



UNIVERSITA' DI PISA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA IDRAULICA, DEI
TRASPORTI E DEL TERRITORIO

Tesi di Laurea Specialistica

ANALISI DI STABILITA' DEGLI ARGINI DEL FIUME

SERCHIO NELLA PROVINCIA DI PISA

RELATORI

Prof. Ing. Diego Lo Presti

Dott. Ing. Nunziante Squeglia

CANDIDATO

Filippo Fochi

12 DICEMBRE 2011

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

Sommario

0. Sommario	2
1. Premessa	5
2. Fenomeni di collasso	7
2.1. Generalità sulle arginature.....	8
2.2. Cause di dissesto arginale	10
2.2.1. Sormonto.....	10
2.2.2. Sifonamento	12
2.2.3. Piping.....	18
2.2.4. Franamento	20
3. Il caso di studio.....	24
3.1. Il fiume Serchio.....	25
3.2. L'evento.....	30
3.3. Le cause	33
3.4. Interventi di urgenza	34
3.5. Piano d'indagine.....	36
4. Indagini in situ	37
4.1. Ubicazione delle indagini	38
4.2. Sondaggi	38
4.3. Profondità della falda.....	40
4.4. Prove di permeabilità Lefranc	40
4.5. Prove penetrometriche statiche CPTu	42
4.5.1. Restituzione del profilo stratigrafico.....	46
4.5.2. Calcolo dei parametri di resistenza	53
4.6. Prove geoelettriche.....	55
5. Analisi di laboratorio	57
5.1. Distribuzione granulometrica.....	58
5.2. Prova triassiale	62
5.3. Massa volumica.....	66
6. Analisi di stabilità	68
6.1. Scelta delle sezioni da indagare	69
6.2. Rilievo delle sezioni	69
6.3. Parametri.....	69
6.4. Metodi di analisi.....	70
6.5. Analisi idrodinamica.....	70
6.6. Analisi di stabilità	71

7.	Risultati.....	72
7.1.	Sezione L4.....	73
7.1.1.	Sezione L4 – problema idrostatico	74
7.1.2.	Sezione L4 – filtrazione stazionaria	74
7.2.	Sezione L27.....	76
7.2.1.	Sezione L27 – problema idrostatico	77
7.2.2.	Sezione L27 – filtrazione stazionaria	77
7.3.	Sezione L32.....	79
7.3.1.	Sezione L32 – problema idrostatico	80
7.3.2.	Sezione L32 – filtrazione stazionaria	80
7.4.	Sezione L48.....	82
7.4.1.	Sezione L48 – problema idrostatico	83
7.4.2.	Sezione L48 – filtrazione stazionaria	83
7.5.	Sezione L51.....	85
7.5.1.	Sezione L51 – problema idrostatico	86
7.5.2.	Sezione L51 – filtrazione stazionaria	86
7.6.	Sezione L57.....	88
7.6.1.	Sezione L57 – problema idrostatico	89
7.6.2.	Sezione L57 – filtrazione stazionaria	90
7.7.	Fattori di sicurezza - resoconto	91
8.	Conclusioni	93
9.	Ringraziamenti	96
10.	Bibliografia	99

1. Premessa

La mattina del 25 dicembre 2009 l'eccessivo flusso idrico nell'alveo del fiume Serchio ha provocato il cedimento dell'argine destro del fiume nelle frazioni di Santa Maria a Colle (comune di Lucca) e di Nodica (comune di Vecchiano, PI) causando una grave alluvione nei territori circostanti.

A seguito di tale evento sono state programmate delle indagini conoscitive sullo stato di fatto degli argini e del loro terreno di sedime, al fine di operare delle analisi di stabilità degli stessi e individuare eventuali aree d'intervento. Oggetto di queste indagini è la zona che va da San Quirico di Moriano (nella provincia di Lucca), sino alla foce nel parco di San Rossore.

La presente tesi si prefigge l'obiettivo di creare un modello geotecnico dei rilevati arginali del fiume Serchio e di eseguirne le analisi di stabilità, nel tratto compreso entro i confini della Provincia di Pisa.

2. Fenomeni di collasso

2.1. Generalità sulle arginature

L'argine è un'opera di difesa passiva del territorio, atta a impedire lo straripamento dei corsi d'acqua. Esso è generalmente costituito da un rilevato impermeabile in terra, che può raggiungere altezze anche considerevoli.

Le arginature sono simili a piccole dighe in terra, ma differiscono da esse per i seguenti aspetti importanti:

- un argine può saturarsi oltre il limite di saturazione capillare solo per un breve periodo di tempo;
- l'adeguamento degli argini è dettato principalmente da esigenze di protezione dalle inondazioni:
 - costruzione su fondamenta povere e non sempre idonee;
- il materiale usato per realizzare l'argine è prelevato da pozzi o da canali scavati in zone adiacenti all'opera:
 - materiale eterogeneo e spesso lontano dalle condizioni ideali.



Figura 1. Argine di notevole altezza sul fiume Po

2. Fenomeni di collasso

Gli argini possono essere disposti **in froldo**, ossia al limite dell'alveo ordinario (o alveo inciso), oppure a una certa distanza da questo. In questo secondo caso la fascia di terreno compresa tra l'alveo ordinario e l'argine prende il nome di golena.

Si ricorre all'argine in froldo in mancanza di spazio o quando l'area da difendere ha un valore troppo elevato per essere sacrificata, destinandola a golena. Questa disposizione limita drasticamente l'espansione laterale del fiume, con un conseguente forte innalzamento dei livelli di piena, di cui risente per rigurgito anche la corrente a monte. Inoltre, poiché nell'alveo ordinario la corrente è molto più profonda e la scabrezza minore che in golena, un argine in froldo è soggetto ad azioni erosive molto più sensibili rispetto al caso di argine con golena.



Figura 2. Argine in froldo della Fossa Pagana in Veneto

Le arginature sottraggono al fiume aree di espansione nei fenomeni di piena, riducendo così la capacità di laminazione. La conseguenza è un aumento delle portate a valle.

2.2. Cause di dissesto arginale

2.2.1. Sormonto

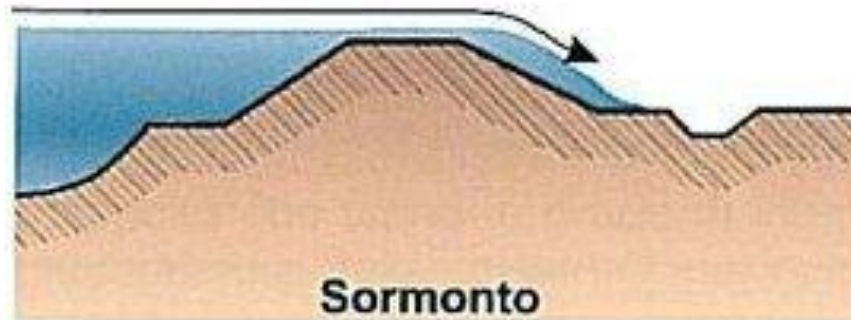


Figura 3. Fenomeno del sormonto.

Il sormonto è il superamento della difesa spondale da parte delle acque fluviali. Può essere dovuto a diverse cause, tra cui

- superamento della portata di progetto;
- errori di progettazione:
 - sottovalutazione della scabrezza dell'alveo;
- modifica della geometria delle sezioni:
 - abbassamento della sommità arginale;
 - assestamento del rilevato;
 - subsidenza del terreno.

In molti casi si può riuscire a impedire il sormonto con un intervento tempestivo. Quando, nel corso di una piena si teme la tracimazione, si può predisporre un rialzo provvisorio degli argini mediante sacchetti di sabbia, ricalzati con terra dal lato campagna. Nel caso di un tratto fluviale munito di muri di sponda anziché di argini, il rialzamento si può realizzare montando delle paratoie metalliche sulla sommità del muro.

La prima e immediata conseguenza del sormonto di un argine da parte dell'onda di piena è la sua rottura per erosione della base. Infatti, durante la piena il livello liquido

s'innalza sino a superare la sommità arginale, per poi ricadere dal lato del piano di campagna come piccole cascate, le quali ingrossano con l'innalzamento dell'onda di piena. Cadendo lungo l'argine, l'acqua acquista velocità e, arrivando ai piedi dell'argine stesso, ha forza sufficiente per eroderne la base.

Questo fenomeno è più rapido quando l'argine non è protetto da un manto erboso adeguato.

Conseguenza dell'erosione della base dell'argine è il suo sfondamento verso il lato di campagna, a causa della pressione dell'onda di piena dal lato golena. La successiva apertura di una breccia provoca la rapida erosione di un ampio tratto arginale e la conseguente inondazione di ampie aree.

