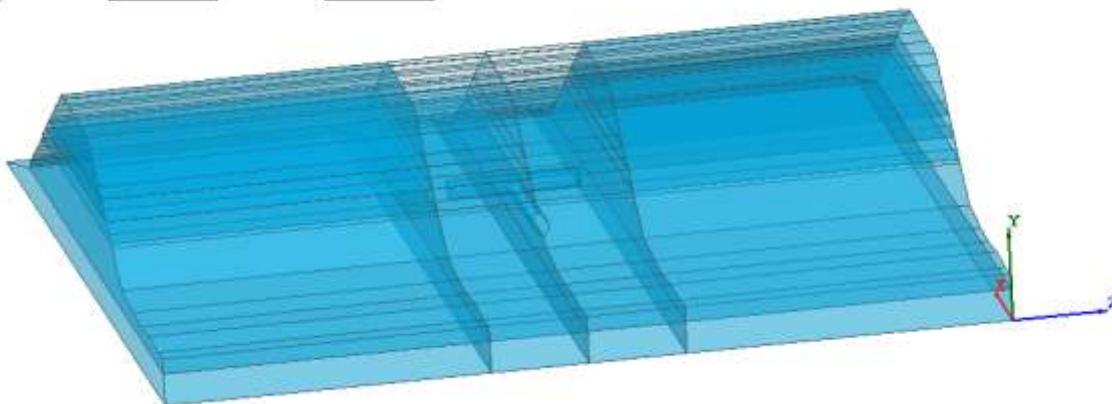


Figura 4.9:Tratto di argine sinistro con tana a T

Nelle successive simulazioni per questioni legate alla possibilità di selezionare gli elementi interni della tana a T, per l'applicazione delle condizioni al contorno, verranno usati modelli più semplici di questo tipo di tana come mostra l'immagine sottostante in - fig. 4.10 - che è costituito da metà modello della - fig. 4.9 - ; naturalmente sono state inserite tutte le condizioni di simmetria necessarie a mantenere la validità del modello stesso.

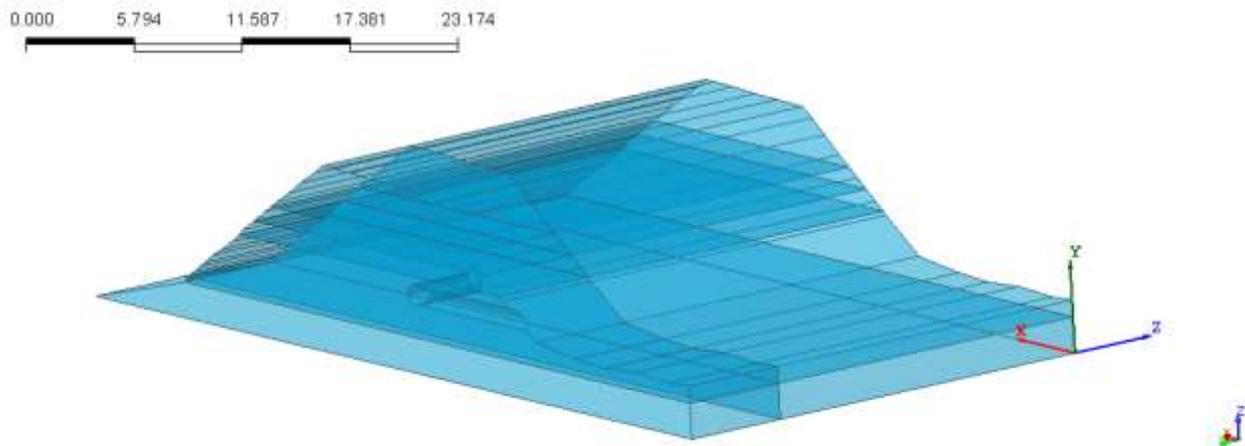


Figura 4.10: Tratto di argine sinistro con tana a T studiato in condizioni di simmetria

Per entrambe le tane si è scelta una lunghezza di penetrazione dell'argine di circa 10 metri

4.1.4 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state inserite manualmente su superfici tridimensionali andando a definire correttamente ogni parte del problema relativo all'analisi di filtrazione.

Le condizioni inserite sono :

- *Superficie di potenziale filtrazione* : posta sul paramento lato campagna, sul piano campagna stesso e lungo le pareti interne delle tane dove presenti.
- *Vincoli di supporto* : sulla base dell' elemento tridimensionale sono stati bloccati i possibili movimenti in tutte le direzioni.
- *Pressione atmosferica*: imposta nei punti in cui è noto il valore di pressione pari a 0
- *Livelli dell'acqua*:
Sono state studiate, su entrambe le sezioni, le condizioni stazionarie con i tre livelli seguenti:
 - Livello a riposo
 - Livello intermedio
 - Livello di piena

Sono state studiate, su entrambe le sezioni, le condizioni transitorie con i seguenti intervalli temporali:

- Da livello a riposo a livello di piena in 24 ore
- Mantenimento del livello di piena per 5 giorni

Oltre a queste analisi sono state poi condotti altri studi, sempre in condizioni transitorie sulla sezione V con differenti ipotesi livelli di piena, durata della stessa e variazioni delle caratteristiche del terreno e della stratigrafia.

Il livello di piena viene tipicamente raggiunto in 24 ore, passando da circa 1.8 m a circa 10.1 m d'acqua (riferiti alla linea di talweg) con intervalli temporali come in tabella sottostante.

ore	livello (m)
2	1,9
4	2,6
6	3,8
8	4,5
10	5,3
12	6
14	6,8
16	7
18	7,8
20	8,2
22	9,5
24	10,1

Tabella4.3: Intervalli temporali e valori del livello della piena

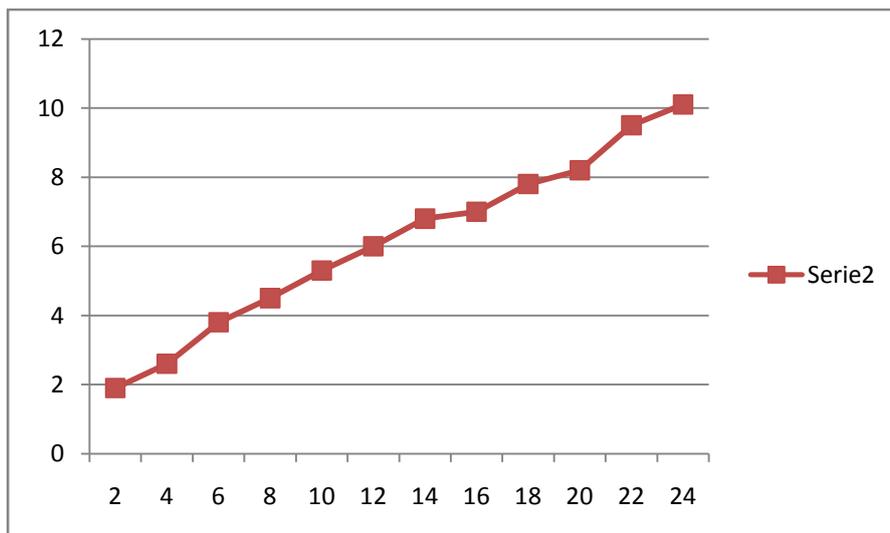


Grafico4.2:Andamento livello di piena

Nelle analisi sono stati considerati solo gli intervalli a 6-12-18-24 ore poiché risultavano essere i più significativi.

Una volta raggiunto il livello di piena lo si è mantenuto costante per un periodo di 5 giorni, misurando i cambiamenti ad intervalli di 24 ore, potendo verificare così il comportamento dell'argine a più lungo termine.

Sono state proposte queste ipotesi di crescita del livello di piena anche a seguito dello studio dei diagrammi forniti dall' *arpav* nei mesi successivi al cedimento del paramento arginale.

Come si può osservare dall' immagine- fig. 4.11 - l'innalzamento progressivo del livello del fiume è comparabile a quello posto nella simulazione; cioè una salita continua dal livello di minimo al livello di piena in 24 ore (linea continua rossa).

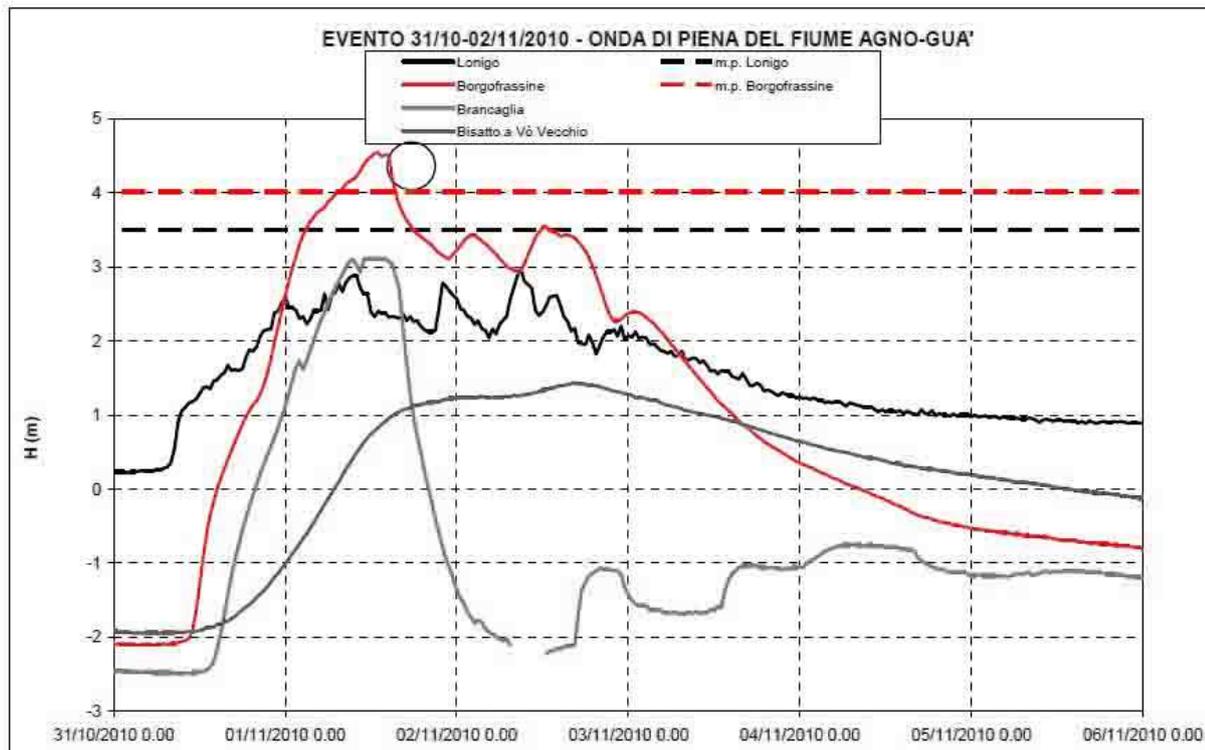


Figura 4.11:Tratto di argine sinistro con tana a T studiato in condizioni di simmetria

Il cerchio rappresenta indicativamente il momento della rottura dell'argine ad una quota d'acqua di circa 7 m e dopo circa 20 ore dall'inizio della piena.

Tali dati verranno poi confermati dalle analisi tridimensionali svolte tramite *GTS MIDAS* nei paragrafi successivi.

4.1.5 Mesh dell'argine

La mesh è la suddivisione di un corpo o una superficie in geometrie elementari di forma triangolare, tetraedrica o altro; sono delle porzioni finite elementari che corrispondono alle porzioni infinitesime nella teoria classica sulla quale si possono applicare forze, pressioni, condizioni al contorno e quant'altro.

Nel progetto in esame la mesh è stata maggiormente intensificata nelle zone d'interesse, cioè le zone in cui erano presenti le alterazioni, poiché una mesh più fitta permette di ottenere risultati più precisi ed una rappresentazione più corretta del problema; ma allo stesso tempo richiede un incremento notevole nei tempi richiesti dal calcolatore per giungere al risultato finale.

Per evitare di sovraccaricare e superare le capacità del calcolatore si è quindi intensificata la mesh nelle zone delle alterazioni, sfruttando elementi di 0.5 m di lato, mentre si sono usati elementi di dimensioni maggiori nelle zone più lontane degradando fino ad elementi di circa 1 m di lato.

Questo ha permesso di ottenere un giusto compromesso tra un'elevata precisione dei risultati nelle zone circostanti le alterazioni ed un adeguato tempo di calcolo della soluzione.

Di seguito vengono proposte, a titolo d'esempio, alcune della mesh adottate sugli argini.

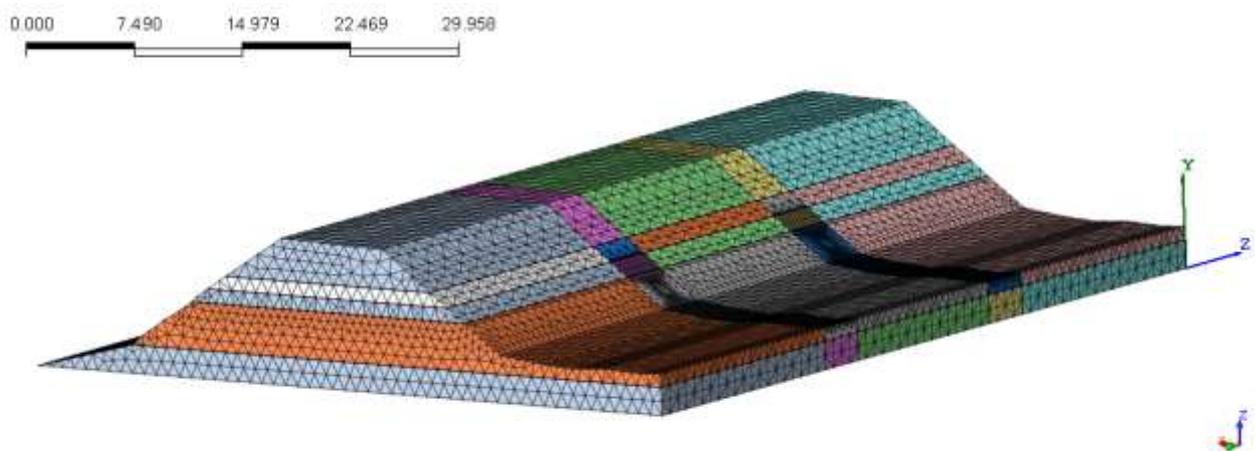


Figura 4.12: mesh del tratto di argine sinistro con tane semplici

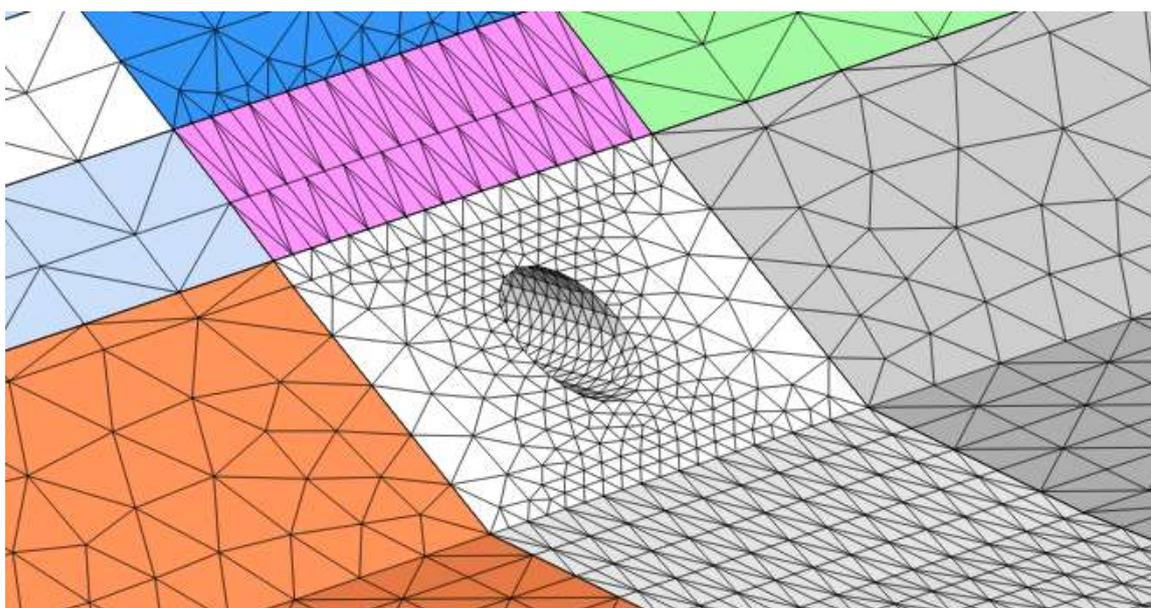


Figura 4.13: Particolare della mesh della tana semplice

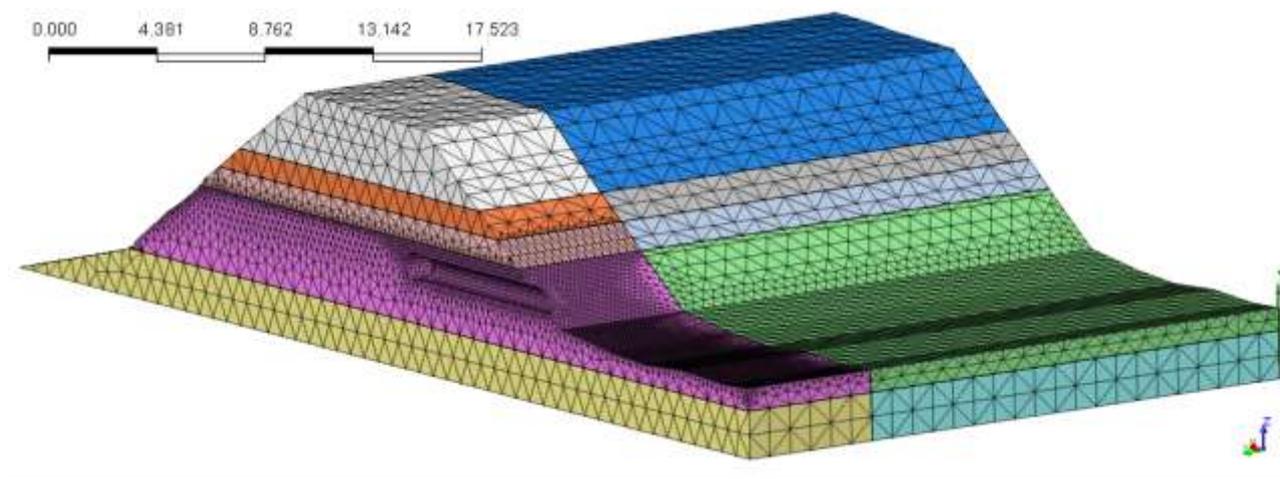


Figura 4.14: mesh del tratto di argine sinistro con tana a T

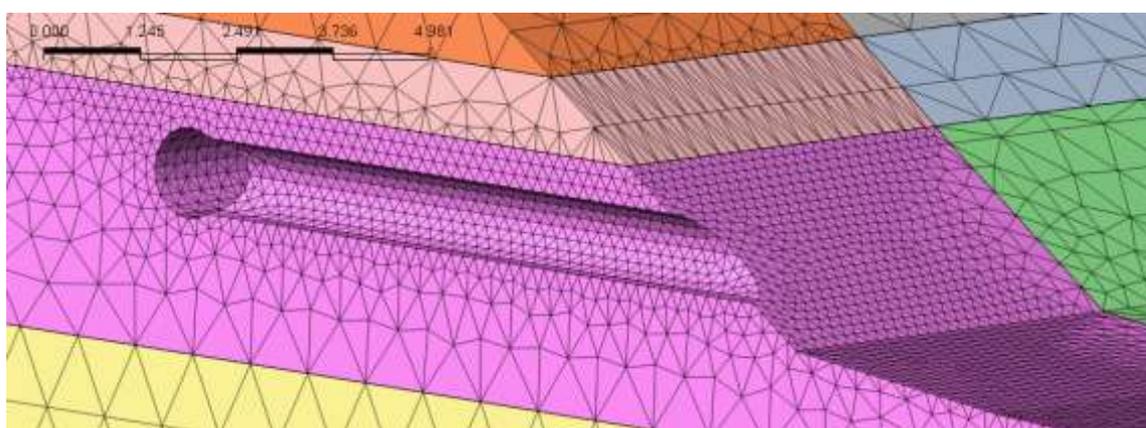


Figura 4.15: Particolare della mesh della tana a T in condizioni di simmetria

4.2 Tipologie di analisi

Verranno ora presentati i risultati ottenuti dalla simulazione dell'argine per entrambe le sezioni scelte.

Si propongono prima le analisi in stato stazionario (sia senza che con la presenza delle alterazioni) e poi introdotte le analisi transitorie.

4.2.1 Analisi stato stazionario

Sono stati utilizzati 3 diversi livelli per entrambe le sezioni:

- Livello a riposo: 1.8 metri sulla linea di talweg
- Livello intermedio: 5 metri sulla linea di talweg
- Livello di piena: 10.1 metri sulla linea di talweg

4.2.1.1 Livello a riposo

4.2.1.1.1 Sezioni senza alterazioni

In ordine la sezione V e la sezione 12 prive di alterazione in condizioni a riposo, tipiche della maggior parte dell'anno del corso del fiume.

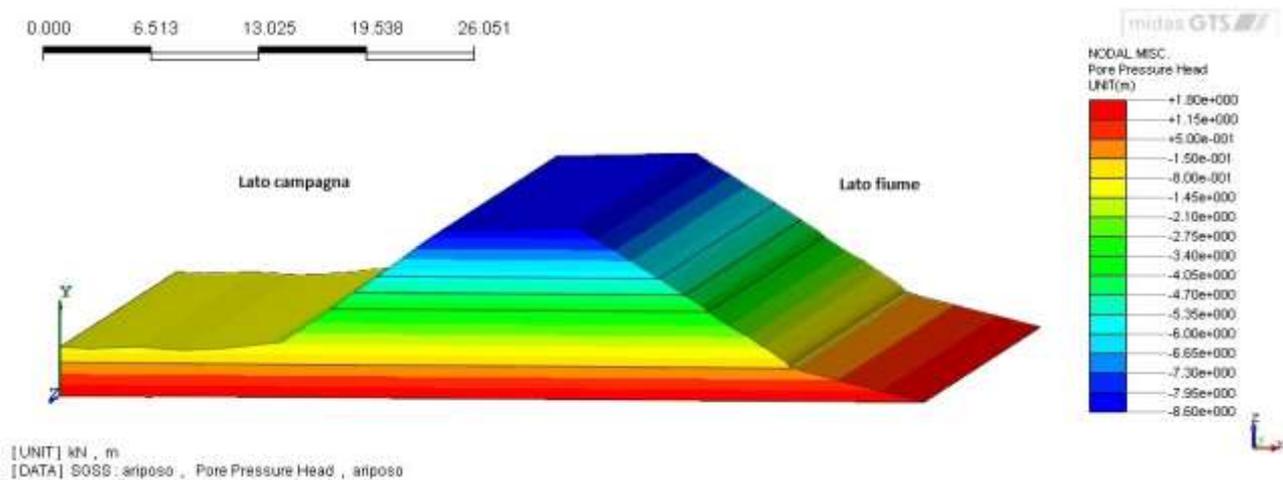


Figura 4.16:Argine sinistro sezione V

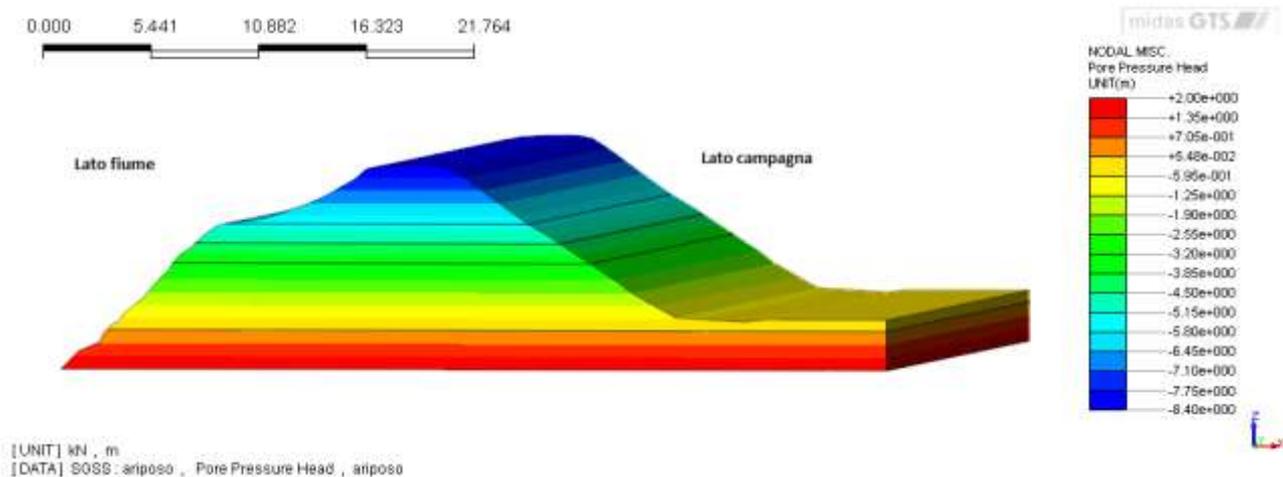


Figura 4.17:Argine destro sezione 12

In entrambi i casi la linea piezometrica si trova nella zona arancione- giallo, non risulta influire in nessun modo sull'argine o sul piano campagna.

4.2.1.1.2 Sezioni con alterazioni semplici

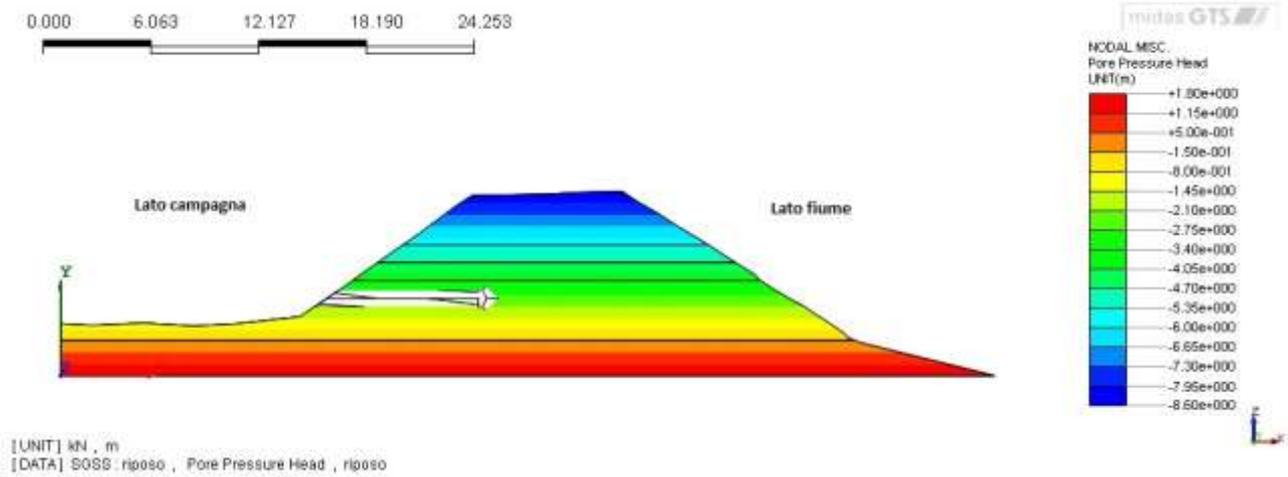


Figura 4.18:Argine sinistro sezione V con alterazione semplice

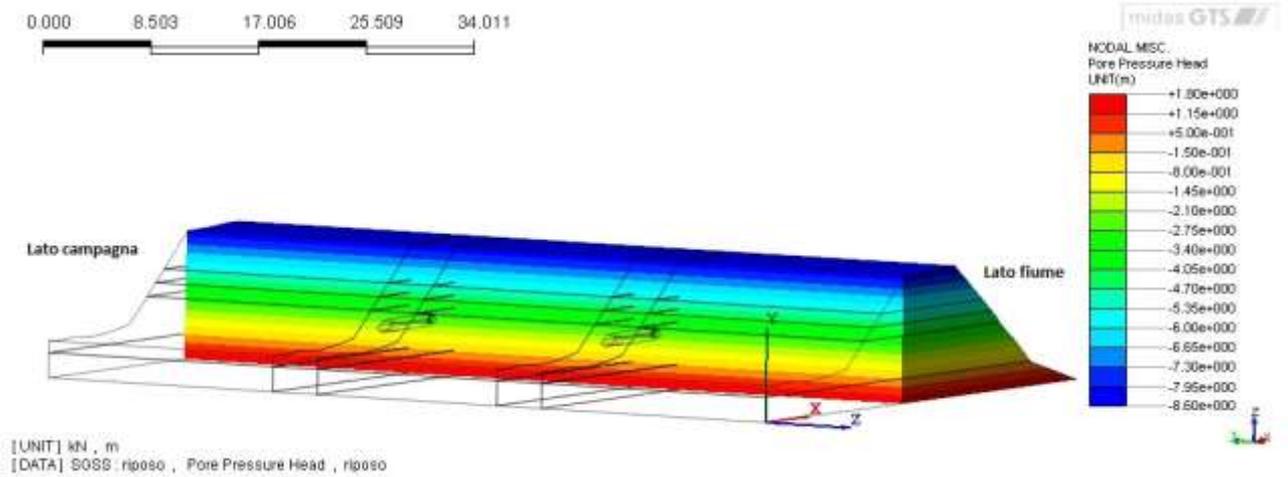


Figura 4.19:Sezione longitudinale argine sinistro sezione V con alterazione semplice

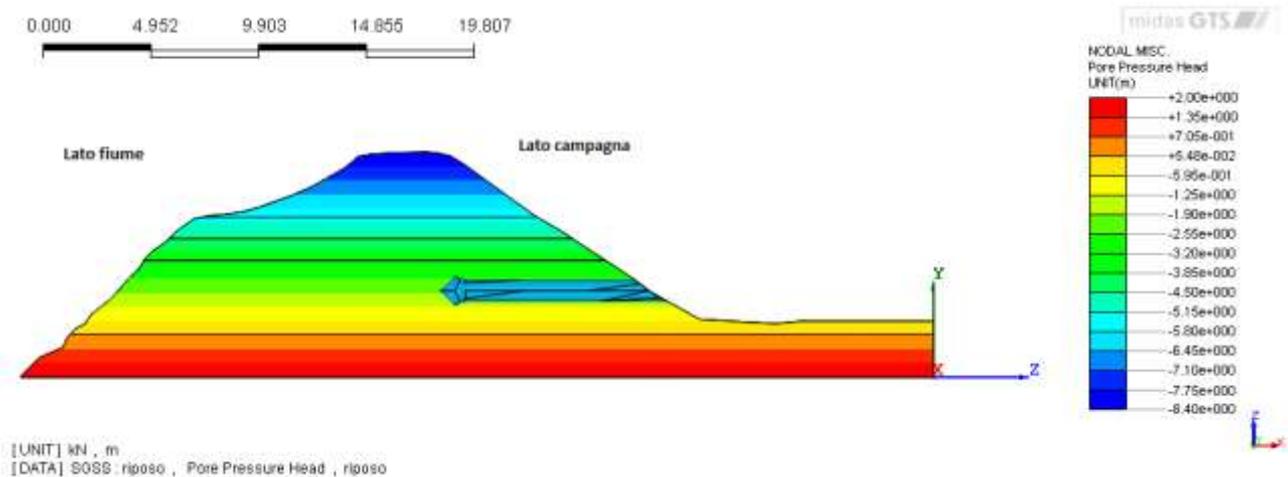
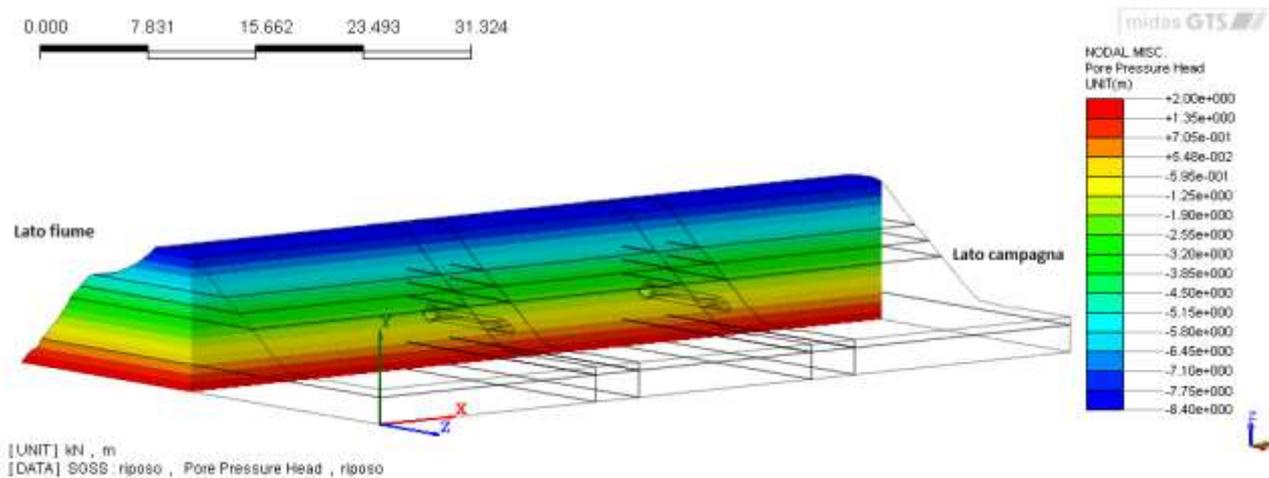


Figura 4.20:Argine destro sezione 12 con alterazione semplice



4.21: Sezione longitudinale argine destro sez 12 con alterazione semplice

Come si può notare dalle immagini la linea piezometrica, situata sempre nel confine arancione-giallo, non risulta essere influenzata dalla presenza delle tane sferiche.

4.2.1.1.3 Sezioni con alterazioni a T

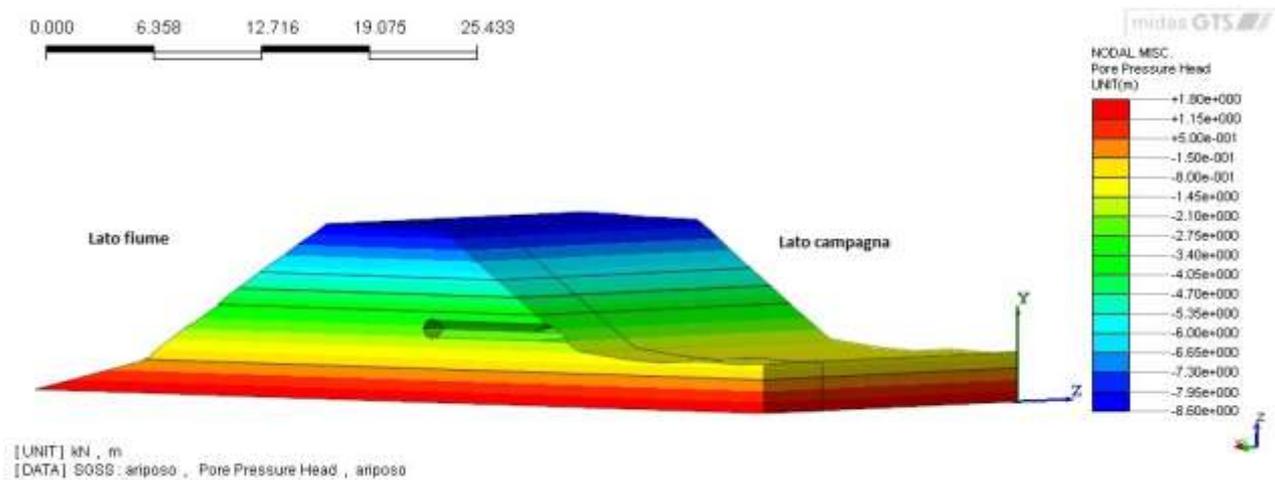


Figura 4.22:Argine sinistro sezione V con alterazione a T

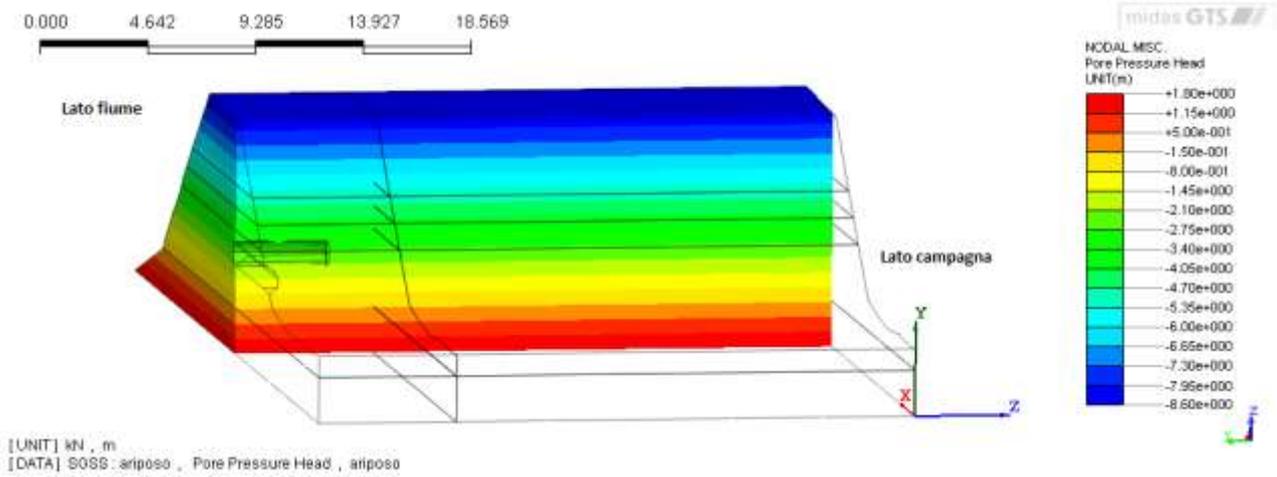


Figura 4.23: Sezione longitudinale argine sinistro sezione V con alterazione a T

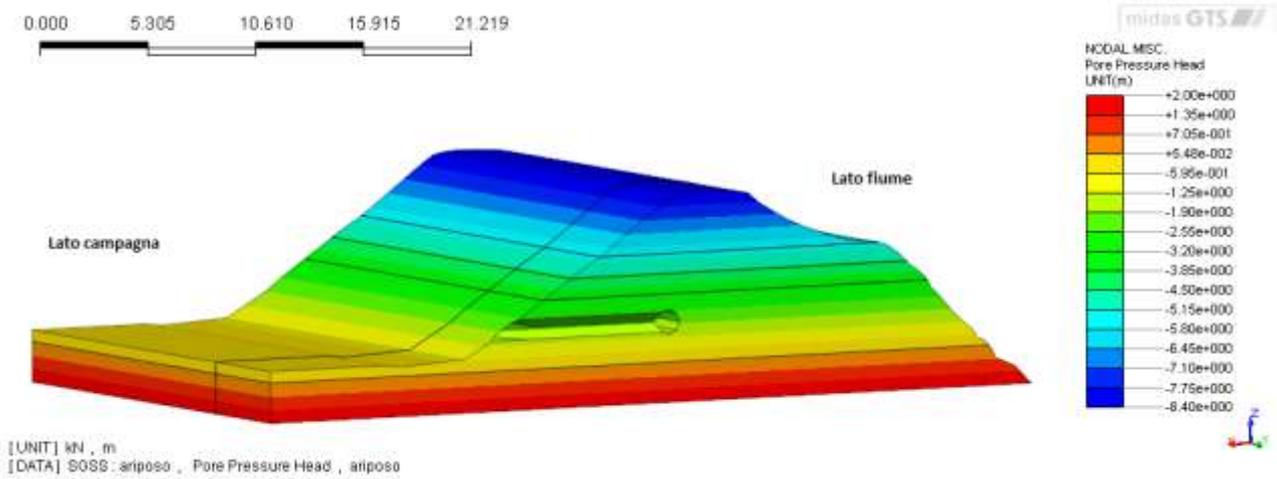


Figura 4.24: Argine destro sezione 12 con alterazione a T

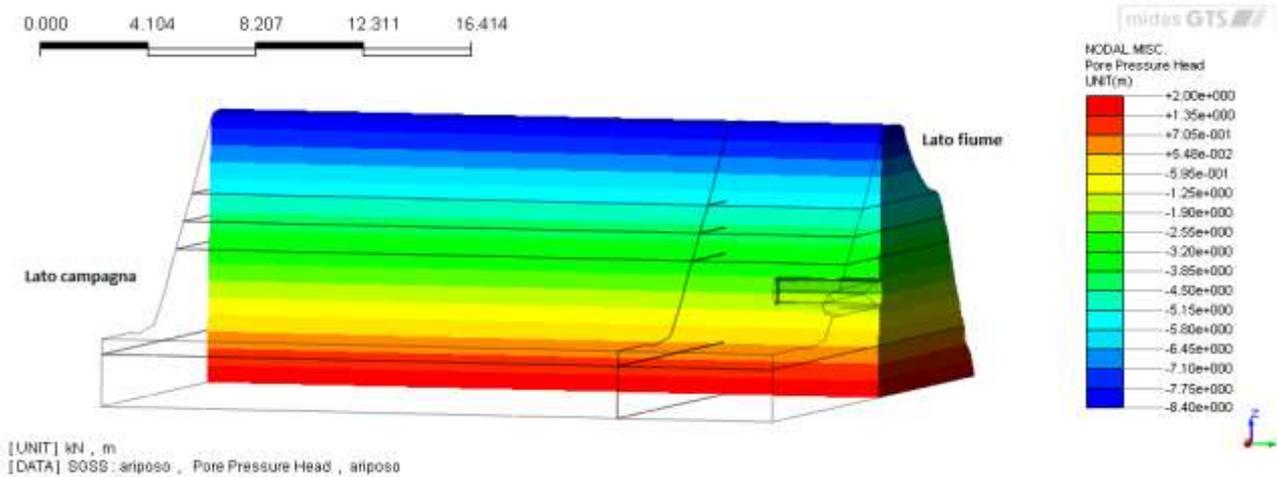


Figura 4.25: Sezione longitudinale argine destro sezione 12 con alterazione a T

Come si può notare dalle immagini la linea piezometrica, situata sempre nel confine arancione-giallo, non risulta essere influenzata dalla presenza delle tane a T.