È fondamentale assicurare anche in caso di sormonto la sopravvivenza dell'argine, per contenere i danni arrecati nell'immediato (minore volume esondato e minore potenza della corrente) e per avere nuovamente un argine efficiente dopo il passaggio della piena.

Per ottenere questo risultato, gli argini vengono fatti in terra stabilizzata a calce o cemento, in modo da risultare maggiormente legati. Inoltre viene inserito un rivestimento delle scarpate dal lato campagna, per evitare che l'acqua ruscellante asporti materiale d'argine.

Nel caso la rimozione del paramento lato campagna sia inevitabile, per evitare anche in tale situazione il collasso dell'opera, si può inserire un diaframma o un palancoato, con la funzione di opera di sostegno per la parte di argine rimanente.

2.2.2. Sifonamento

La presenza, in occasione di eventi di piena, di un eccesso di pressione neutra nel terreno di fondazione, al piede dell'argine o nelle zone a campagna, può dare luogo al pericoloso fenomeno del sifonamento, con perdita d'equilibrio del materiale costituente il rilevato. Questo fenomeno avviene principalmente in terreni di fondazione formati da strati di materiali incoerenti permeabili.

Il sifonamento si manifesta come una risalita verticale dell'acqua in un suolo che non è in grado di opporsi a tale spinta, che si verifica sulle opere di materiale sciolto (o fondate su materiale sciolto), quando un forte dislivello idrico tra monte e valle innesca un moto di filtrazione.

Il sifonamento può essere talmente rapido, da far passare soltanto frazioni di ora tra il manifestarsi dei primi sintomi e il completo collasso delle strutture.

Per meglio comprendere il problema, analizziamo i fenomeni di filtrazione nei mezzi porosi.

Solitamente lo spostamento dell'acqua in un terreno ha velocità così basse che i termini cinetici dell'energia posseduta dal fluido sono trascurabili e l'energia coincide con la quota piezometrica:

$$E = h + \frac{p}{\gamma}$$

Si parla di moto di filtrazione quando, invece, vi è un gradiente piezometrico nella direzione del moto. La velocità di filtrazione corrisponde alla velocità apparente (cioè la velocità media in una sezione generica), che è inferiore a quella effettiva attraverso ogni singolo canale interstiziale di cui è costituito il terreno.

Considerando il gradiente idraulico uniformemente distribuito e il regime di moto laminare, rientriamo nelle ipotesi della legge di Darcy:

$$i = \frac{v}{k}$$

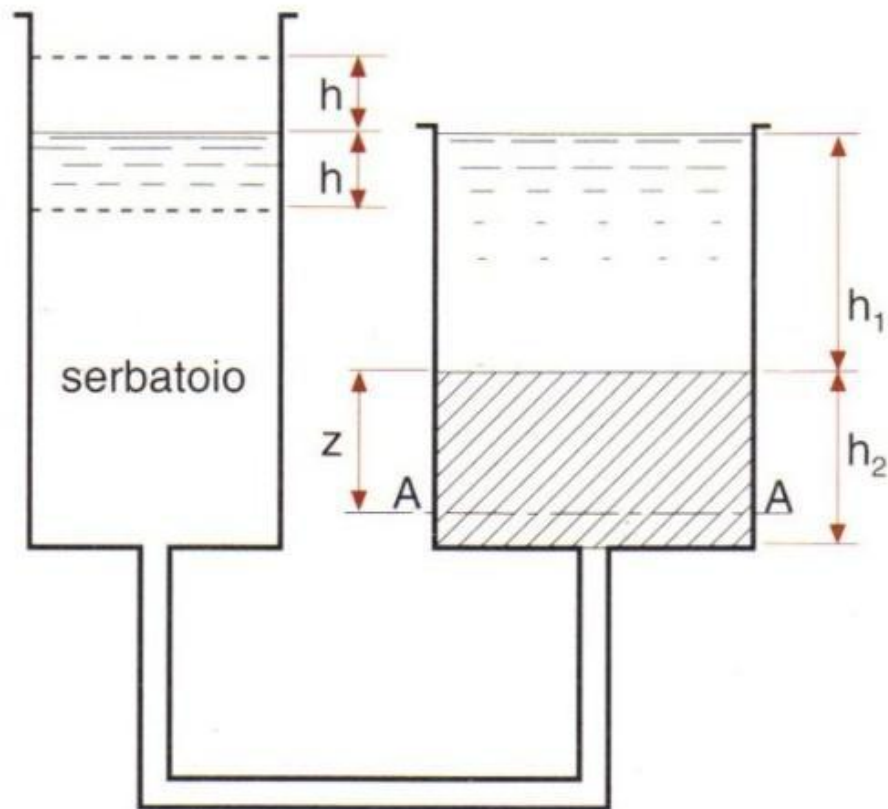


Figura 4. Schema di filtrazione

Ipotizziamo di avere un livello in acqua h_1+h_2 e un terreno di altezza h_2 saturo con permeabilità k , come mostrato in figura.

La tensione totale a fondo recipiente è data dalla somma della pressione neutra u e dalla tensione efficace σ' :

$$\sigma = \sigma' + u$$

La pressione dell'acqua nei pori sul profilo AA vale:

$$u = (h_1 + z)\gamma_w$$

Con gradienti idraulici nulli, la pressione effettiva sul profilo AA è data dal valore idrostatico:

$$\sigma' = z\gamma' \quad [Pa]$$

Instauriamo ora all'intero del campione di terreno un certo gradiente idraulico, abbassando di h il livello dell'acqua: nasce così un moto di filtrazione attraverso il terreno.

2. Fenomeni di collasso

La perdita di carico avviene completamente nel materiale granulare e la pressione neutra varia di una quantità proporzionale all'altezza del carico idraulico instaurato. Poiché la tensione totale deve rimanere la stessa, la tensione efficace aumenta.

Il flusso dell'acqua attraverso i vuoti incrementa la tensione efficace di una quantità chiamata pressione di filtrazione. La nuova pressione efficace è:

$$\sigma' = z\gamma' + iz\gamma_w$$

Il secondo termine della somma rappresenta la pressione di filtrazione.

Se, al contrario dall'esempio proposto, si aumentasse il carico idraulico di un valore pari a h , la tensione efficace tenderebbe a diminuire, a causa del valore negativo della pressione di filtrazione, fino al sopraggiungere di un valore nullo. In tale situazione, il terreno perde consistenza e le sue particelle vengono trasportate via dal flusso idrico.

L'annullamento della tensione efficace avviene quando si raggiunge il gradiente idraulico critico, dato dalla relazione:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

All'aumentare del carico idraulico, la pressione di filtrazione aumenta e, di conseguenza, aumenta l'effetto instabilizzante. Infatti, la pressione efficace diminuisce, rendendo le particelle di terreno trasportabili con più facilità.

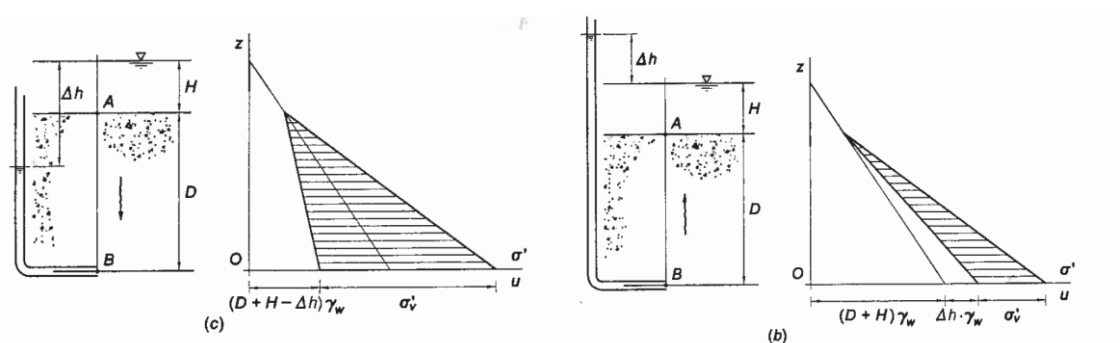


Figura 5. Andamento della pressione neutra e delle tensioni efficaci.

Possiamo adesso complicare il modello, considerando il flusso non più come monodimensionale, ma bidimensionale su un piano.