4.2.1.2 Livello intermedio

4.2.1.2.1 Sezioni senza alterazioni

In ordine la sezione V e la sezione 12 prive di alterazione in condizioni intermedie, supponendo un riempimento parziale dell'argine per un lungo periodo

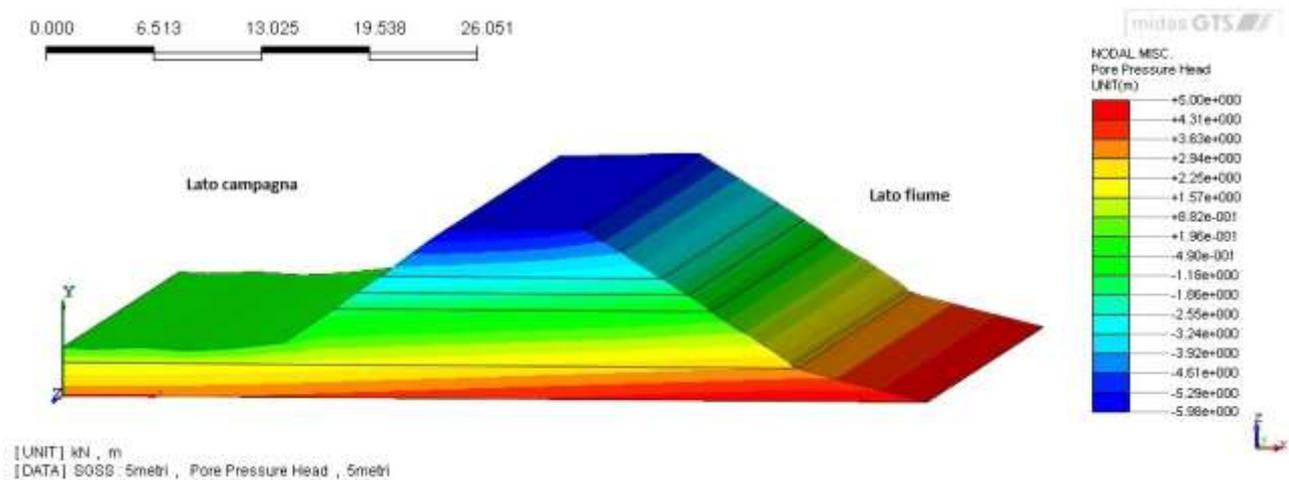


Figura 4.26:Argine sinistro sezione V

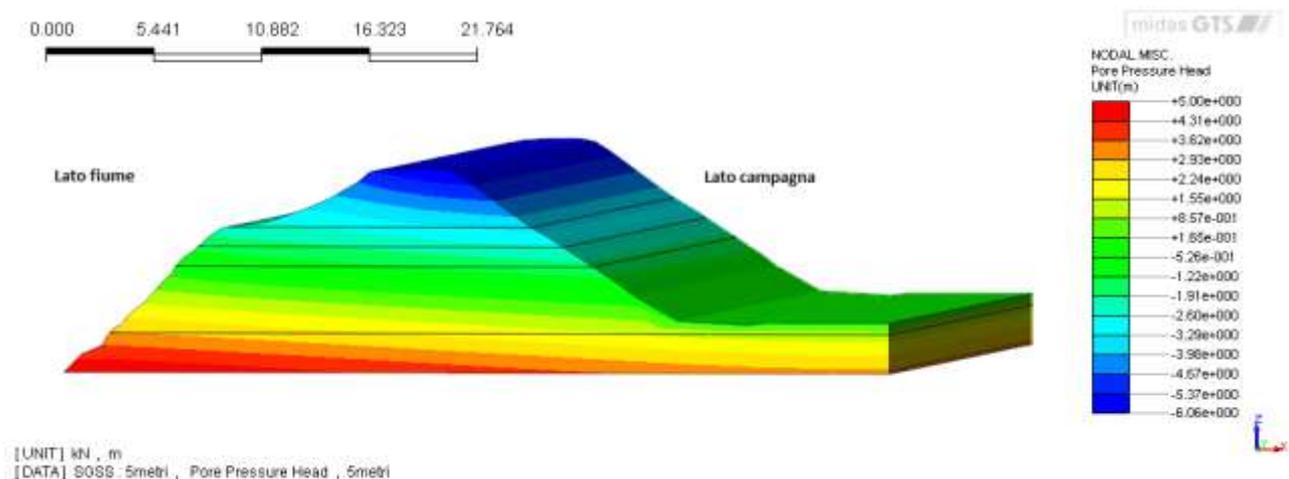


Figura 4.27:Argine destro sezione 12

In entrambi i casi la linea piezometrica si trova nella zona verde, non risulta influire in maniera significativa sull'argine, la linea piezometrica passa per il piede dell'argine lato campagna senza creare eccessivi problemi.

4.2.1.2.2 Sezioni con alterazioni semplici

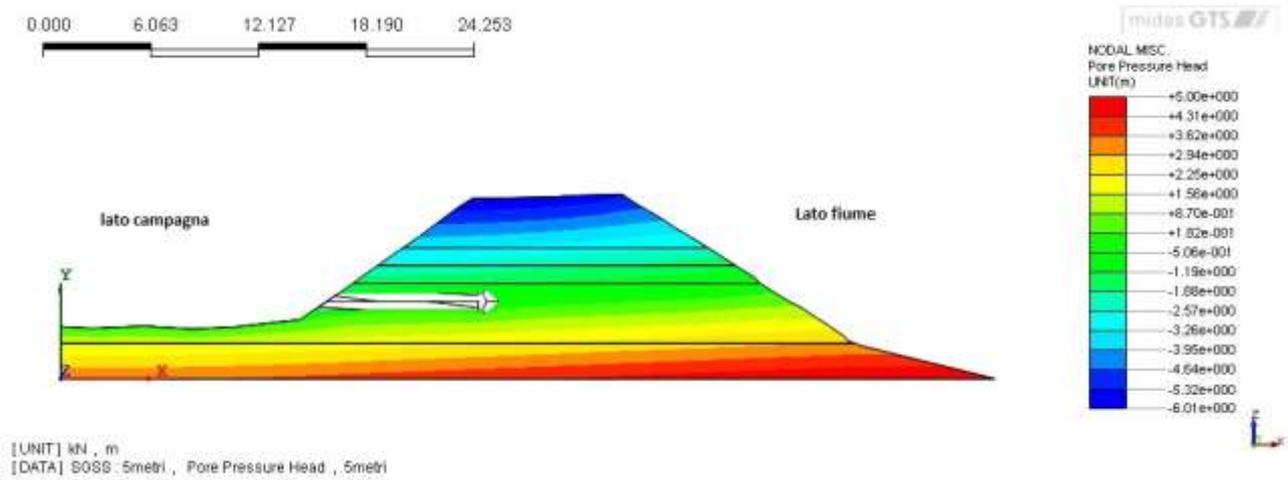


Figura 4.28:Argine sinistro sezione V con alterazione semplice

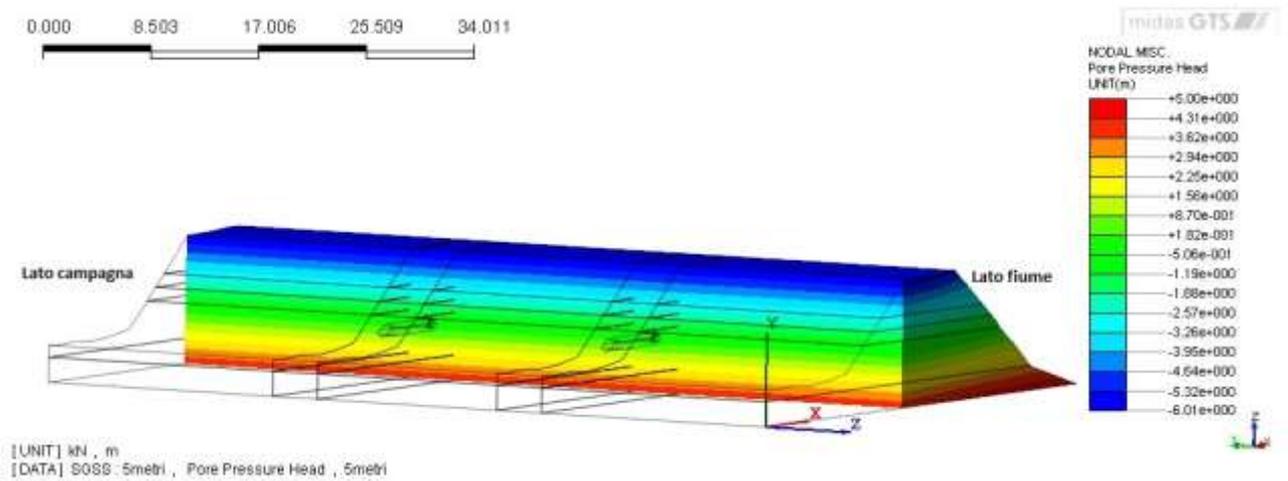


Figura 4.29:Sezione longitudinale argine sinistro sezione V con alterazione semplice

4.2.1.2.3 Sezioni con alterazioni a T

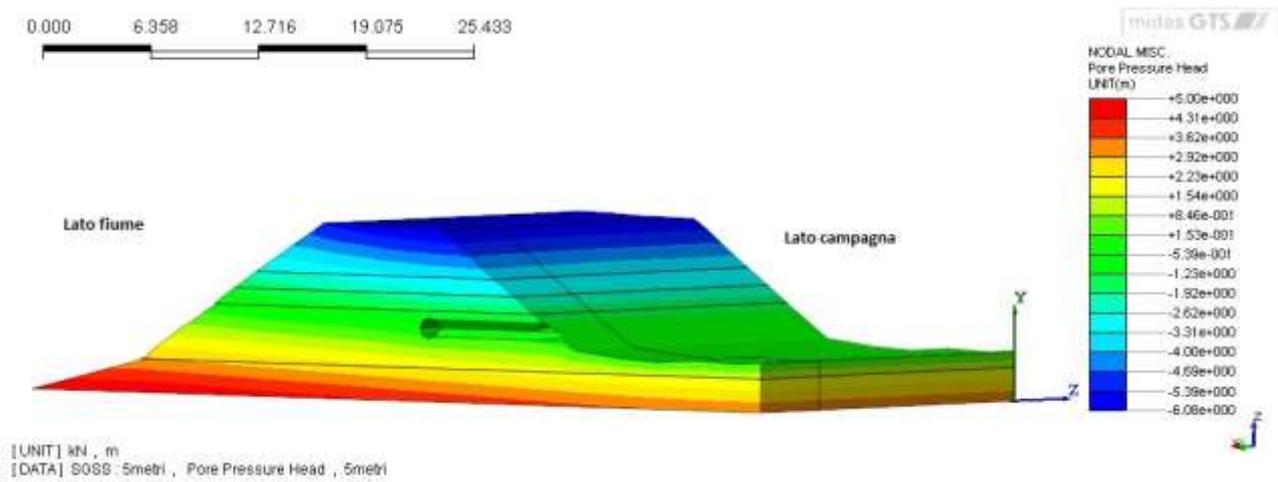


Figura 4.32:Argine sinistro sezione V con alterazione a T

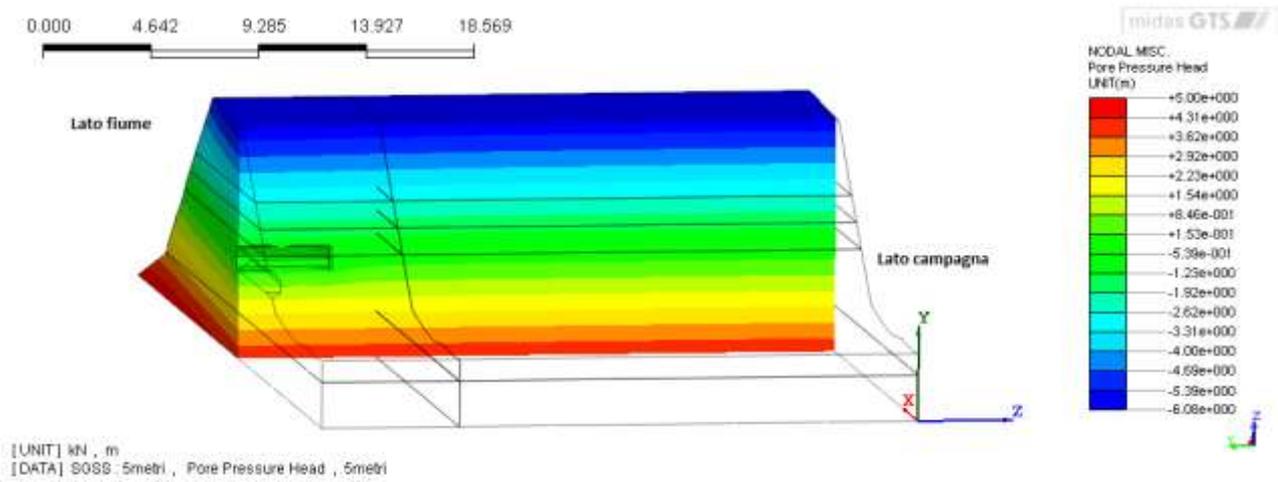


Figura 4.33:Sezione longitudinale argine sinistro sezione V con alterazione a T

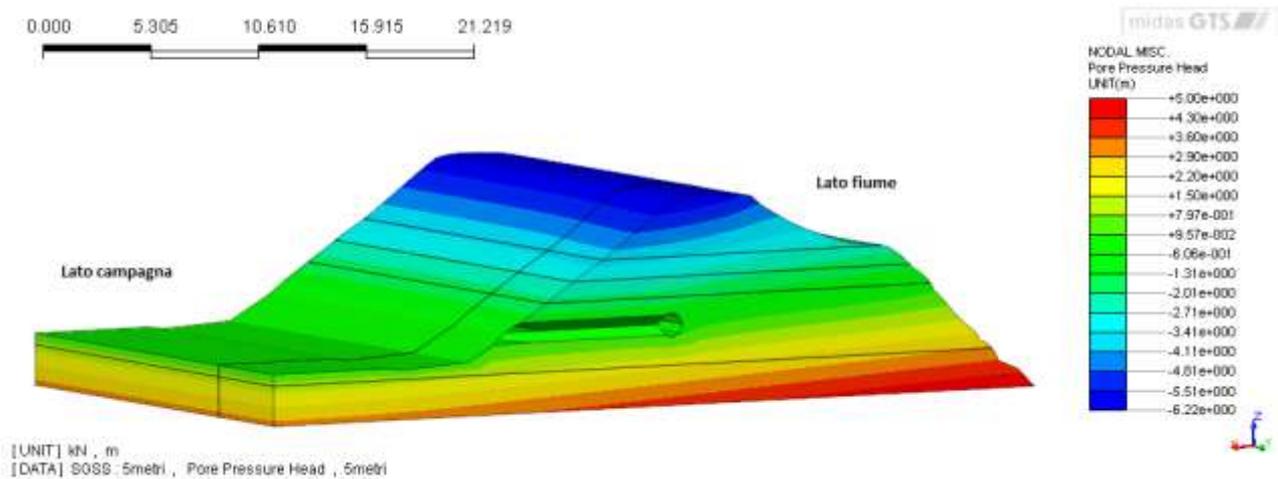


Figura 4.34:Argine destro sezione 12 con alterazione a T

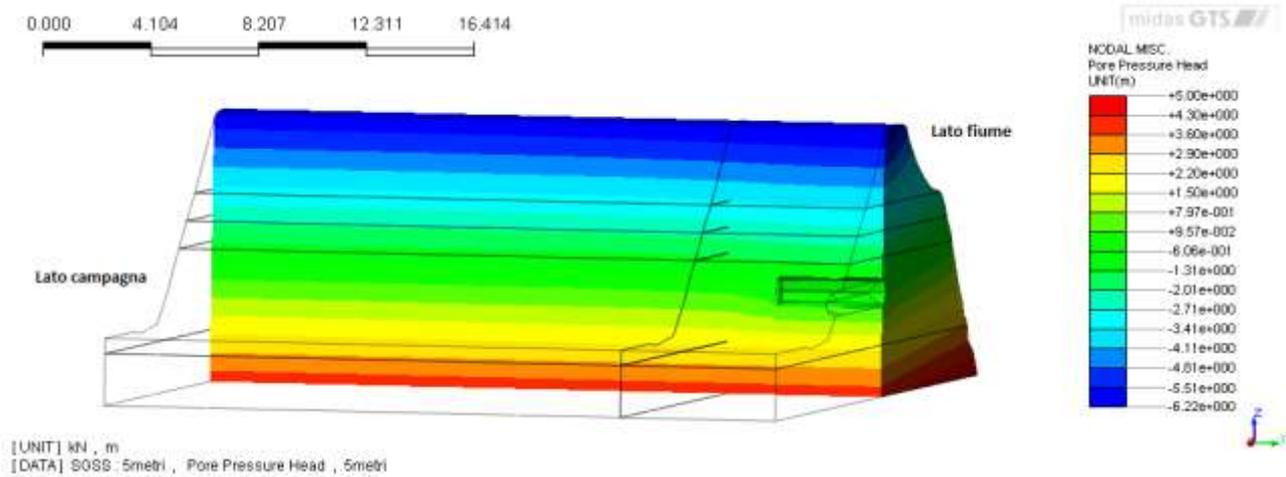


Figura 4.35: Sezione longitudinale argine destro sezione 12 con alterazione a T

La linea piezometrica, situata sempre nella zona verde, passa sotto le tane andando a lambirne la cavità longitudinale all'argine. Si nota dalle immagini delle sezioni longitudinali una lieve inclinazione del contorno verde in prossimità delle zone soggette alle alterazioni, questo effetto è molto più accentuato nelle alterazioni a T rispetto che in quelle a sfera. I valori di filtrazione e di flusso, anche se presenti, sono comunque di bassa entità tali da non causare alcun tipo di problema.

4.2.1.3 Livello di piena

4.2.1.3.1 Sezioni senza alterazioni

In ordine la sezione V e la sezione 12 prive di alterazione in condizioni di piena, supponendo un riempimento totale dell'argine per un lungo periodo.

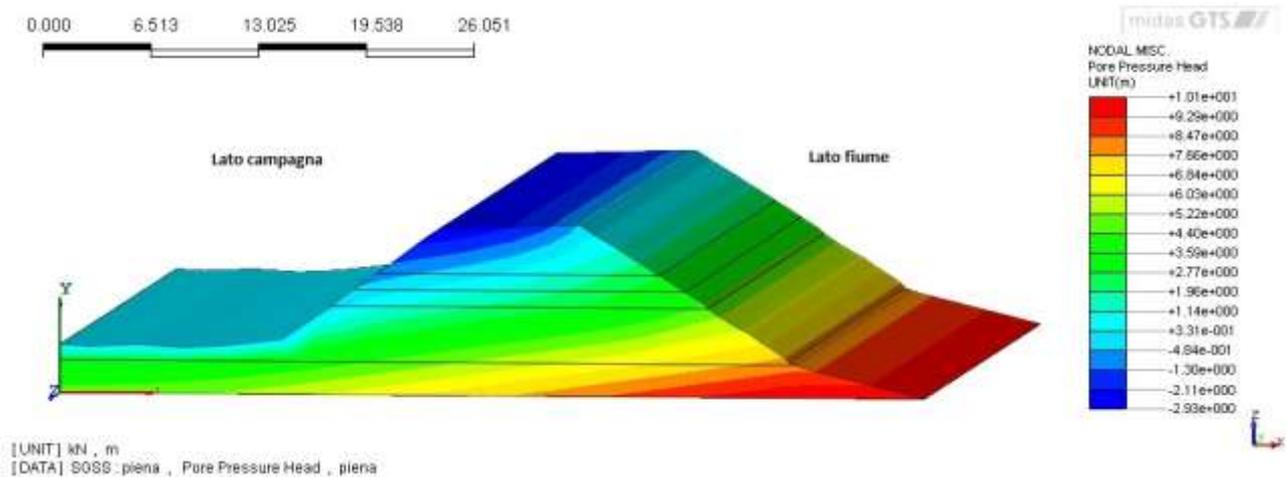


Figura 4.36:Argine sinistro sezione V

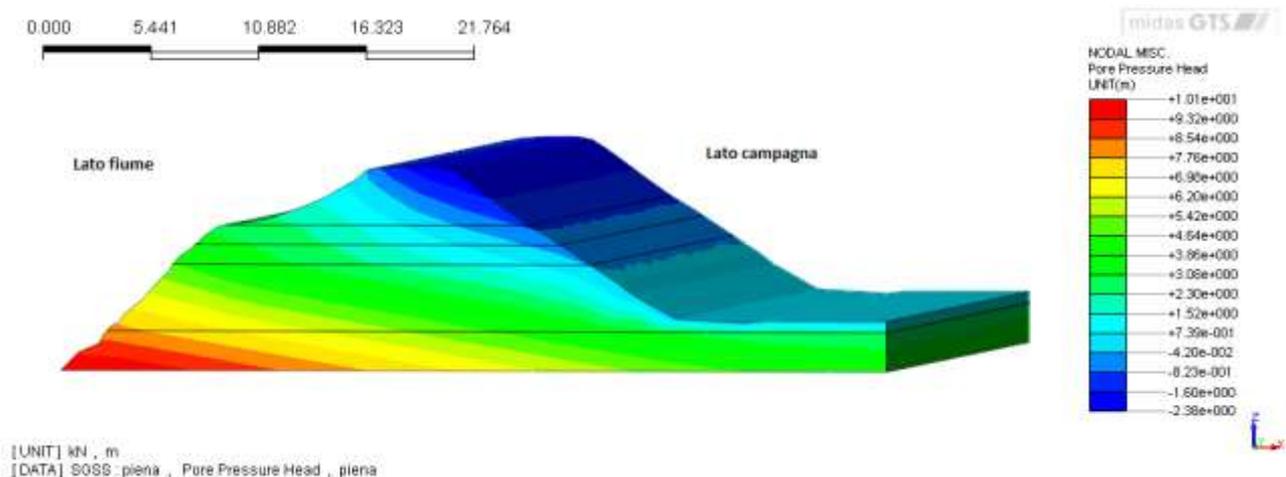


Figura 4.37:Argine destro sezione 12

In entrambi i casi la linea piezometrica si trova nella zona di confine azzurro – blu e come si può notare tende ad uscire lato campagna a circa metà altezza dell'argine. I valori di filtrazione sono molto elevati, tali da non poter essere sostenuti dall'arginatura.

4.2.1.3.2 Sezioni con alterazioni semplici

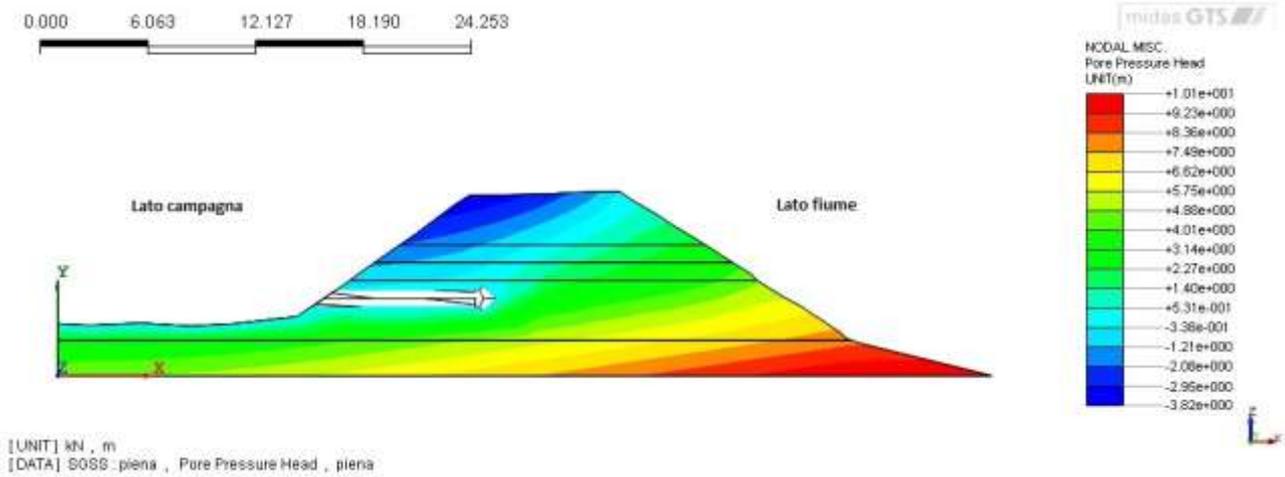


Figura 4.38:Argine sinistro sezione V con alterazione semplice

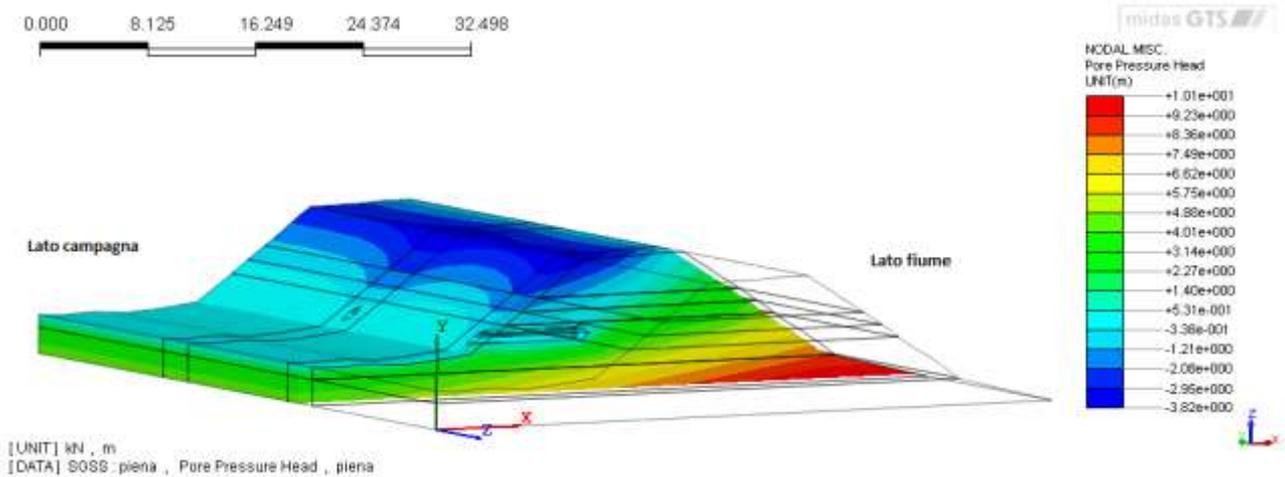


Figura 4.39:Sezione trasversale argine sinistro sezione V con alterazione semplice

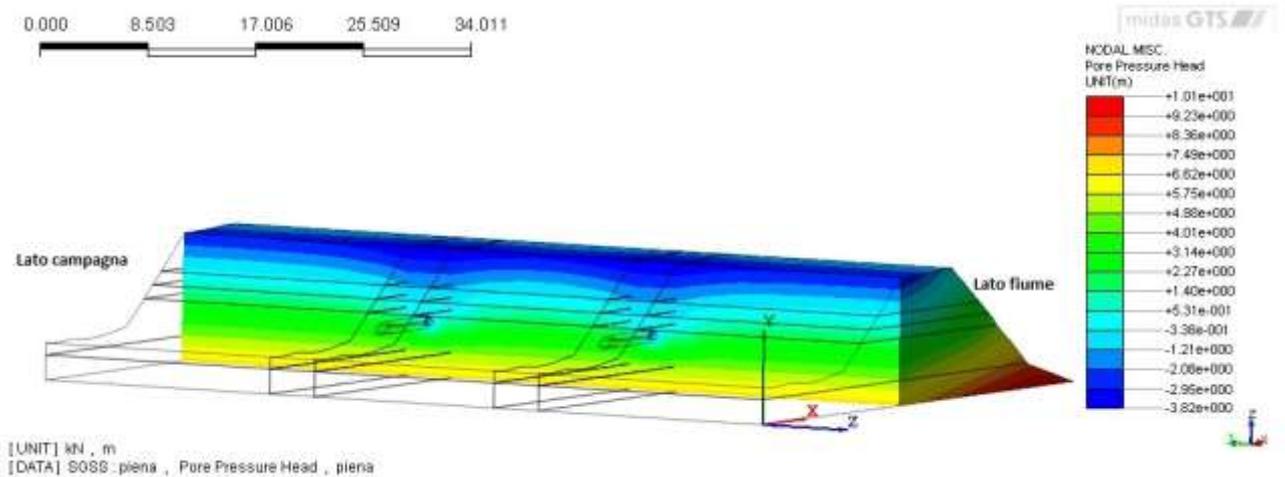


Figura 4.40:Sezione longitudinale argine sinistro sezione V con alterazione semplice

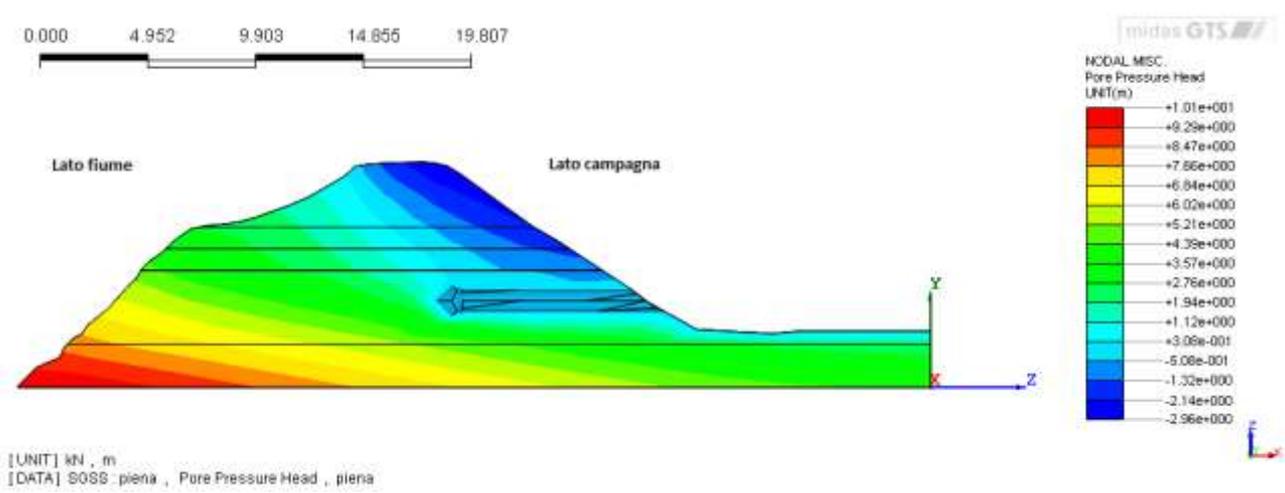
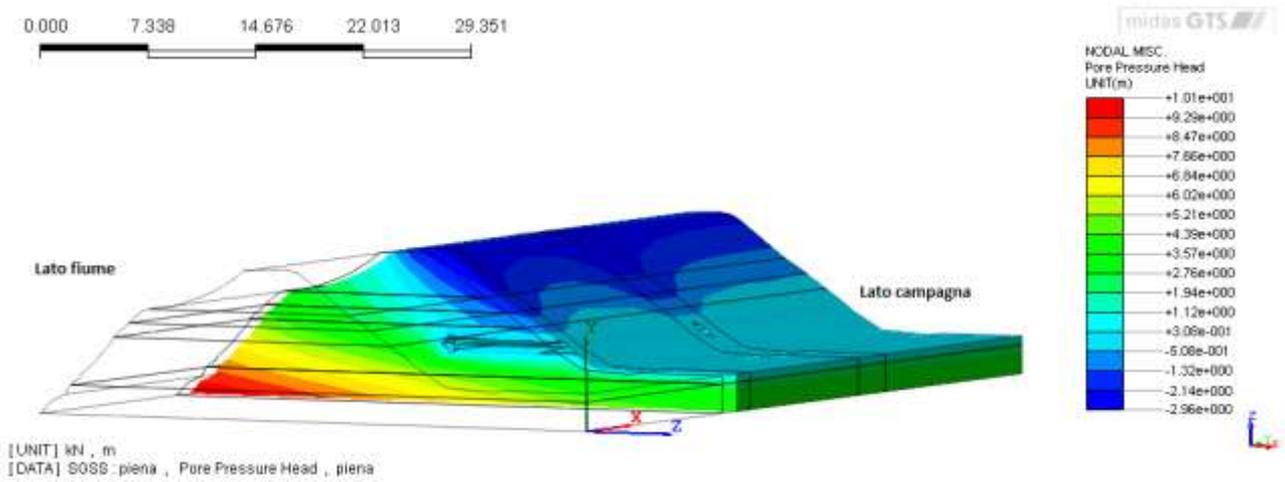
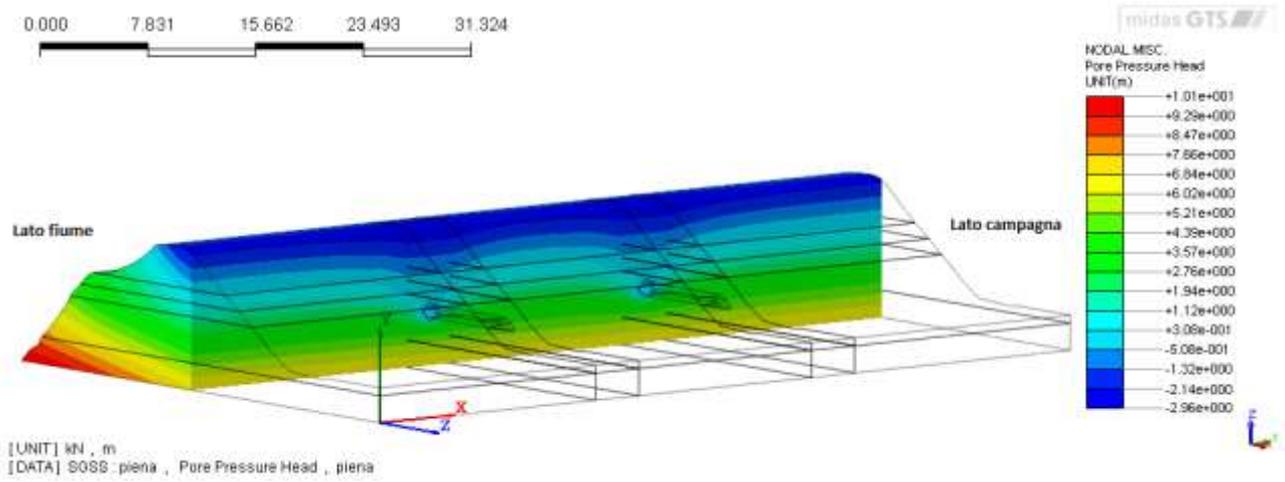


Figura 4.41:Argine destro sezione 12 con alterazione semplice



4.42:Sezione trasversale argine destro sez 12 con alterazione semplice



4.43:Sezione longitudinale argine destro sez 12 con alterazione semplice

Come si può notare dalle immagini la linea piezometrica, situata sempre nel confine azzurro-blu, risente fortemente della presenza delle alterazioni, andando ad essere richiamata nelle zone in cui esse sono situate. Sia i profili trasversali che longitudinali mostrano quest'andamento.

La presenza della tana sferica tende ad influenzare il moto di filtrazione per una zona pari a circa 1 volta il suo diametro. Nel caso in esame essendo le tane costituite da una sfera di circa 1 metro influiscono un a zona di un metro a destra e uno a sinistra dell'asse della tana stessa, per un totale di circa 3 metri d'argine.

4.2.1.3.3 Sezioni con alterazioni a T

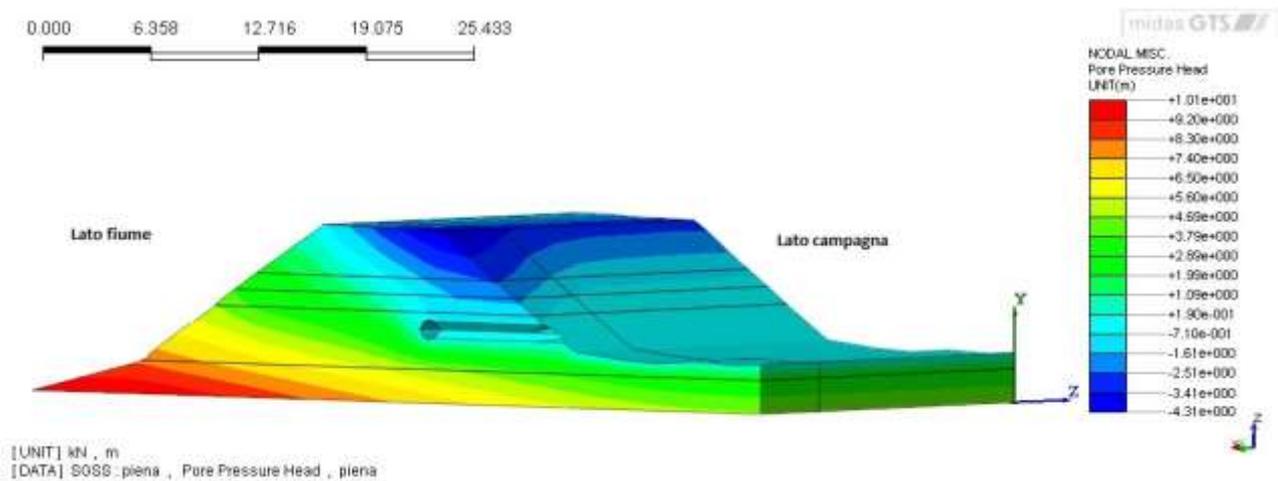


Figura 4.44:Argine sinistro sezione V con alterazione a T

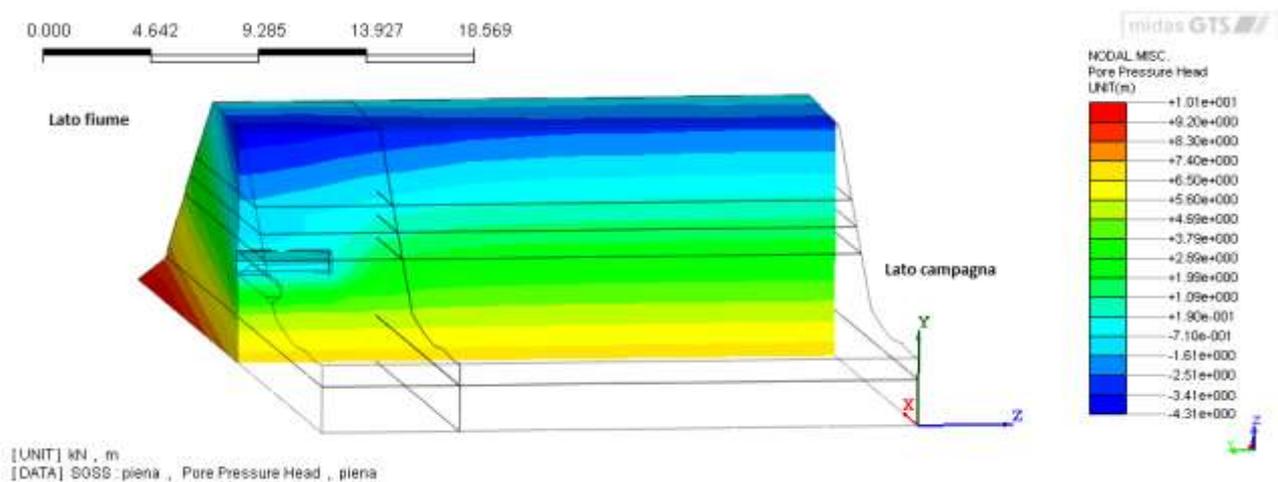


Figura 4.45:Sezione longitudinale argine sinistro sezione V con alterazione a T

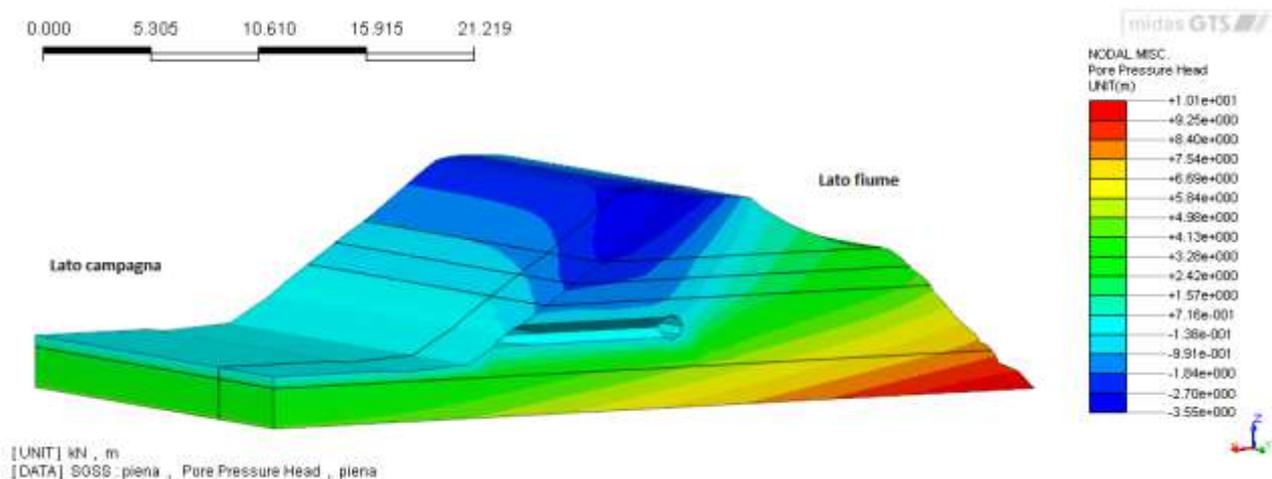


Figura 4.46:Argine destro sezione 12 con alterazione a T

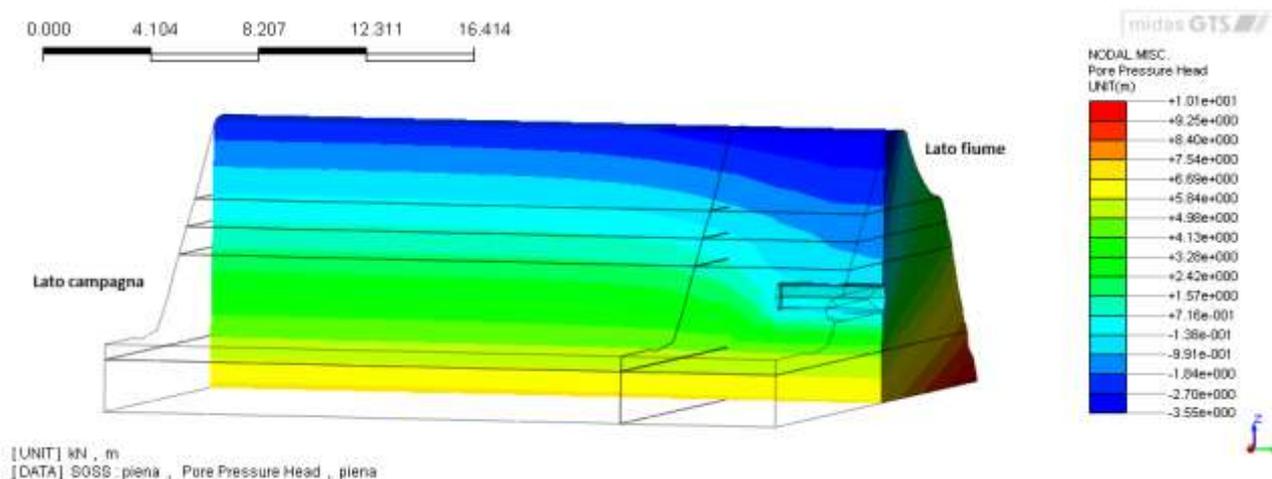


Figura 4.47:Sezione longitudinale argine destro sezione 12 con alterazione a T

Come si può notare dalle immagini la linea piezometrica, situata sempre nella zona di confine azzurro-blu , risente fortemente della presenza delle alterazioni, andando ad essere richiamata nelle zone in cui esse sono situate. Sia i profili trasversali che longitudinali mostrano quest'andamento.

Si nota infatti dalle immagini delle sezioni longitudinali una forte inclinazione della linea piezometrica in prossimità delle zone soggette alle alterazioni, questo effetto è molto più accentuato nelle alterazioni a T rispetto che in quelle a sfera. I valori di filtrazione e di flusso, sono tali da causare grosse problematiche all'arginatura.

L'alterazione a T tende ad influenzare il moto di filtrazione per una zona pari a circa 2 volte la lunghezza dell'elemento longitudinale dell'alterazione. Nel caso specifico in esame, essendo tale elemento lungo 4 metri (studiando metà alterazione per questioni di simmetria e praticità di calcolo) tende ad influenzare una zona di circa 10 metri, misurati dalla testa dell'elemento longitudinale, a sinistra della tana ed altrettanti, per simmetria, a destra; comportando così la creazione di una zona soggetta alla presenza dell'alterazione molto estesa di circa 20-24 metri totali.

Da queste analisi, e da quelle che verranno svolte in seguito, si nota come la presenza di un alterazione a T, con un elemento longitudinale all'arginatura, influenzi maggiormente il richiamo d'acqua verso di essa comportando maggiori problematiche.

4.2.2 Analisi in stato transitorio

Vengono ora esposte le analisi dell'argine in stato transitorio, con l'ipotesi di una piena che cresce linearmente per 24 ore e successivamente il livello di piena viene mantenuto per 5 giorni.

Verranno presentate prima le sezioni prive di alterazione, poi quelle soggette alla presenza di alterazioni semplici, a T ed infine alcuni esempi particolari legati alle variazioni di posizione delle tane o variazioni nella stratigrafia rispetto a quella standard utilizzata fin ora.

4.2.2.1 Sezioni prive di alterazioni

Le immagini sottostanti rappresentano, in ordine, la sezione V e la sezione 12, ad intervalli temporali di 6-12-18-24 ore e 3 e 5 giorni; sono stati scelti questi intervalli poiché risultavano essere i più rappresentativi del problema.

Sezione V:

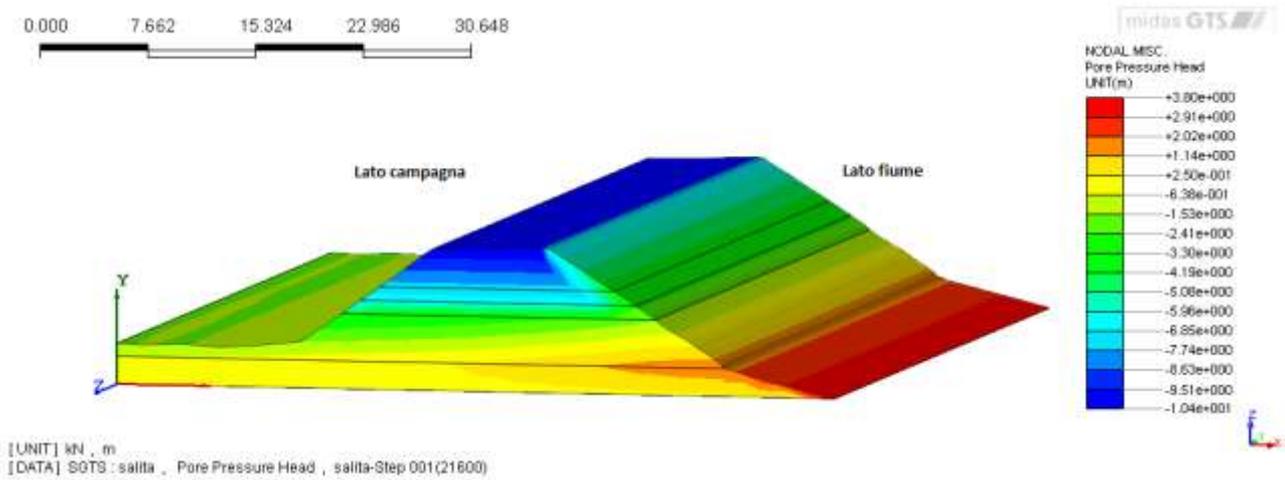


Figura 4.48:Argine sinistro sezione V dopo 6 ore

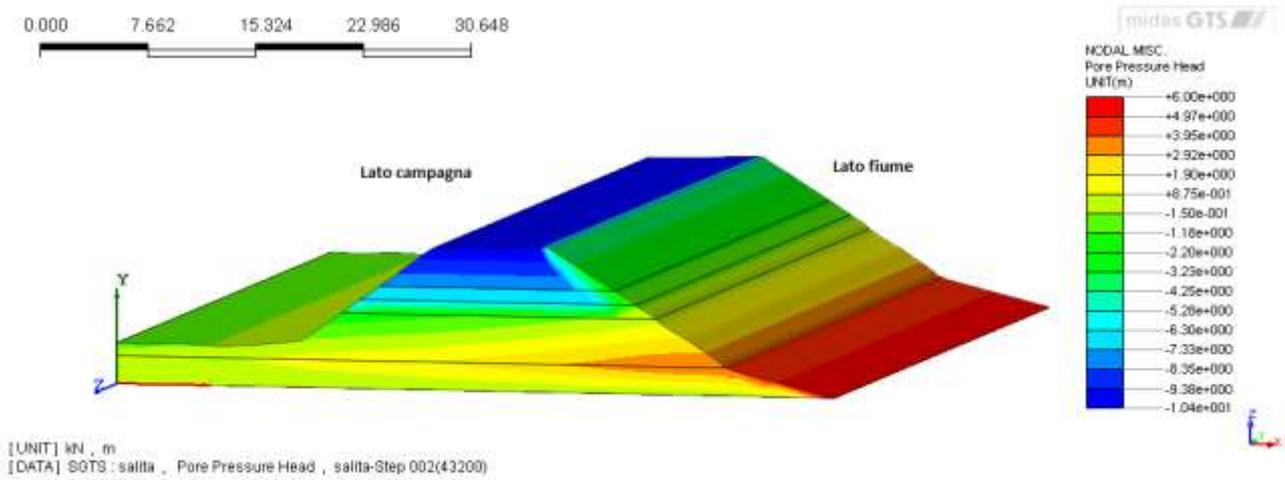


Figura 4.49:Argine sinistro sezione V dopo 12 ore

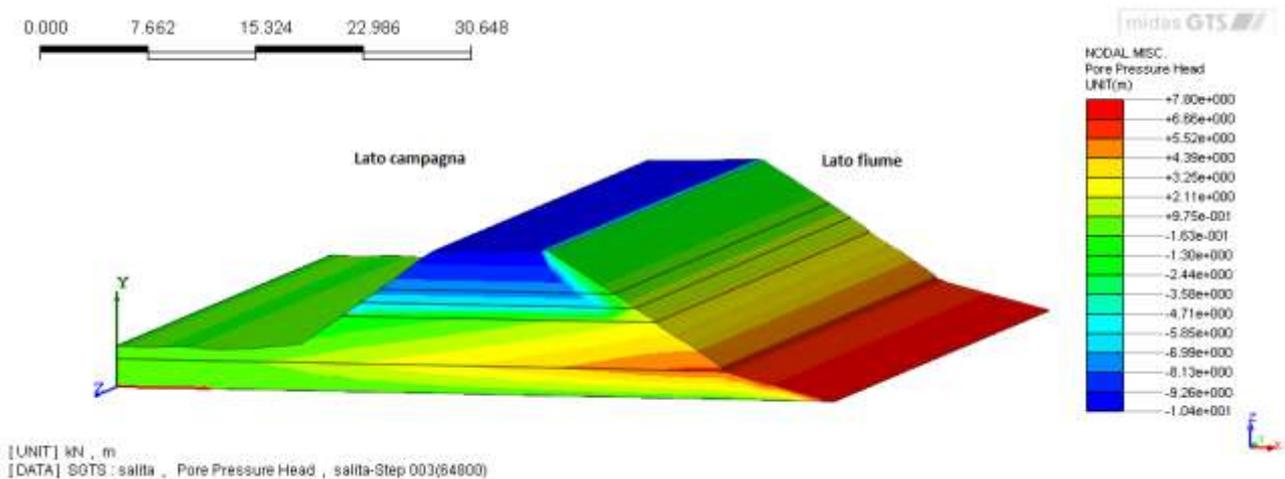


Figura 4.50:Argine sinistro sezione V dopo 18 ore

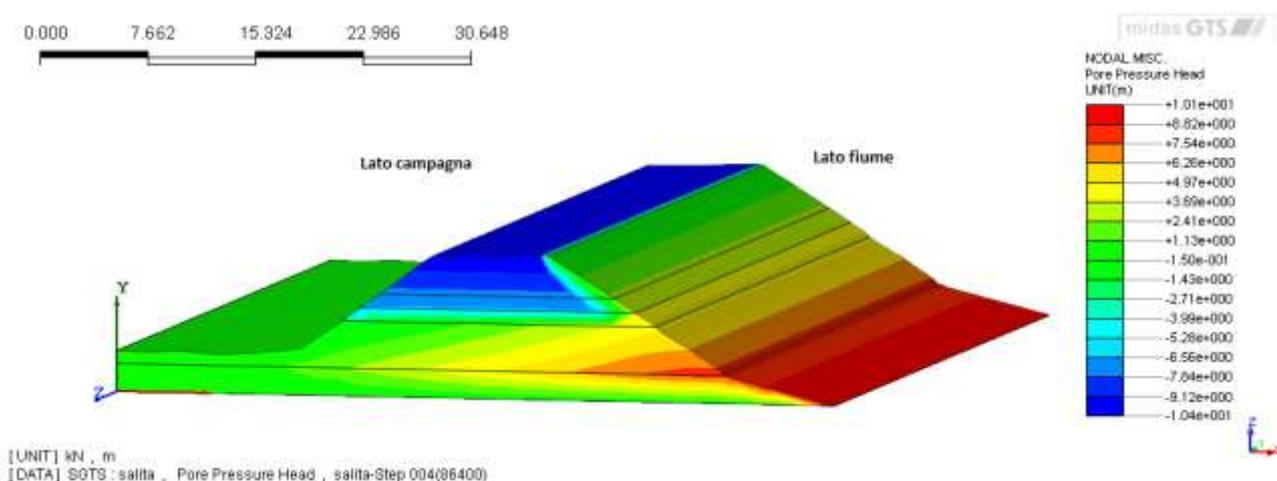


Figura 4.51:Argine sinistro sezione V dopo 24 ore

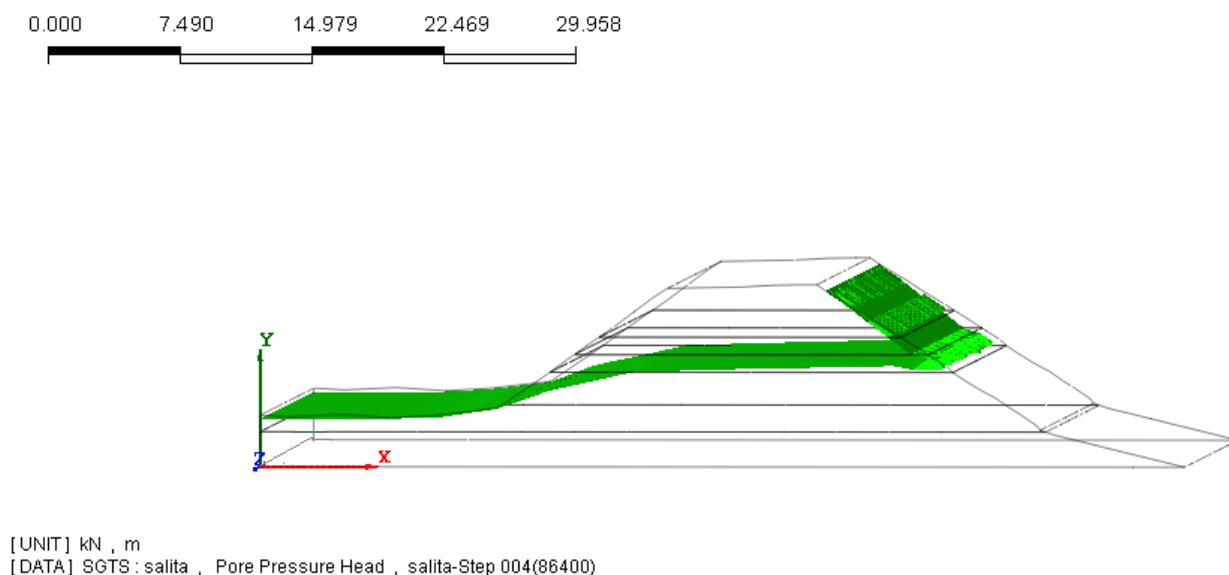


Figura 4.52:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 24 ore

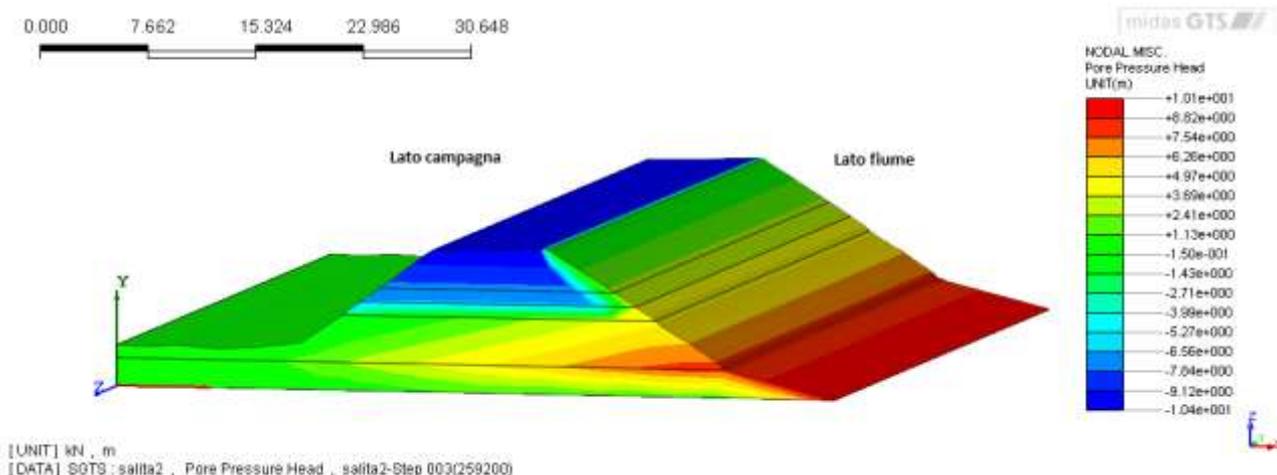


Figura 4.53:Argine sinistro sezione V dopo 3 giorni

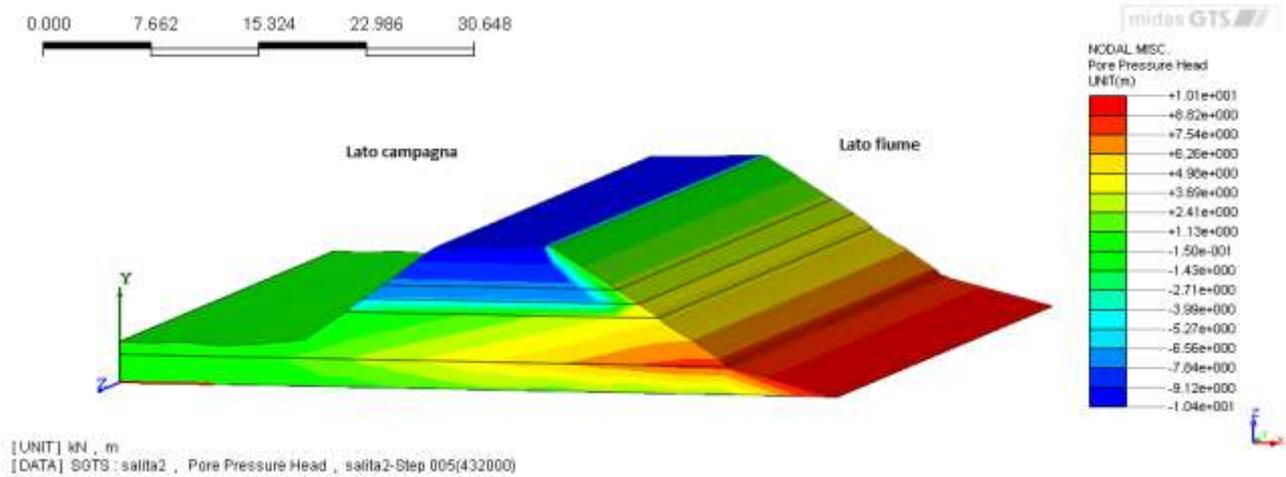


Figura 4.54:Argine sinistro sezione V dopo 5 giorni

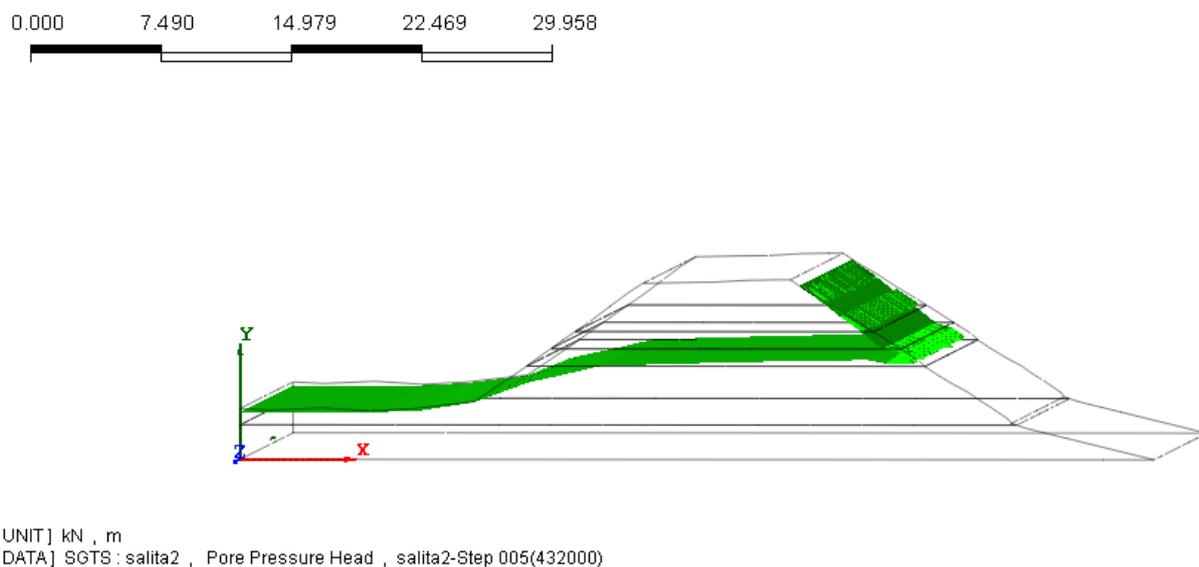


Figura 4.55:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 5 giorni

Come si può notare dalla sequenza delle immagini sovrastanti, l'andamento dell'acqua all'interno dell'argine, in condizioni transitorie, è differente rispetto a quello in condizioni stazionarie.

Infatti l'acqua non ha il tempo di andare ad imbibire i primi tre strati superiori di argilla-limosa, a bassa permeabilità, ed il flusso di fluido si concentra solo negli strati alla base.

Si nota inoltre che la linea piezometrica resta all'interno dell'argine fino a 24 ore dall'inizio della piena, è infatti dopo tale lasso di tempo che si iniziano ad avere i primi fenomeni di filtrazione sul paramento lato campagna e sul piano campagna stesso.

Come evidenziato in - fig. 4.55 - ,che rappresenta la linea piezometrica dopo 24 ore, l'acqua inizia a filtrare dal piede dell'argine con valori che alla ventiquattresima ora sono di circa $3.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e che raggiungono il valore di $4.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dopo 5 giorni di piena .

Prima delle 24ore l'argine non risulta avere problemi, infatti in - fig. 4.50 –,rappresentante la situazione dopo 18 ore di piena, si nota che la linea piezometrica collocata lungo il confine della zona giallo – verde risulta essere ancora racchiusa all'interno del corpo arginale e non si verificano fenomeni di filtrazione.

Sezione 12:

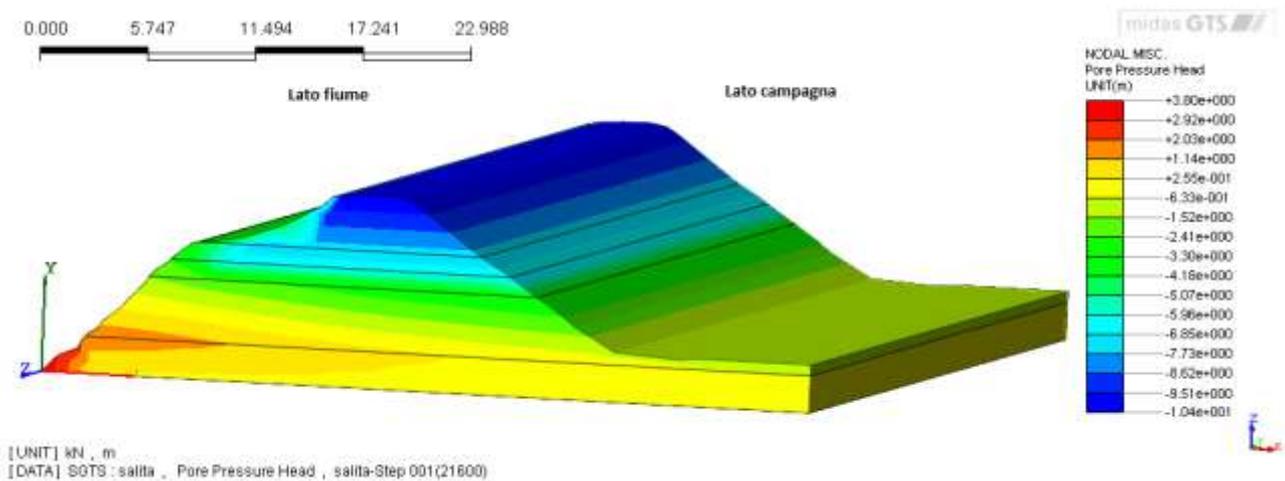


Figura 4.56:Argine destro sezione 12 dopo 6 ore

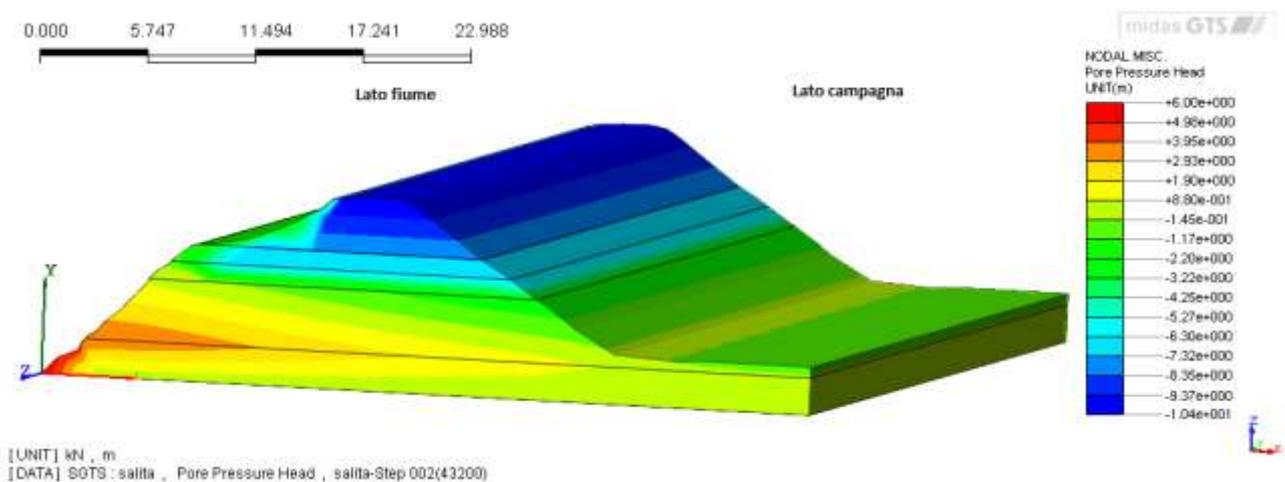


Figura 4.57:Argine destro sezione 12 dopo 12 ore

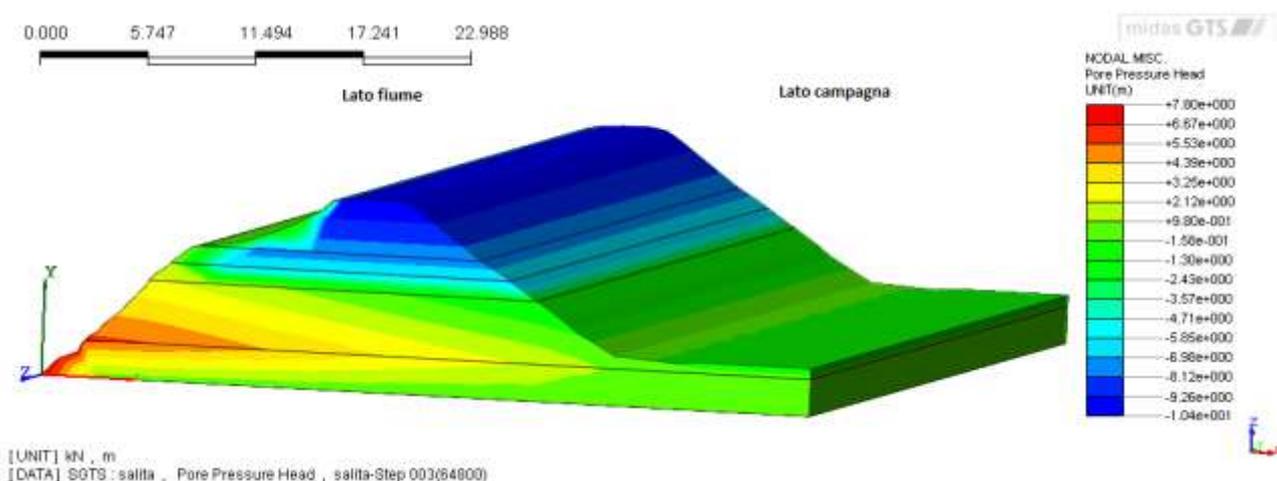


Figura 4.58:Argine destro sezione 12 dopo 18 ore

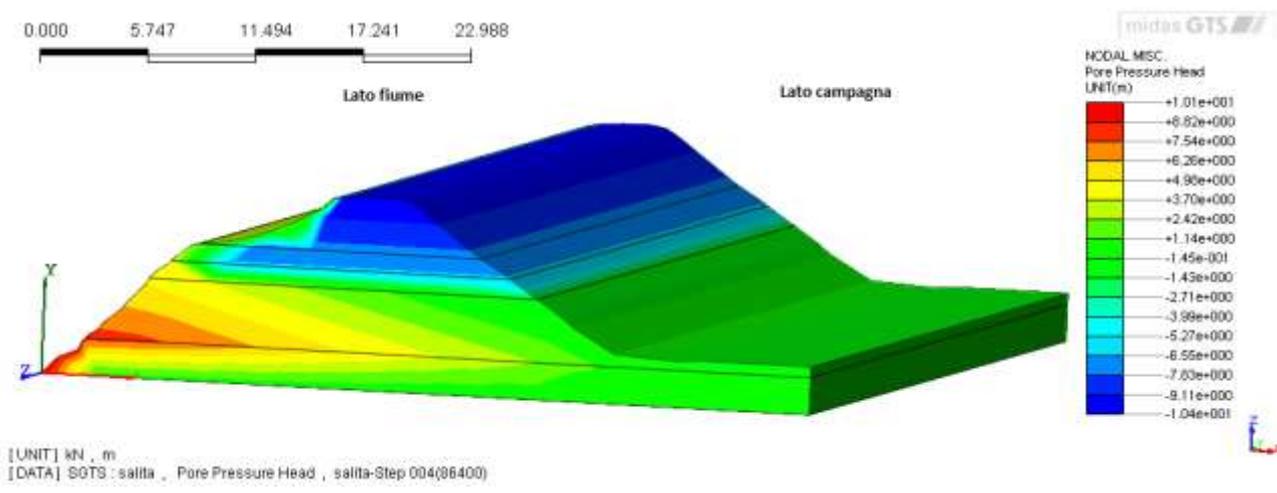


Figura 4.59:Argine destro sezione 12 dopo 24 ore

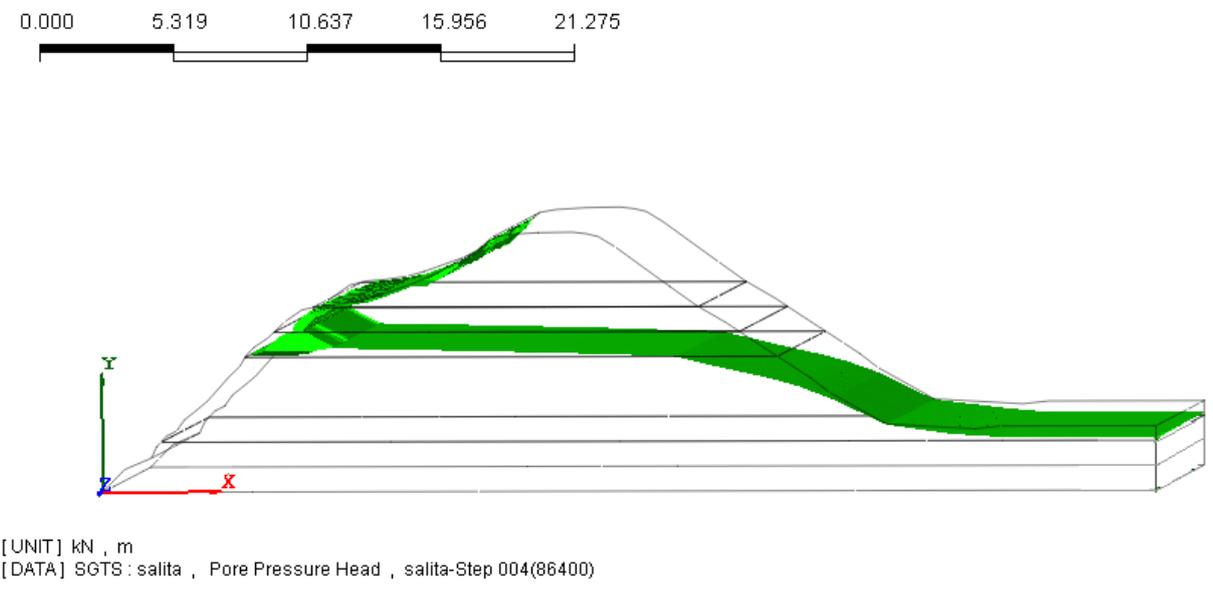


Figura 4.60:Argine destro sezione 12 linea piezometrica dopo 24 ore

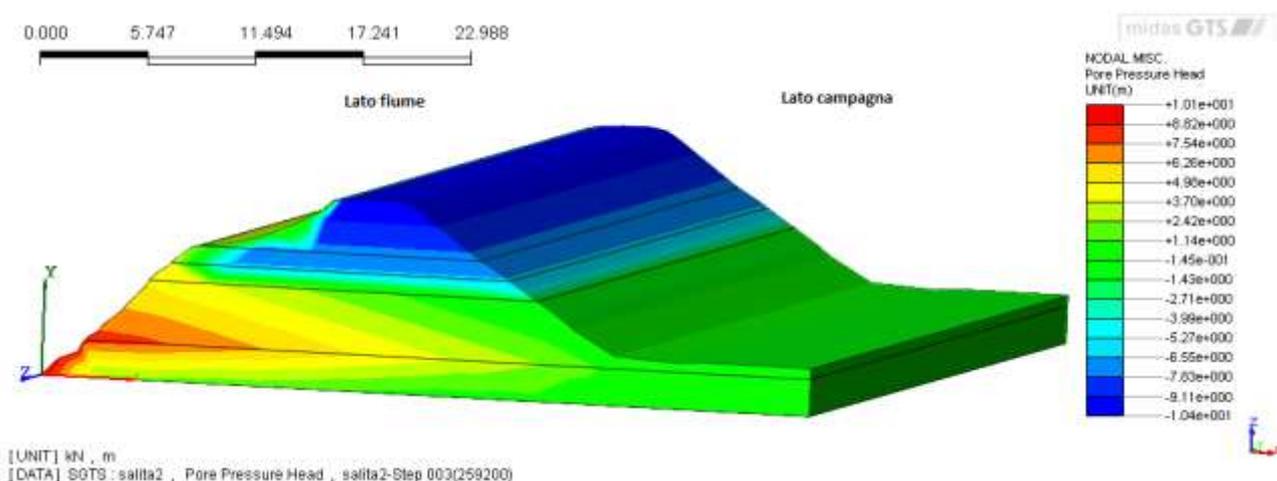


Figura 4.61:Argine destro sezione 12 dopo 3 giorni

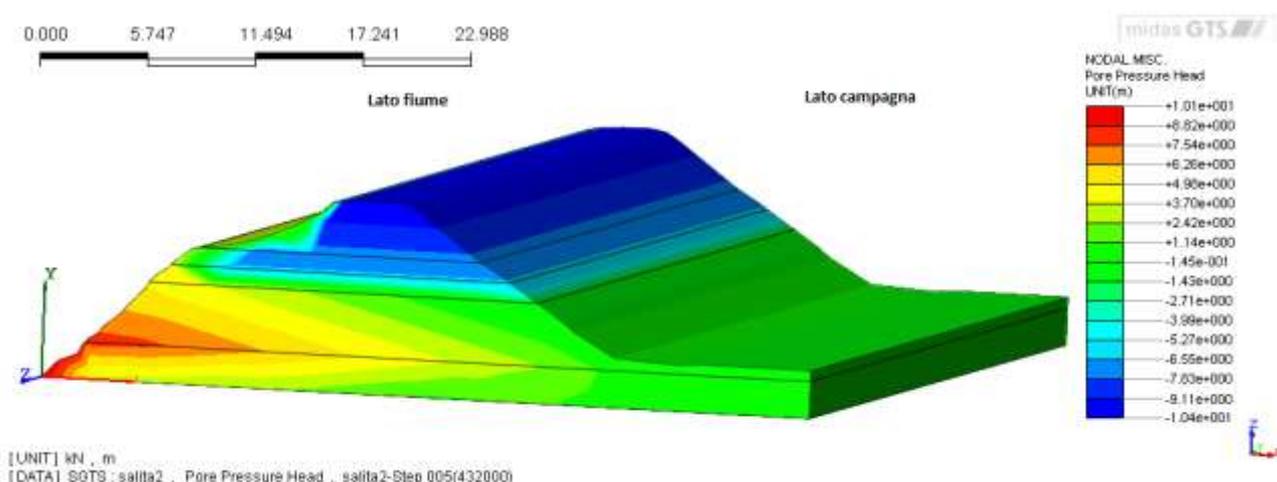


Figura 4.62:Argine destro sezione 12 dopo 5 giorni

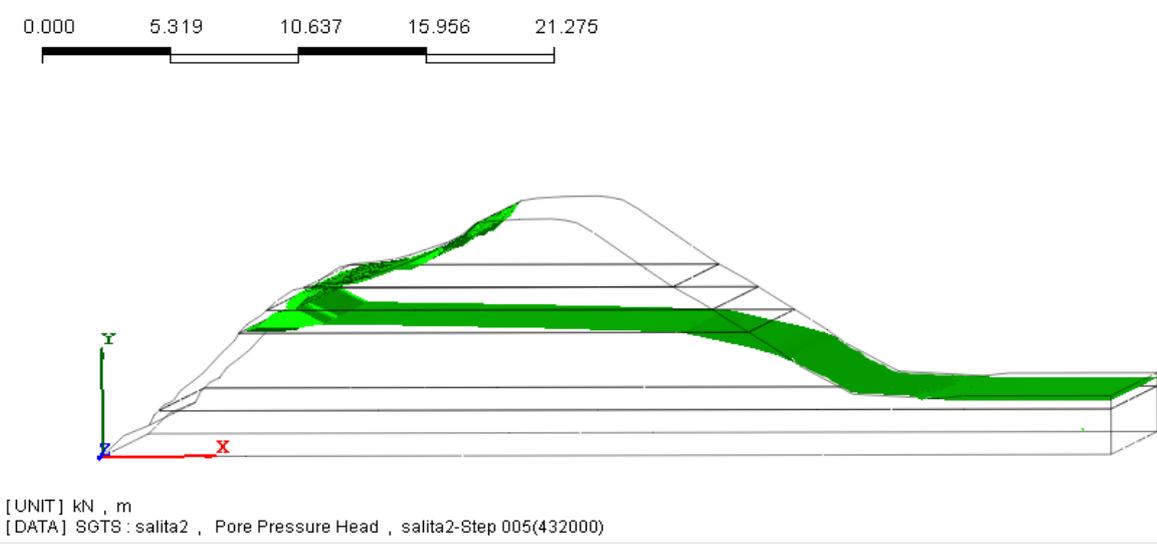


Figura 4.63:Argine destro sezione 12 linea piezometrica dopo 5 giorni

Quanto detto in precedenza per l'argine sinistro vale anche per il destro in condizioni transitorie e senza la presenza delle alterazioni.

I primi problemi di filtrazione, anche in questo, caso si presentano dopo circa 24 ore dall'inizio della piena iniziando con piccoli valori di $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ e che raggiungono il valore di $4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dopo 5 giorni di piena.

4.2.2.2 Sezioni con alterazioni semplici

Le immagini sottostanti rappresentano, in ordine, l'argine costituito dalla sezione V e dalla sezione 12, ad intervalli temporali di 6-12-18-24 ore e 3 e 5 giorni; sono stati scelti questi intervalli poiché risultavano essere i più rappresentativi del problema.

Sezione V:

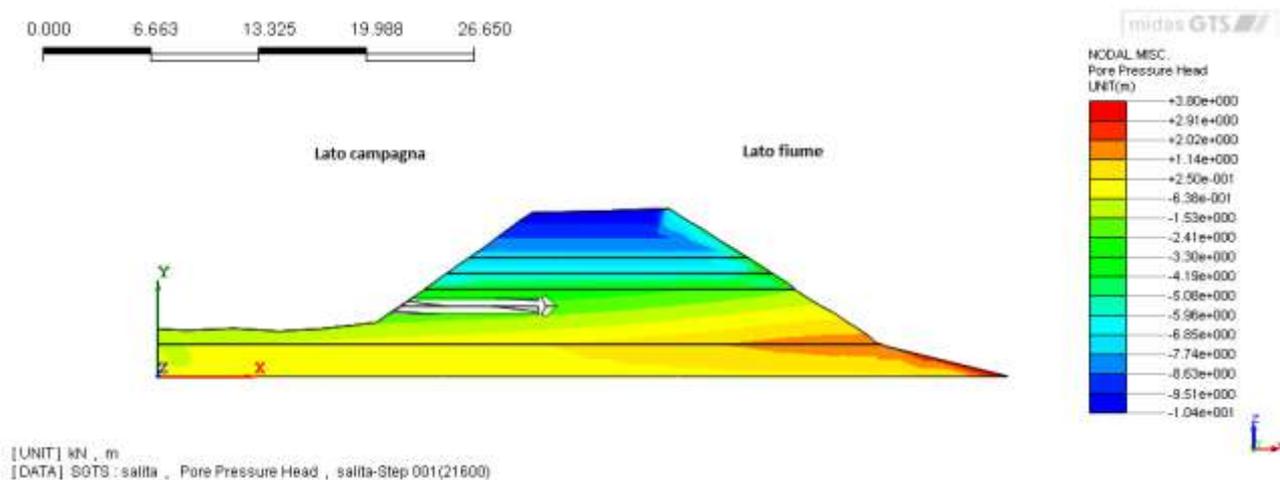


Figura 4.64:Argine sinistro sezione V dopo 6 ore

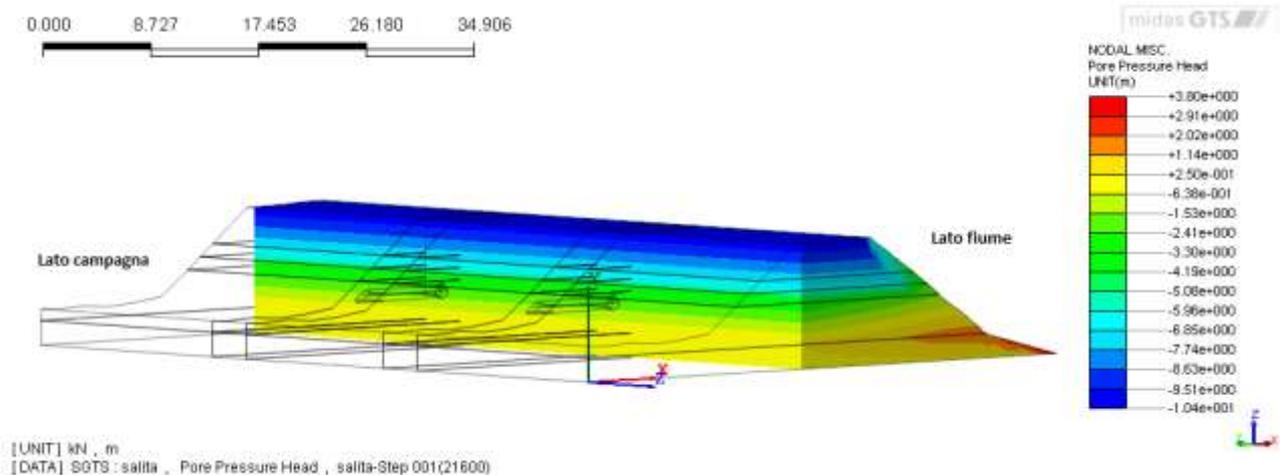


Figura 4.65:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 6 ore

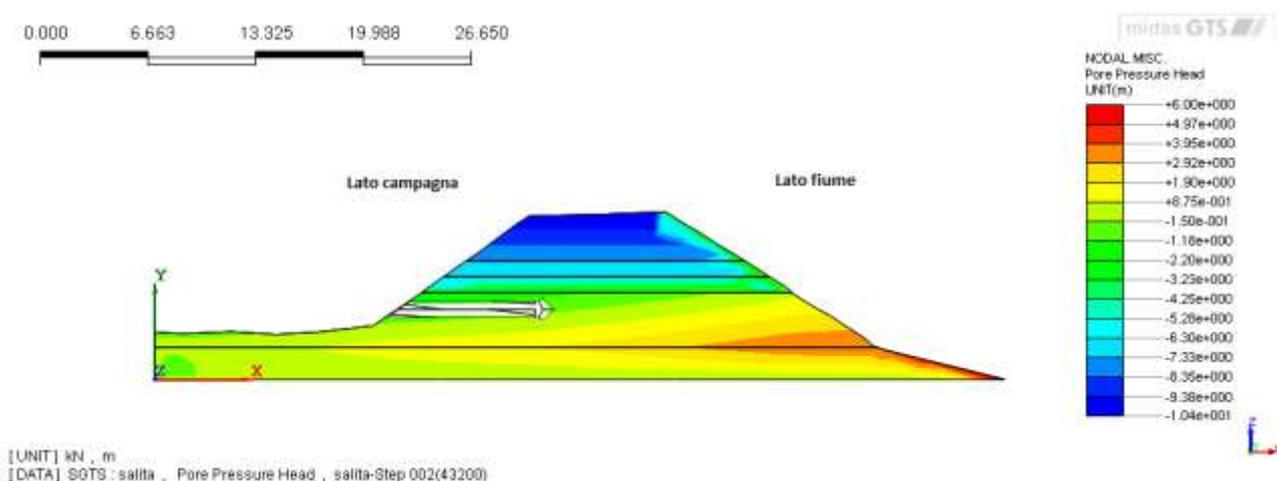


Figura 4.66:Argine sinistro sezione V dopo 12 ore

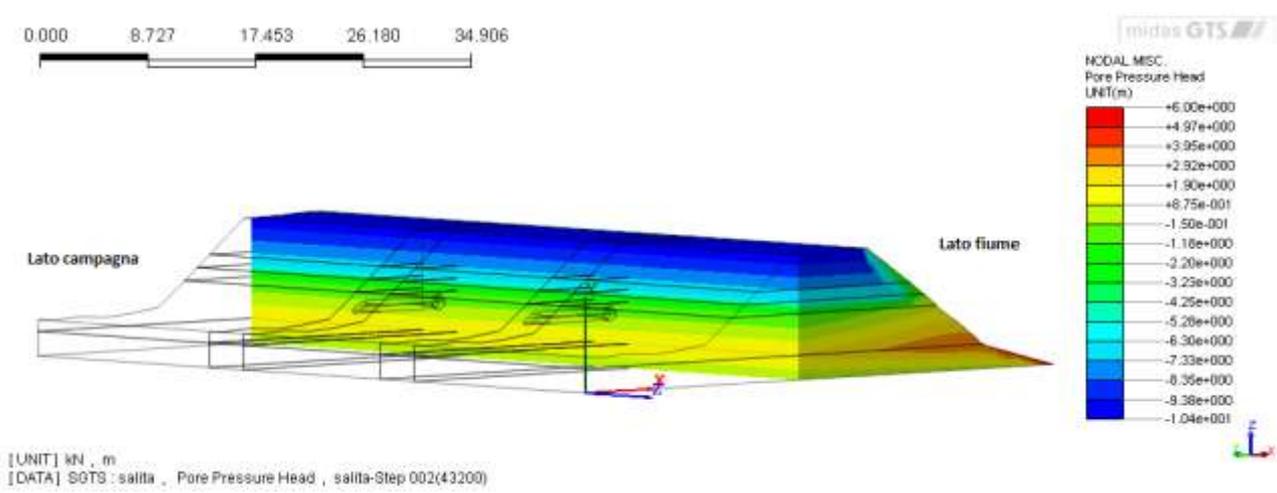


Figura 4.67:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 12 ore

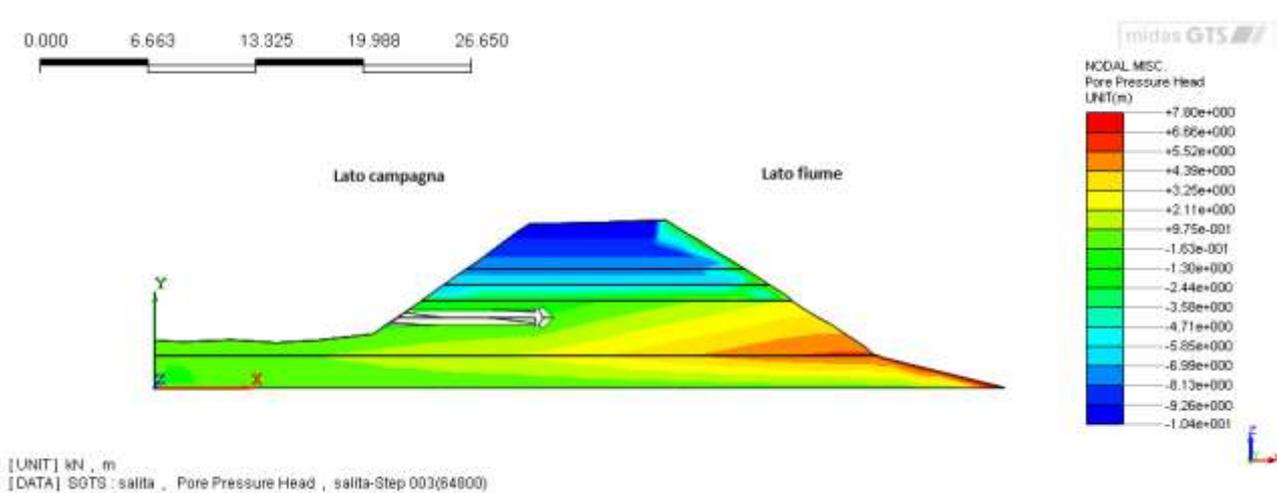


Figura 4.68:Argine sinistro sezione V dopo 18 ore

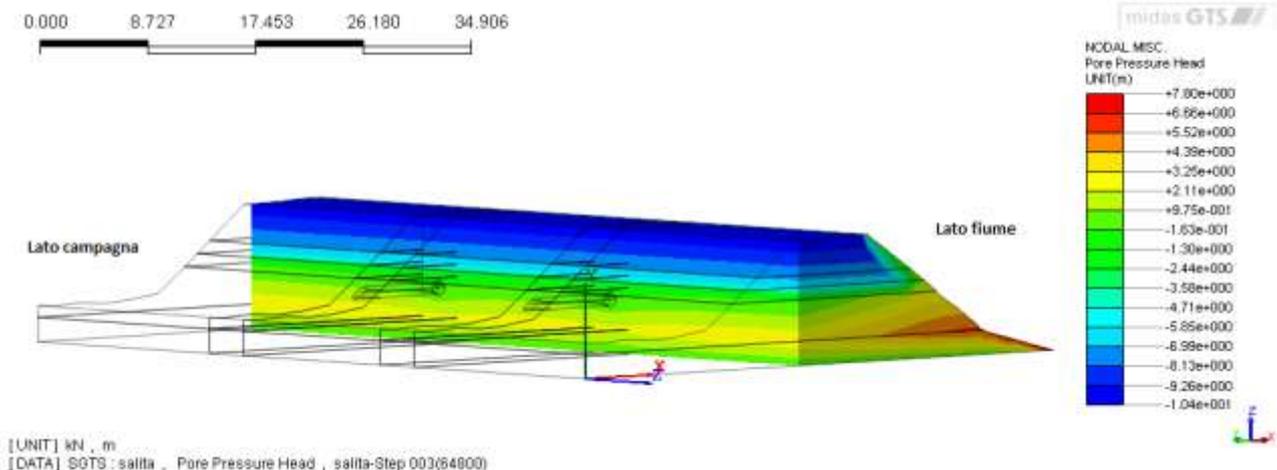


Figura 4.69: Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 18 ore

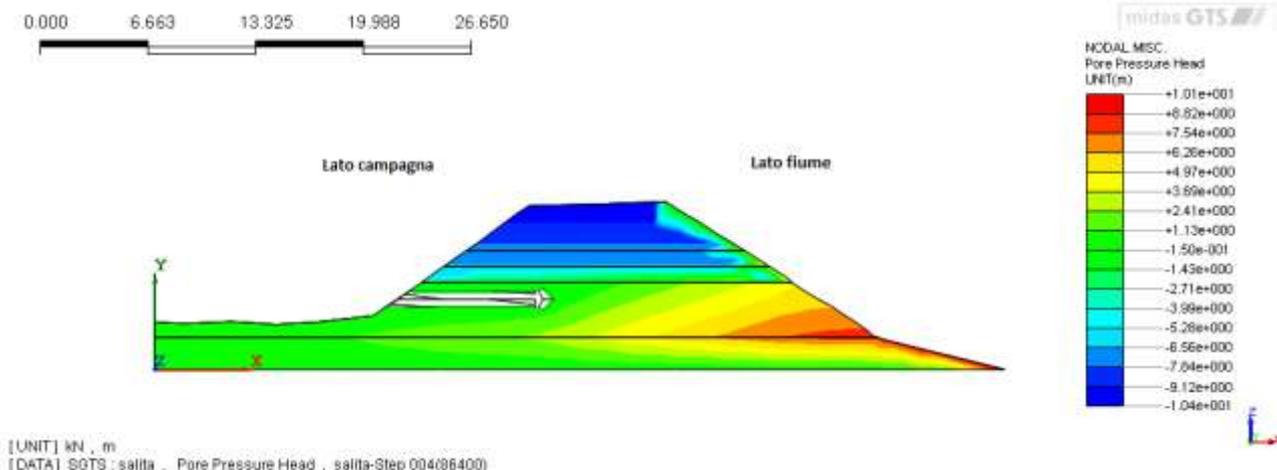


Figura 4.70: Argine sinistro sezione V dopo 24 ore

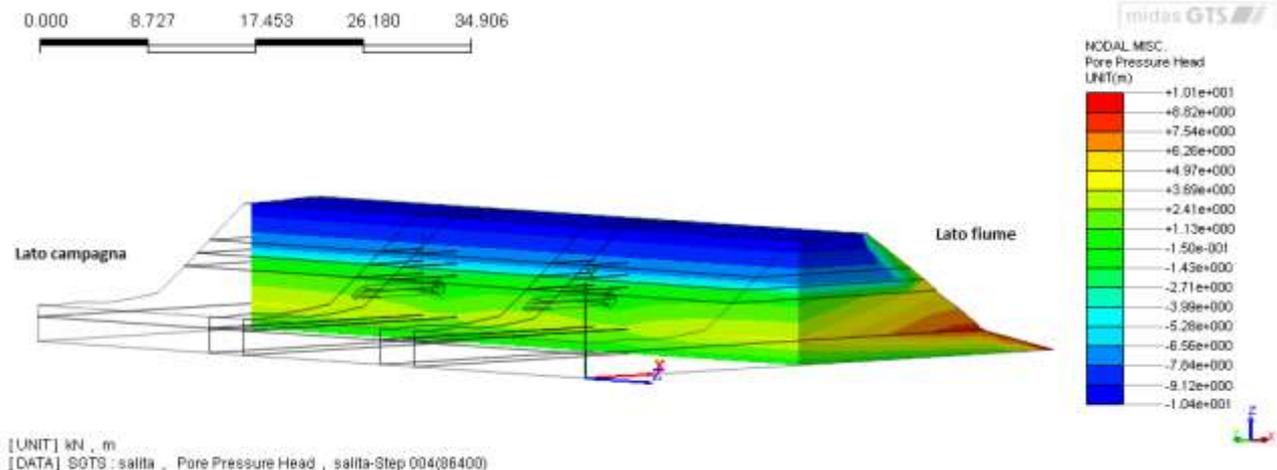


Figura 4.71: Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 24 ore

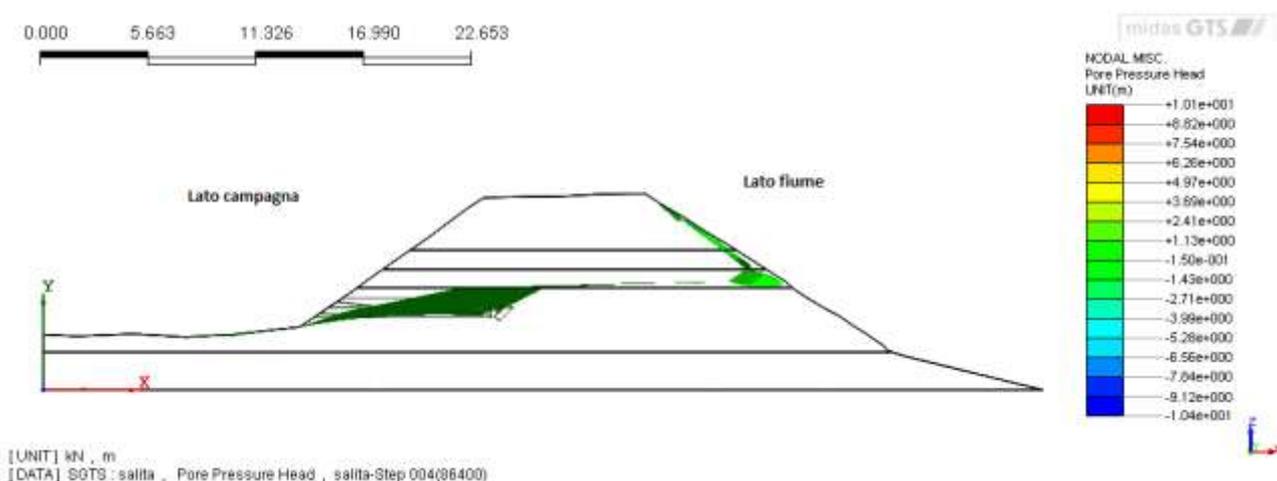


Figura 4.72:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 24 ore

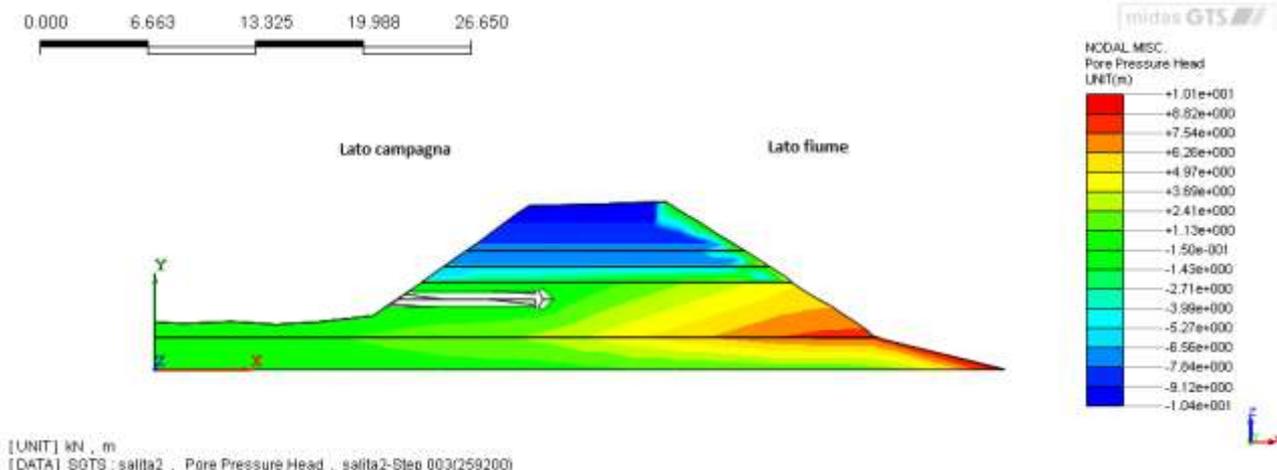


Figura 4.73:Argine sinistro sezione V dopo 3 giorni

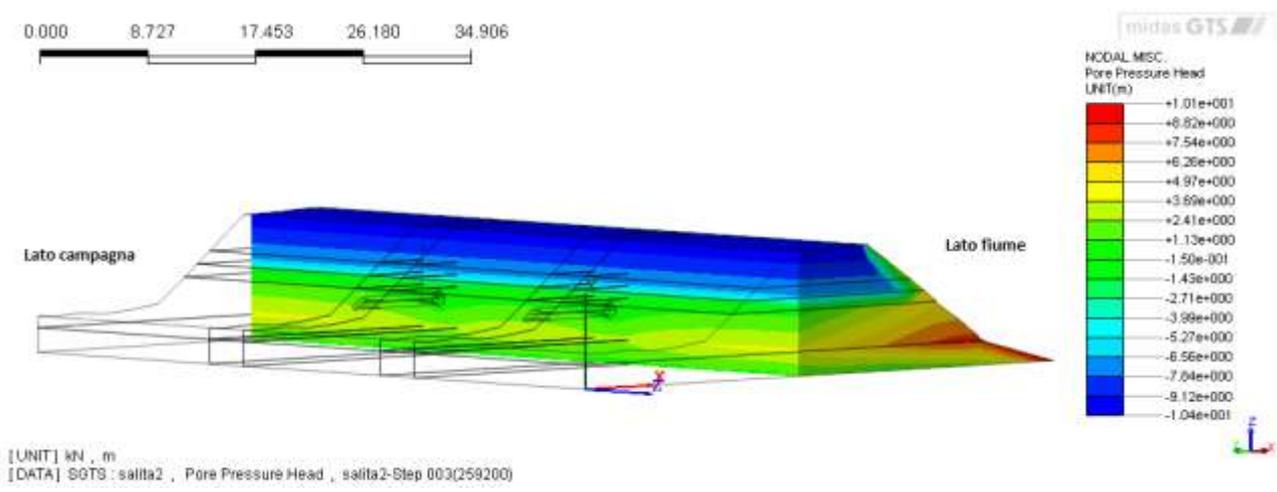


Figura 4.74:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 3 giorni

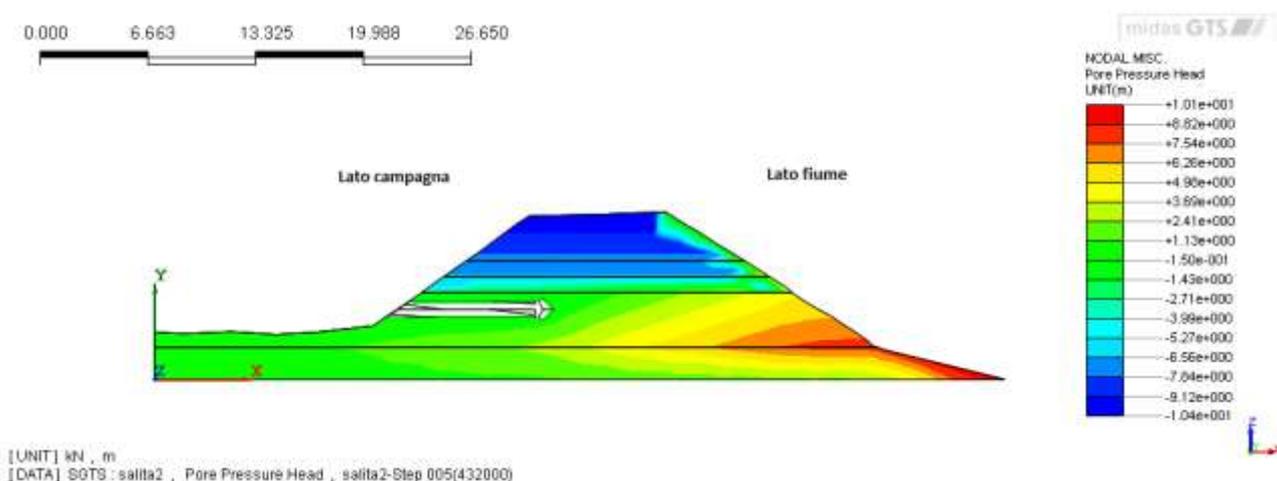


Figura 4.75:Argine sinistro sezione V dopo 5 giorni

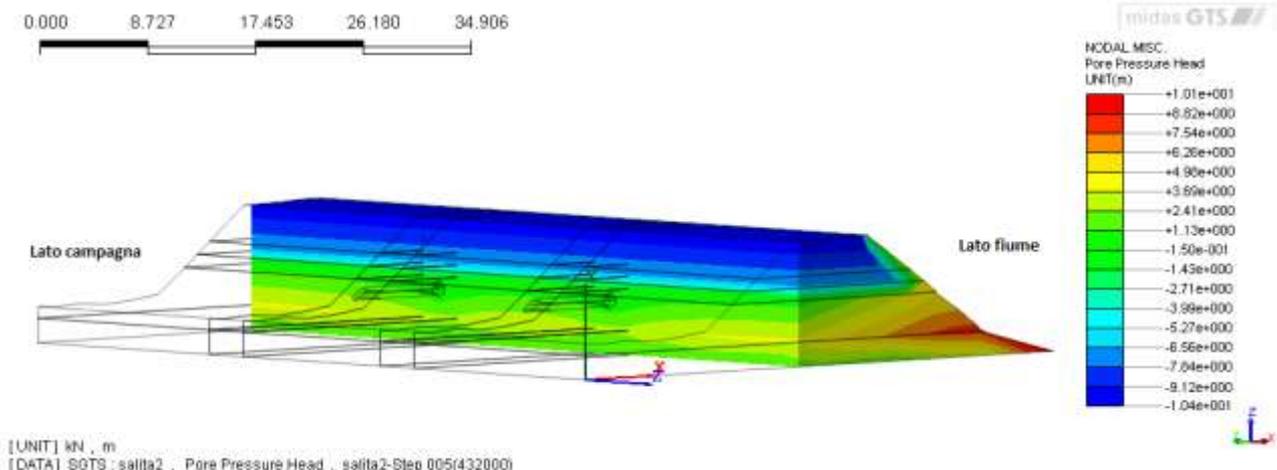


Figura 4.76:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 5 giorni

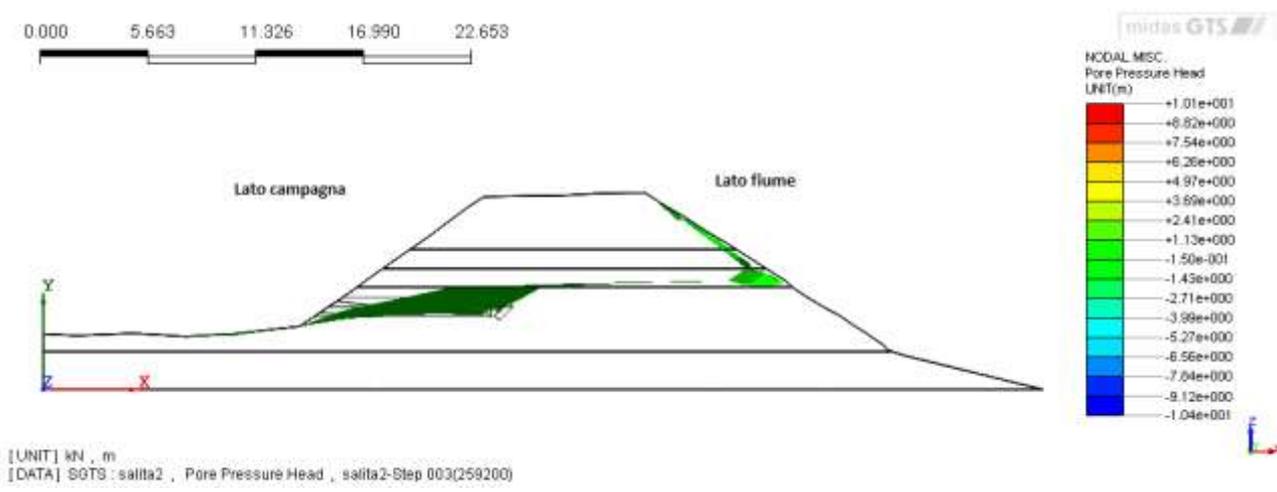


Figura 4.77:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 5 giorni

Dalle analisi condotte sull' argine soggetto ad una coppia di tane del tipo semplice si nota che dall'inizio della piena fino alla 18esima ora l'argine non risulta avere grossi problemi di filtrazione, la linea piezometrica è sempre mantenuta all'interno del corpo arginale.

Dallo studio e dal confronto dei risultati tra la 18esima e la 24esima ora si nota come in questo lasso di tempo l'argine sia soggetto ad imbibimento quasi completo dello strato dove risiede l'alterazione e soprattutto si nota da - fig. 4.72 - ,che rappresenta la linea piezometrica dopo 24 ore, che l'acqua ha completamente invaso la tana e la filtrazione è già in atto.

Nel caso di tana semplice quindi si può desumere che tra la 20esima e la 22esima ora la linea piezometrica raggiunga la tana e da essa inizi la fuoriuscita d'acqua che prosegue fino al quinto giorno ed oltre.

Si può notare anche,dalle immagini che rappresentano le sezioni trasversali dell'argine, come l'elemento sferico dell'alterazione tenda a richiamare verso di se l'acqua e vada ad influenzare una zona maggiore rispetto al suo diametro. Nel caso specifico in esame essendo le tane costituite da una sfera di circa 1 metro influiscono per una zona di un metro a destra ed uno a sinistra della stessa, per un totale di circa 3 metri d'argine.

I valori di filtrazione sono di circa $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ alla 24esima ora e raggiungono il valore di $5.78 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dopo 5 giorni di piena .Come si nota dalle immagini sottostanti i valori massimi di filtrazione si concentrano principalmente nella parte sferica dell'alterazione, che funge da elemento di raccolta dell'acqua.

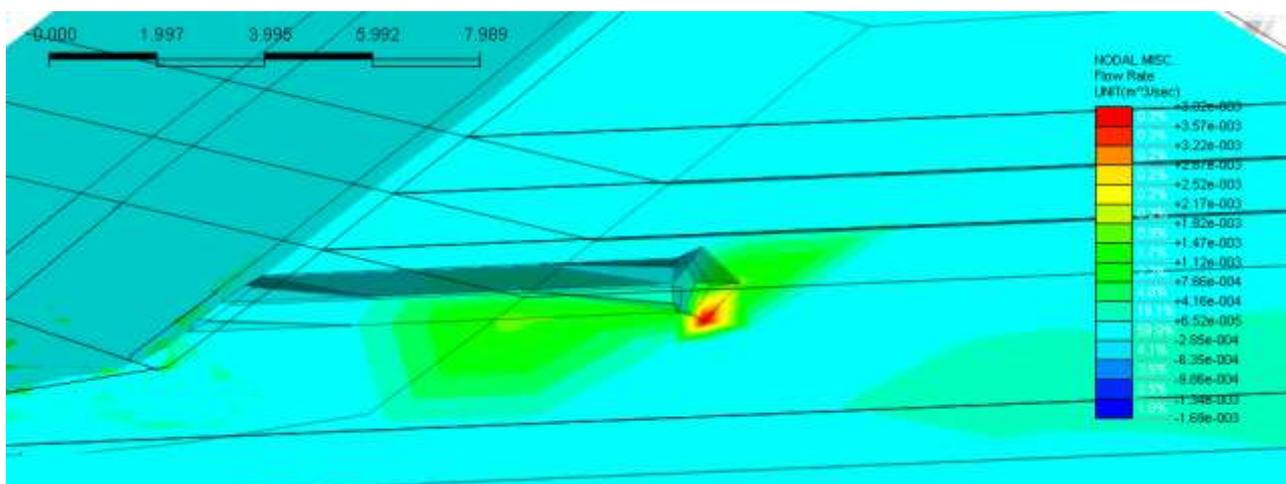


Figura 4.78: Filtrazione dalla tana sferica dopo 24 ore

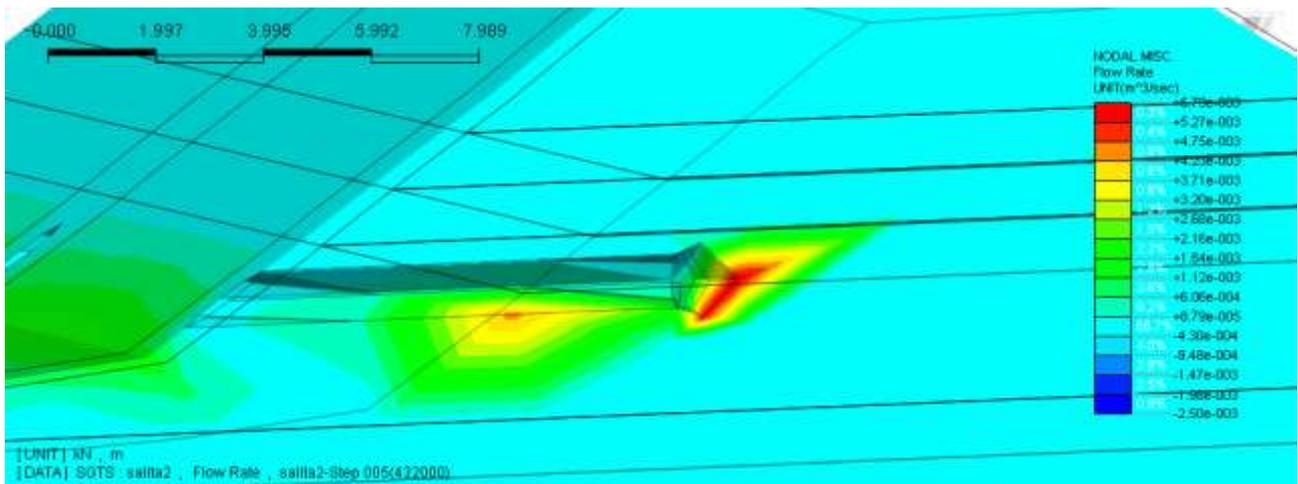


Figura 4.79:filtrazione dalla tana sferica dopo 5 giorni

GTSMidas permette di andare a studiare anche i valori di velocità del flusso all'interno del corpo arginale e come si nota dalle immagini di seguitola filtrazione risulta essere principalmente collocata nello strato dove è presente l'alterazione, raggiungendo valori di picco proprio a contatto con la cavità sferica della tana.

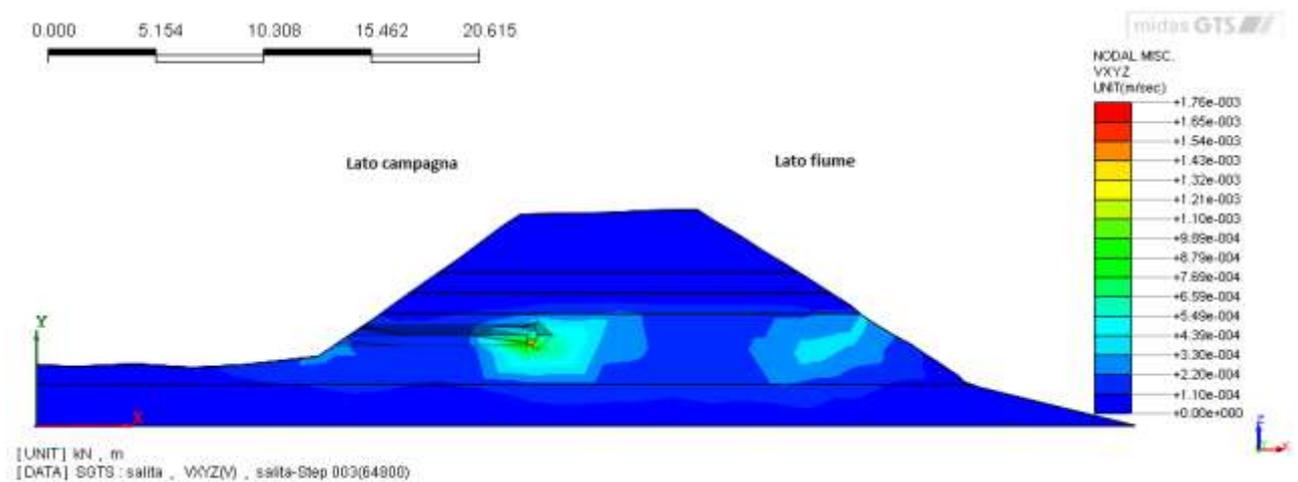


Figura 4.80:velocità di filtrazione dopo 18 ore

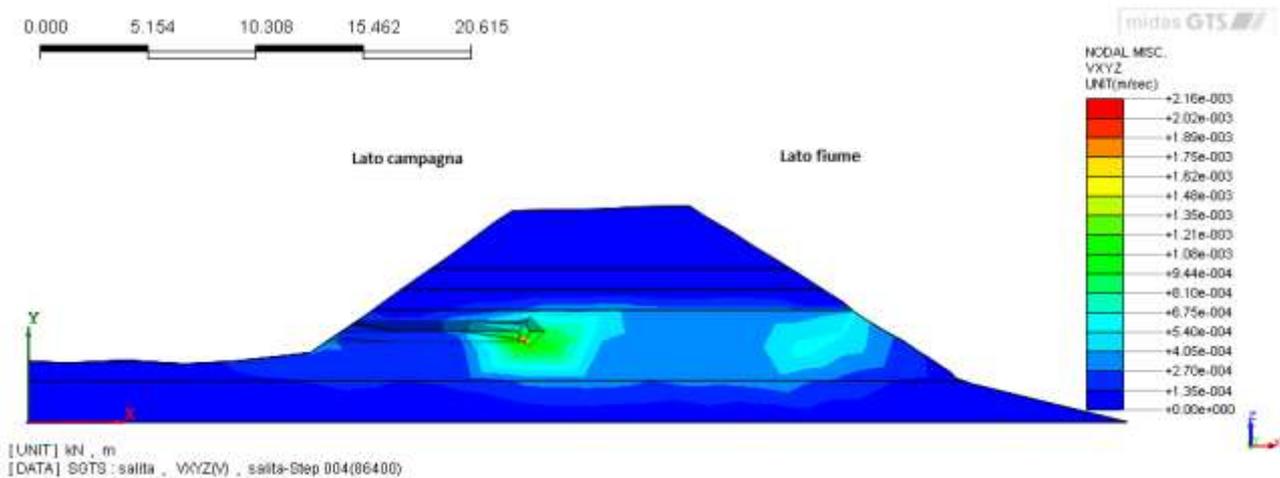


Figura 4.81: velocità di filtrazione dopo 24 ore

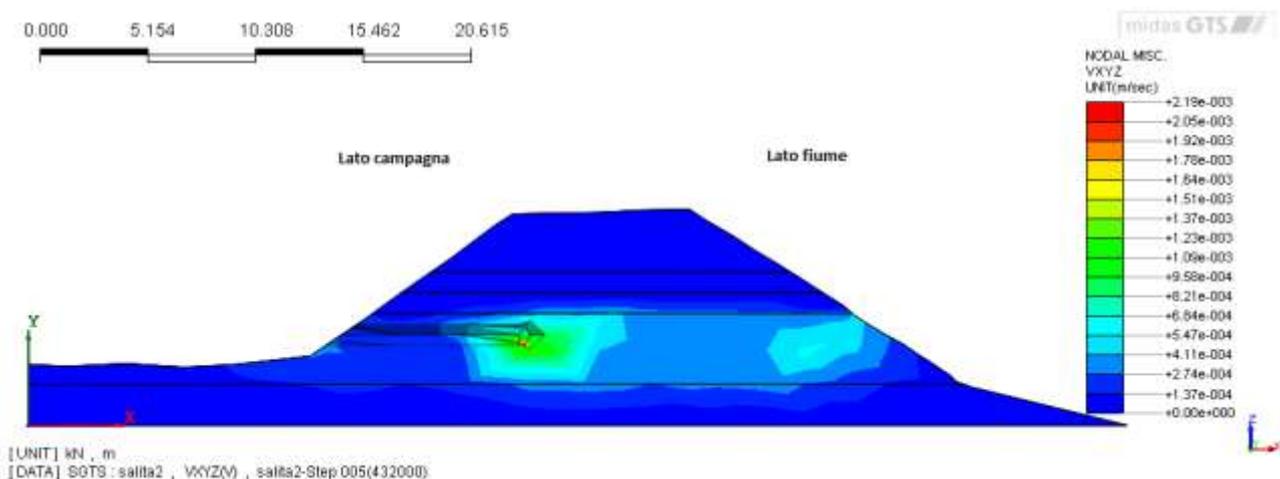


Figura 4.82 velocità di filtrazione dopo 5 giorni

E' stato poi calcolato anche il valore del gradiente idraulico nella tana che dopo 18 ore risulta essere dell'ordine di 0.8-0.9 mentre dopo 24 ore presenta un valore pari a 2.138, quindi di molto superiore all'unità comportando significativi problemi di asportazione di materiale e quindi di stabilità del corpo arginale.