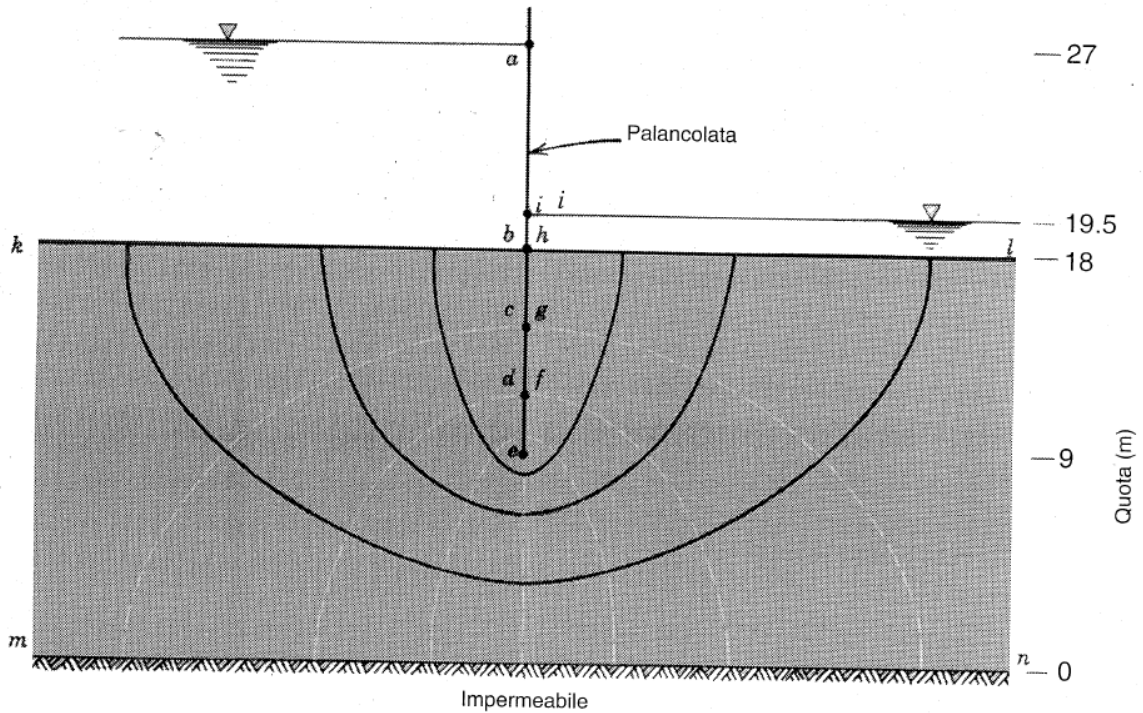


Figura 6. Moto di filtrazione piano

La risoluzione del problema muove dallo studio delle equazioni di Laplace, che rappresentano le curve equipotenziali, ossia le curve a ugual carico, tramite l'equazione differenziale:

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

Dividendo il corpo filtrante in maglie quadrate e procedendo con una risoluzione alle differenze finite, il carico idraulico in ogni nodo è dato dall'equazione

$$h_{i-1,j} + h_{i,j-1} + h_{i+1,j} + h_{i,j+1} - 4h_{i,j} = 0$$

Tenendo conto delle opportune condizioni al contorno, date da eventuali strati impermeabili, si ottengono tante equazioni quanti sono i carichi incogniti, in maniera tale da costituire un sistema lineare di facile risoluzione.

2. Fenomeni di collasso

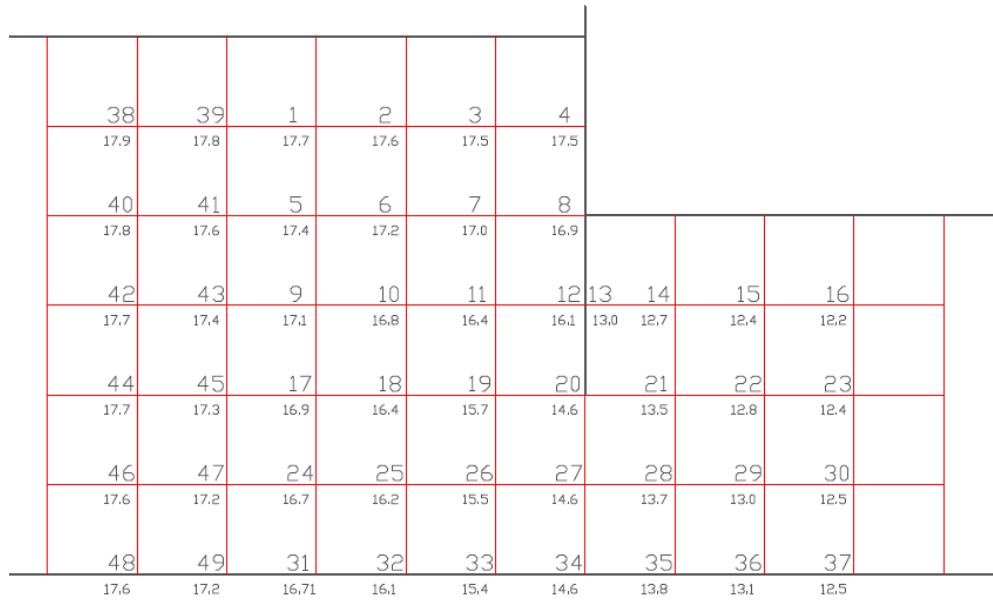
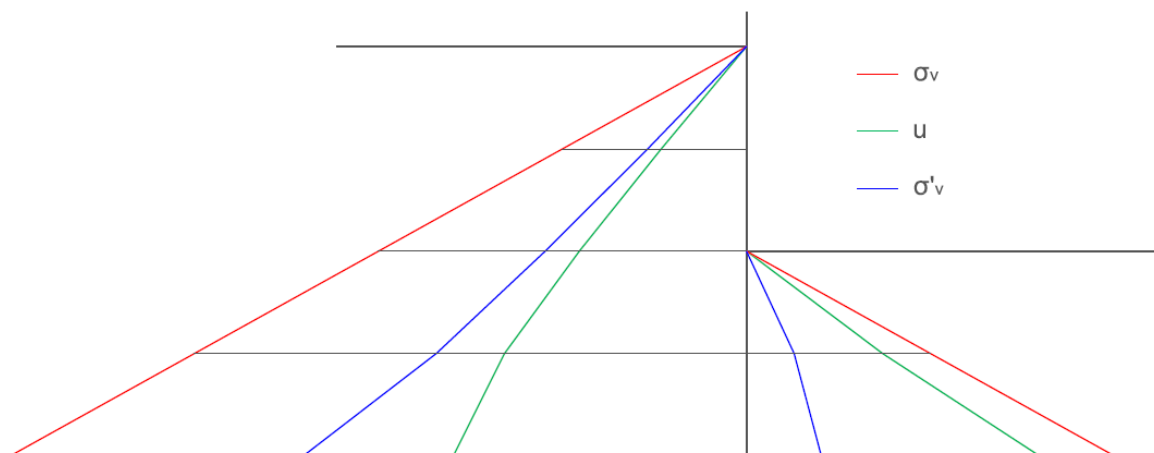


Figura 7. Suddivisione dell'ammasso filtrante in maglie quadrate.

Uno studio di questo tipo conduce a ottenere pressioni neutre che crescono in maniera non lineare, poiché la velocità di filtrazione non è uguale ovunque a causa delle diverse sezioni filtranti nel reticolo. In particolare, nel tratto di flusso in discesa, le pressioni interstiziali sono meno che lineari, mentre nel tratto a flusso ascensionale, esse sono più che lineari. Questo comporta una riduzione del gradiente critico e, quindi, una maggiore facilità nell'instaurazione del sifonamento.



La normativa italiana (NTC 2008, §6.2.3.2.) prevede una verifica al sifonamento, data dalla disuguaglianza

$$u_{inst,d} \leq \sigma_{stb,d}$$

dove

- $u_{inst,d}$: pressione interstiziale di progetto;
- $\sigma_{stb,d}$: tensione totale di progetto.

Tenendo conto dei coefficienti correttivi proposti per ottenere i valori di progetto, la verifica diventa

$$1.3 u \leq \sigma_{v0}$$

Le proprietà fisiche e granulometriche della formazione giocano un ruolo fondamentale nel fenomeno, il quale richiede il raggiungimento della stazionarietà:

- nelle ghiaie le sovrappressioni hanno la libertà di sfogarsi, in quanto l'acqua non è ostacolata, grazie all'elevata permeabilità;
- nelle argille la stazionarietà viene raggiunta in tempi enormi, non compatibili con le durate delle onde di piena nei corsi d'acqua;
- le sabbie presentano le caratteristiche ideali per l'instaurazione di questo fenomeno. È così che il sifonamento si verifica quasi esclusivamente nelle formazioni sabbiose.

Per verificare la stabilità al sifonamento occorre quindi conoscere contemporaneamente le caratteristiche del materiale e l'andamento delle linee di flusso e della cadente piezometrica lungo il percorso del moto di filtrazione. Se le caratteristiche del materiale sono note, l'andamento della piezometrica può essere ricavato risolvendo il problema del moto e tracciando il reticolo idrodinamico.

Solitamente il materiale è disomogeneo e le sue caratteristiche sono note soltanto come valori medi: il sifonamento può iniziare allora in corrispondenza di situazioni singolari non previste. Per questo motivo è sempre opportuno mantenere considerevoli margini di sicurezza.