Di seguito vengo riportate le medesime analisi sulla sponda destra

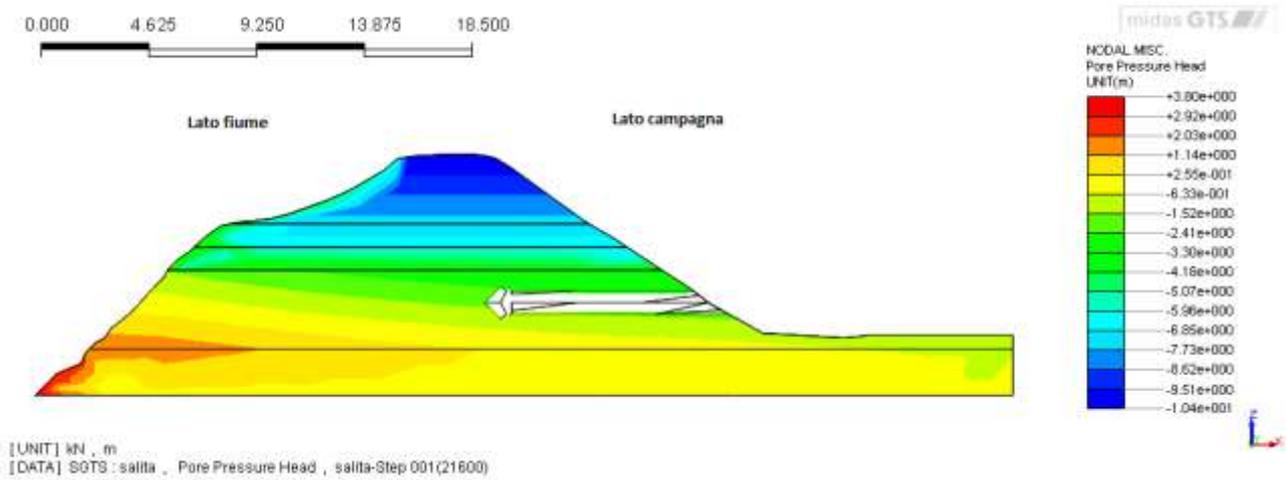


Figura 4.83:Argine destro sezione 12 dopo 6 ore

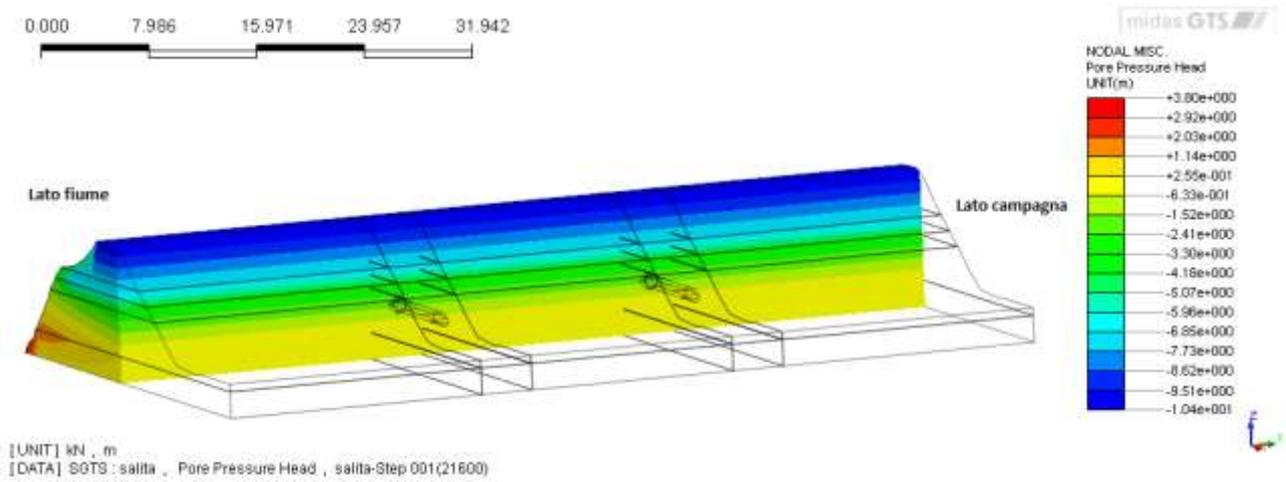


Figura 4.84Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 6 ore

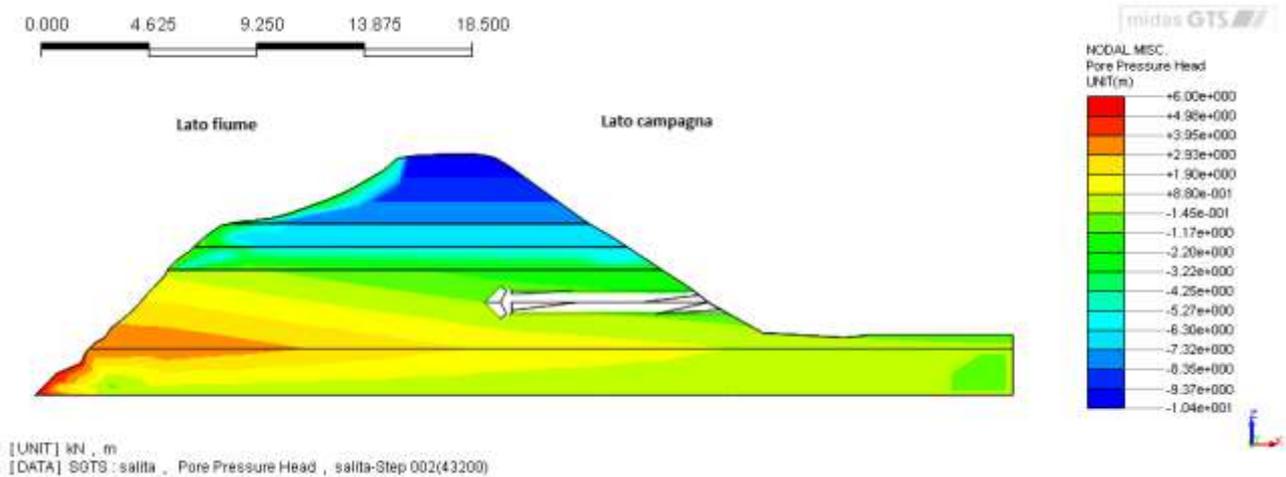


Figura 4.84Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 6 ore

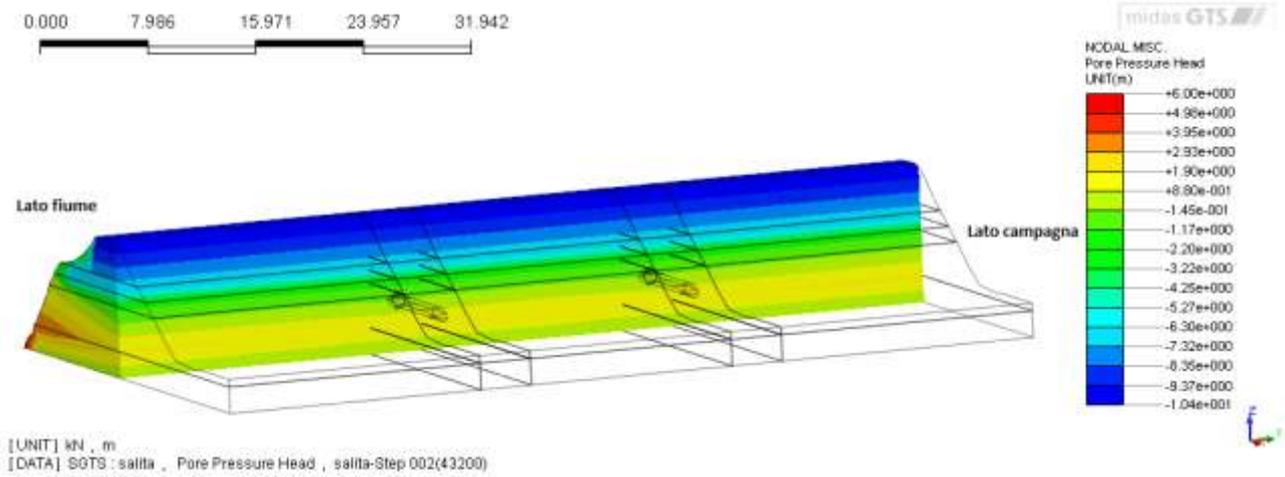


Figura 4.86: Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 12 ore

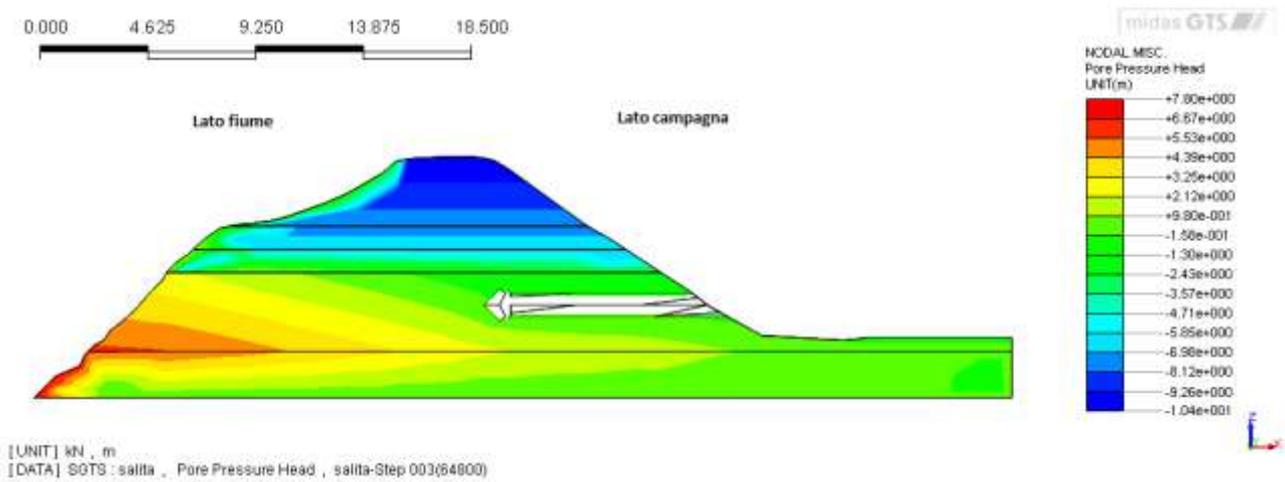


Figura 4.87: Argine destro sezione 12 dopo 18 ore

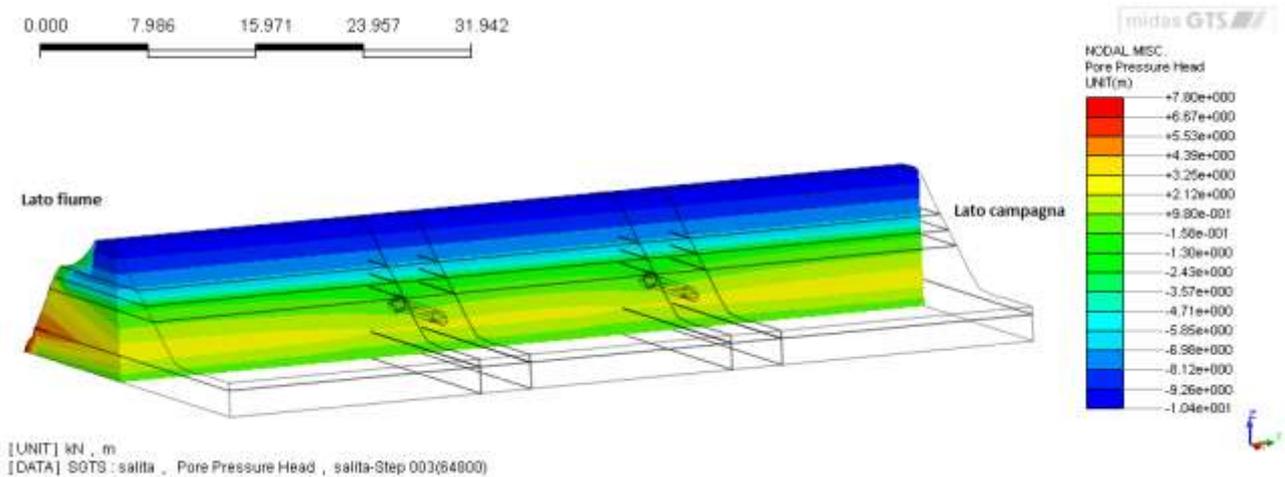


Figura 4.88: Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 18 ore

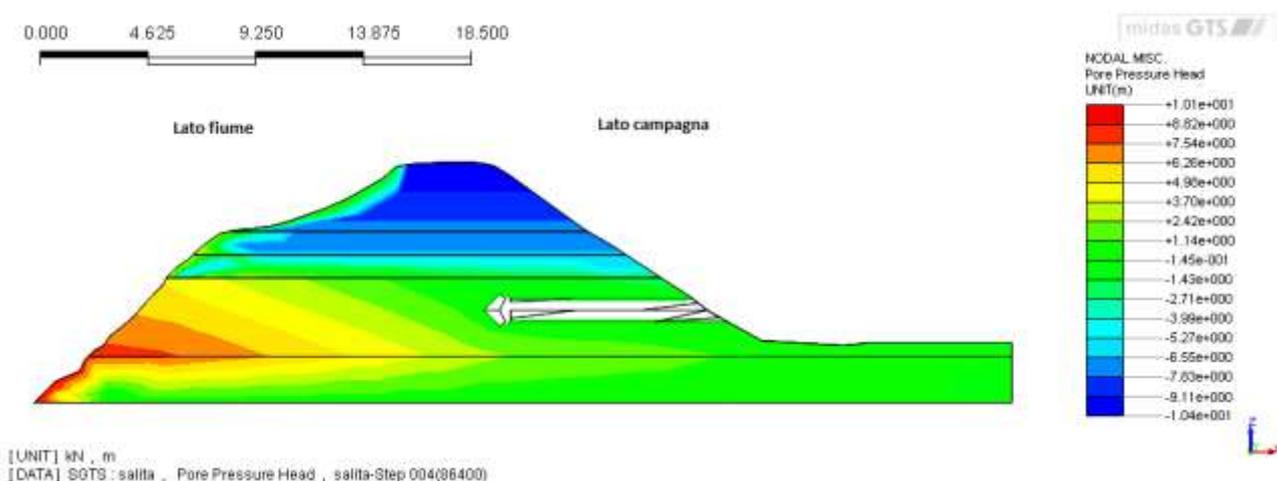


Figura 4.89:Argine destro sezione 12 dopo 24 ore

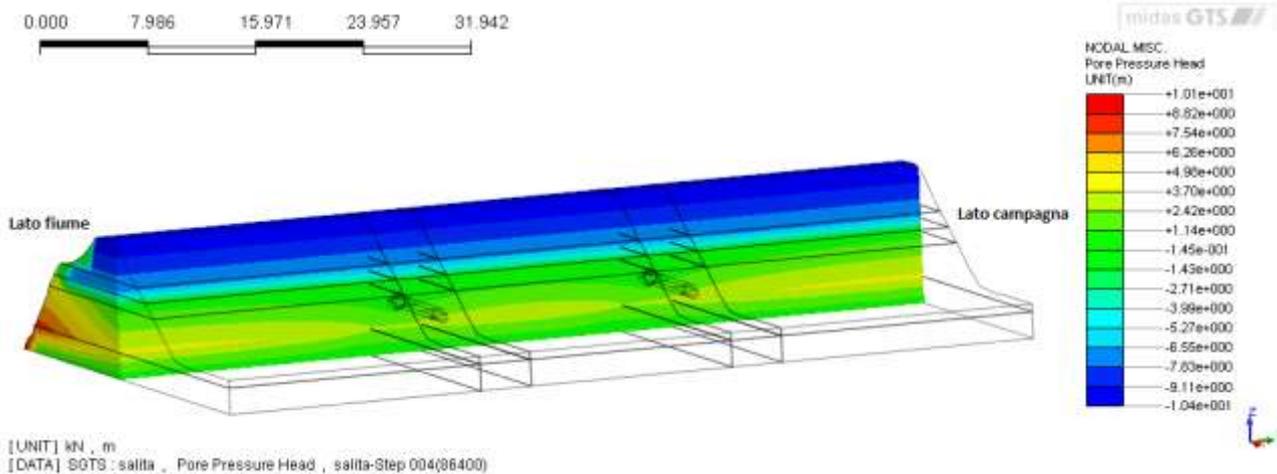


Figura 4.90:Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 24 ore

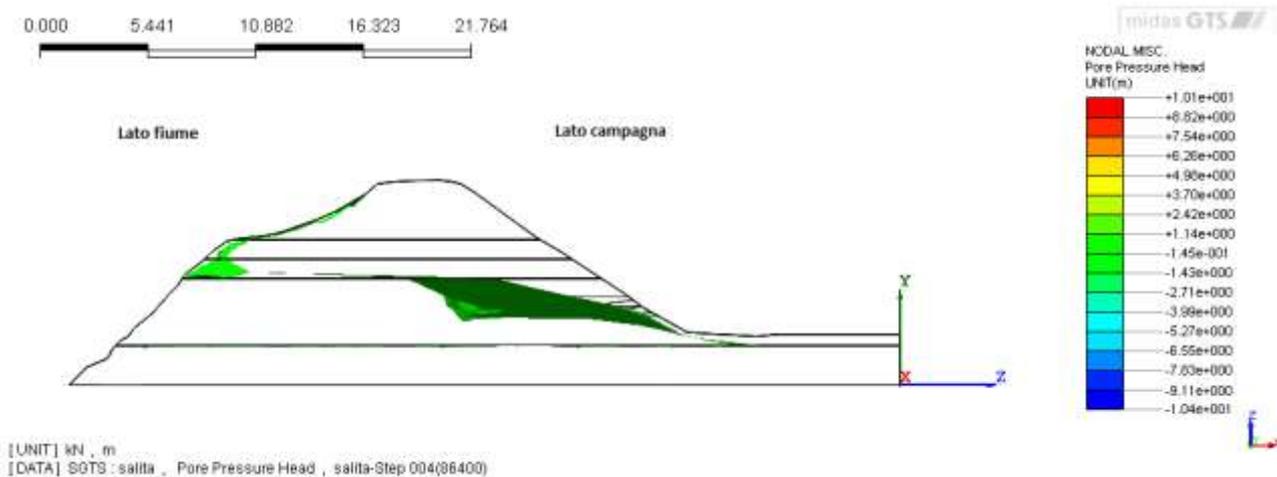


Figura 4.91:Argine destro sezione 12 linea piezometrica dopo 24 ore

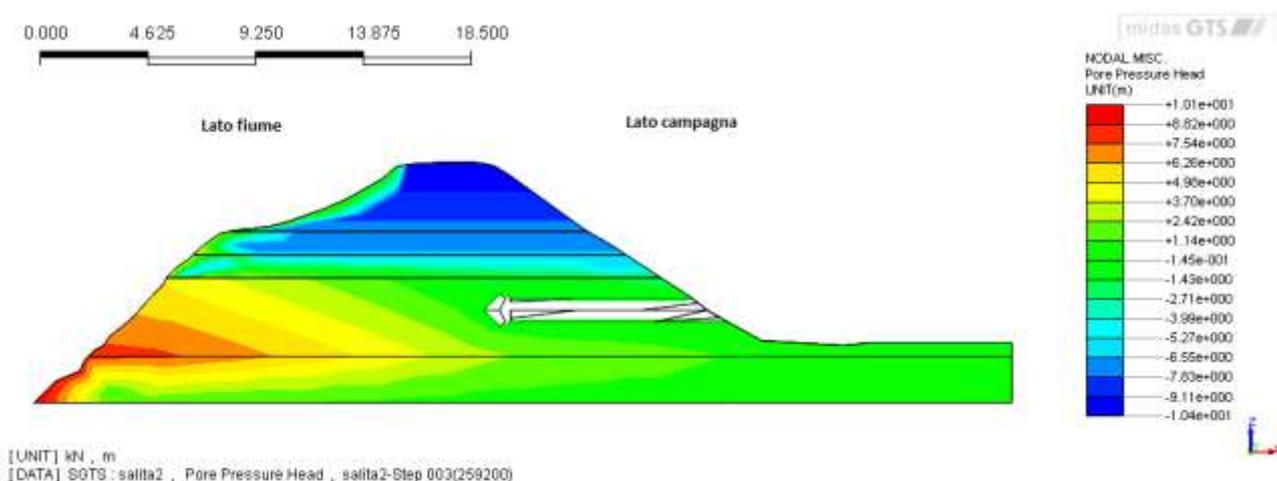


Figura 4.92:Argine destro sezione 12 dopo 3 giorni

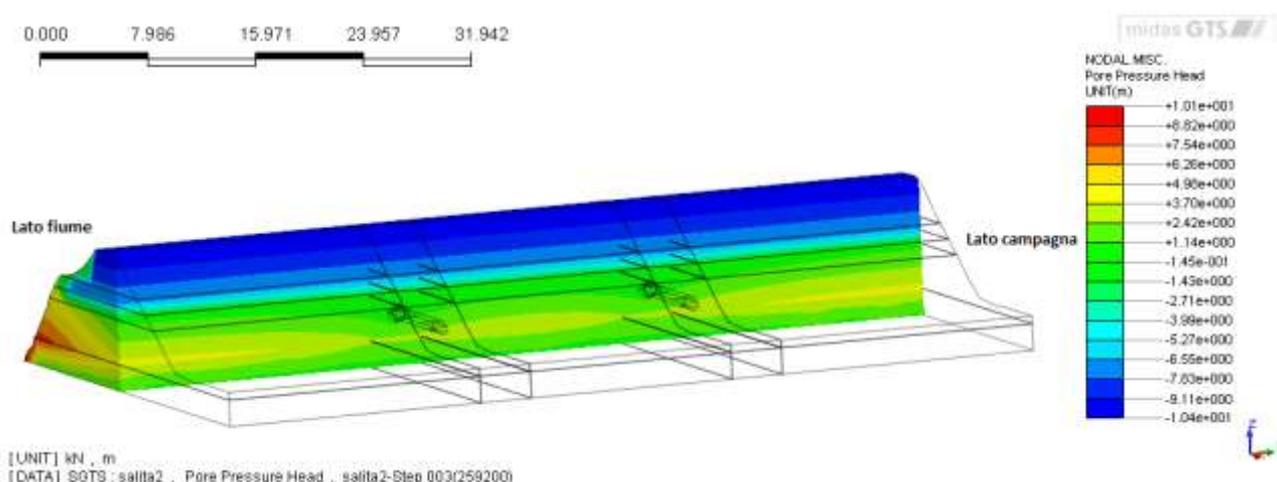


Figura 4.93:Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 3 giorni

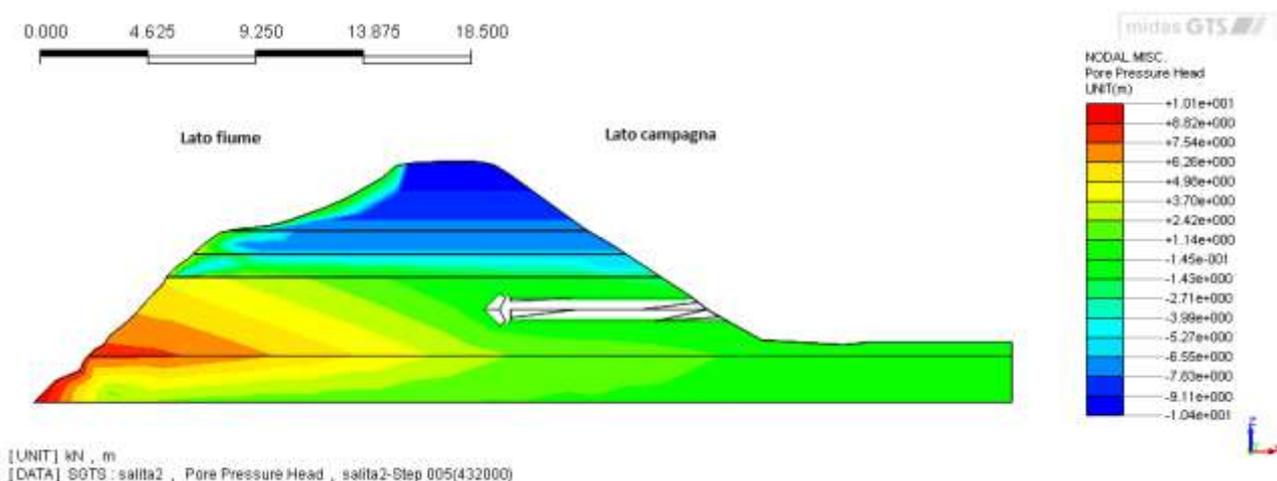


Figura 4.94:Argine destro sezione 12 dopo 5 giorni

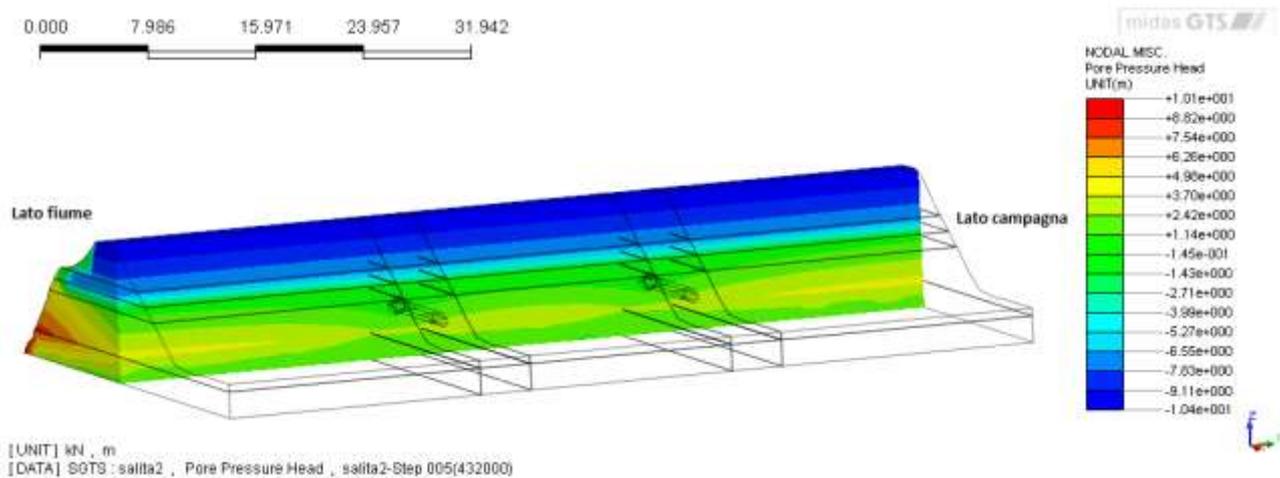


Figura 4.95: Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 5 giorni

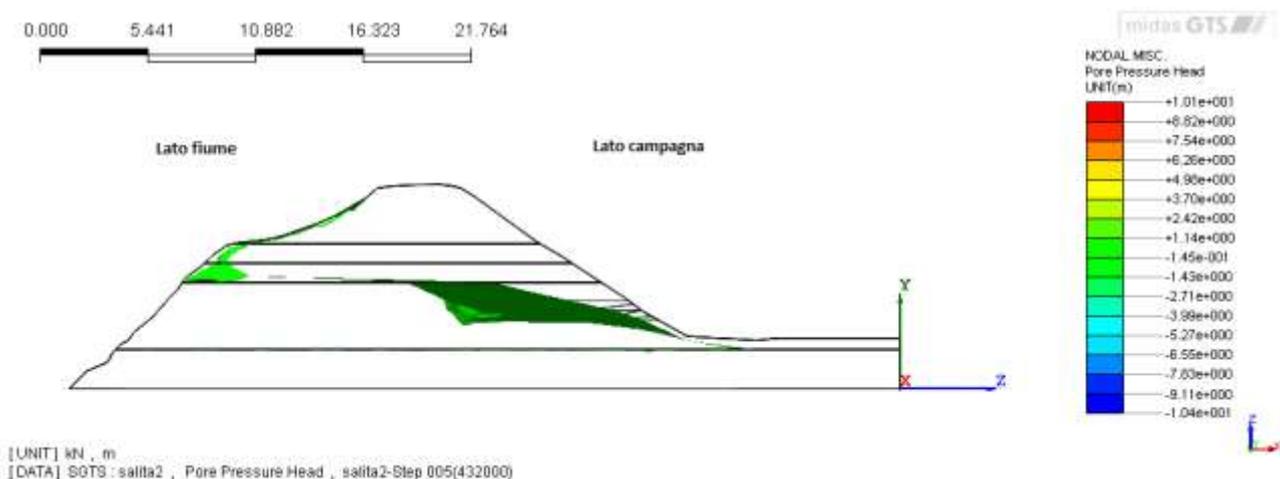


Figura 4.96: Argine destro sezione 12 linea piezometrica dopo 5 giorni

Come si può notare anche per l'argine destro, soggetto ad alterazione semplice, valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza per l'argine sinistro.

Circa tra la 20esima e la 22esima ora dall'inizio della piena ha l'inizio la filtrazione attraverso la tana e la linea piezometrica nell'argine risente della presenza delle cavità sferiche andando a incurvarsi in prossimità delle stesse; influenzando un'area di circa 3 metri attorno alla tana stessa. Da sottolineare anche il valore del gradiente idraulico che dopo 24 ore di piena nel punto più sollecitato dell'alterazione è di 2.29.

Di seguito le immagini che rappresentano i valori di filtrazione e le loro velocità.

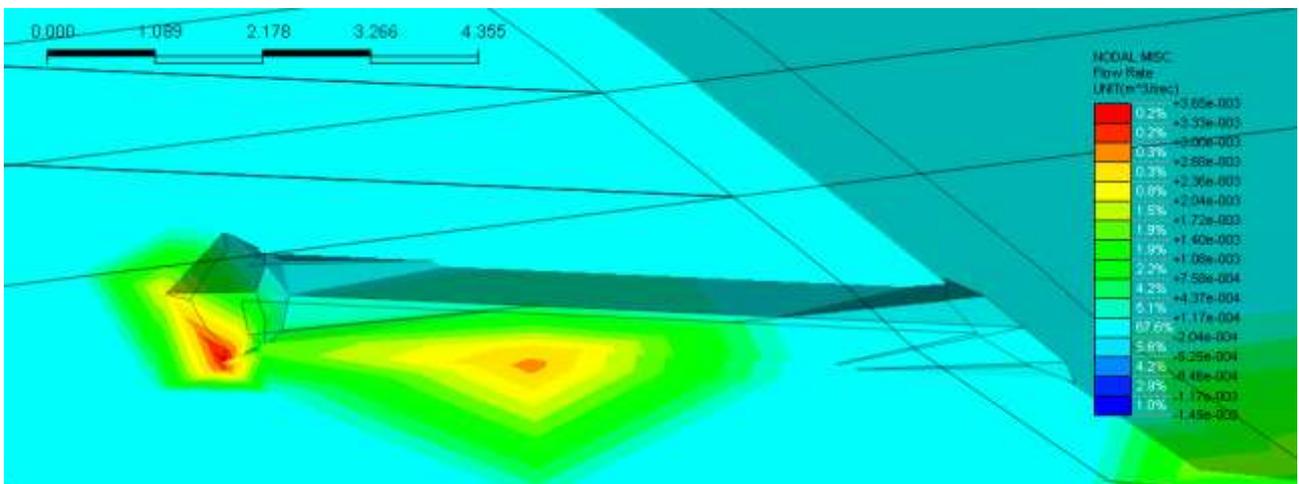


Figura 4.97: Filtrazione dalla tana sferica dopo 24 ore

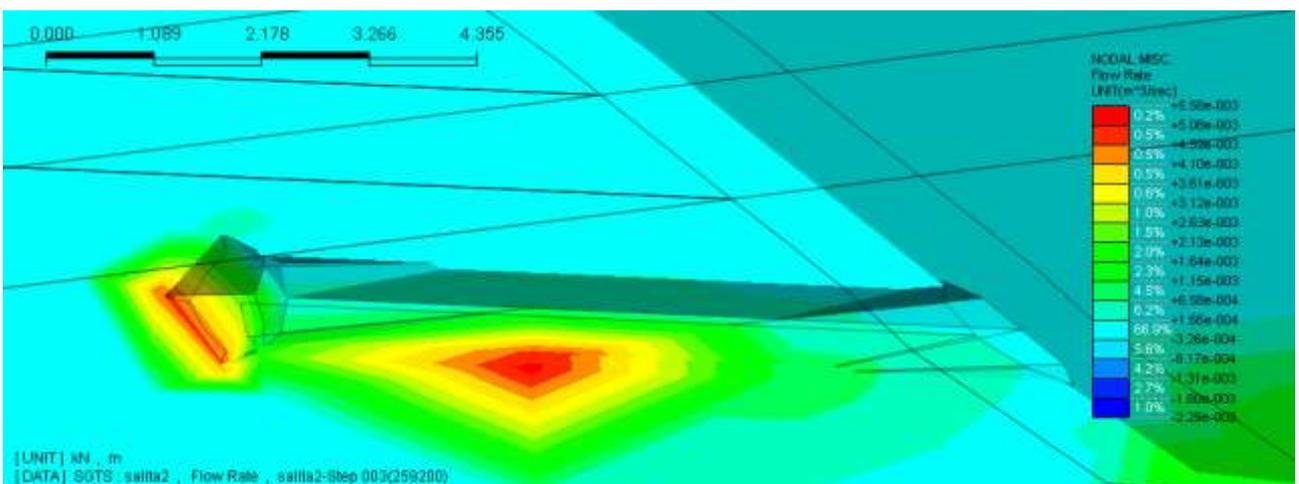


Figura 4.98: filtrazione dalla tana sferica dopo 5 giorni

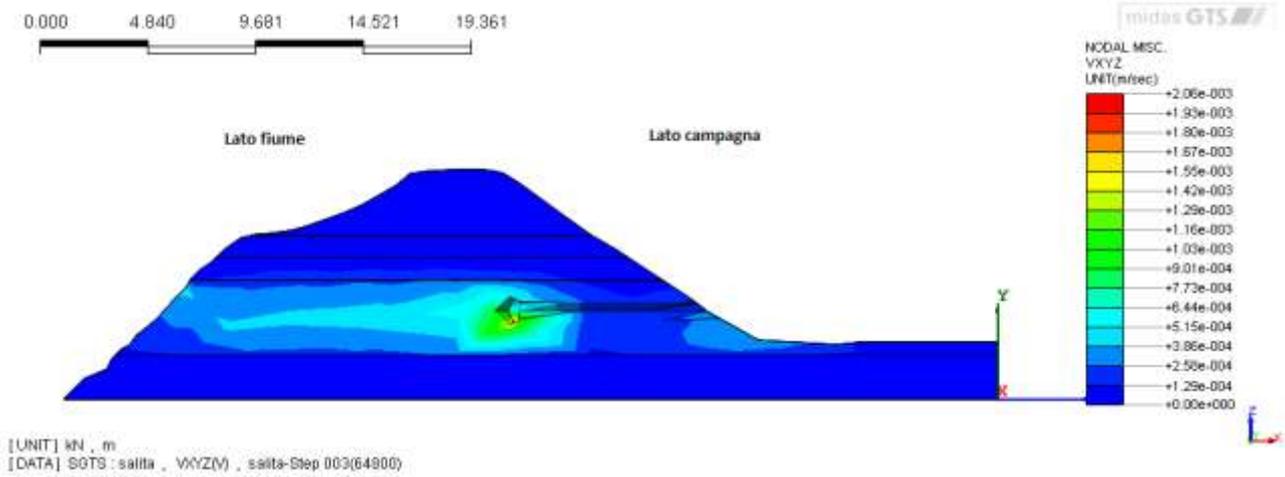


Figura 4.99: velocità di filtrazione dopo 18 ore

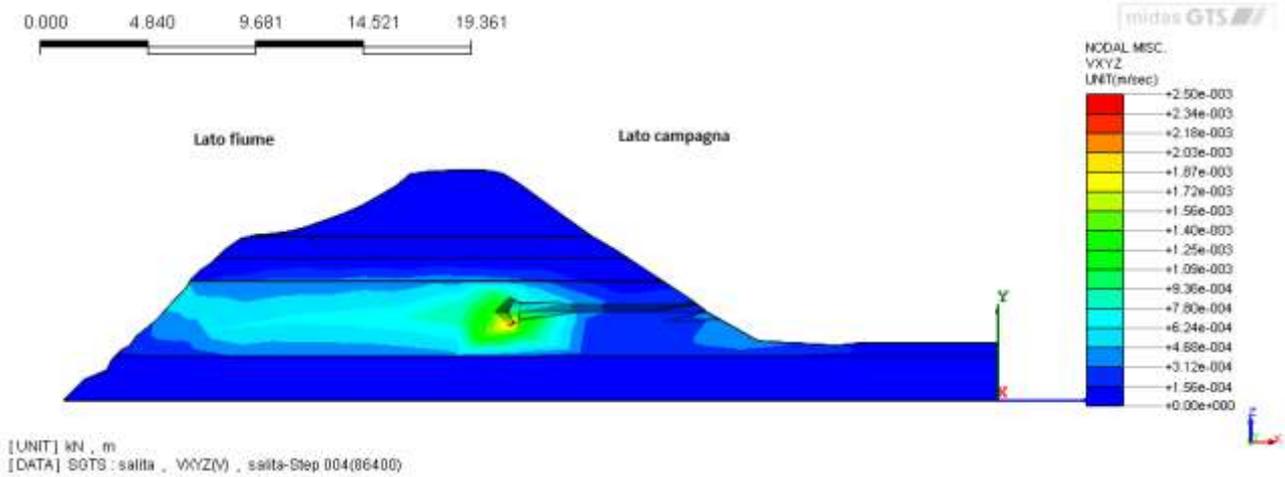


Figura 4.100: velocità di filtrazione dopo 24 ore

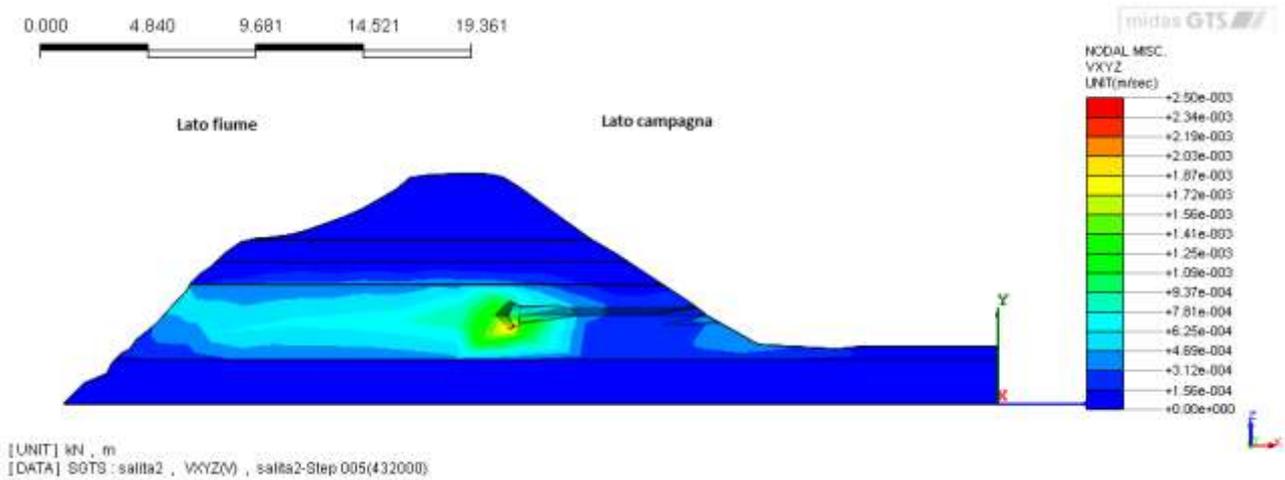


Figura 4.101: velocità di filtrazione dopo 5 giorni

4.2.2.3 Sezioni con alterazioni a T

Le immagini sottostanti rappresentano, in ordine, l'argine costituito dalla sezione V e dalla sezione 12, ad intervalli temporali di 6-12-18-24 ore e 3 e 5 giorni; sono stati scelti questi intervalli poiché risultavano essere i più rappresentativi del problema.

Sezione V:

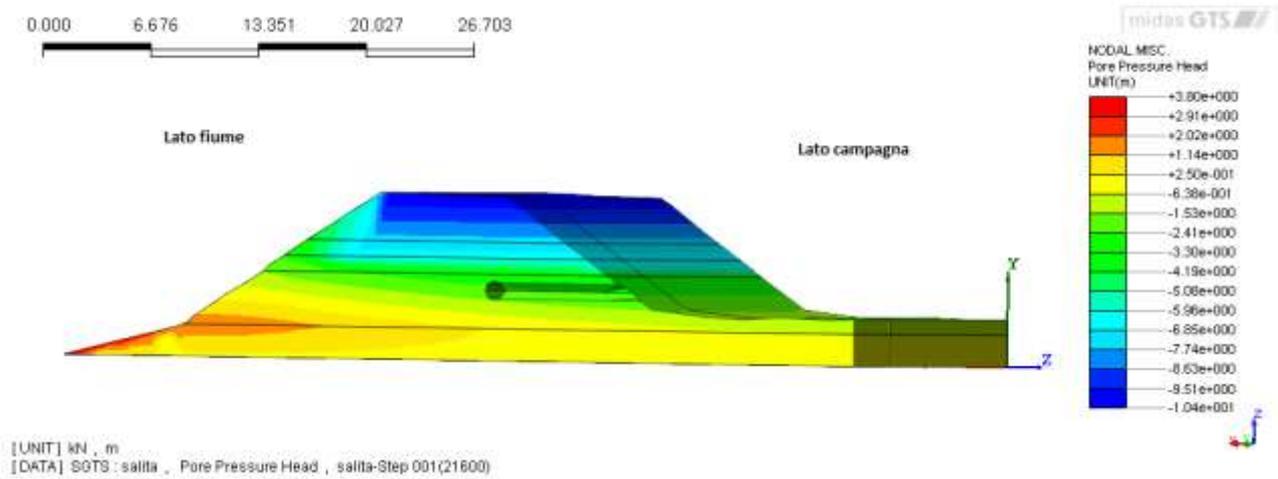


Figura 4.102:Argine sinistro sezione V dopo 6 ore

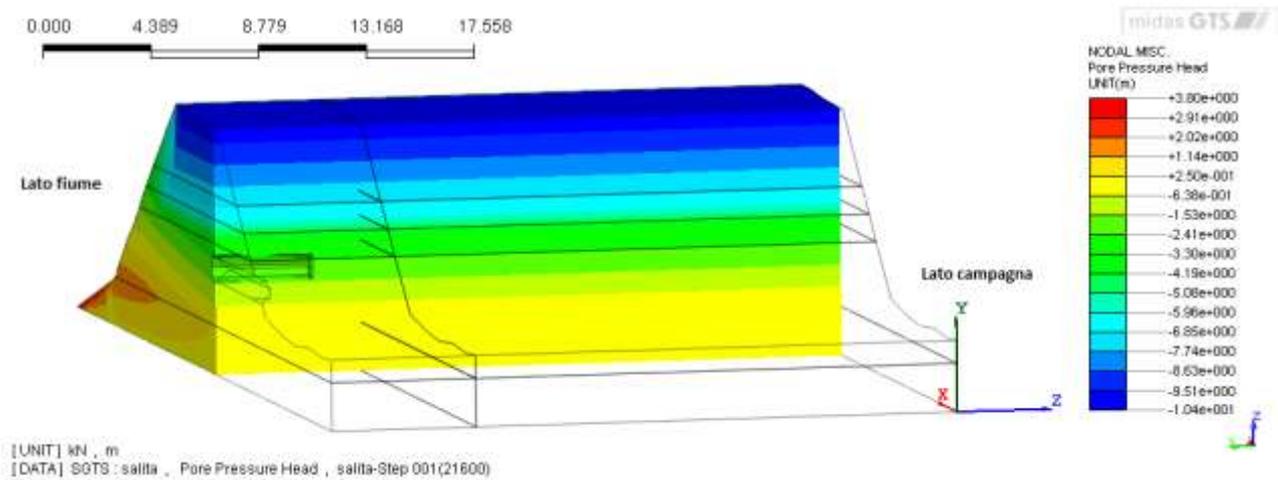


Figura 4.103Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 6 ore

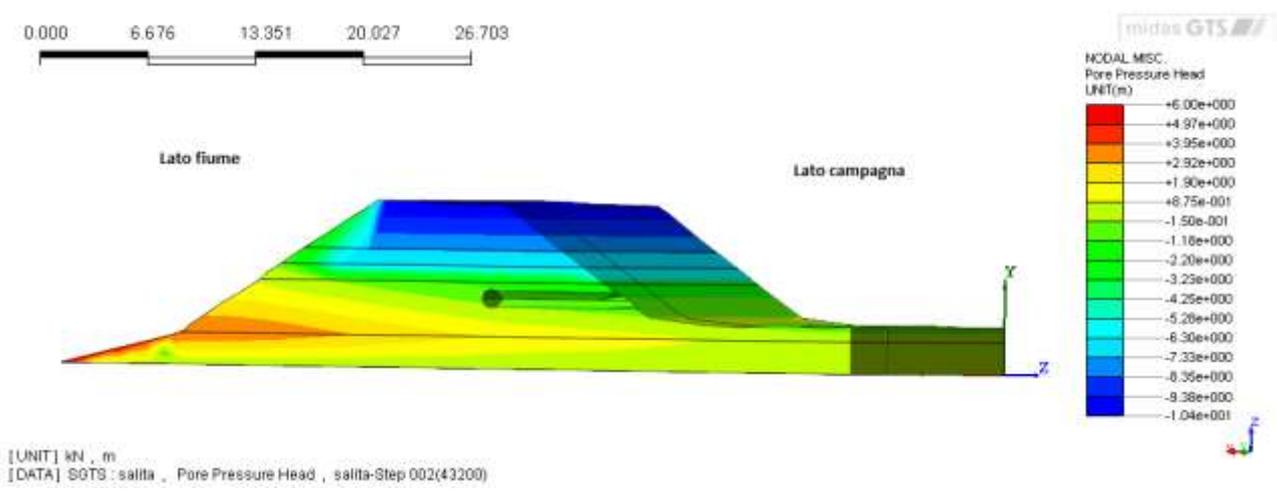


Figura 4.104:Argine sinistro sezione V dopo 12 ore

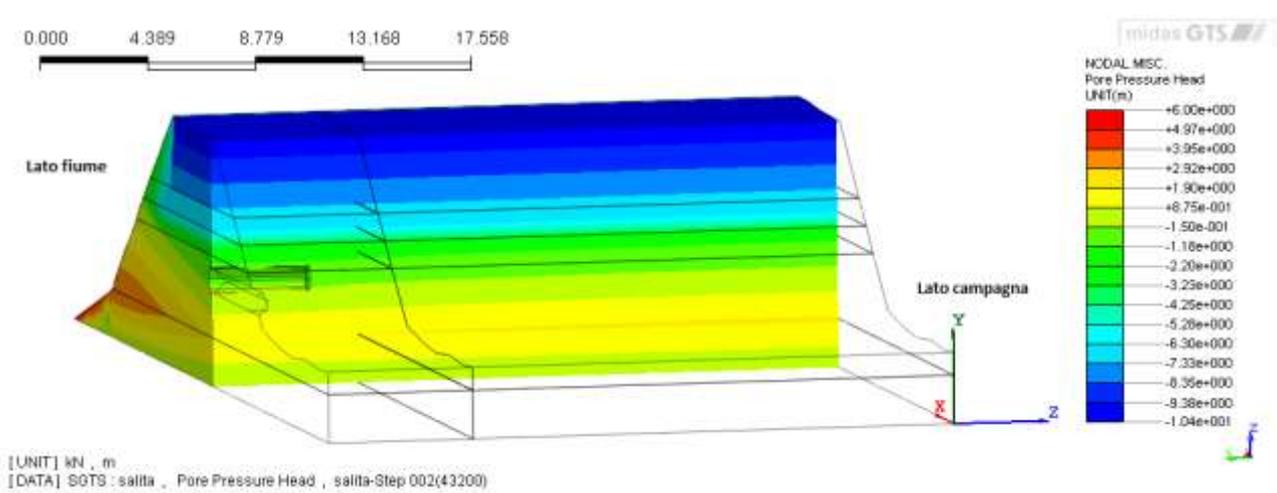


Figura 4.105:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 12 ore

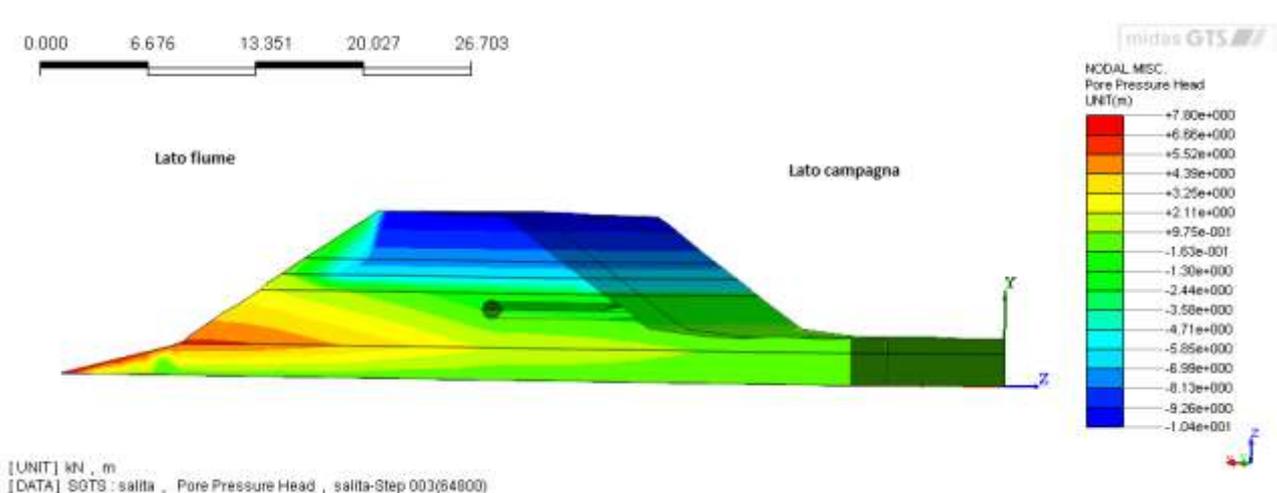


Figura 4.106:Argine sinistro sezione V dopo 18 ore

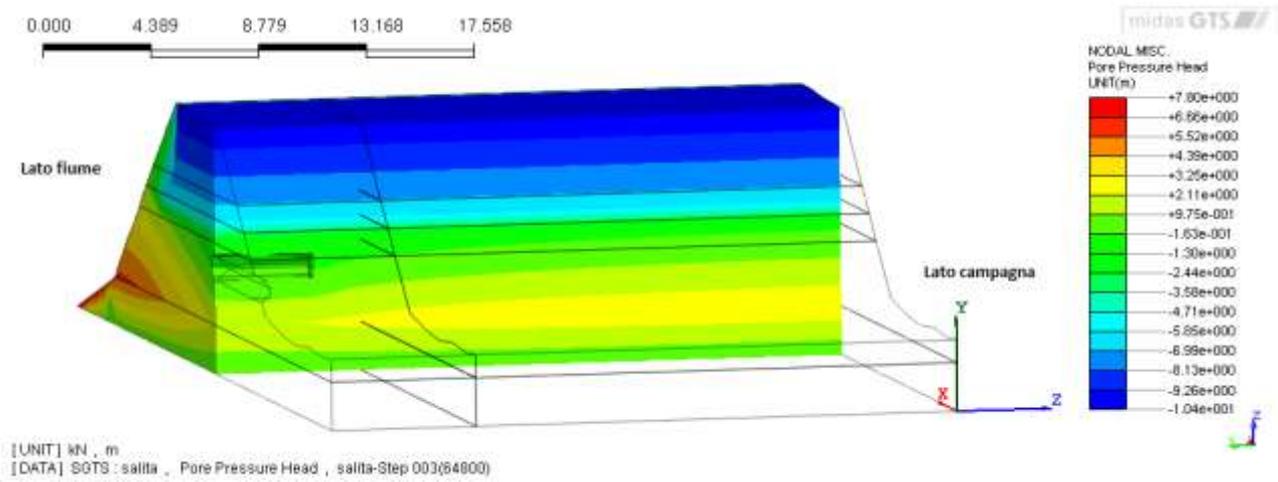


Figura 4.107:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 18 ore

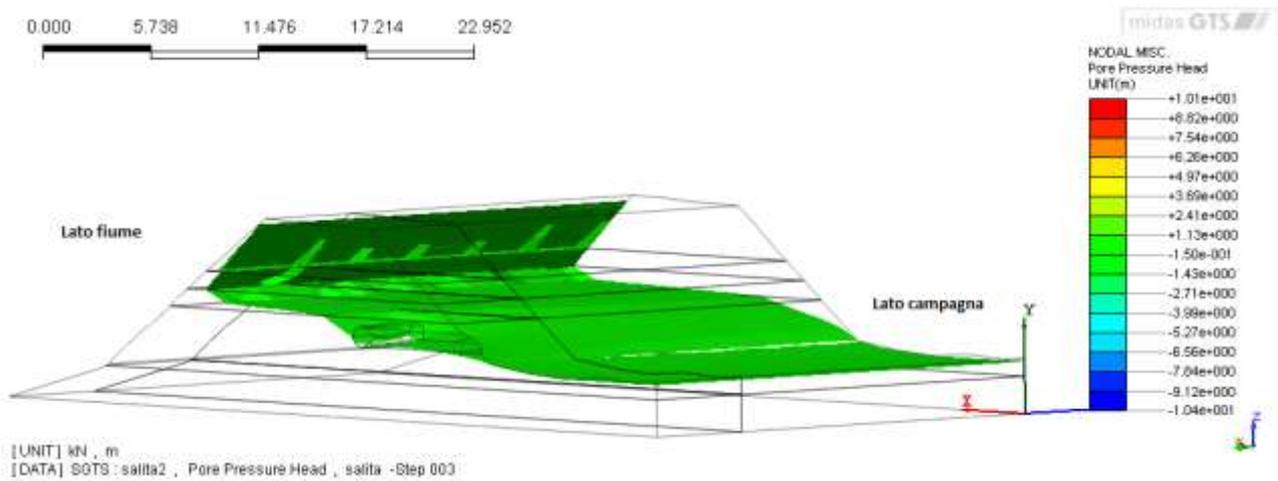


Figura 4.108:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 18 ore

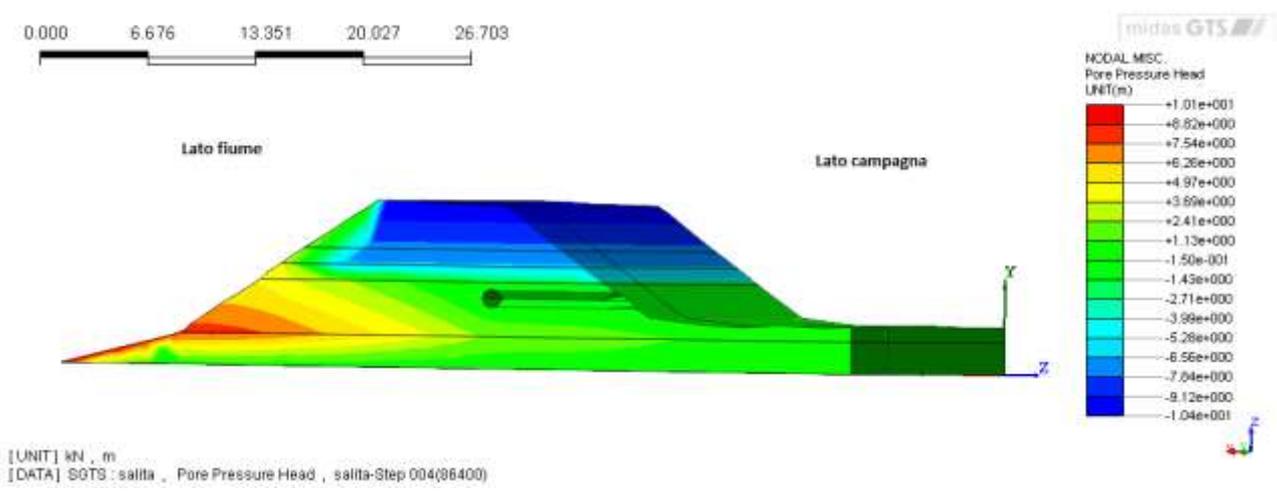


Figura 4.109:Argine sinistro sezione V dopo 24 ore

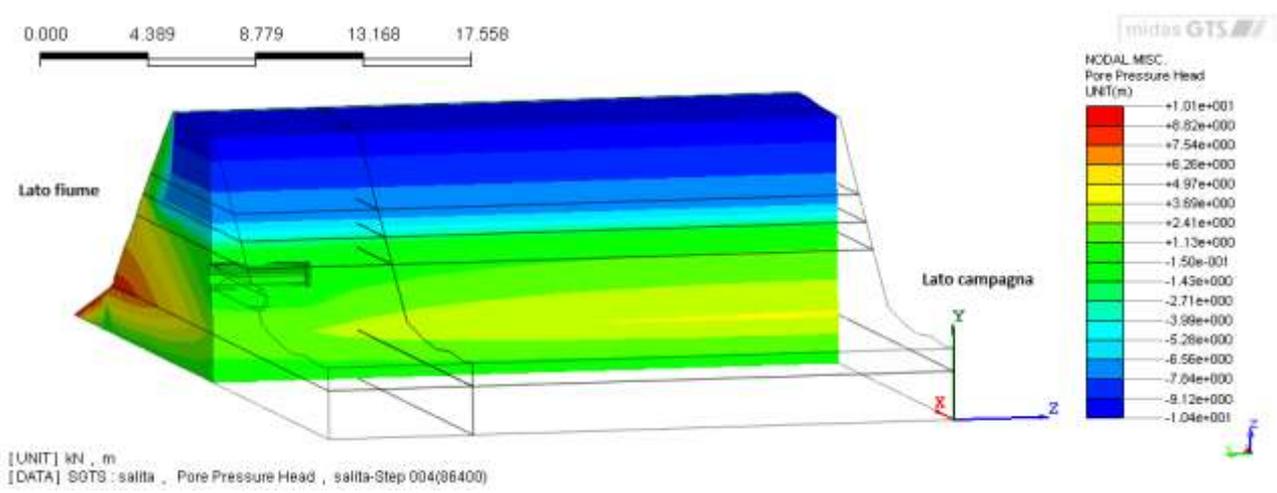


Figura 4.110:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 24 ore

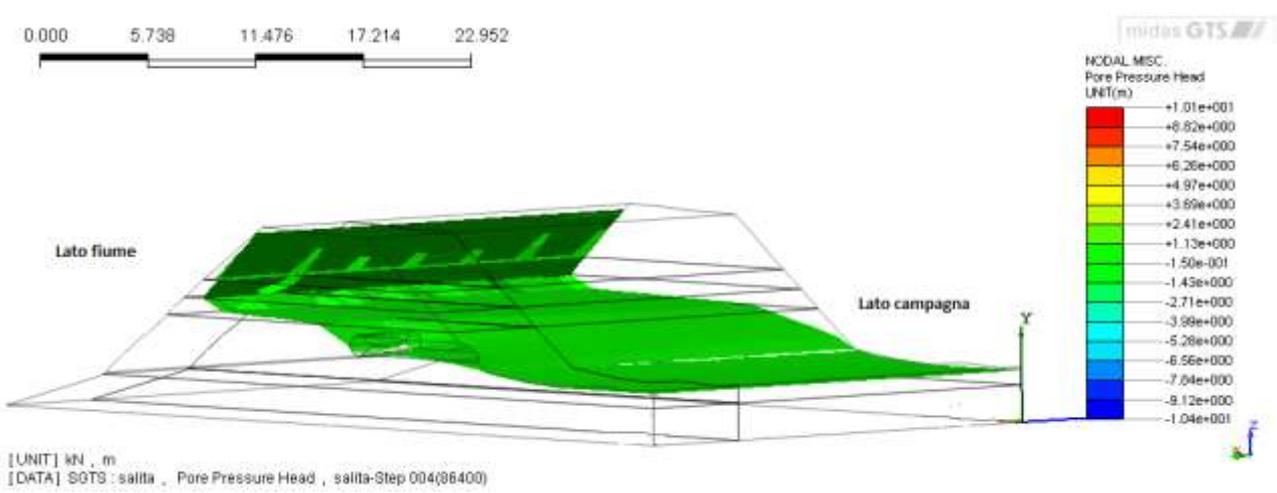


Figura 4.111:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 24 ore

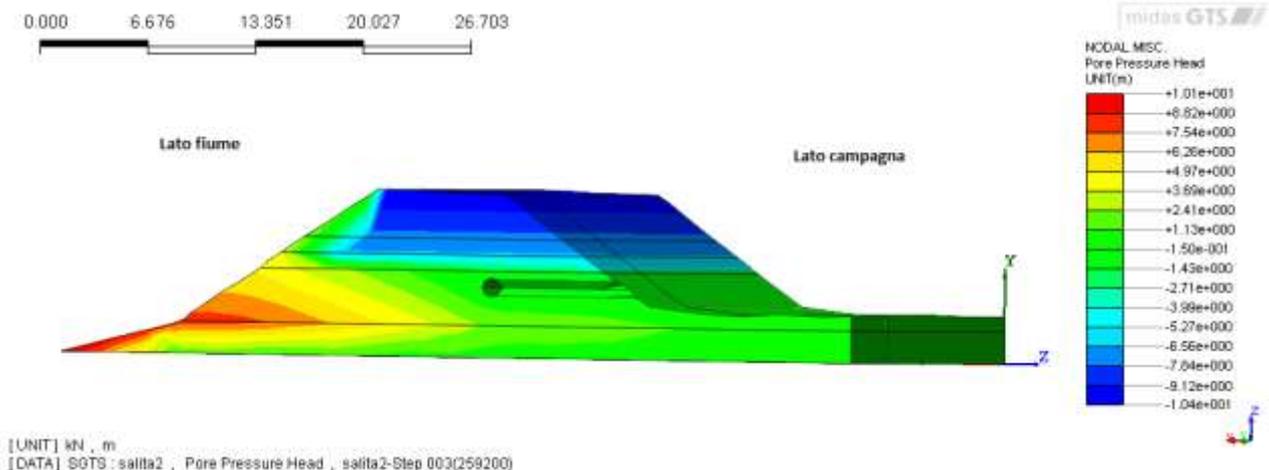


Figura 4.112:Argine sinistro sezione V dopo 3 giorni

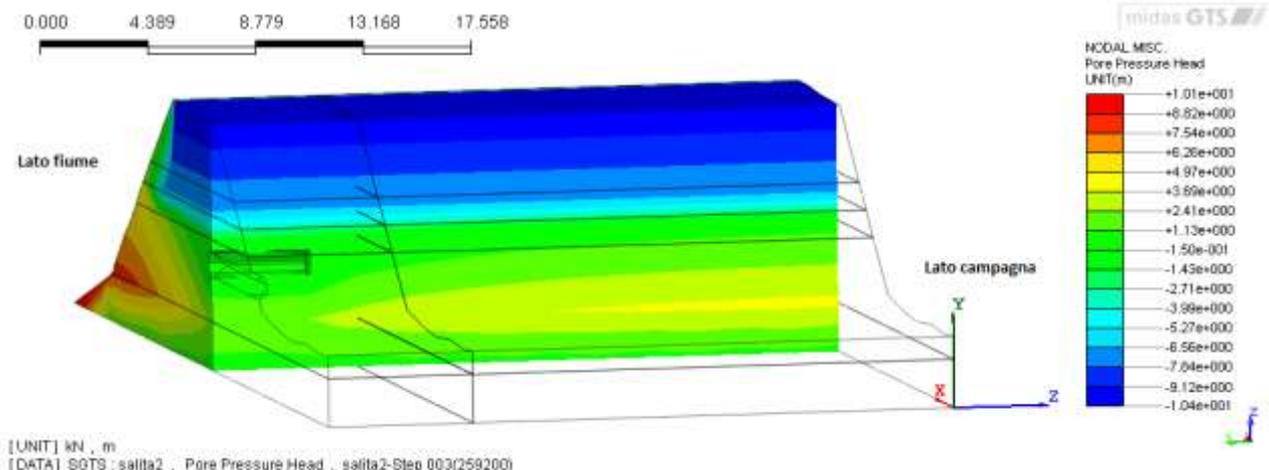


Figura 4.113:Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 3 giorni

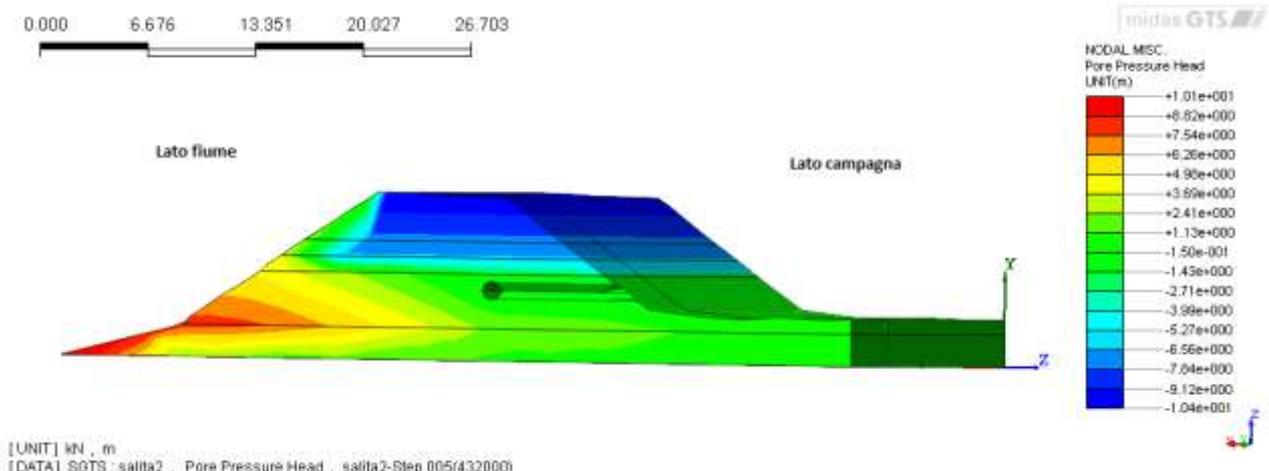


Figura 4.114:Argine sinistro sezione V dopo 5 giorni

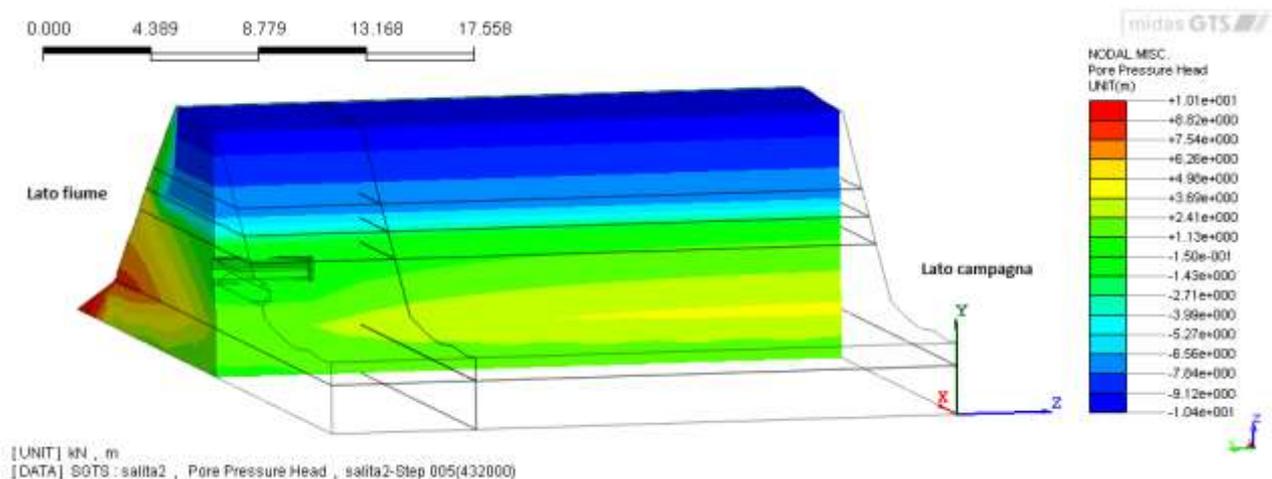


Figura 4.115: Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 5 giorni

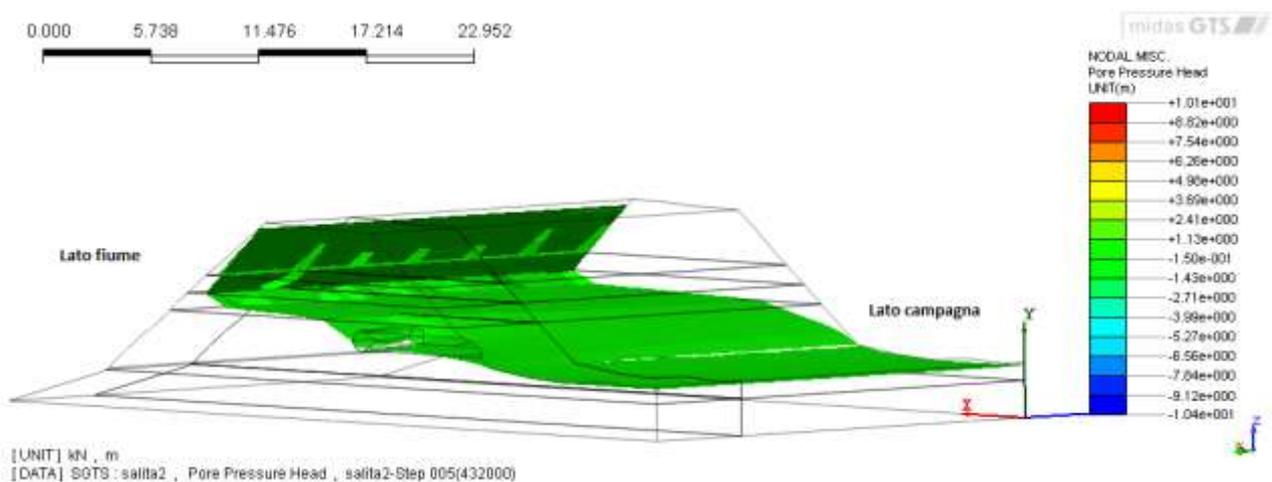


Figura 4.116: Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 5 giorni

Dalle analisi condotte sull' argine soggetto ad un alterazione del tipo a T si nota che alla 18esima ora la linea piezometrica ha già raggiunto la tana ed il corpo arginale risulta imbibito d'acqua; dallo studio dello strato dove risiede l'alterazione e dalla - fig. 4.108 - ,che rappresenta la linea piezometrica dopo 18 ore, si può facilmente vedere come l'acqua abbia completamente invaso la tana e la filtrazione sia già in atto.

Si può notare anche, dalle immagini che rappresentano le sezioni trasversali dell'argine, che l'elemento longitudinale dell'alterazione tenda a richiamare verso di se l'acqua andando ad influire una zona pari a circa 1.5-2 volte la sua lunghezza. Nel caso in esame essendo le tane costituite da un condotto di circa 4 metri a destra e 4 a sinistra dell'asse della tana, la zona influenzata è di circa 20 metri; valore molto elevato per un corpo

arginale di piccole dimensioni come questo. Questo fenomeno si nota molto dalle sezioni longitudinali, si può infatti vedere come la linea piezometrica in prossimità dell'alterazione tenda ad incurvarsi e solo a una distanza pari a 2 volte la lunghezza dell'alterazione la linea piezometrica torna ad essere orizzontale.

I valori di filtrazione sono di circa $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ alla 18esima ora, $4.96 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ alla 24esima e raggiungono il valore di $5.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dopo 5 giorni di piena . Tali valori sono simili a quelli dell'alterazione sferica ma, in questo caso, il processo di filtrazione risulta essere più veloce ed anticipato di alcune ore. Come si nota dalle immagini sottostanti i valori massimi di filtrazione si concentrano principalmente all'estremità dell'alterazione, tali punti infatti fungono da elementi di raccolta dell'acqua.

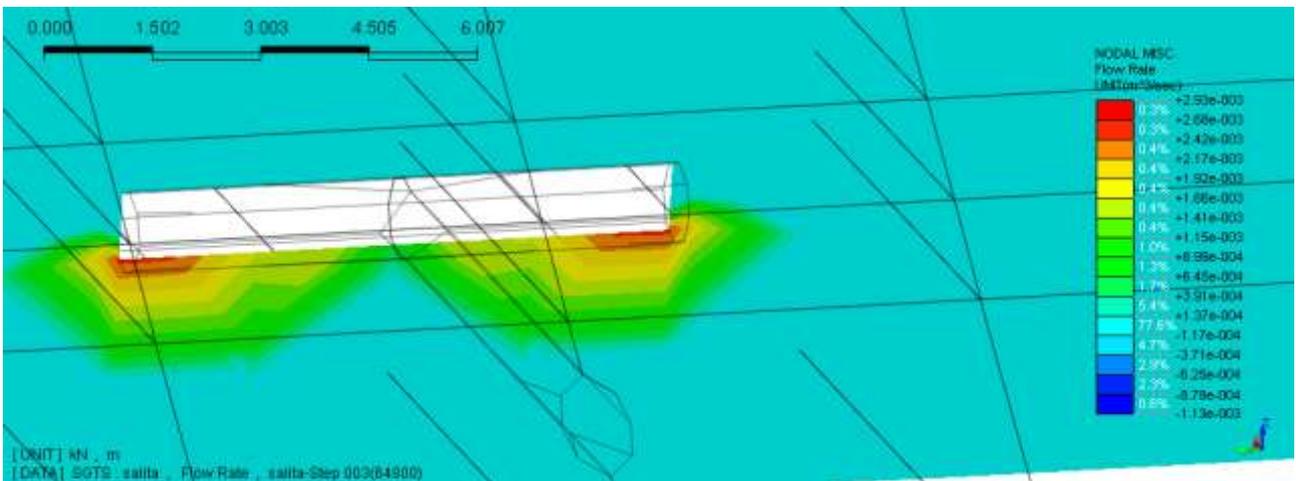


Figura 4.117: Filtrazione dalla tana sferica dopo 18 ore

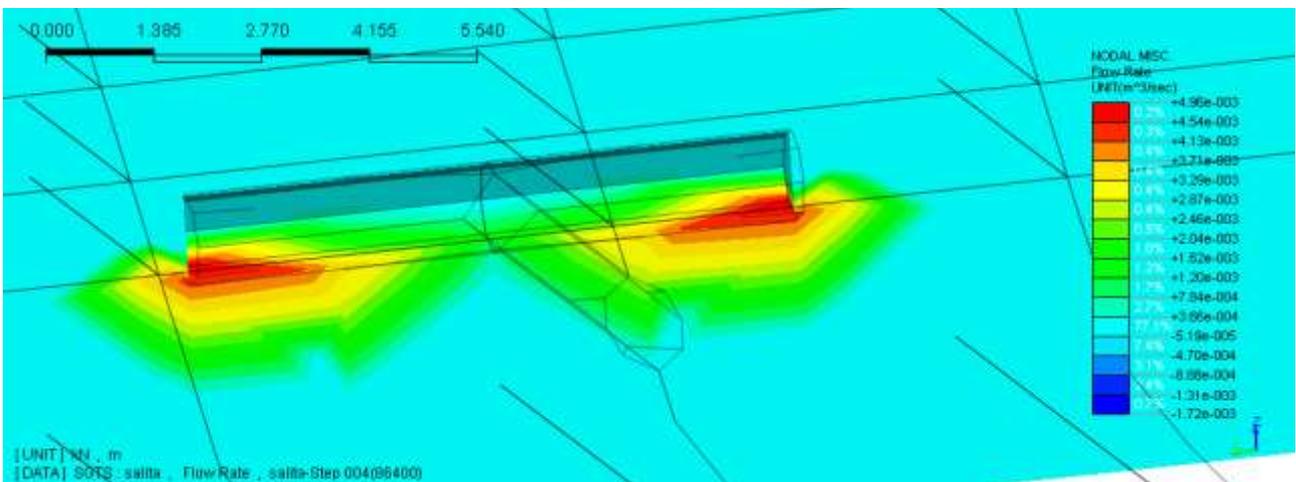


Figura 4.118: Filtrazione dalla tana sferica dopo 24 ore

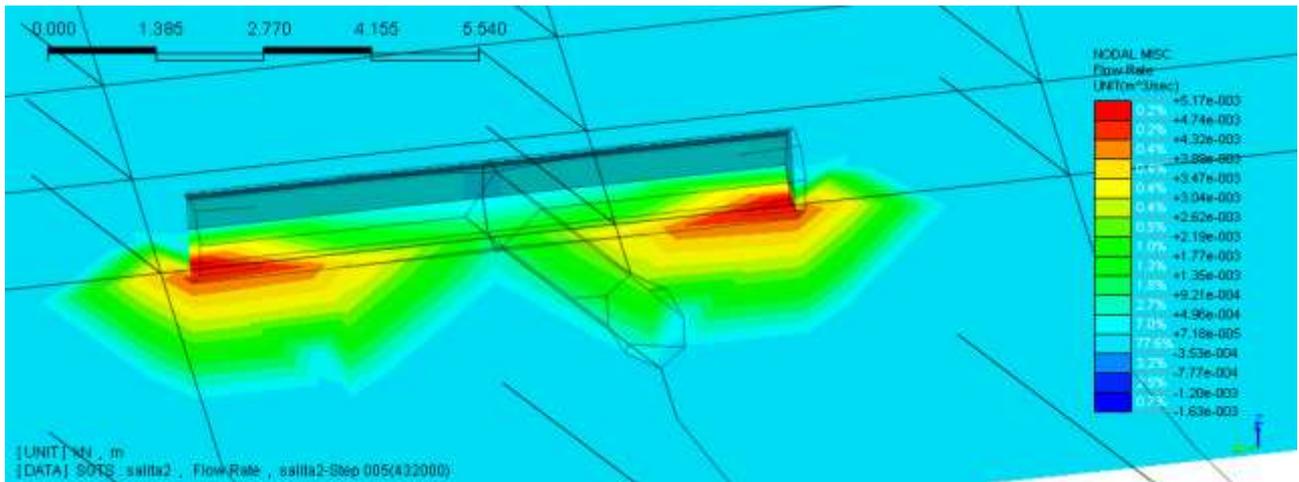


Figura 4.119: Filtrazione dalla tana sferica dopo 5 giorni

GTSMidas permette di studiare anche i valori di velocità del flusso all'interno del corpo arginale e, come si nota dalle immagini sottostanti, la filtrazione risulta essere principalmente collocata nello strato dove è presente l'alterazione raggiungendo valori di picco proprio a contatto con l'elemento longitudinale della tana.

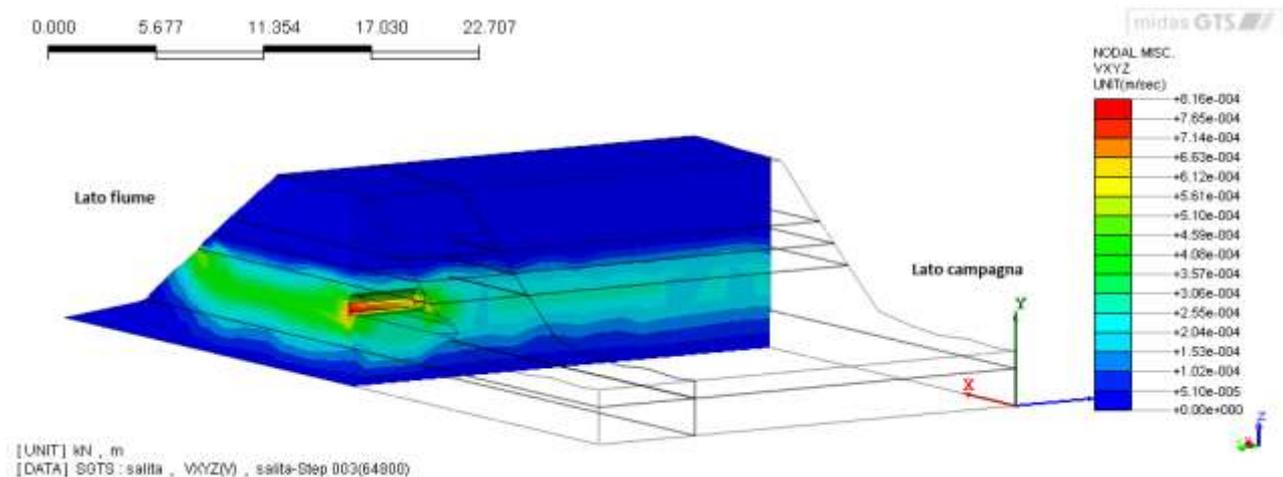


Figura 4.120: velocità di filtrazione dopo 18 ore

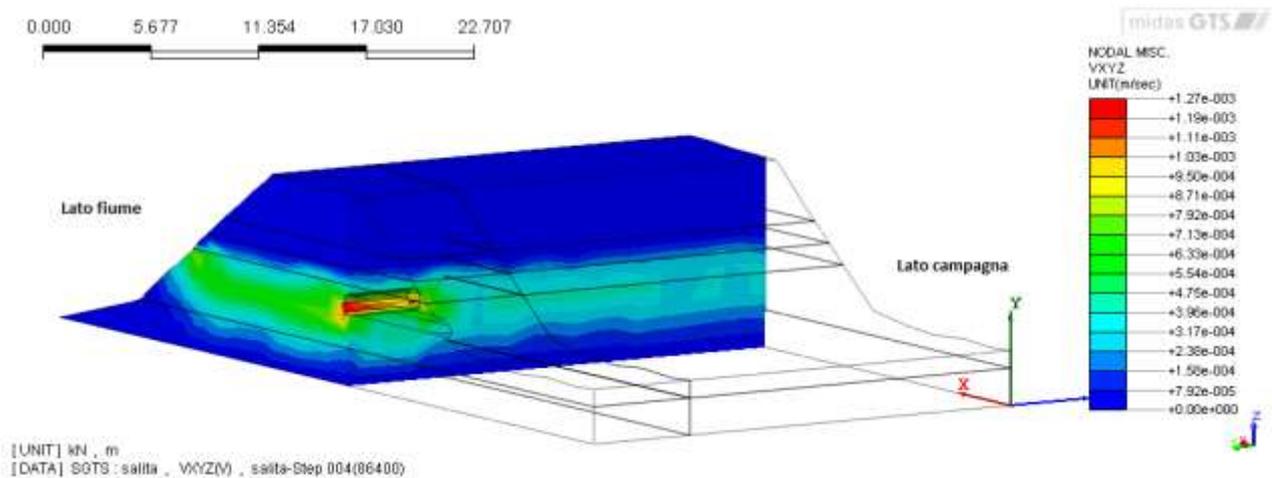


Figura 4.121: velocità di filtrazione dopo 24 ore

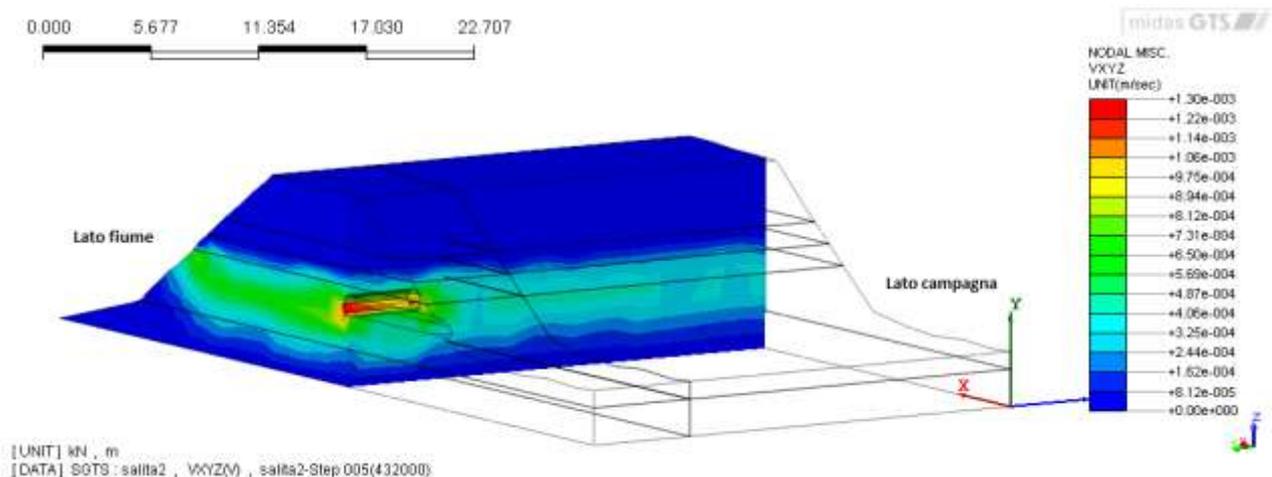


Figura 4.122 velocità di filtrazione dopo 5 giorni

Per quanto riguarda i gradienti idraulici all' interno dell' alterazione si raggiunge il valore di 1.43, dopo 18 ore dall'inizio della piena e si arriva a 2.54 dopo 24 ore. Entrambi i valori sono superiori all'unità e questo dà luogo a significativi problemi per quanto riguarda l'eventuale asportazione di materiale e per la stabilità dell'argine in condizioni di piena; la tana funge da condotto permettendo un rilevante flusso d'acqua attraverso essa e di conseguenza l'asportazione di materiale dal corpo arginale con notevoli conseguenze sulla sicurezza dell'argine stesso.