2. Fenomeni di collasso

Se il materiale non è omogeneo o la sezione del deflusso varia lungo il percorso, come generalmente accade, il sifonamento può innescarsi:

- sulla superficie dello strato, quando la pendenza piezometrica vi supera il valore critico
- in uno strato più profondo, con un sollevamento in blocco di tutto lo strato sovrastante, quando si hanno forti cadenti piezometriche in profondità

Per prevenire o limitare il pericolo di sifonamento, s'interviene sul moto di filtrazione, con la costruzione di setti verticali impermeabili (palancolati o diaframmi), o con la creazione di dreni al piede dal lato campagna.

2.2.3. Piping

Il piping è un fenomeno dinamico di erosione del rilevato arginale, che si sviluppa a partire dall'unghia di valle dell'opera. Il piping progredisce attraverso vie preferenziali all'interno del terreno di fondazione, all'interno del rilevato o tra rilevato e fondazione.



Figura 8. Fontanazzo sul Bacchiglione a Pontelongo (PD)

La rimozione delle particelle (in genere della frazione più fine o di quella con minore peso specifico) ha pertanto inizio sul lato campagna, manifestandosi talvolta con la presenza di piccole sorgenti localizzate, dette fontanazzi o sand boil. Successivamente, il fenomeno di erosione tende a estendersi verso monte, con un meccanismo di tipo regressivo, per effetto dell'incremento di velocità dovuto alla riduzione delle resistenze idrauliche. Si arriva così alla formazione di un vero e proprio tubo all'interno del rilevato arginale, da cui il nome inglese "piping". Quando il dinamismo interessa la zona golenale, si ha il collasso dell'opera.

L'erosione interna inizia localmente con il movimento delle piccole particelle all'interno della matrice terrosa, sino a formare delle piccole cavità; una volta che si è innescato il piping, il flusso all'interno del singolo tubicino tende ad aumentare, poiché diminuiscono le forze di attrito; l'aumento di portata fa crescere di conseguenza le dimensioni dei canali stessi in maniera inarrestabile, ottenendo il collasso e infine la rottura.

Il piping può essere favorito da radici di alberi con percorso sub-orizzontale, soprattutto se la specie arborea è particolarmente idrofila. Un'altra causa possibile è data dalle tane di mammiferi, che costituiscono vie preferenziali per il flusso idrico e quindi permettono l'innescamento del piping.

L'entità del fenomeno è valutabile in base alla natura dell'acqua che sgorga:

- acqua limpida: il fenomeno non è molto preoccupante, in quanto l'acqua è priva di forza erosiva e non asporta particelle solide nel suo percorso sotterraneo;
- acqua torbida: la corrente è dotata di apprezzabile forza erosiva; in questo caso si verifica un intorbidamento marcato anche delle acque dei pozzi e dei fossi vicini all'argine.

A oggi non esistono metodi di analisi deterministica, che consentano cioè di determinare se una sezione sia verificata o meno nei confronti del piping. Gli unici metodi esistenti sono di tipo probabilistico: forniscono soltanto una stima del rischio di collasso per le varie sezioni.

Come provvedimento d'urgenza, in questi casi, si ricorre all'arginatura del fontanazzo con opere provvisorie in terra o mediante l'ausilio di sacchetti di sabbia (coronelle), in modo da ottenere l'innalzamento del livello di affioramento e ridurre così il carico motore disponibile all'acqua per infiltrarsi nel terreno.

2.2.4. Franamento

Il franamento dell'argine può essere dovuto a varie cause che generano l'instabilità dei paramenti del rilevato, tra cui interventi di natura antropica. Un esempio è costituito dallo sradicamento di alberi presenti lungo la linea di sponda, che può provocare l'erosione al piede e lo smottamento di grosse zolle di terreno, generando l'instabilità dell'intero rilevato.



Figura 9. Frana degli argini del torrente Stridolone (GR)

2. Fenomeni di collasso

I rimedi solitamente adottati per ostacolare i fenomeni franosi nelle arginature sono opere repellenti, oppure difese longitudinali (gettate di massi di protezione al piede, muri di sponda).

Dal punto di vista analitico, il problema può essere studiato agli elementi finiti, con i cosiddetti “metodi delle strisce”, che prevedono come ipotesi:

- stato di deformazione piano: vengono trascurati gli effetti tridimensionali;
- arco della superficie di scorrimento approssimabile con la relativa corda;
- legame costitutivo del terreno rigido-perfettamente plastico;
- criterio di rottura di Mohr-Coulomb.

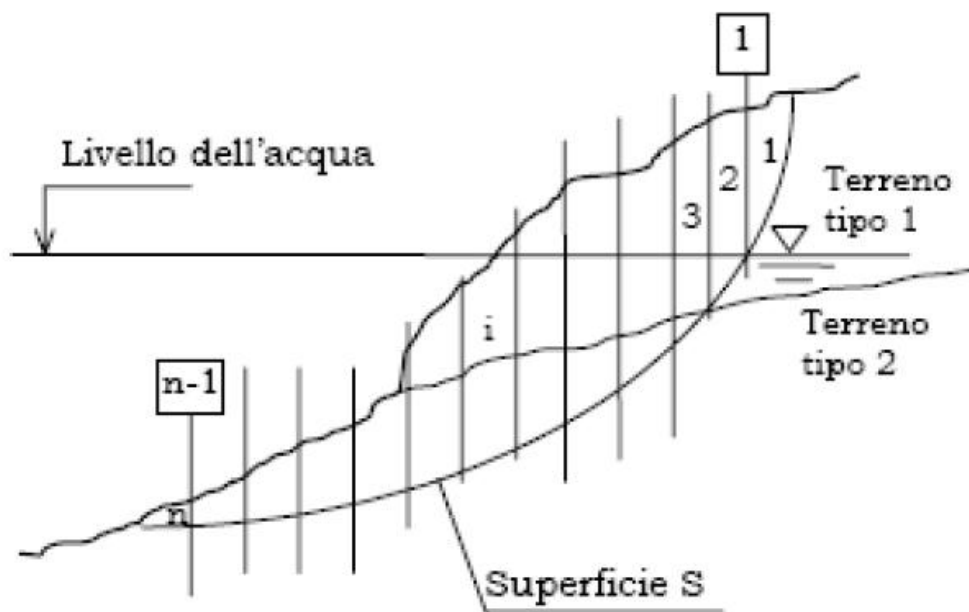


Figura 10. Metodo delle strisce

Il metodo di Bishop semplificato è attualmente il più diffuso e utilizzato fra i metodi delle strisce. Come ipotesi aggiuntiva, prevede:

- superficie di scorrimento circolare;
- risultante nulla delle componenti nella direzione verticale delle forze agenti sulle facce laterali.

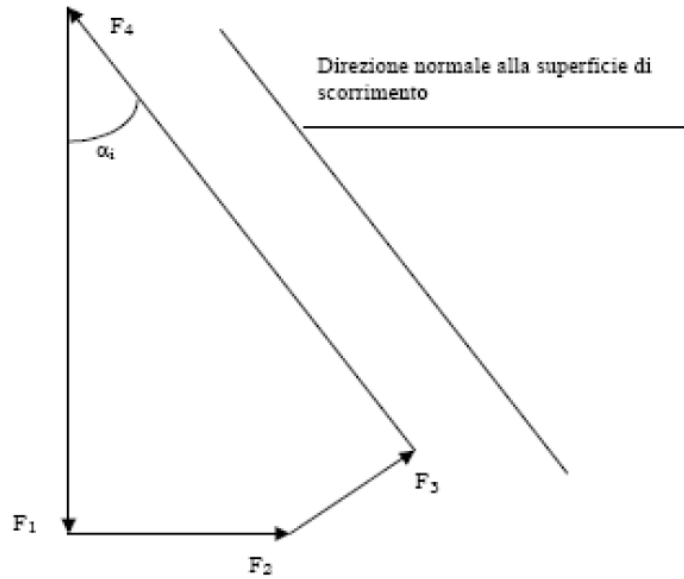


Figura 11. Poligono delle forze

Con riferimento al poligono delle forze sopra riportato, l'equazione di equilibrio nella direzione verticale è:

$$F_1 - F_3 \cdot \sin \alpha_i = F_4 \cdot \cos \alpha_i$$

$$W_i + (X_i - X_{i-1}) - T_i \cdot \sin \alpha_i = (N'_i + U_{bi}) \cdot \cos \alpha_i$$

Per le ipotesi del metodo di Bishop semplificato vale:

$$(X_i - X_{i-1}) = 0$$

Da cui deriva:

$$M_s = \sum_1^n \left[c'_i \cdot \Delta x_i + (W_i - u_i \cdot \Delta x_i) \cdot \tan \varphi'_i \right] \cdot \left[\frac{1}{\cos \alpha_i \cdot \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \varphi'_i}{FS} \right)} \right]$$

La soluzione analitica del problema è ricercata per via iterativa, fissando valori successivi di tentativo per FS.