Di seguito vengo riportate le medesime analisi sulla sponda destra

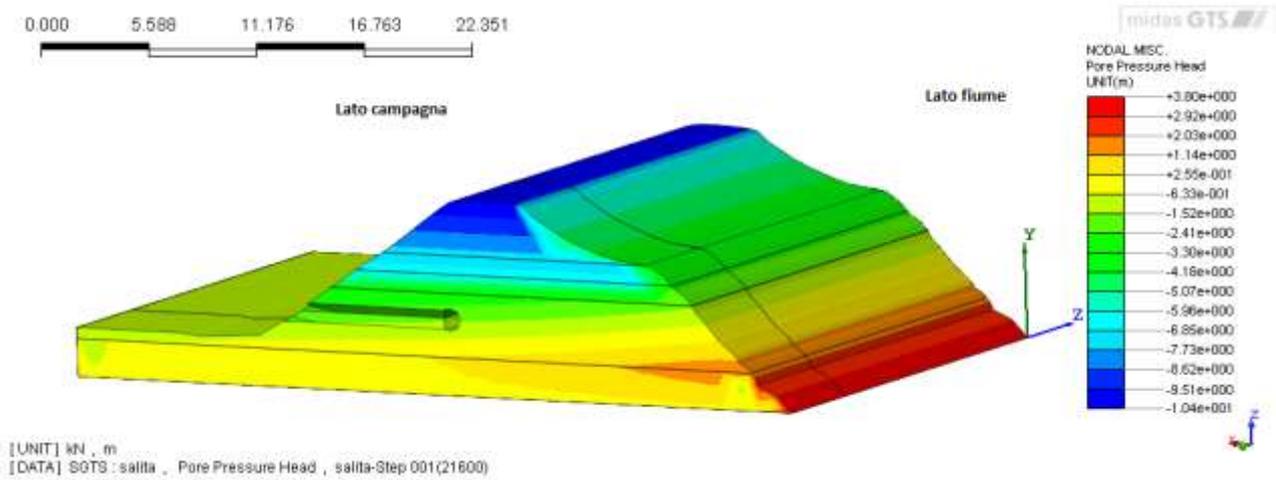


Figura 4.123:Argine destro sezione 12 dopo 6 ore

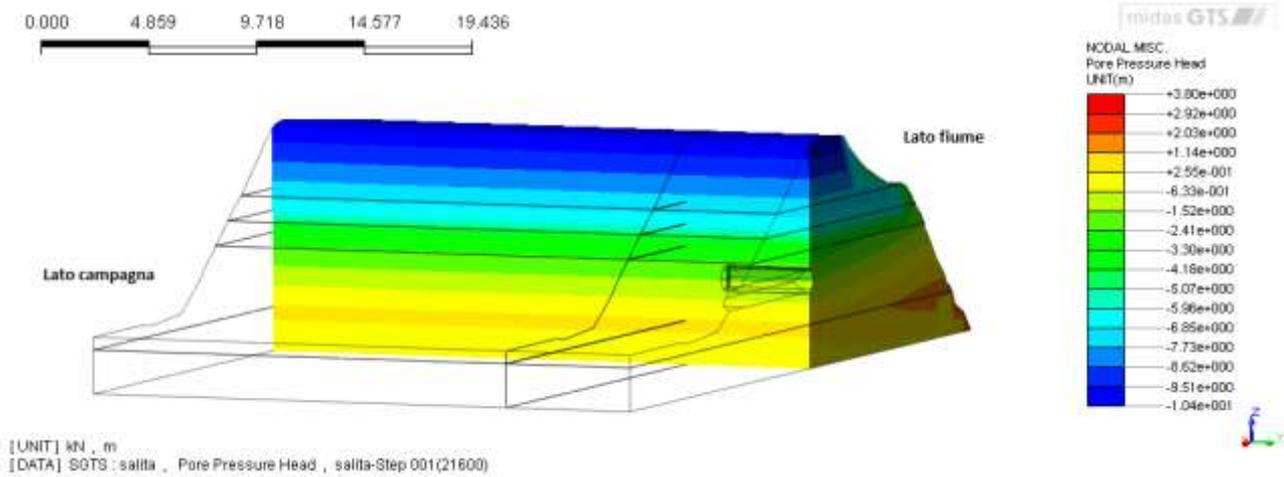


Figura 4.124:Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 6 ore

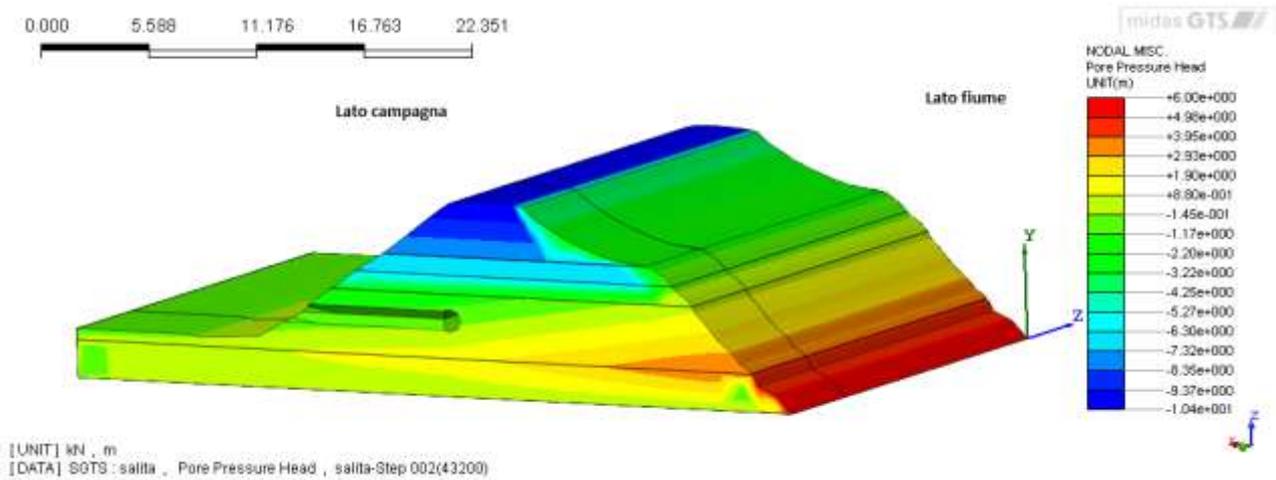


Figura 4.125:Argine destro sezione 12 dopo 12 ore

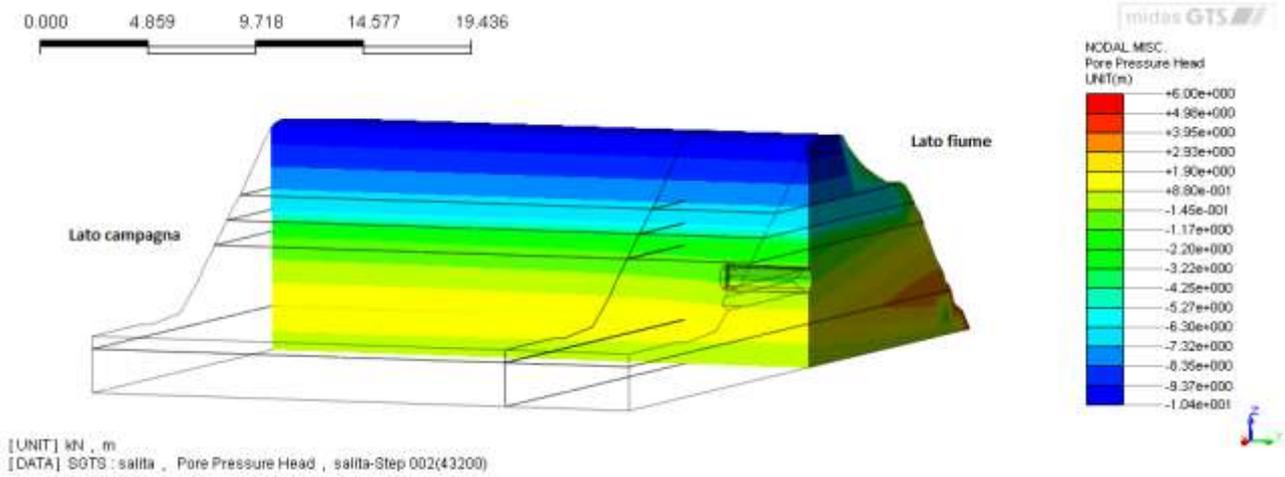


Figura 4.126: Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 12 ore

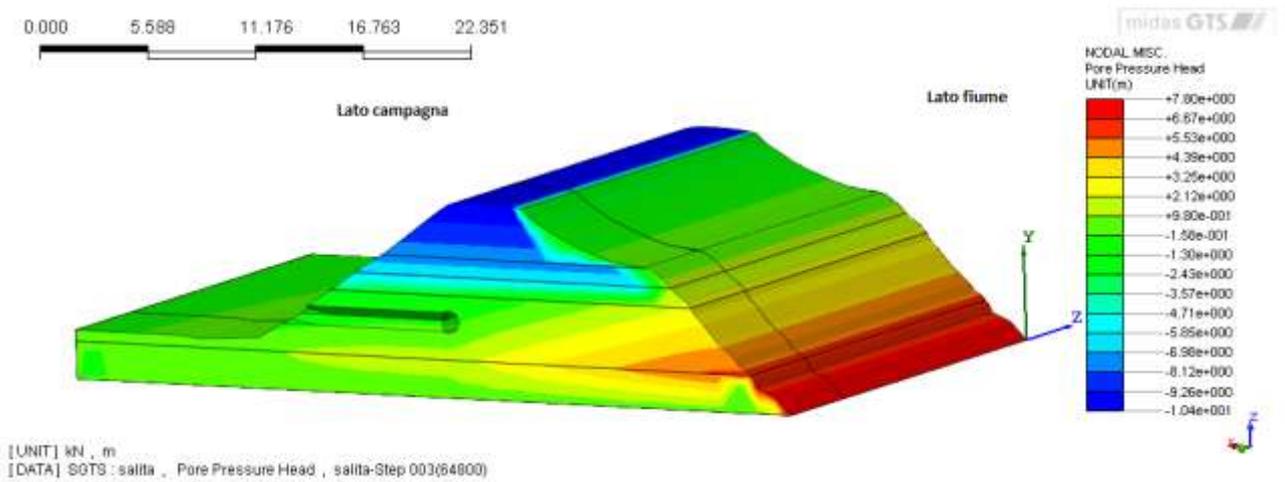


Figura 4.127: Argine destro sezione 12 dopo 18 ore

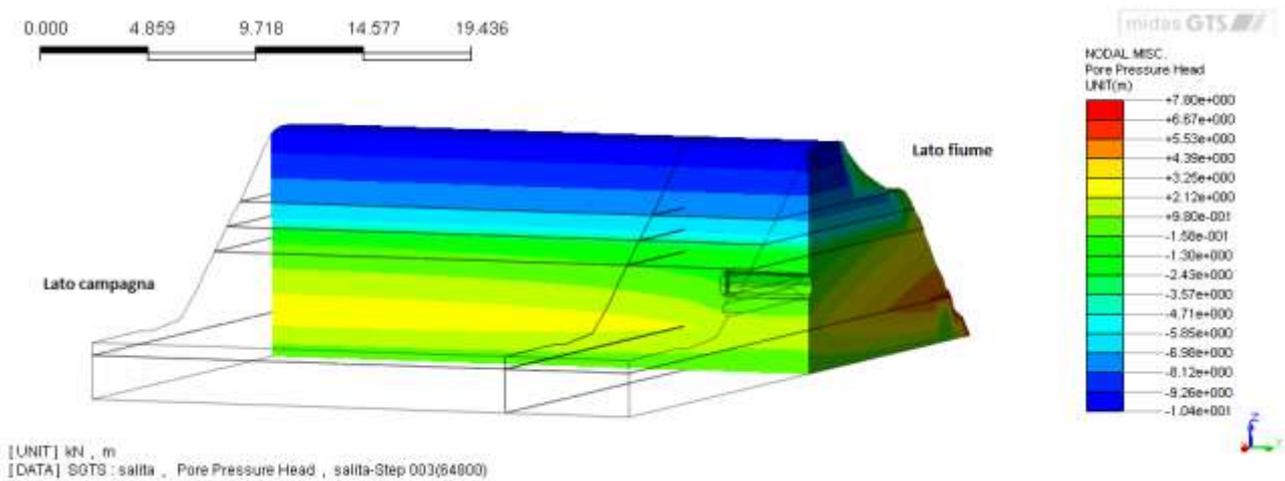


Figura 4.128: Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 18 ore

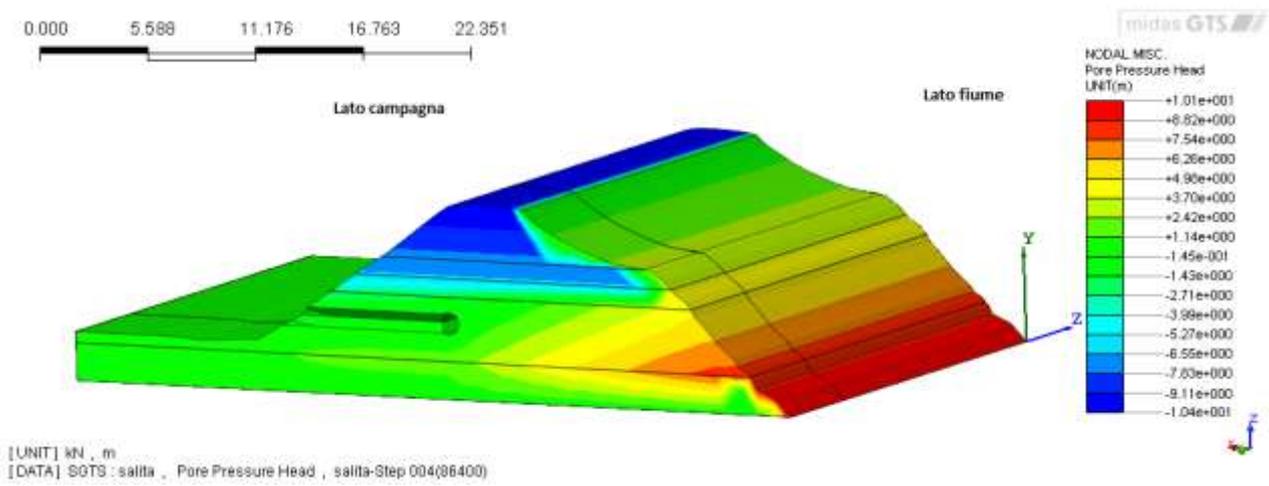


Figura 4.129:Argine destro sezione 12 dopo 24 ore

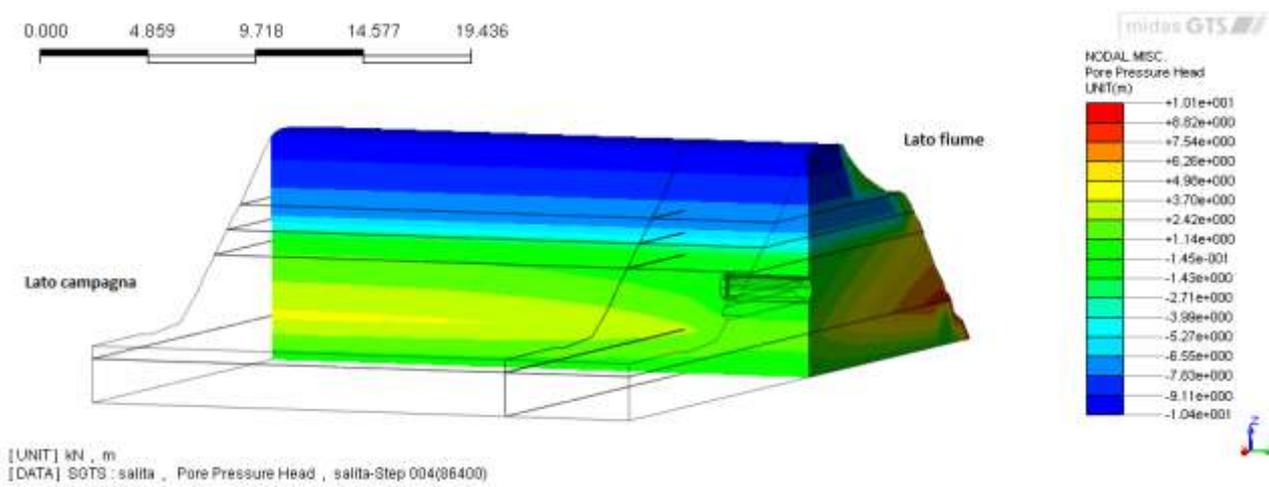


Figura 4.130:Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 24 ore

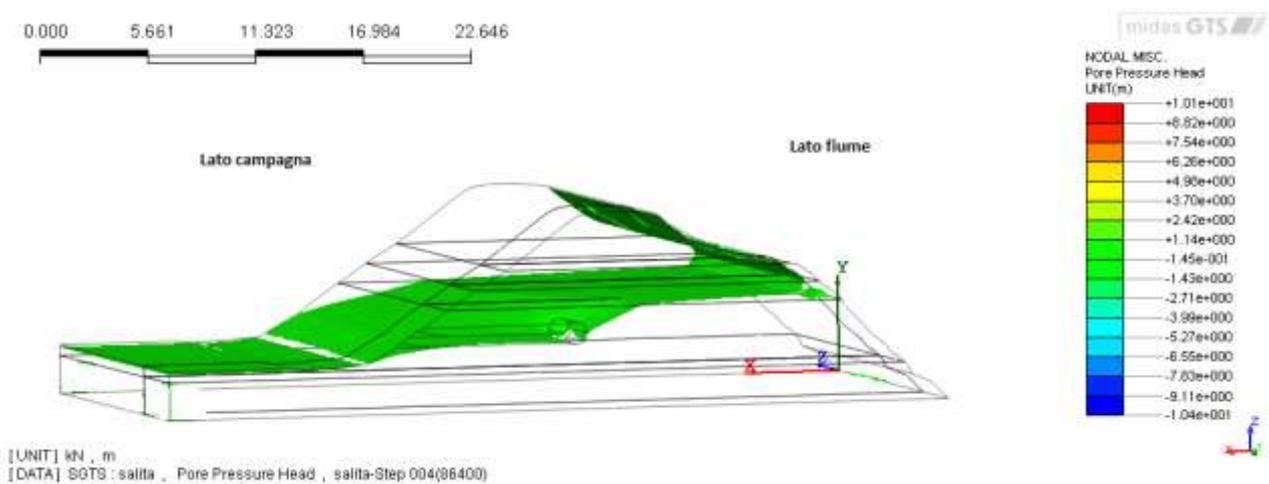


Figura 4.131:Argine destro sezione 12 linea piezometrica dopo 24 ore

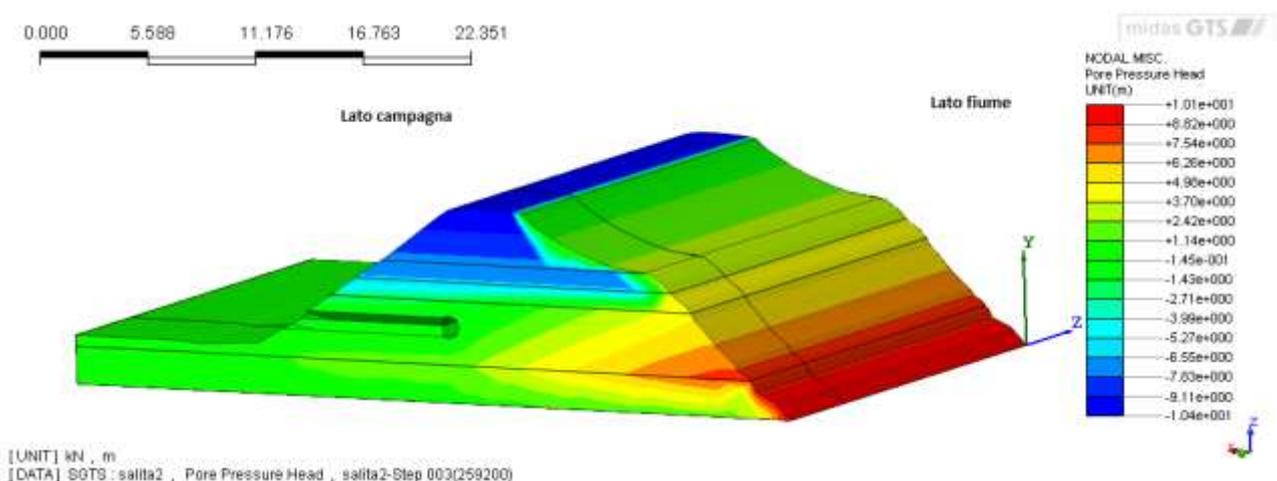


Figura 4.132:Argine destro sezione 12 dopo 3 giorni

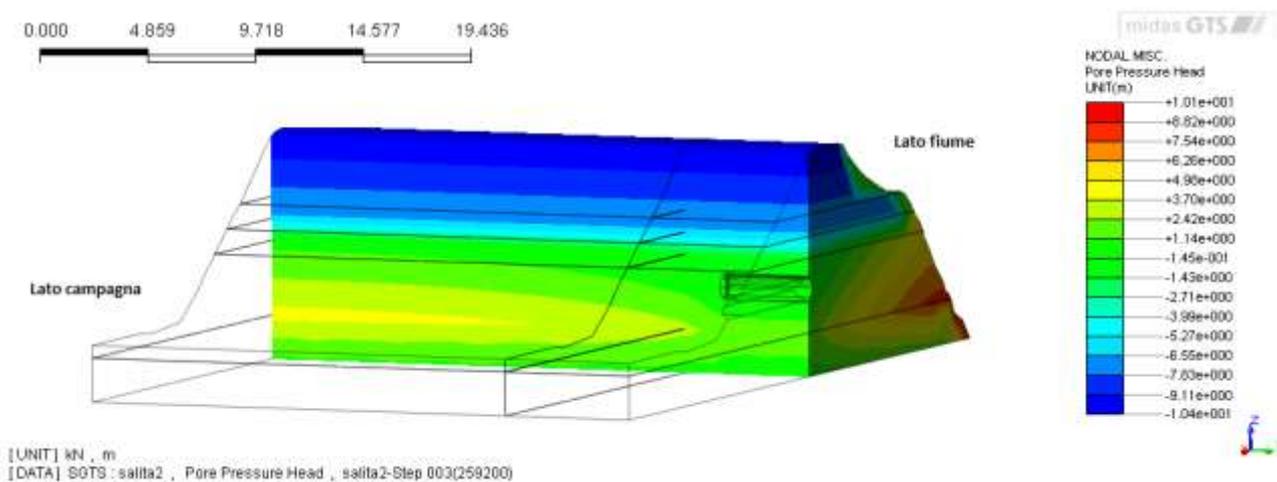


Figura 4.133:Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 3 giorni

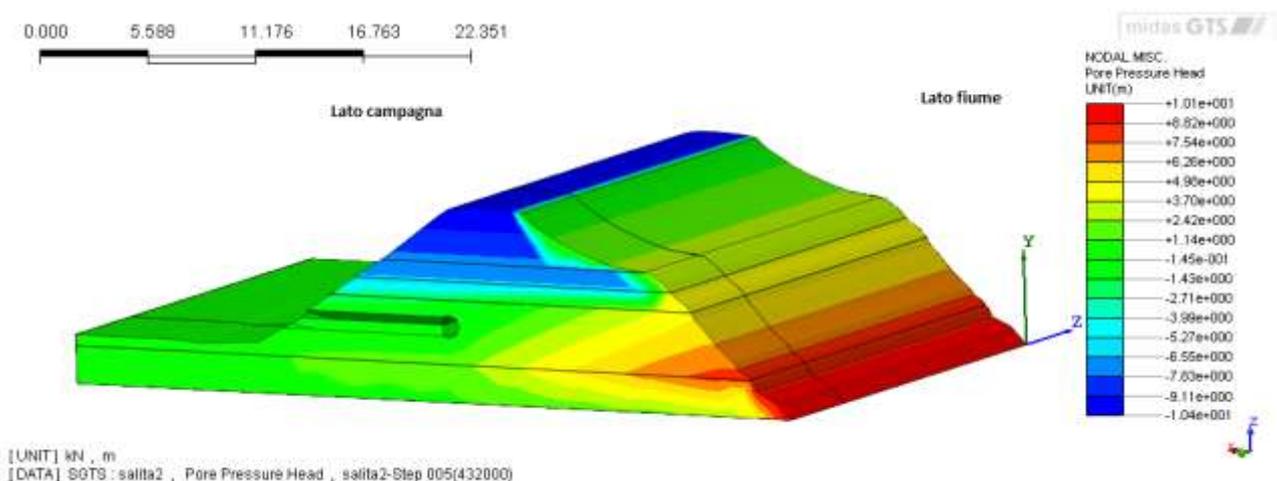


Figura 4.134:Argine destro sezione 12 dopo 5 giorni

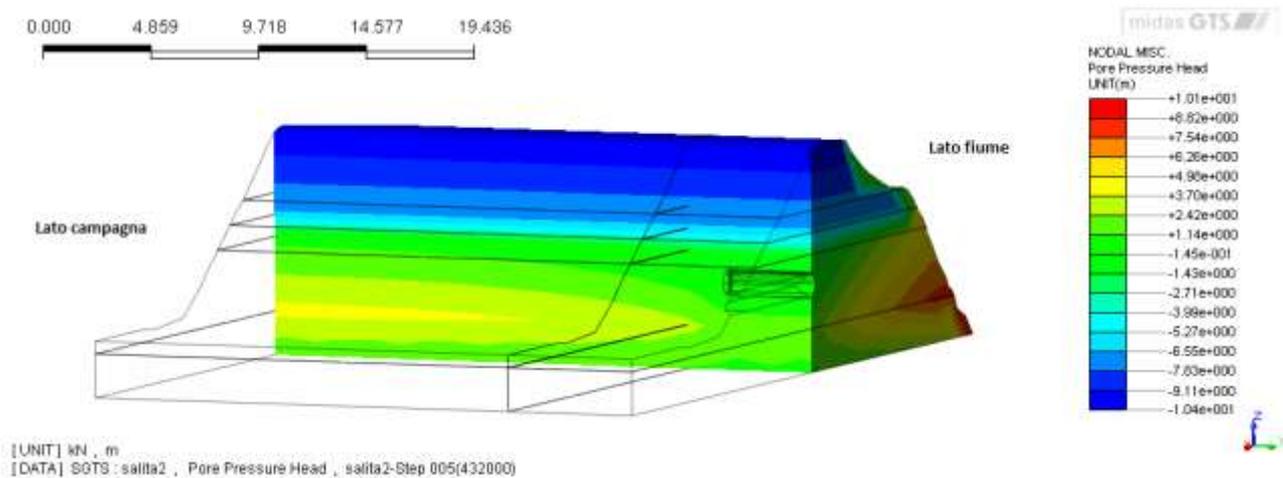


Figura 4.135: Taglio longitudinale argine destro sezione 12 dopo 5 giorni

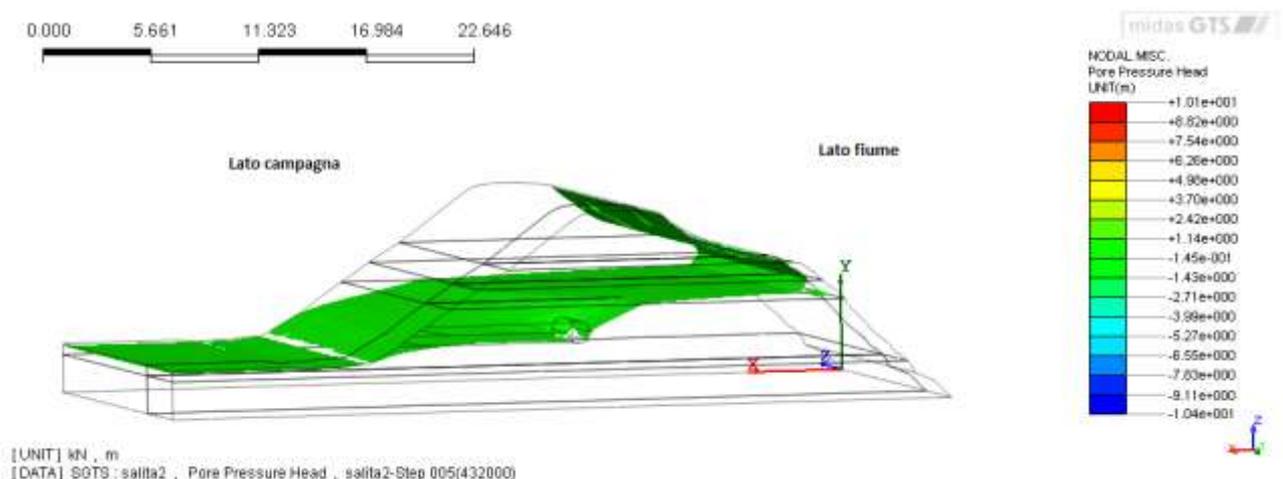


Figura 4.136: Argine destro sezione 12 linea piezometrica dopo 5 giorni

Anche in questo caso, circa 18 ore dopo l'inizio della piena la linea piezometrica raggiunge la tana ottenendo gli stessi risultati esposti precedentemente per la sponda sinistra.

La presenza della cavità longitudinale influenza una zona dell'argine di circa 10 metri a sinistra e 10 a destra dell'asse della tana. E' da sottolineare anche il valore del gradiente idraulico che dopo 18 ore di piena nel punto più sollecitato dell'alterazione è di 1.56 e dopo 24 ore raggiunge il valore di 2.82.

Di seguito le immagini che rappresentano i valori di filtrazione e le loro velocità;

Da sottolineare che i valori di filtrazione sono di circa $3.55 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ alla 18esima ora, $6.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ alla 24esima e raggiungono il valore di $6.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dopo 5 giorni di piena superiori al caso precedente.

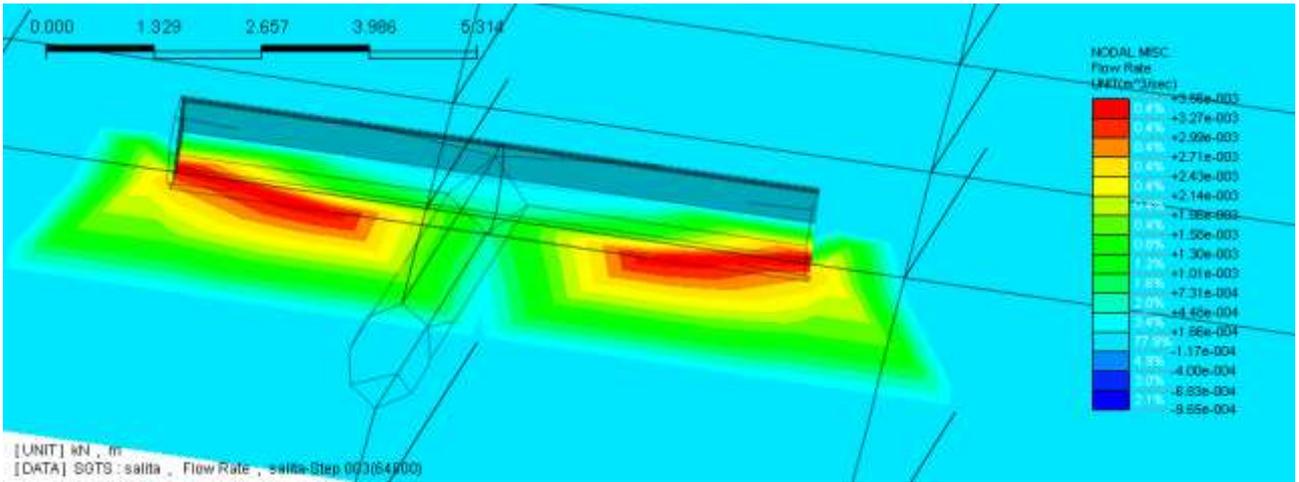


Figura 4.137: Filtrazione dalla tana sferica dopo 18 ore

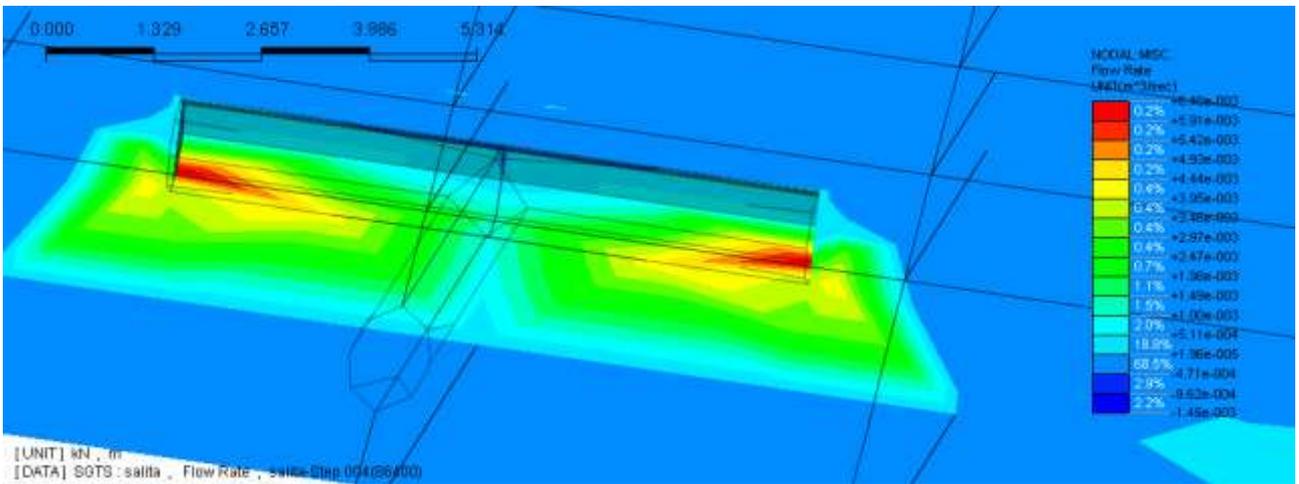


Figura 4.138: Filtrazione dalla tana sferica dopo 24 ore

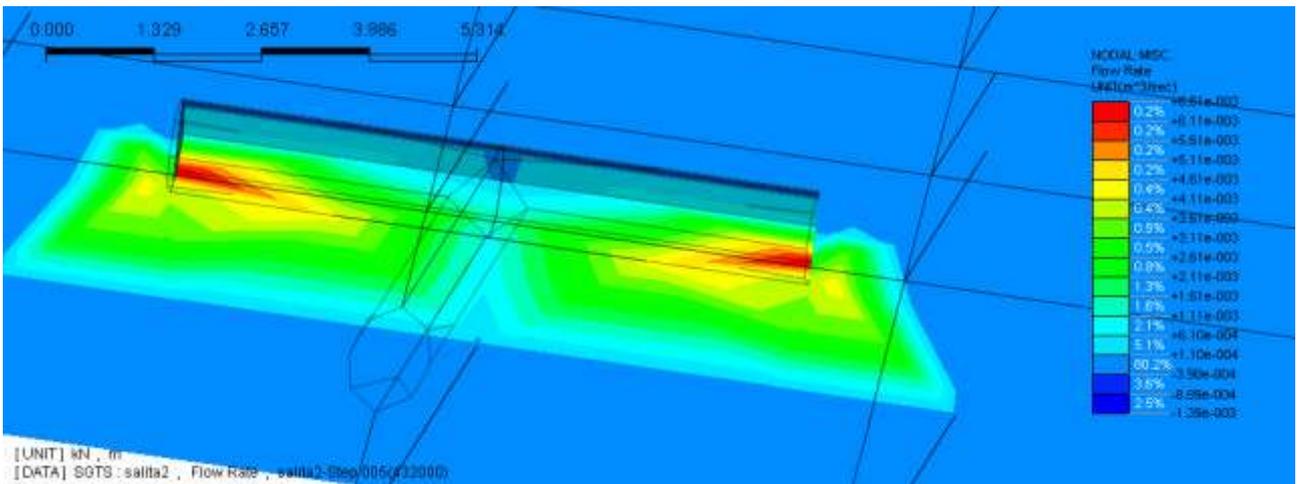


Figura 4.139: filtrazione dalla tana sferica dopo 5 giorni

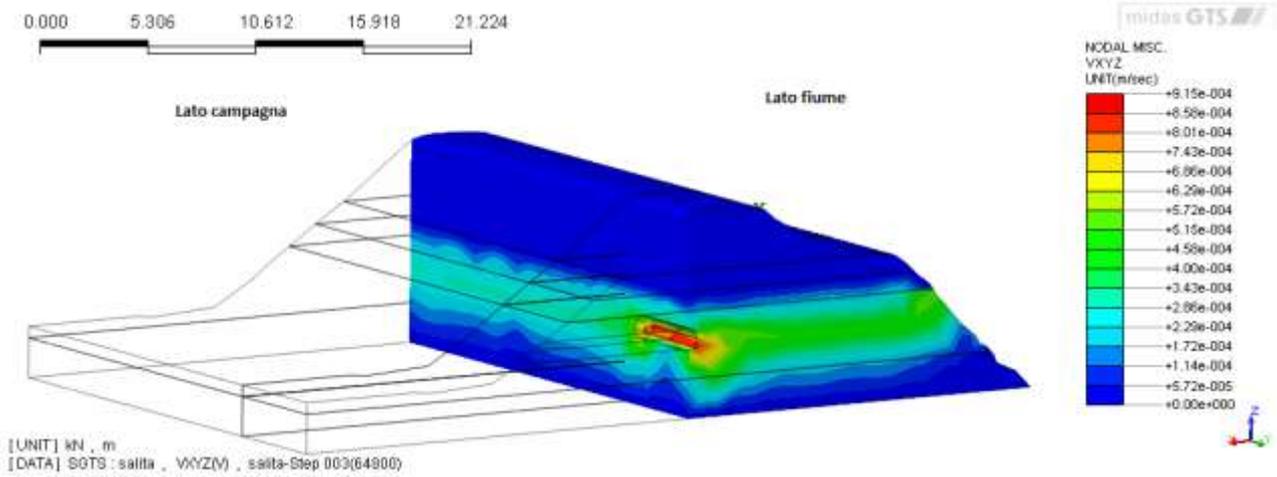


Figura 4.140: velocità di filtrazione dopo 18 ore

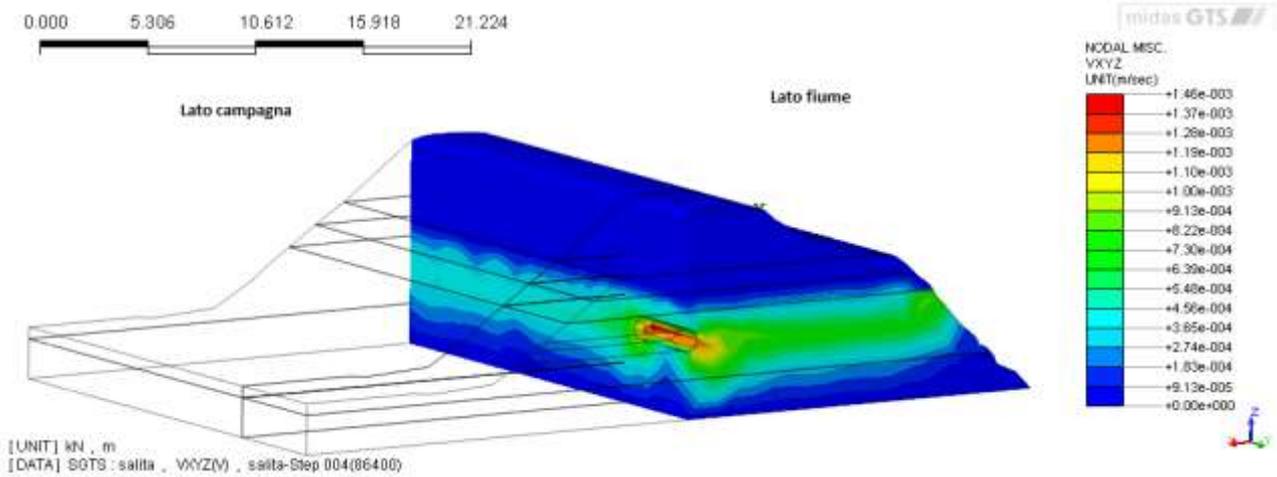


Figura 4.141: velocità di filtrazione dopo 24 ore

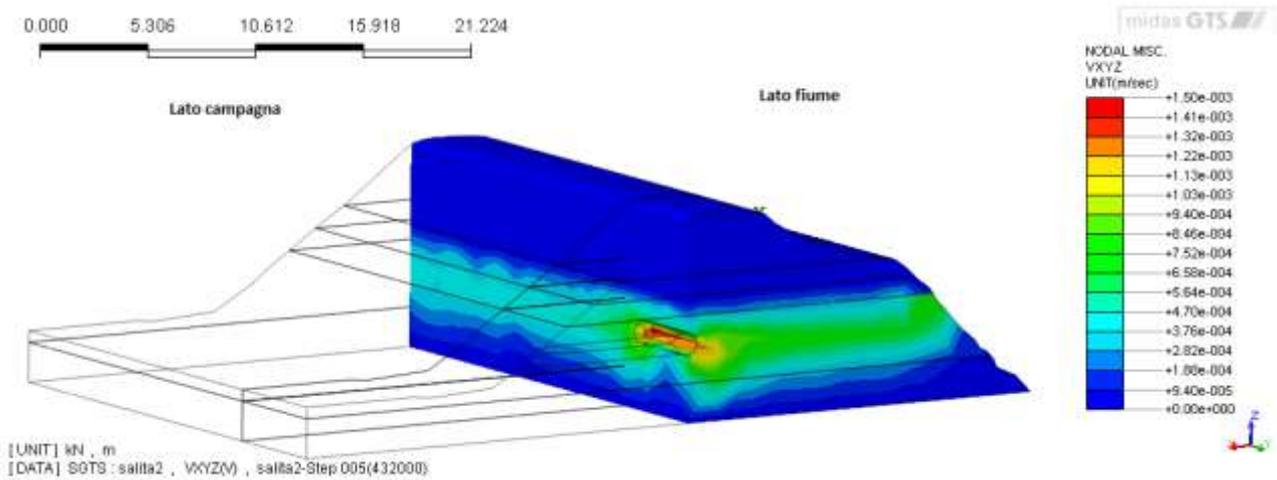


Figura 4.142: velocità di filtrazione dopo 5 giorni

4.2.2.4 Analisi particolareggiate

Come si è potuto notare dai paragrafi precedenti, l'alterazione a T è quella che maggiormente influisce sulla filtrazione e conseguentemente può provocare un maggior numero di situazioni problematiche.

Per questo motivo le analisi seguenti sono tutte condotte sull'argine sinistro - sezione V soggetto ad alterazioni del tipo a T; si è analizzato l'argine in condizioni particolari per poter andare a studiare fino a che punto ed in che modo tali alterazioni possano modificare l'andamento della filtrazione.

Le analisi condotte sono le seguenti:

- Doppia tana a T;
- Doppia tana a T ravvicinata;
- Variazione del livello di massima piena
- Impermeabilizzazione lato fiume dello strato sede dell'alterazione.

4.2.2.4.1 Doppia tana a T

In questa analisi si sono andate a disporre 2 alterazioni a T ad una distanza di 20 metri tra gli assi delle tane e di conseguenza una distanza di 10 metri tra i due elementi longitudinali della tana interni all'argine - fig. 4.143 -. Tale distanza è la minima che solitamente si trova in natura tra due tane, poiché come già detto gli animali sono molto territoriali e raramente interferiscono tra di loro.

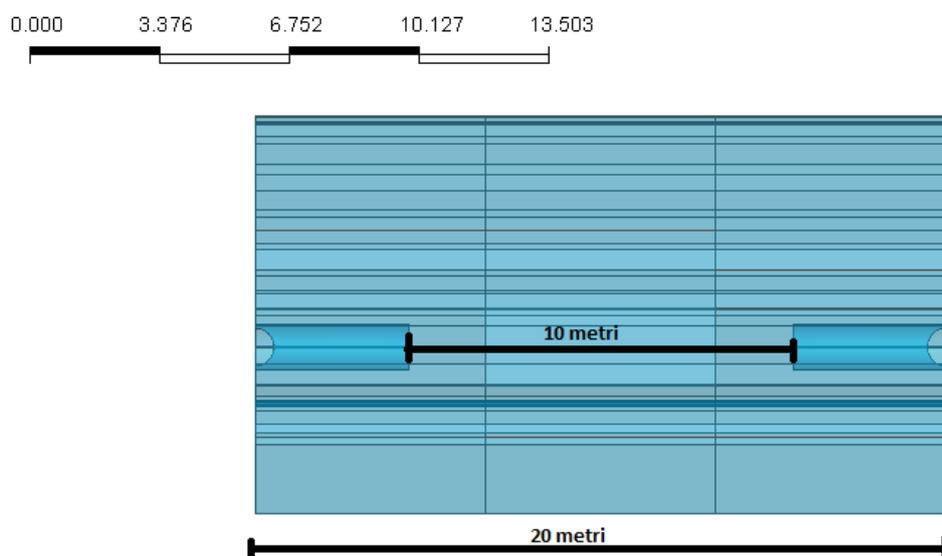


Figura 4.143:prospetto argine con due tana a T

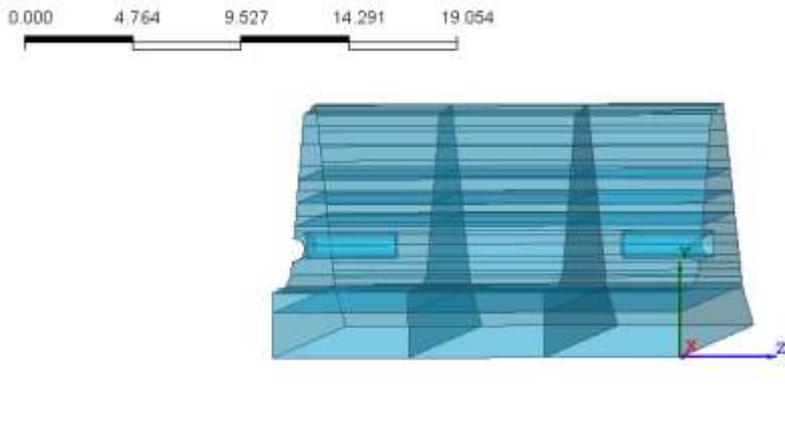


Figura 4.144: Tratto di argine sinistro con due tane a T

Si è notato che in questo caso l'influenza doppia delle tane tende a far inibire molto più velocemente l'argine, infatti già alla 12 ora si iniziano ad apprezzare i primi valori di filtrazione e di flusso e alla 18esima ora il processo è già completamente avviato.

E' da ricordare infatti che le alterazioni del tipo a T hanno una zona d'influenza di circa 10-12 metri a destra e a sinistra dall'asse della tana e la disposizione in - fig. 4.143 - tende a far coincidere i bordi delle due zone d'influenza aumentando notevolmente gli effetti della filtrazione.

Si mostrano ora solo le immagini più significative dell'analisi:

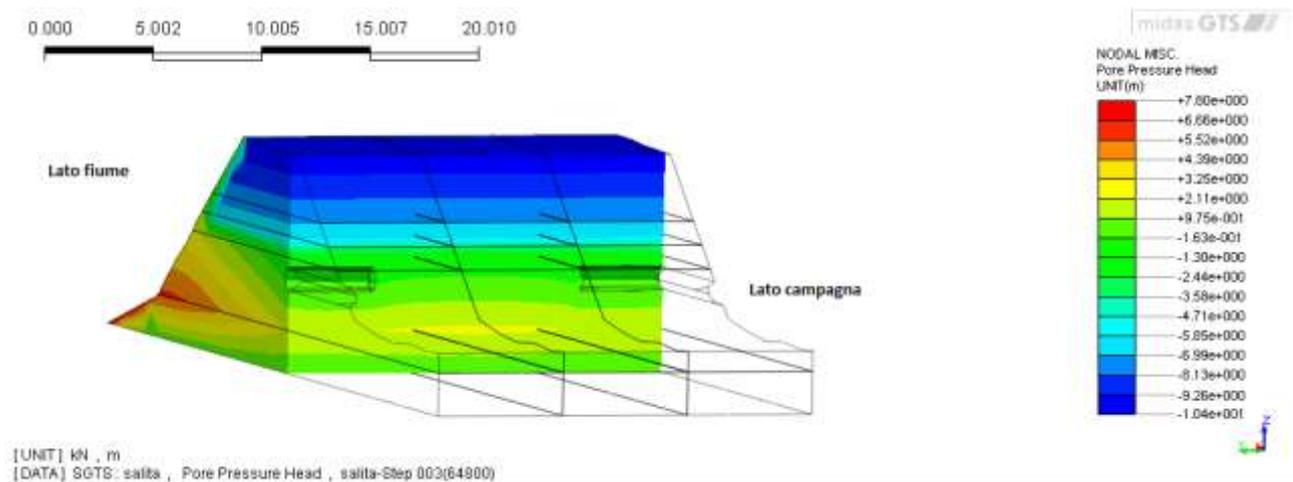


Figura 4.145: Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 18 ore

L'immagine precedente rappresenta la situazione dopo 18 ore dall'inizio della piena e già si può apprezzare come la linea piezometrica tenda ad essere notevolmente influenzata dalla presenza delle 2 alterazioni andando ad inflettersi verso queste.

L'immagine sottostante risulta essere maggiormente chiara e mostra lo stesso fenomeno con una maggior definizione della linea piezometrica.

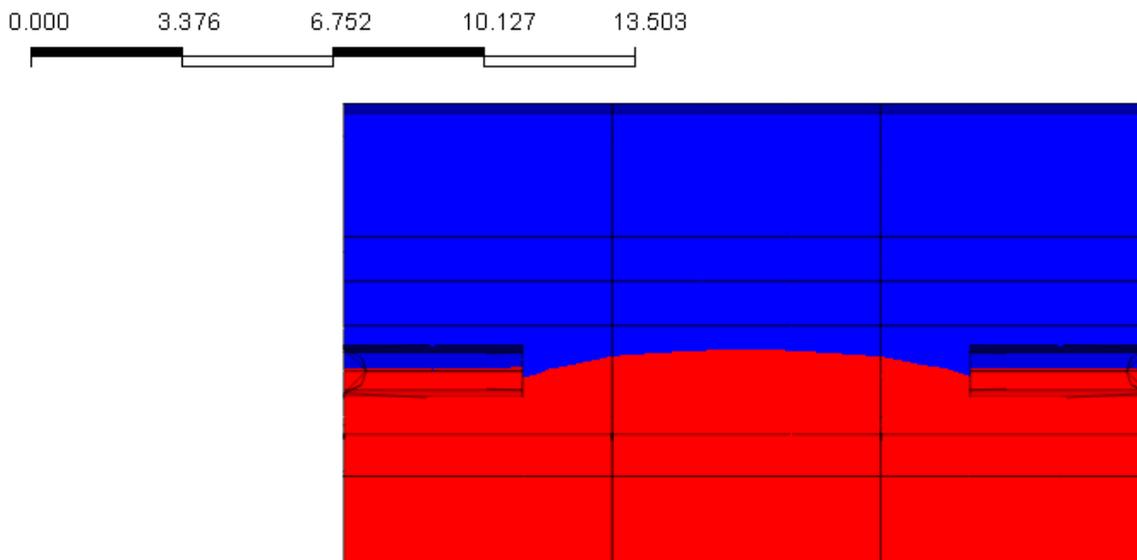


Figura 4.146: Particolare andamento linea piezometrica tra le due tane

I valori di filtrazione che si ottengono dopo 12 ore sono di circa $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ma già alla 18esima ora si raggiungono valori di $3.98 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; i gradienti idraulici in prossimità delle tane, dopo 18 ore di piena, sono pari a 2.34, un valore molto elevato.

4.2.2.4.2 Doppia tana a T ravvicinata

Visti i risultati ottenuti in precedenza si è pensato di avvicinare ulteriormente le due alterazioni ad una distanza di 12 metri tra gli assi delle tane e di conseguenza una distanza di 4 metri tra i due elementi longitudinali delle tane interni all'argine. Tale distanza raramente si trova in natura tra due tane differenti, ma può essere riferita ad un unico animale che scava più cunicoli vicini con più uscite.

0.000 3.379 6.758 10.137 13.516

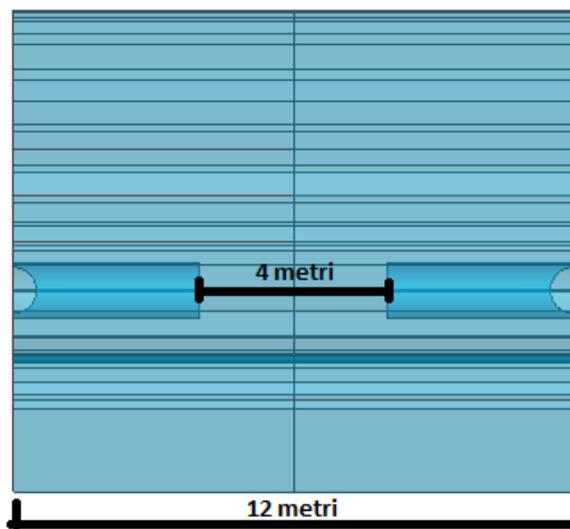


Figura 4.147: prospetto argine con due tana a T

0.000 4.600 9.199 13.799 18.398

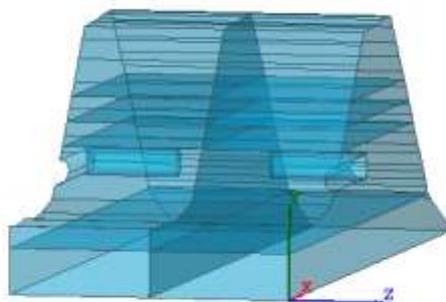


Figura 4.148: Tratto di argine sinistro con due tane a T

Si è notato che rispetto al caso precedente, essendo le alterazioni ancora più vicine il loro effetto tende ad anticipare l'inizio della filtrazione; già alla 12 ora dopo l'inizio della piena il processo è completamente avviato.

E', nuovamente da ricordare, che le alterazioni del tipo a T hanno una zona d'influenza di circa 10-12 metri a destra e a sinistra dall'asse della tana ed in questo caso tale zone risultano completamente sovrapposte.

Si mostrano ora solo le immagini più significative dell'analisi:

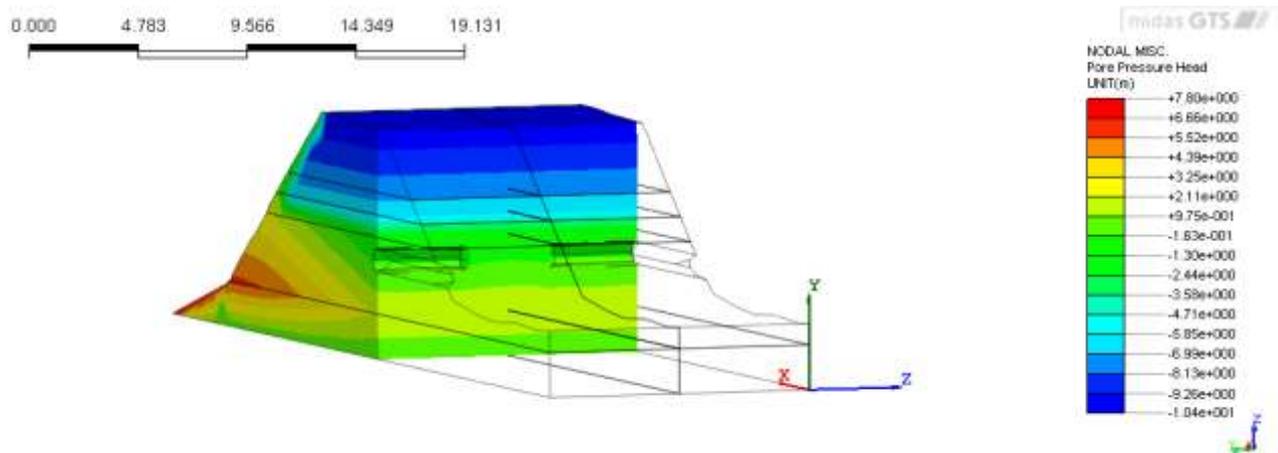


Figura 4.149 : Taglio longitudinale argine sinistro sezione V dopo 12 ore

L'immagine precedente rappresenta la situazione dopo 12 ore dall'inizio della piena e già si può apprezzare come la linea piezometrica tenda ad essere notevolmente influenzata dalla presenza delle 2 alterazioni andando ad inflettersi verso queste.

L'immagine sottostante risulta essere maggiormente esplicativa mostrando lo stesso fenomeno con una maggior definizione della linea piezometrica.

0.000 3.379 6.758 10.137 13.516

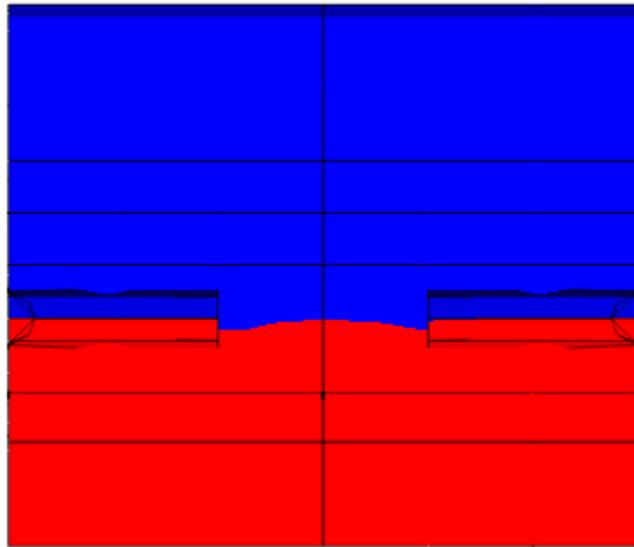


Figura 4.150: Particolare andamento linea piezometrica tra le due tane

I valori del flusso di filtrazione che si ottengono dopo 12 ore sono di circa $4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ma già alla 18esima ora si raggiungono valori di $3.18 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; i gradienti idraulici in prossimità delle alterazioni, dopo 18 ore, sono di 2.45, un valore molto elevato.