Il metodo di Janbu semplificato mantiene l'ipotesi di risultante nulla delle componenti nella direzione verticale delle forze agenti sulle facce laterali, ma abbandona quella di superficie di scorrimento circolare.

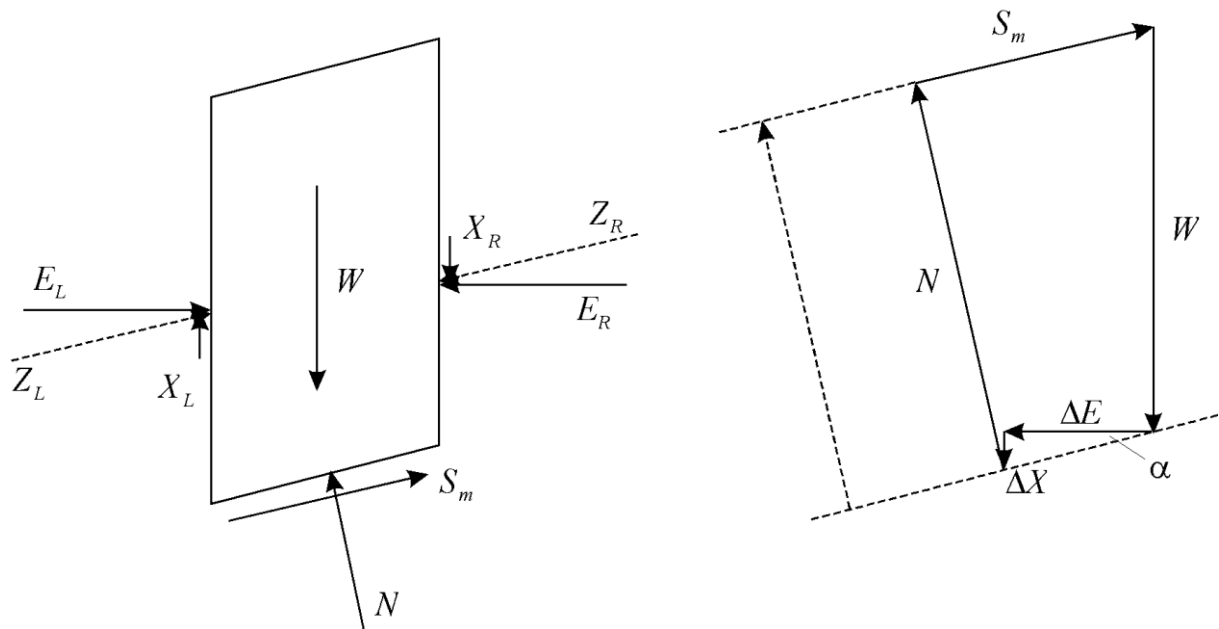


Figura 12. Poligono delle forze.

Il poligono delle forze e la relativa equazione di equilibrio sono uguali al modello precedente, mentre per il calcolo del fattore di sicurezza si fa riferimento alle forze orizzontali, piuttosto che ai momenti, come accadeva per Bishop:

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u\beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha}$$

Il metodo di Morgenstern e Price non annulla le forze inter-concilio verticali, ma assume come nota una relazione che le lega alle orizzontali:

$$X = E\lambda f(x)$$

La successiva procedura risolutiva risulta la stessa degli altri metodi di equilibrio limite globale.

3. Il caso di studio

3.1. Il fiume Serchio

Il bacino del Serchio viene classicamente suddiviso in tre zone aventi diverse caratteristiche morfologiche: la Garfagnana, la Media Valle e la Piana di Lucca.



Figura 13. Bacino idrografico del Fiume Serchio

La fascia costiera, in cui è situato il Lago di Massaciucoli, comprende aree apparentemente indipendenti dall'attuale configurazione del bacino idrografico, ma

3. Il caso di studio

che rappresentano storicamente aree di impaludamento e di esondazione naturale del fiume.

Gli affluenti di destra del Serchio originano dalle Alpi Apuane e sono generalmente abbastanza ricchi di acque: Edron, Turrîte Secca, Turrîte di Gallicano, Turrîte Cava, Pedogna, Celetra, Freddana, Contesora.

Gli affluenti di sinistra del Serchio non sono, in genere, ricchi di acque perenni, fatta eccezione per la Lima; si annoverano: Covezza, Corfino, Castiglione, Sillico, Ceserana, Corsonna, Loppora, Ania, Segone, Dezza, Suricchiana, Fegana, Lima, Vinchiana, Fraga, Ozzeri.

Lungo il corso del fiume, sono presenti bacini artificiali, siti in Garfagnana e nella Media Valle: Vicaglia, Villa Collemantina, Gramolazzo, Vagli, Pontecosi, Isola Santa, Trombacco, Turrîte Cava.



Figura 14. Diga di Vagli e relativo bacino

3. Il caso di studio

Il bacino idrografico del fiume Serchio, con i suoi 1460 Km² di superficie, domina la quasi totalità del territorio della provincia di Lucca. Una quota minima è rappresentata dai bacini minori della riviera apuana (Versilia, Baccatoio, Camaione) e della Lunigiana (Aulella).

Il Serchio ha origine in Alta Garfagnana e assume la sua denominazione a partire da Piazza al Serchio. Due sono i confluenti principali: il cosiddetto Serchio di Soraggio, di provenienza appenninica (dal Monte Prado), e il torrente Serchio di Gramolazzo, di provenienza apuana. Fino a Calavorno, il fianco apuano resta il principale alimentatore del fiume Serchio. A valle di Calavorno è invece maggiore l'apporto di acqua di provenienza appenninica: sono infatti il Torrente Fegana e soprattutto il Torrente Lima ad alimentare principalmente il Serchio.



Figura 15. Il Serchio a Borgo a Mozzano

A valle di Borgo a Mozzano, dopo la confluenza con la Lima, il fiume riceve in destra i torrenti che scendono dalle propaggini meridionali delle Alpi Apuane, mentre i tributari di sinistra sono prevalentemente originati dall'altipiano delle Pizzorne.

Nei pressi dell'abitato di Ponte a Moriano il Serchio si riversa nella pianura lucchese, dove raccoglie le acque del torrente Freddana; successivamente, volge a ovest dove, attraverso le "strette" di Filettole, entra in provincia di Pisa, scorrendo nei

3. Il caso di studio

comuni di San Giuliano Terme e Vecchiano, fino a terminare il suo corso gettandosi nel Mar Ligure, nella zona del Parco di San Rossore, pochi chilometri a nord di Pisa, dopo un percorso di circa 100 Km.

La piana di Lucca fu in epoche passate modellata e alluvionata dall'antico Serchio (Auser) il cui alveo si dirigeva verso la zona del Bientinese.

I corsi d'acqua della provincia di Lucca appartengono al settore ligure del versante tirrenico dell'Appennino; per la vicinanza dello spartiacque al mare questi corsi sono in genere brevi e caratterizzati da forti pendenze che conferiscono loro un regime marcatamente torrentizio.

Vi sono infine i canali del bacino dell'alveo prosciugato del lago del Bientina, che hanno la funzione di mantenere l'area bonificata. Sono corsi d'acqua a deflusso lento, come il fosso Guappero e il canale Rogio-Ozzeri.



Figura 16. Golena del Serchio nel comune di Vecchiano

In tempi storici (dal VII al XVI sec.) tutto il sistema fluviale del Serchio e dei suoi rami minori che ancora divagavano e si impaludavano nella pianura, venne regimato

3. Il caso di studio

mediante interventi idraulici, per raggiungere la situazione attuale, con il Serchio che scorre in un alveo arginato e pensile sino alla foce di Migliarino.

A valle di Ripafratta, nel tratto in cui il Serchio scorre nella pianura costiera pisano-versiliese, il fiume continua a essere arginato e rettificato, cosicché il suo bacino coincide con la fascia golenale.

Le precipitazioni piovose e nevose del bacino del Fiume Serchio sono tra le più elevate d'Italia (intorno ai 1800 mm/anno). Il basso grado di inquinamento del fiume è dovuto principalmente a questa elevata piovosità, che genera un'abbondante portata anche nel periodo estivo e assicura il deflusso minimo vitale. La portata, che a valle di Borgo a Mozzano è mediamente di 46 m³/sec, non scende infatti mai al di sotto di 6.5 m³/sec.

Si riportano di seguito i principali dati geografici relativi al bacino del Serchio:

SUPERFICIE TOTALE BACINO	1.565 (Km ²)
SUPERFICIE DEL BACINO IMBRIFERO	1.408 (Km ²)
ALTEZZA MEDIA ANNUA DI PIOGGIA	1.946 mm
COEFFICIENTE MEDIO ANNUO DI DEFLUSSO	0,70
QUOTA MEDIA BACINO	717 m s.l.m.
PORTATA MASSIMA DEL SERCHIO A LUCCA (9.11.1982)	2.200m ³ /sec
PORTATA MEDIA	46 m ³ /sec
PORTATA MINIMA	6,50 m ³ /sec
PORTATA MINIMA STORICA	4 m ³ /sec
COMUNI RICADENTI NEL BACINO	36
POPOLAZIONE (ISTAT 1991)	270.000 ab.

	POPOLAZIONE (unità)	SUP.(Km ²)
Garfagnana	30.059	530
MediaValle	30574	372
Alta Val di Lima	8.000	160
Piana di Lucca	98.862	273
Litorale	102.505	230
Totale	270.000	1.565

Le caratteristiche geologiche delle rocce carbonatiche affioranti consentono inoltre cospicui fenomeni di infiltrazione, che permettono di alimentare sorgenti importanti e riducono al minimo i tempi di torbidità delle acque superficiali.

3. Il caso di studio

Attualmente i parametri chimici e batteriologici delle acque del fiume Serchio, nonché i dati acquisiti con l'impiego di indicatori biologici, indicano nella maggior parte del fiume una buona qualità fin quasi alla foce.

Il regime a carattere torrentizio ha sempre determinato notevoli problemi per le piene e per le alluvioni, che nella storia hanno interessato ripetute volte la piana e la stessa città di Lucca.

Tali eventi alluvionali furono contenuti nel 1800 con la realizzazione delle arginature attuali.

3.2. L'evento

Nella mattina del giorno 25 Dicembre 2009, intorno alla ore 6:15, il fiume Serchio ha rotto gli argini in località Santa Maria a Colle.



Figura 17. Breccia a monte della bretella autostradale

Nell'argine, in destra idraulica, si sono aperte due brecce. La prima, della lunghezza di circa 30 m si è aperta in prossimità del ponte della bretella autostradale Lucca –

3. Il caso di studio

Viareggio. La seconda breccia, dello sviluppo di circa 70 m, si è aperta circa 300 m a valle della precedente, prima dell'immissione nel fiume Serchio del torrente Contesora.

Da queste due aperture è fuoriuscito circa un milione di metri cubi di acqua, che ha allagato l'abitato di Santa Maria a Colle e le zone limitrofe.



Figura 18. Breccia a valle della bretella autostradale

Sempre nella mattina di Natale il fiume ha rotto l'argine anche nel comune di Vecchiano (PI), tra le località Nodica e Migliarino; il cedimento ha interessato l'argine destro in un tratto sito circa un chilometro a monte del cavalcavia dell'autostrada A12, ed ha originato una falla di circa 160 m di lunghezza.



Figura 19. La breccia di Nodica



Figura 20. L'alluvione di Vecchiano a seguito del collasso

3.3. Le cause

Per poter comprendere al meglio gli effetti dell'evento del 25 dicembre, è necessario analizzare in primis le condizioni meteorologiche che si sono registrate a cominciare dalla settimana precedente.

Infatti, fra il 18 e il 19 dicembre 2009 si sono verificate sul bacino del Serchio, fino a quote di pianura, nevicate estese e abbondanti con temperature molto rigide, seguite da un brusco rialzo delle temperature e conseguente fusione della neve precedentemente accumulata.

Nei giorni 21, 22 e 23 dicembre l'atmosfera sopra il bacino imbrifero del fiume è stata percorsa da correnti umide meridionali, che hanno causato precipitazioni molto abbondanti ed estese, seguite dopo una breve pausa da un'ulteriore intensa perturbazione, che ha interessato il bacino fino alla mattina del 25.

A seguito di tali fenomeni, nel fiume si è generato un evento di piena, caratterizzato da due onde consecutive e persistenti, entrambe di portata significativa, con picchi nei giorni del 23 e 25 dicembre.

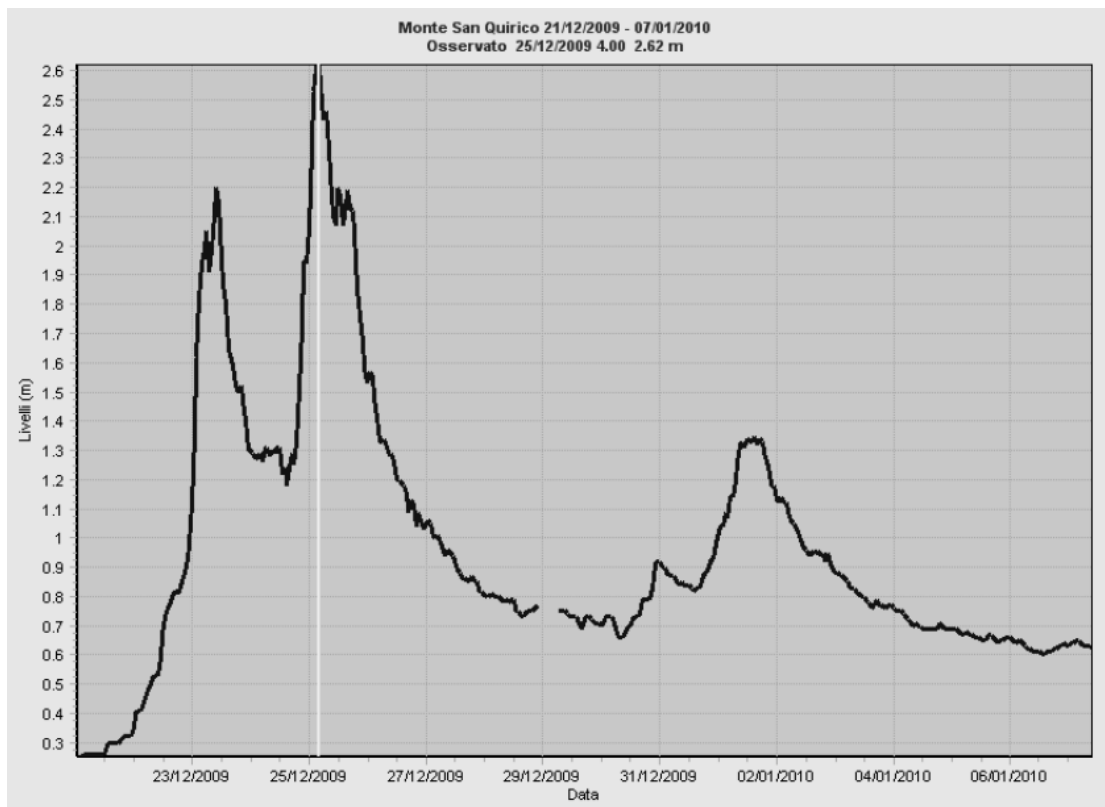


Figura 21. Livello idrometrico nell'evento di piena

Contemporaneamente, a partire dal 23 dicembre e fino alla mattina del 25, forti venti occidentali hanno determinato una condizione persistente di mare alto, con quote idrometriche fino a + 0,80 m sul livello medio marino.



Figura 22. Foce del Serchio durante una mareggiata da Sud-Ovest

Il picco di piena del 25 dicembre, che ha direttamente originato le rotture arginali del fiume Serchio, si è inserito quindi in un contesto caratterizzato da terreni molto imbibiti e da un deflusso a mare ostacolato.

Vale la pena sottolineare come l'onda di piena del 25 si sovrapponga alla precedente prima del suo esaurimento, come ben mostrato dal grafico riportato sopra. Si evidenzia inoltre la lentezza della fase di esaurimento, almeno parzialmente imputabile a un abbondante deflusso di base.

3.4. Interventi di urgenza

A seguito di tale disastro, fu prevista l'immediata messa in sicurezza dei tratti arginali che avevano ceduto.



Figura 23. Interventi di urgenza sulle rotte a Nodica

Gli interventi eseguiti sono stati:

- posa in opera di uno strato di base in massi ciclopici, intasati con misto di cava;
- posa in opera di un nucleo centrale a sezione trapezia in geoblocchi di calcestruzzo, intasati con calcestruzzo e strutturati con rete elettrosaldata
- ricoprimento in terra;
- realizzazione di un taglione in calcestruzzo al piede dell'argine lato fiume, di circa 4 metri di profondità e ammorsato nell'argine integro a monte e a valle della breccia;
- confinamento delle breccie con un diaframma in palancole metalliche infisse nel terreno per circa 7 metri.

3.5. Piano d'indagine

Dopo una prima messa in sicurezza, la Protezione Civile ha deciso di indagare in modo più approfondito lo stato di salute degli argini del fiume Serchio nelle provincie di Lucca e Pisa.