4.2.2.4.3 Variazione del livello di massima piena

Si è ipotizzata ora una variazione delle condizioni di piena.

Grazie alle analisi condotte dall' *arpav* è stato possibile notare che in alcuni casi il livello durante una piena non raggiungeva il suo valore massimo ma, sempre con una salita lineare di 24ore, si attestava su una quota di circa 5 metri sulla linea di talweg, tale livello viene poi mantenuto per un periodo di tempo di alcuni giorni.

L'analisi condotta quindi risulta simile alle prime analisi transitorie svolte ma in questo caso il minor livello di piena comporterà un tempo maggiore per andare ad imbibire l'argine e iniziare la filtrazione.

Si può constatare che anche dopo 24 ore la linea piezometrica, situata tra gli strati giallo-verde tende solo a sfiorare la base dell'alterazione ed i valori di flusso sono molto bassi dell'ordine di $3.2 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, al limite ancora trascurabili.

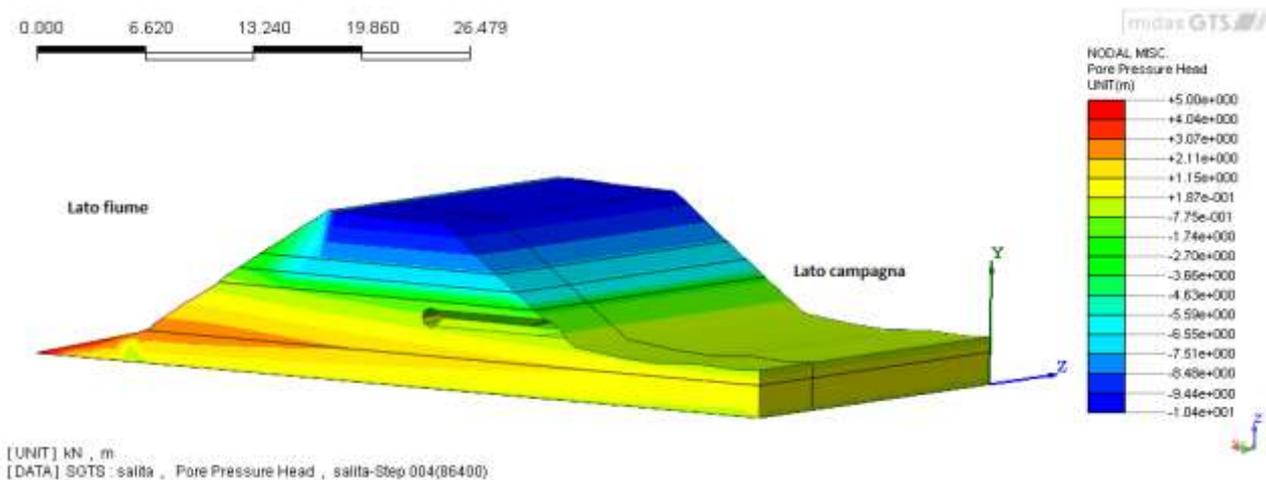


Figura 4.151:Argine sinistro sezione V dopo 24 ore

Solo dopo 3 giorni di piena costante si iniziano a notare i primi effetti, la filtrazione attraverso la tana ha inizio ed i gradienti crescono

Al quinto giorno i valori di flusso sono di circa $7.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ e il gradiente alla base della tana risulta essere pari a 0.834; di conseguenza i problemi di asportazione di materiale dal corpo arginale sono di entità molto limitata.

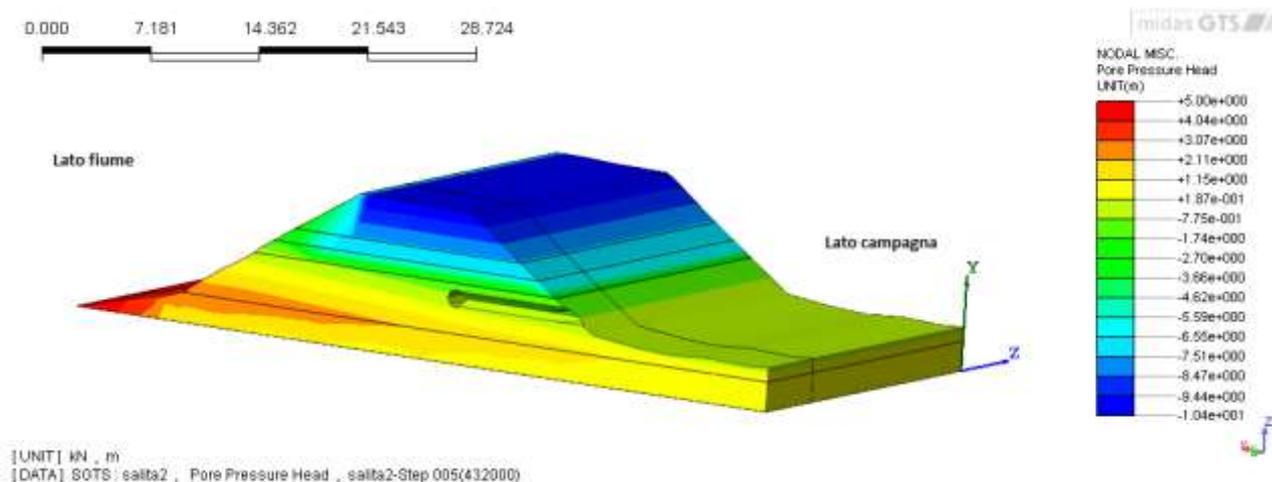


Figura 4.152:Argine sinistro sezione V dopo 5 giorni

4.2.2.4.4 Impermeabilizzazione lato fiume dello strato sede dell'alterazione

E' stata svolta un'ulteriore analisi poiché si è notato che la filtrazione avveniva principalmente nello strato dove risiede l'alterazione. L'idea è quella che se si riuscisse ad impedire, o ritardare, la filtrazione all'interno di tale strato i problemi a essa legati risulterebbero notevolmente inferiori.

E' da sottolineare che la stratigrafia iniziale non tiene conto del fatto che sul paramento lato fiume tenta a depositarsi uno strato di sedimenti poco permeabili dovuto alle successive piene del corso d'acqua e al deposito di materiali argillo - limosi in sospensione durante le fasi di piena.

Da questa ipotesi si è andata ad identificare la seguente stratigrafia:

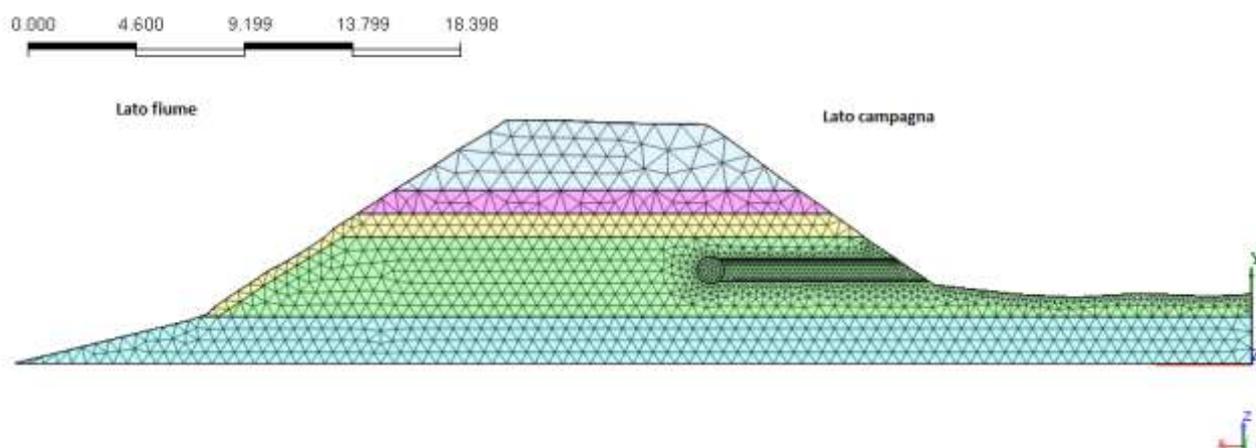


Figura 4.153: Mesh argine con nuova stratigrafia

Le caratteristiche, l'ordine degli strati e le tipologie dei materiali risultano essere le stesse della tabella - tab. 4.1 - ma con la differenza che il terzo strato, a partire dalla sommità arginale, costituito da materiali argillo - limosi ricopre il paramento lato fiume dello strato in cui risiede l'alterazione per uno spessore di circa 30 cm, questo per simulare il processo di sedimentazione di cui si parlava in precedenza.

Il sottile strato poco permeabile a protezione di quello sede dell'alterazione ha permesso quindi di svolgere una nuova analisi mantenendo le ipotesi e le condizioni di piena della - tab. 4.3 - ma con risultati nettamente diversi rispetto a quelli ottenuti in precedenza.

Di seguito vengono rappresentate le immagini più significative dell'analisi:

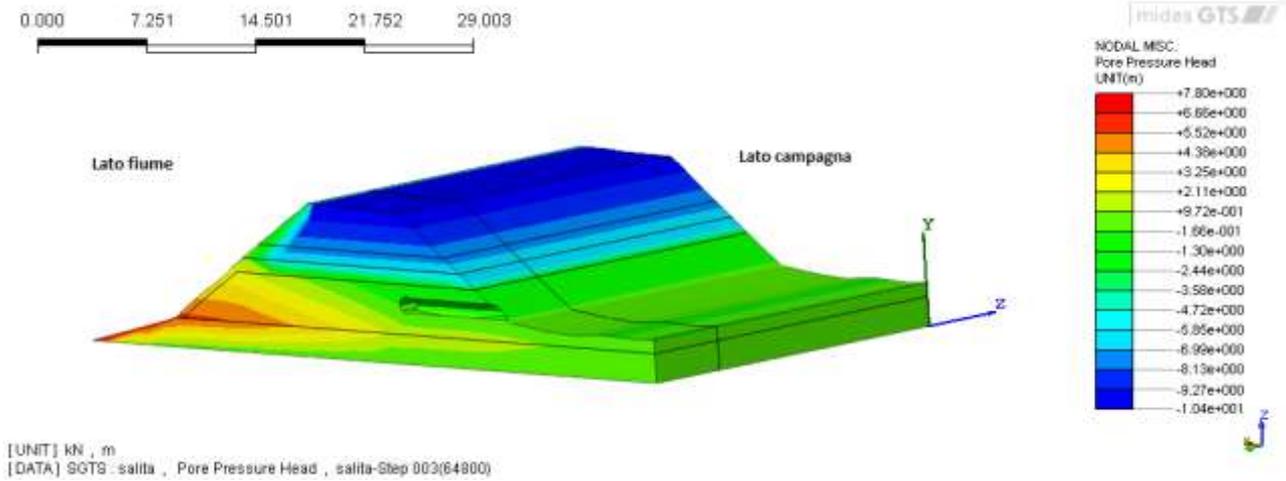


Figura 4.154:Argine sinistro sezione V dopo 18 ore

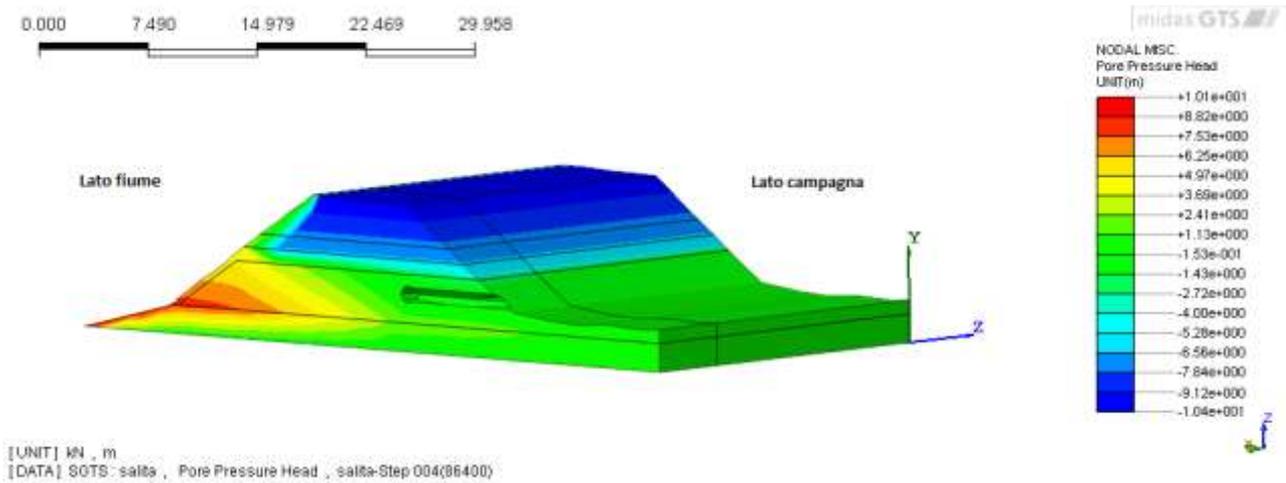


Figura 4.155:Argine sinistro sezione V dopo 24 ore

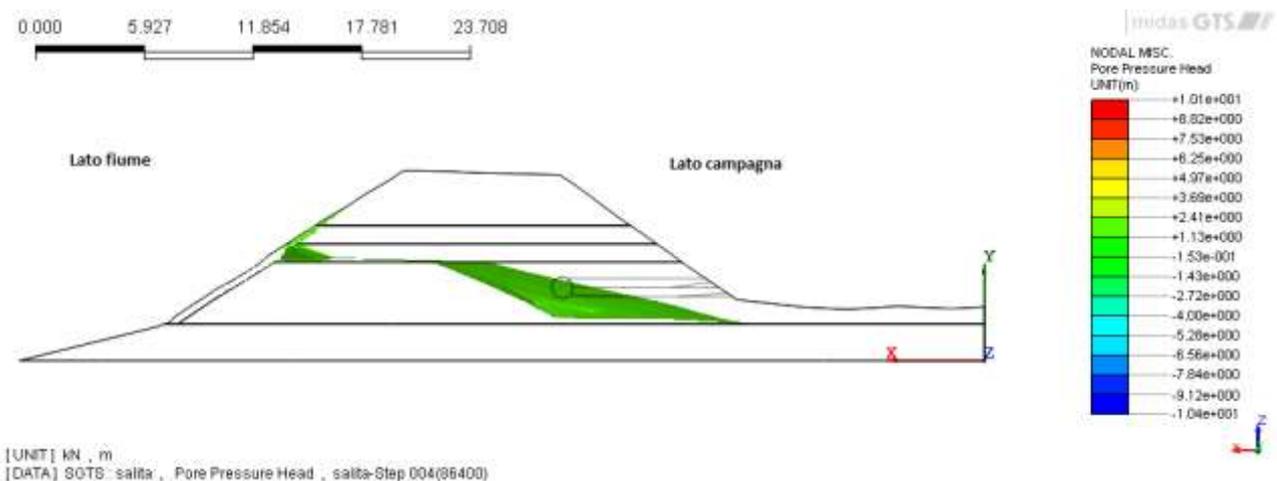


Figura 4.156:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 24 ore

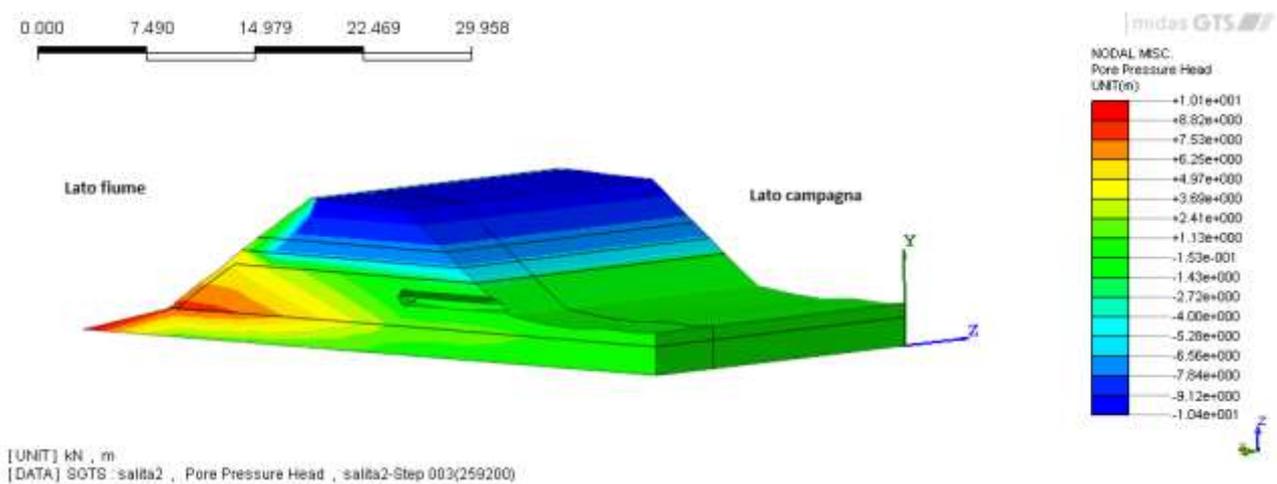


Figura 4.157: Argine sinistro sezione V dopo 3 giorni

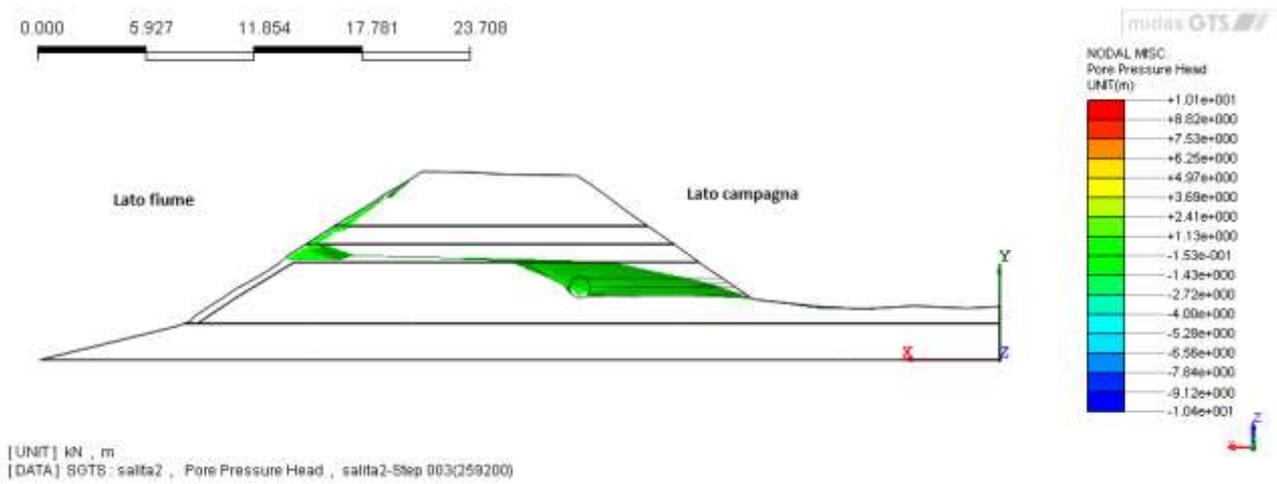


Figura 4.158:Argine sinistro sezione V linea piezometrica dopo 3 giorni

Si nota che l'argine non presenta problematiche degne di nota nemmeno dopo 24 ore di piena, infatti la linea piezometrica, pur risentendo della presenza della tana, tende a passarle sotto senza andare ad interferire con la stessa.

Le portate e il gradiente idraulico all'interno del corpo del rilevato risultano essere molto bassi, quasi trascurabili, fino al terzo giorno di piena quando la linea piezometrica arriva ad incontrare l'alterazione e ha inizio la filtrazione.

Dopo 3 giorni si hanno valori di portata pari a $6.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ed un valore del gradiente critico di 1.25, che seppur superiore all'unità risulta essere nettamente minore rispetto ai casi precedenti.

Bisogna ora verificare che in fase di scarico della piena, il paramento arginale lato fiume ed in particolare lo spessore di argilla posto a protezione dello strato sede dell'alterazione non subisca fenomeni di collasso durante le fasi di svaso; in particolare si andranno a controllare le pressioni che si generano alle spalle dello spessore di argilla andandole a confrontare con il peso dello strato stesso, si trascura l'eventuale resistenza dovuta alla coesione essendo lo strato di spessore limitato.

Dalle analisi condotte la piena poteva restare all'interno dell'argine fino a 3 giorni prima di iniziare la fuoriuscita d'acqua dalla tana; si è partito da questo valore ipotizzando quindi una piena di 3 giorni ed un successivo svaso in 24 ore.

Piena di 3 giorni e svaso in 24 ore	
Pressione generata dallo svaso (kN/m^2)	Resistenza offerta dallo strato argilloso (kN/m^2)
7,12	5,82

Tabella 4.4: Pressioni alle spalle dello strato argilloso

I dati che si ottengono mostrano come in questo caso la pressione alle spalle dello spessore d'argilla è eccessiva, superiore alla resistenza offerta dall'argilla stessa tramite il proprio peso, tale perciò da poter dar luogo ad una rottura dello strato ed a un l'eventuale cedimento del corpo arginale.

Questo perché nonostante lo svaso sia in atto la presenza d'acqua all'interno dell'argine, che dopo 3 giorni si trova in condizioni critiche, comporta un moto di filtrazione dall'interno dello stesso verso il lato del canale.

Si è quindi ipotizzato di adottare come punto di partenza una piena di 2 giorni ed un successivo svaso della durata di 24 ore; così facendo l'argine risulta ancora parzialmente lontano dalle condizioni critiche e la presenza d'acqua durante le fasi di svaso non da

luogo a condizioni critiche. Infatti come si nota dai dati sottostanti i valori di pressione alle spalle dello strato argilloso sono nettamente inferiori rispetto al caso precedente e non comportano problematiche di stabilità.

Piena di 2 giorni e svaso in 24 ore	
Pressione generata dallo svaso (kN/m ²)	Resistenza offerta dallo strato argilloso (kN/m ²)
3,48	5,82

Tabella 4.5: Pressioni alle spalle dello strato argilloso

I dati mostrano quindi che è consigliabile mantenere la piena per un periodo massimo di 48 ore all'interno dell'argine provvisto di uno strato argilloso a protezione delle alterazioni ed effettuare uno svaso della durata di 24 ore per evitare condizioni limite legate alle pressioni che si possano generare alle spalle dello spessore argilloso.

Si può concludere che la presenza del sottile strato impermeabile tende non solo a ritardare la filtrazione all'interno dell'ammasso arginale, ma a ridurre anche il valore in maniera non trascurabile, naturalmente la presenza di questo strato è da verificare e controllare in sito ma l'analisi può essere usata come base di partenza per una futura ipotesi di sistemazione del corpo arginale.

4.2.2.4.5 Variazione della permeabilità

In aggiunta a quanto precedentemente fatto, sono state condotte anche una serie di analisi dell'argine basandosi sulla stratigrafia iniziale, ma variando la permeabilità degli strati, raddoppiandola o dimezzandola, per poter tener conto dei possibili possibili variazioni naturali delle permeabilità dei terreni.

Naturalmente dato il piccolo range di cambiamento delle permeabilità i risultati ottenuti non sono stati poi significativamente differenti rispetto alle precedenti analisi, ma hanno dimostrato che ad una maggior permeabilità corrisponde un tempo di inizio fuoriuscita dell'acqua dalla tana di circa 12 ore, mentre al diminuire della permeabilità il momento in cui la linea piezometrica incontra la tana tende a spostarsi verso la 24esima ora.

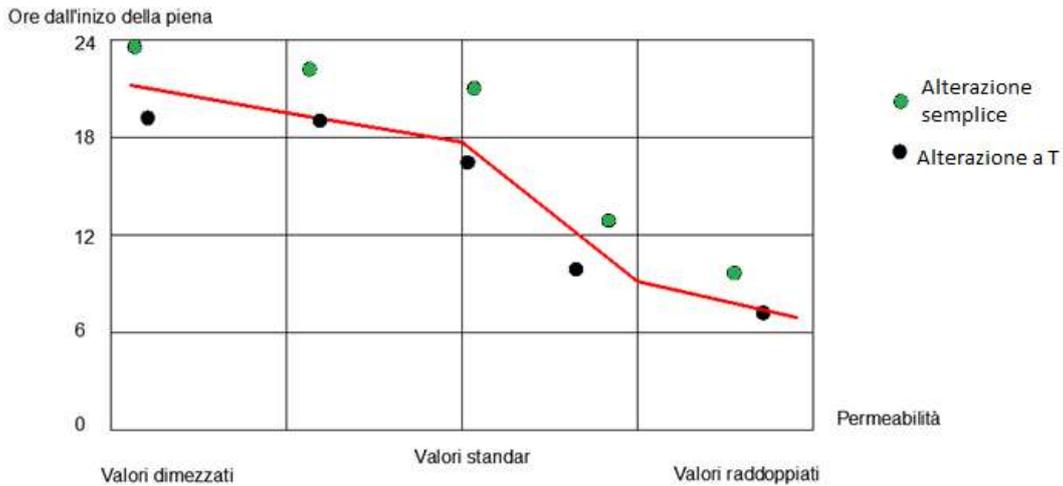


Grafico 4.3: Tempo prima dell'inizio della filtrazione in relazione alla permeabilità

Dal grafico infatti si nota tale andamento, i punti sono stati ottenuti andando a considerare prima l'alterazione semplice poi quella a T e le permeabilità sono state moltiplicate e divise per 1,5 e poi per 2.

4.2.2.5 Grafici riassuntivi

A chiusura del capitolo nel seguente paragrafo vengono rappresentati alcuni grafici riassuntivi delle analisi svolte precedentemente considerando le caratteristiche di permeabilità in tabella 4.1.

Si confrontano le tre situazioni di argine privo di alterazione, con alterazione semplice ed a T andando ad identificare nel grafico il punto d'inizio della filtrazione attraverso l'alterazione o il paramento lato campagna.

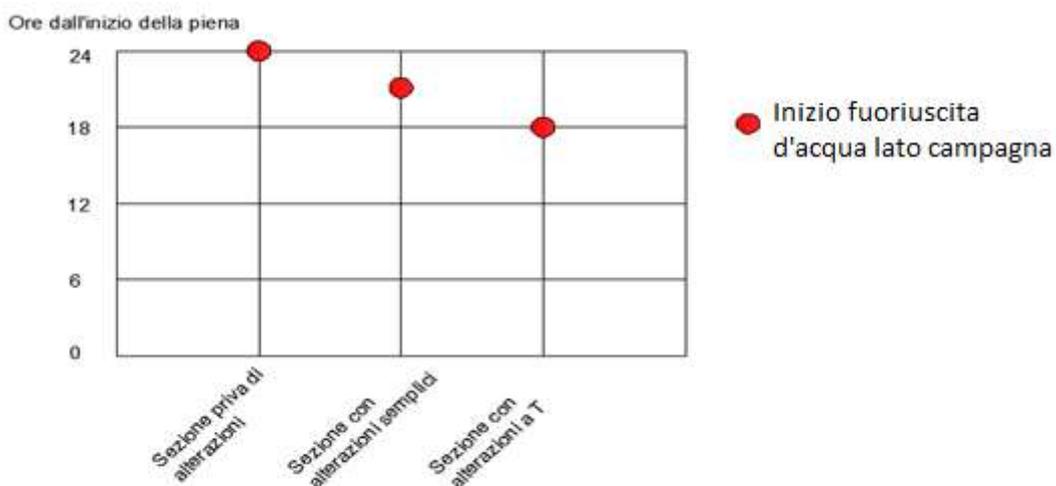


Grafico 4.4: Tempo prima dell'inizio della fuoriuscita d'acqua in relazione al tipo di alterazione

Come si nota dalle tre situazioni la più gravosa è quella dell'argine con alterazione a T che implica un inizio di flusso di filtrazione dalla tana già a partire dalla 18esima ora di piena, mentre nel caso di alterazione semplice tale fenomeno avviene circa dopo 20 ore di piena; l'argine completamente privo di alterazioni invece riesce a mantenere la linea piezometrica all'interno del suo corpo arginale per 24 ore prima di iniziare una fuoriuscita d'acqua dal paramento lato campagna.

Una volta identificata l'alterazione a T come la più gravosa si è deciso di far variare la distanza tra 2 tane andando a far sovrapporre le zone d'influenza delle stesse.

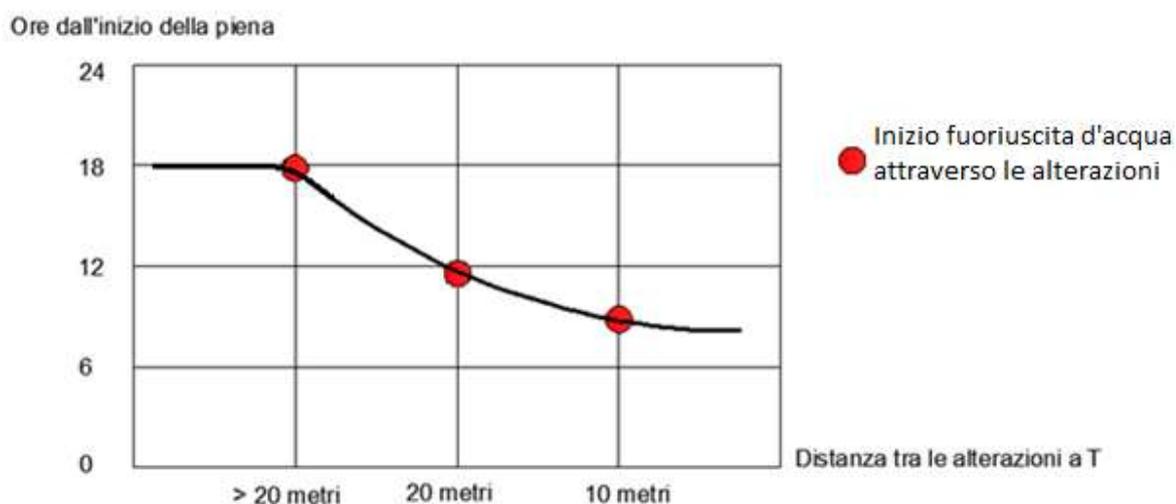


Grafico 4.5: Tempo prima dell'inizio della fuoriuscita d'acqua in relazione alla distanza tra due alterazioni

Come si nota se le tane distano tra loro più di 20 metri l'influenza reciproca è pressoché nulla, ed il tempo richiesto dalla linea piezometrica per raggiungere l'alterazione è di 18 ore.

Avvicinando l'imbocco delle tane a 20 metri le zone d'influenza tendono a combaciare tra loro e l'effetto reciproco comporta un inizio di filtrazione nelle tane già alla 12esima ora di piena; una vicinanza ulteriore dell'imbocco delle tane porta ad avere già dopo sole 8-10 ore di piena una fuoriuscita d'acqua dalla tana e le conseguente asportazione di materiale dal corpo arginale con le successive problematiche di stabilità.

Raramente due tane tendono a trovarsi ad una distanza inferiore ai 20 metri tra loro, ma è sempre bene andare a controllare lo stato dell'argine e la creazione di nuove tane adiacenti ad altre eventualmente abbandonate dai proprietari, poiché ciò potrebbe

comportare il raggiungimento di condizioni critiche per la stabilità del paramento arginale durante le fasi di piena del corso d'acqua.

4.2.2.6 Variazioni del grado di saturazione dell' argine

Si presenta ora una variazione alle analisi precedentemente svolte.

Considerando sempre l'argine sinistro con alterazione a T si è fatto variare il valore di saturazione dei terreni costituenti l'argine.

Nelle analisi precedenti il contenuto d'acqua era di 0.5, superiore ad ogni valore delle curve SWCC come visibile in - *tabella 4.2-* , lo si è ridotto fino al valore di 0.1 andando quindi a simulare un argine in condizioni di parziale saturazione via via più accentuata.

Questo perché le caratteristiche di saturazione del corpo arginale possono essere molto varie e la sua risposta ad una piena dipende anche da esse, infatti in un argine con grado di saturazione più elevato la linea piezometrica impiegherà meno tempo a raggiungere l'alterazione ed ad innescare la fuoriuscita d'acqua dal paramento lato campagna poiché non c'è bisogno di andare a saturare prima il terreno; viceversa in un argine parzialmente saturo l'acqua dovrà andare prima a riempire i vuoti del terreno e poi avrà la possibilità di avanzare all'interno del corpo arginale, impiegando quindi più tempo a raggiungere l'alterazione.

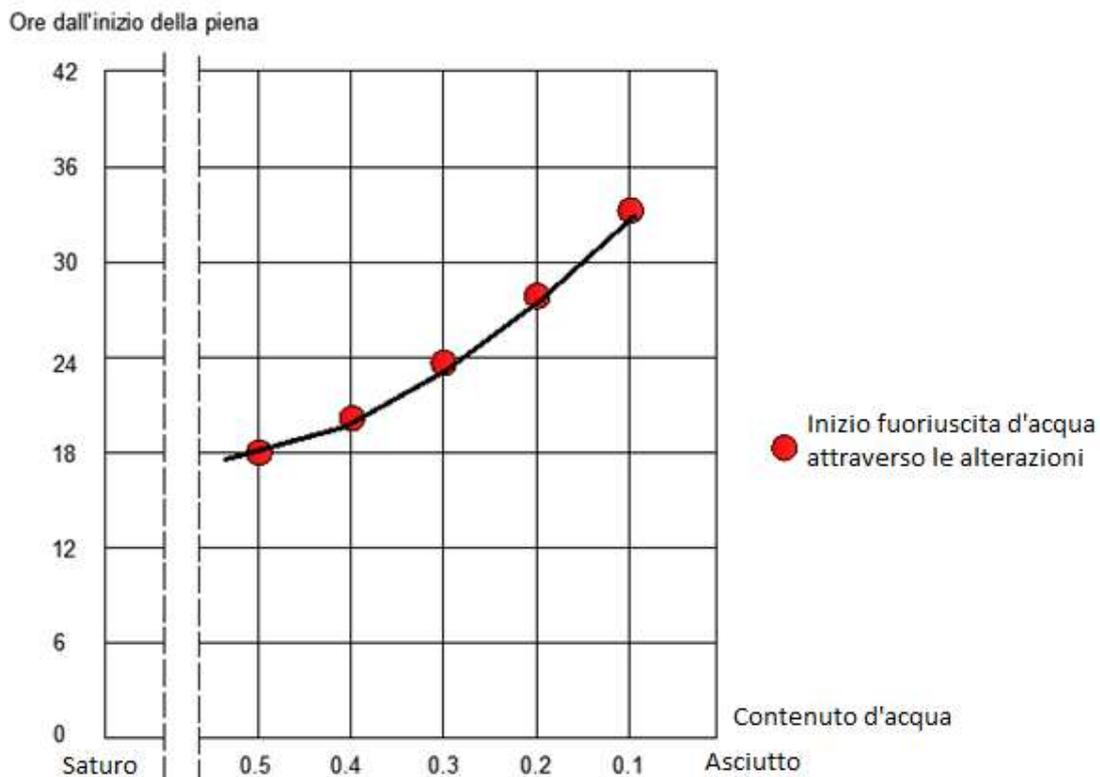


Grafico4.6: Tempo prima dell'inizio della fuoriuscita dell'acqua in relazione alla saturazione (tane a T)

Come si nota dal grafico la condizione di saturazione corrispondente al valore di 0.5 del contenuto d'acqua è la condizione utilizzata nelle precedenti analisi, la linea piezometrica raggiunge la tana dopo circa 18 ore di piena. Questo è la situazione più gravosa e quindi è stata presa in esame come caso maggiormente rappresentativo.

Andando a ridurre il grado di saturazione il tempo richiesto dalla linea piezometrica a raggiungere la tana aumenta notevolmente fino quasi raddoppiare e superare le 30 ore dall'inizio della piena.

Il grado di saturazione del copro arginale durante le fasi di una piena è influenzato dalle condizioni metrologiche dei giorni precedenti, infatti un forte periodo piovoso precedente ad una piena andrà introdurrà un elevato grado di saturazione del corpo arginale conseguentemente le condizioni critiche si raggiungeranno in tempi pari a circa 18 ore, come determinato nei paragrafi precedenti, viceversa se la piena si presenta dopo un periodo poco piovoso l'argine risulterà tendenzialmente più asciutto ed il tempo necessario perché la piezometrica raggiunga la tana sarà superiore.

Naturalmente non potendo conoscere lo stato generale dell'argine nei vari periodi dell'anno l'ipotesi delle 18 ore come valore limite resta quella che permette di aver maggior margine di sicurezza evitando eventuali condizioni limite impreviste.

5.0 Conclusioni

Dalle analisi svolte nel capitolo precedente si sono ottenuti i seguenti risultati:

- In condizioni stazionarie l'argine soggetto alla piena non presenta un livello di sicurezza accettabile, mentre per il livello di riposo (livello mantenuto nel fiume per la maggior parte dell'anno e quindi reale condizione stazionaria) non si riscontrano evidenti condizioni critiche.
- In condizioni transitorie l'argine privo di alterazioni riesce a mantenere la linea piezometrica all'interno del corpo arginale per 24 ore, oltre tale periodo la linea piezometrica raggiunge il paramento esterno.
- In presenza di alterazioni del tipo semplice l'argine riesce a mantenere un livello di sicurezza e portate di filtrazione entro quantità contenute solo per un periodo di circa 20-22 ore, la zona dell'argine influenzata dalla tana è di circa 3 metri disposti simmetricamente a destra e sinistra della stessa.
- In presenza di alterazioni del tipo a T l'argine in condizioni transitorie può presentare condizioni critiche già a partire dalla 18esima ora di piena con valori dei flussi di filtrazione e gradienti idraulici maggiori rispetto al caso precedente; il tratto di argine soggetto all'influenza della tana è di circa 20 metri disposti simmetricamente a destra e sinistra della tana.
- Nel caso in cui le alterazioni a T risultino molto vicine e le loro zone d'influenza vadano a sovrapporsi, gli effetti della filtrazione nell'argine sarebbero aggravati e anticipati nel tempo, con il verificarsi di condizioni critiche anche dopo sole 12 ore dall'inizio della piena.
- Una diversa situazione stratigrafica con uno strato impermeabile posto a protezione dello strato sede dell'alterazione può aiutare a ritardare nel tempo le condizioni critiche legate alla filtrazione.
- Una piccola variazione di permeabilità sposta nel tempo il momento di inizio della fuoriuscita d'acqua, che comunque è mantenuto in un periodo compreso tra le 12 e le 24 ore dopo l'inizio della piena.

Dai risultati ottenuti si può quindi concludere che:

- Le alterazioni del tipo a T risultano essere maggiormente problematiche per la sicurezza dell'argine poiché presenta valori maggiori del flusso di filtrazione e sono anticipati nel tempo rispetto al caso di alterazione semplice; inoltre la loro zona d'influenza è molto estesa ed una serie di tane disposte ad intervalli regolari e vicine tra loro possono aggravare le problematiche ad esse legate.
- Vista la presenza delle alterazioni nell'argine si suggerisce di provvedere alla sua messa in sicurezza tramite uno dei metodi tipicamente adottati:
 - o Riempimento delle tane con malte cementizie;
 - o Impermeabilizzazione dell'argine tramite diaframature;
 - o Impermeabilizzazione del paramento lato fiume, lasciando intatte le tane e salvi i suoi abitanti;

La tecnica dell'impermeabilizzazione dell'argine lato fiume, senza andare a cacciare gli animali dal loro habitat, risulta essere la soluzione più facilmente accettata dalla popolazione; non è una soluzione eccessivamente costosa, se rapportata alla diaframatura, lascia in vita le specie animali che comunque sono autoctone del nostro territorio e permette di mettere in sicurezza l'argine per un periodo di almeno 2 giorni di piena.

E' da sottolineare, inoltre, che l'accuratezza della modellazione tridimensionale e le successive analisi dipendono fortemente dal numero di prove, campioni e dati a disposizione in merito alle caratteristiche dei terreni, della forma dell'argine e delle alterazioni stesse; pertanto, per studi approfonditi ed accurati risulta sempre necessaria l'esecuzione di un elevato numero di prove in sito ed esperimenti di laboratorio in grado di fornire un preciso dettaglio delle caratteristiche dei terreni e di tutti gli aspetti oggetti di studio. Si segnala quindi che i risultati ottenuti sono solamente indicativi in quanto nelle analisi molti dei valori adottati sono solamente stime delle caratteristiche meccaniche dei terreni costituenti il corpo arginale e gli andamenti dei livelli di piena hanno un carattere di eccezionalità.

Bibliografia

- Adani Attilio – Criteri generali di progetto di un argine – Istituto di Idraulica “G.Poleni
- Ali R. Estabragh¹ and Akbar A. Javadi: Shear Strength Behaviour of Unsaturated Silty Soil;
- Bixio V., Fanton P., Fiume A. & Manfredini L. – La sicurezza idraulica nei comprensori di Bonifica del fiume Po – Conferenza Internazionale di Acqua, Bonifica e Salvaguardia del Territorio, Mantova, 27-29 Maggio 2003;
- CLVR (2011): Informational Circular No. 2: Summary of California Levee Vegetation Research;
- Costa G. and di Prisco C. , On Slope Instability induced by seepage erosion – Canadian Journal Geotechnical, vol. 36;
- Da Deppo, Datei, Salandin (2000) , Sistemazione dei Corsi d’Acqua , Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima e Geotecnica, Edizioni Libreria Cortina Padova;
- Delage P. (2002): Experimental unsaturated soil mechanics;
- FEMA 473 (2005): Technical Manual for Dam Owners – Impacts of animals on earthen dams;
- Guan G. S., Rahardjo H., Choon L. E. (2010): Shear Strength Equations for Unsaturated Soil under drying and wetting;
- Harder L. F. Jr., Kroll R., Claassen V., Buck P. E. F., Berry A. M. (2010): Investigation of Tree Root Penetration into a Levee Soil-Cement-Bentonite Slurry Cutoff Wall;
- Haselsteiner R., Werth K., Heerten G., (2010): Application of geosynthetics for overtopping loads at flood protection dikes;
- Haselsteiner R.: Woody Vegetation on small embankment dams
- J. Facciorusso, C. Madiari, G. Vannucchi – Dispense di Geotecnica Università di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione Geotecnica;
- Lane E.W, Security from Underseepage: Masonary Dams on Earth Foundations ;
- Maleki M., Bayat M. (2012): Experimental evaluation of mechanical behavior of unsaturated silty sand under constant water content condition;
- Montuori, Complementi di idraulica , 1997;
- Nam S., Gutierrez M. (2009): Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils;

- Oka F., Kodaka T. (2010): Experimental study of the behaviour of unsaturated compacted silt under triaxial compression;
- Rimmington J. M. (2004): Managing Earthwork Monuments – Section C / Management Issues;
- Rosa Stefano: Tesi di laurea magistrale Università di Padova “ Analisi degli effetti delle alterazioni dei corpi arginali sui moti di filtrazione” 2012/2013.
- Song Y. S., Hwang W. K., (2012): A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions;
- Supino Giulio , Le reti idrauliche , Patron Ed. Bologna, 1965
- Terzaghi K., Peck R.B. , Soil Mechanics in engineering practice , John Wiley and Sons, 1967;
- Tomlinson S.S. and Vaid Y.P. , Seepage forces and Confining Pressure effects on piping erosion , Canadian Geotechnical Journal, 2000;
- US Army, US Navy and US Air Force (1971) “Dewatering and Groundwater Control for Deep Excavation”;
- US Bureau of Reclamation (1987) “Design Standards No. 13, “Embankment dams”;
- Van Zyl, D.J. and Harr, M.E. , Seepage Erosion Analysis of Structures , Proc. 10^o International Conference On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. I
- Zielinski M., Sanchez M., Romero E. (2011): Assessment of water retention behaviour in compacted fills