A questo scopo sono stati stanziati dei fondi per eseguire indagini geotecniche in situ e in laboratorio, al fine di avere un quadro completo sulla salute degli argini nel tratto compreso tra la frazione di S. Anna a Lucca sino alla foce in località Migliarino a Pisa.

4. Indagini in situ

4. Indagini in situ

4.1. Ubicazione delle indagini

Le indagini sono state distribuite all'incirca uniformemente lungo gli argini del fiume Serchio nel tratto che attraversa la provincia di Pisa.



Figura 24. Corso del Serchio nella provincia di Pisa

4.2. Sondaggi



Figura 25. Risultato di un sondaggio

4. Indagini in situ

I sondaggi permettono di conoscere con certezza la natura delle terre nella verticale ispezionata, perché sono uno strumento diretto, che non necessita d'interpretazioni; infatti il materiale estratto può essere direttamente osservato a occhio nudo dall'operatore.

Questo permette di avere un controllo sui risultati ottenuti dalle prove di tipo indiretto; nel nostro caso, il sondaggio serve per tarare e corroborare le interpretazioni fatte sulle prove penetrometriche, le quali sono decisamente maggiori in numero e quindi restituiscono la stratigrafia del terreno con maggiore risoluzione.

Sono stati eseguiti in tutto diciannove sondaggi, di cui dodici sulla sponda sinistra, numerati da S1 a S12, e sette sulla destra, numerati da S13 a S20 saltando S18.



Figura 26. Realizzazione di un sondaggio

4.3. Profondità della falda

Nei dati di origine, forniti dall'amministrazione provinciale di Pisa, sono fornite informazioni sulla profondità della falda in due maniere distinte.

Per ciascun sondaggio, è riportata la profondità rilevata con cura da una coppia di piezometri Casagrande. Sulla sponda di sinistra, inoltre, la soggiacenza è stata misurata con sonda galvanometrica in ciascuna verticale di CPTu.

È stato così scelto di adoperare a sinistra il valore ricavato durante le prove penetrometriche, per avere una maggiore risoluzione. Sulla sponda destra, invece, è stato fatto ricorso a quello derivante dai sondaggi, poiché unico dato in possesso.



Figura 27. Pozzetto del piezometro Casagrande

4.4. Prove di permeabilità Lefranc

Durante l'esecuzione dei sondaggi, spesso in corrispondenza dei campioni prelevati, sono state condotte le prove di permeabilità Lefranc a carico variabile,

4. Indagini in situ

secondo due procedure successive: per la prima (a) è stata rivestita la parete del foro, in modo da avere filtrazione soltanto attraverso la sezione di base; nella seconda (b), invece, il rivestimento è stato sollevato di 35 cm, per avere la filtrazione anche sulla superficie laterale.

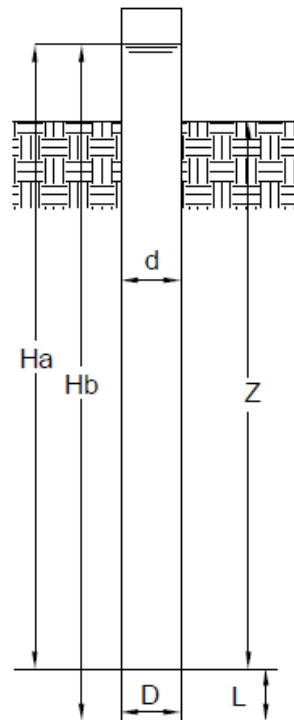


Figura 28. Schema della prova Lefranc

Poiché la prova "a" tiene fondamentalmente conto della sola filtrazione verticale, mentre la "b" considera contemporaneamente la componente verticale e orizzontale, come valore di riferimento è stato preso il k_b , da essa derivante.

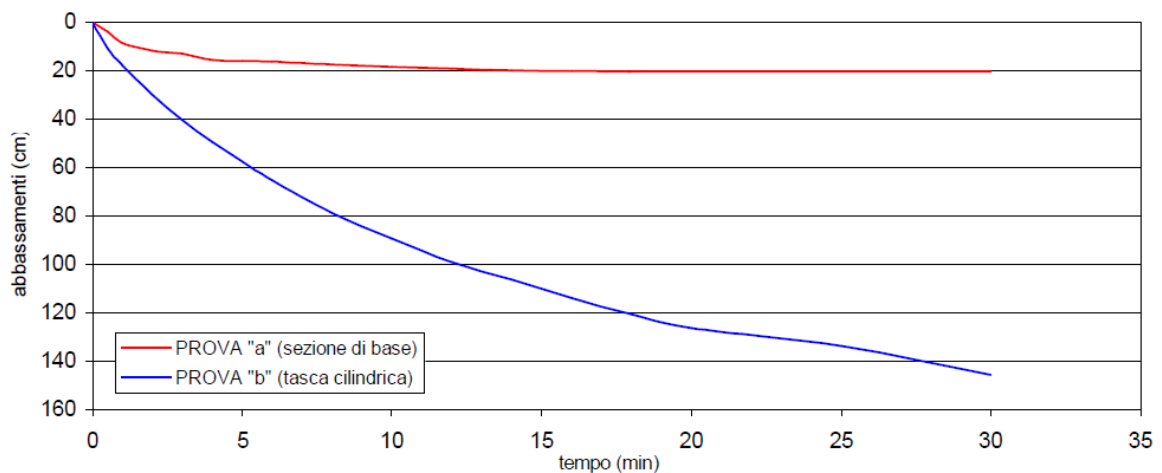


Figura 29. Prova Lefranc S4L3

I dati sono stati poi elaborati, raggruppando i valori ottenuti in base alla natura del materiale presente nel punto d'indagine, dedotta dalla scheda di sondaggio e dallo studio della granulometria dei campioni.

Materiale	Permeabilità, k (m/s)
Sabbia	7.62E-05
Sabbia limosa	5.84E-05
Sabbia con limo debolmente argillosa	8.25E-05
Limo argilloso sabbioso	2.50E-04

I risultati sopra riportati destano non pochi dubbi, in quanto non si nota l'andamento spiccatamente crescente della permeabilità con la granulometria che ci saremmo aspettati. Invece, i tre materiali più grossi hanno praticamente la stessa permeabilità, mentre per il limo argilloso essa è ancora più grande.

4.5. Prove penetrometriche statiche CPTu

Sulla parte di argini ricadente nella provincia di Pisa è stato eseguito un totale di centoquarantanove prove penetrometriche, divise fra settantasette in riva sinistra, numerate da 1s a 79s saltando 58s e 59s, e settantadue in riva destra, numerate da 1 a 72.

La maggior parte delle prove raggiunge i 20 m di profondità; sono inoltre presenti prove che si spingono fino a 30 m e altre che s'interrompono prima della profondità richiesta, a causa del raggiungimento di strati di ghiaia non attraversabili.



Figura 30. Realizzazione di una prova CPTu

Le indagini sono del tipo CPTu: penetrometriche statiche con piezocono. Durante la prova vengono misurati vari parametri a intervalli di 1 o 2 cm; i più importanti sono:

- profondità, d
- resistenza alla punta, q_c
- resistenza laterale, f_s
- pressione interstiziale, u

I certificati di prova sono stati inseriti nell'applicativo CPeT-IT di GeoLogismiki, per passare alla fase d'interpretazione.

4. Indagini in situ

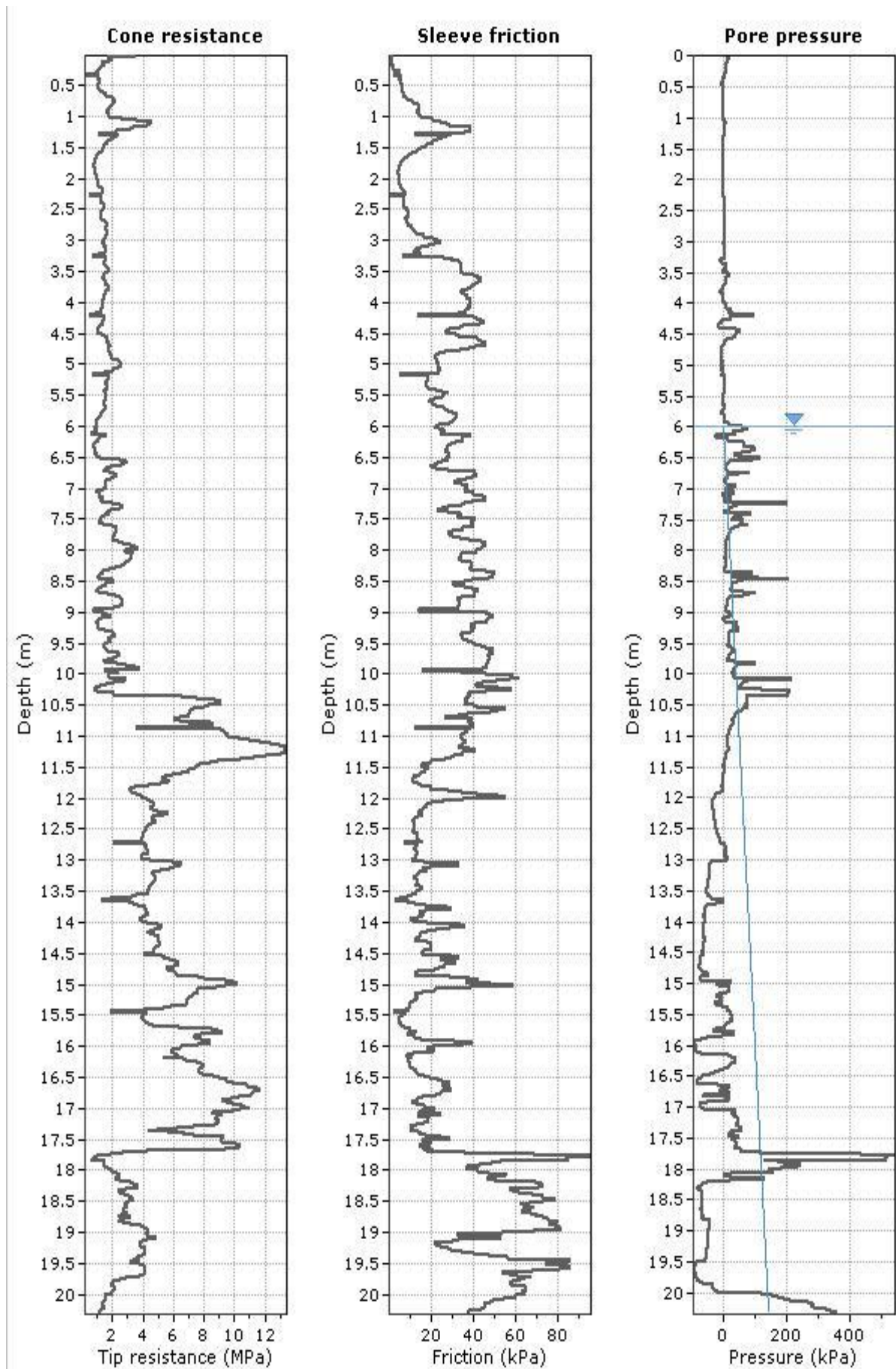


Figura 31. Dati grezzi della prova CPTu 14s

4. Indagini in situ

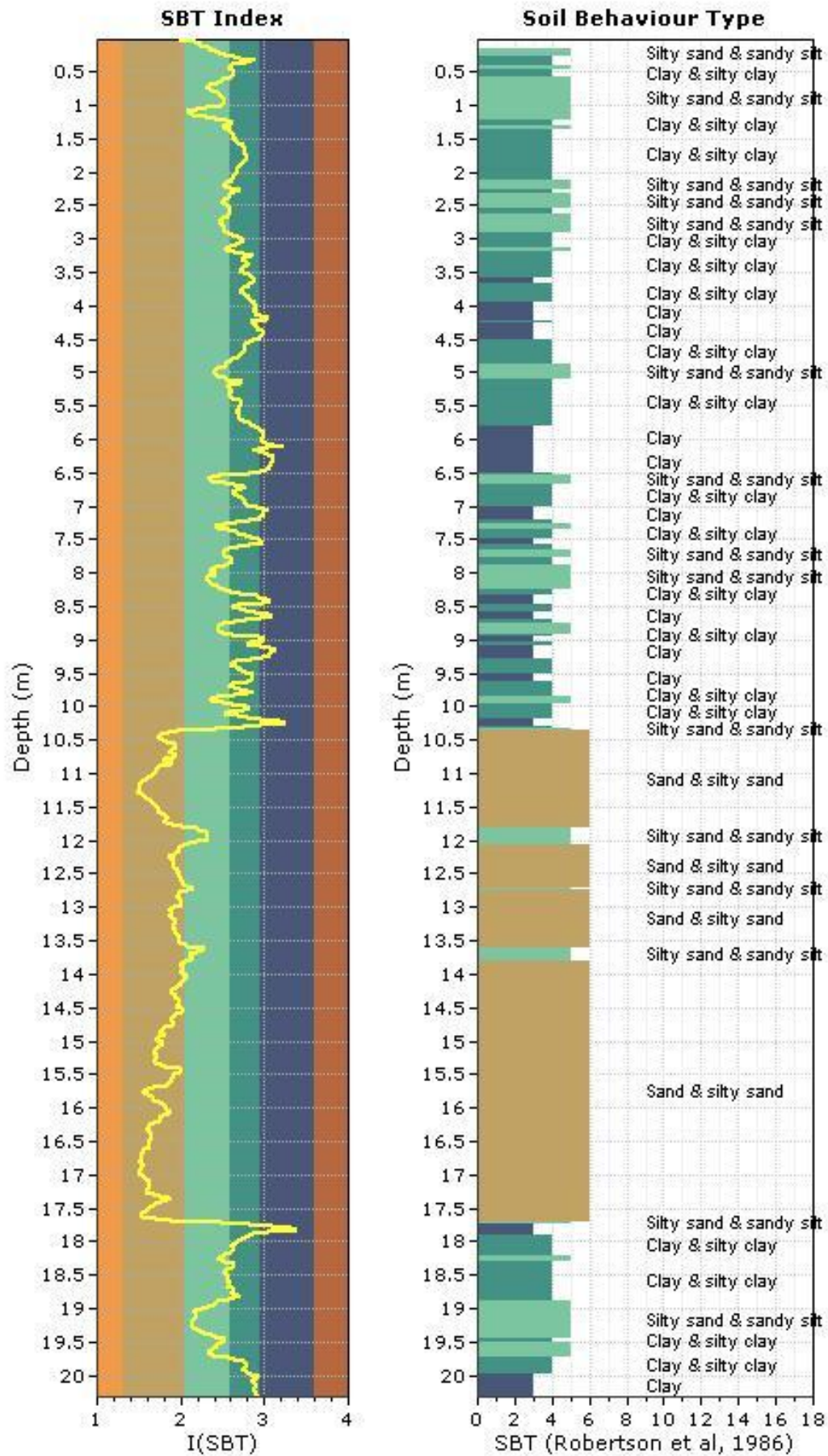


Figura 32. Interpretazione della prova CPTu 14s

4.5.1. Restituzione del profilo stratigrafico

Il programma individua bene il susseguirsi dei diversi strati attraversati durante la prova, mentre non è attendibile quando assegna a ciascuno strato il materiale corrispondente. Questo è dovuto al fatto che, pur essendo prevalentemente in presenza di terreni a grana medio-grossa, la resistenza alla punta rimane comunque piuttosto bassa; infatti, le formazioni di sabbia o sabbia limosa nella zona d'indagine presentano livelli di addensamento veramente bassi, restituendo così valori di resistenza simili a quelli di terreni più fini.

Per tarare il programma in modo da riconoscere correttamente i materiali attraversati, si è fatto ricorso ai sondaggi, come già spiegato.

Abbiamo fatto riferimento alla classificazione di Robertson et Al. del 1986, che riporta le seguenti classi di materiali (Soil Behaviour Type, SBT):

1. sensitive fine grained: argille sensitive;
2. organic material: torba;
3. clay: argilla;
4. clay and silty clay: argilla e argilla limosa;
5. clay and silty clay: argilla e argilla limosa;
6. sandy silt and clayey silt: limo sabbioso e argilloso;
7. sandy silt and silty sand: limo sabbioso e sabbia limosa;
8. sand and silty sand: sabbia e sabbia limosa;
9. sand: sabbia;
10. gravely sand: sabbia ghiaiosa.

Il programma d'interpretazione non distingue le classi 4 e 5, 6 e 7, 8 e 9; pertanto, abbiamo considerato delle super-classi, di seguito dette 4+5, 6+7, 8+9.

Abbiamo poi abbinato ogni sondaggio alla prova CPTu più vicina e abbiamo confrontato la classe osservata nel sondaggio con la classe attribuita dal programma per ogni tratto coincidente.

4. Indagini in situ

Riportiamo di seguito, in termini di percentuale sulla lunghezza di scavo, come i vari materiali trovati nei sondaggi sono stati riconosciuti dall'applicativo.

		Classe riconosciuta				
		3	4+5	6+7	8+9	10
Classe osservata nel sondaggio	3	/	/	/	/	/
	4+5	77%	12%	6%	5%	/
	6+7	42%	18%	35%	5%	/
	8+9	19%	22%	18%	41%	/
	10	/	/	18%	82%	/

Vediamo che solo la classe 8+9 è stata riconosciuta tale nella maggior parte dei tratti (41%), mentre tutte le altre classi vengono per lo più riconosciute come materiale a grana minore di quella effettiva.

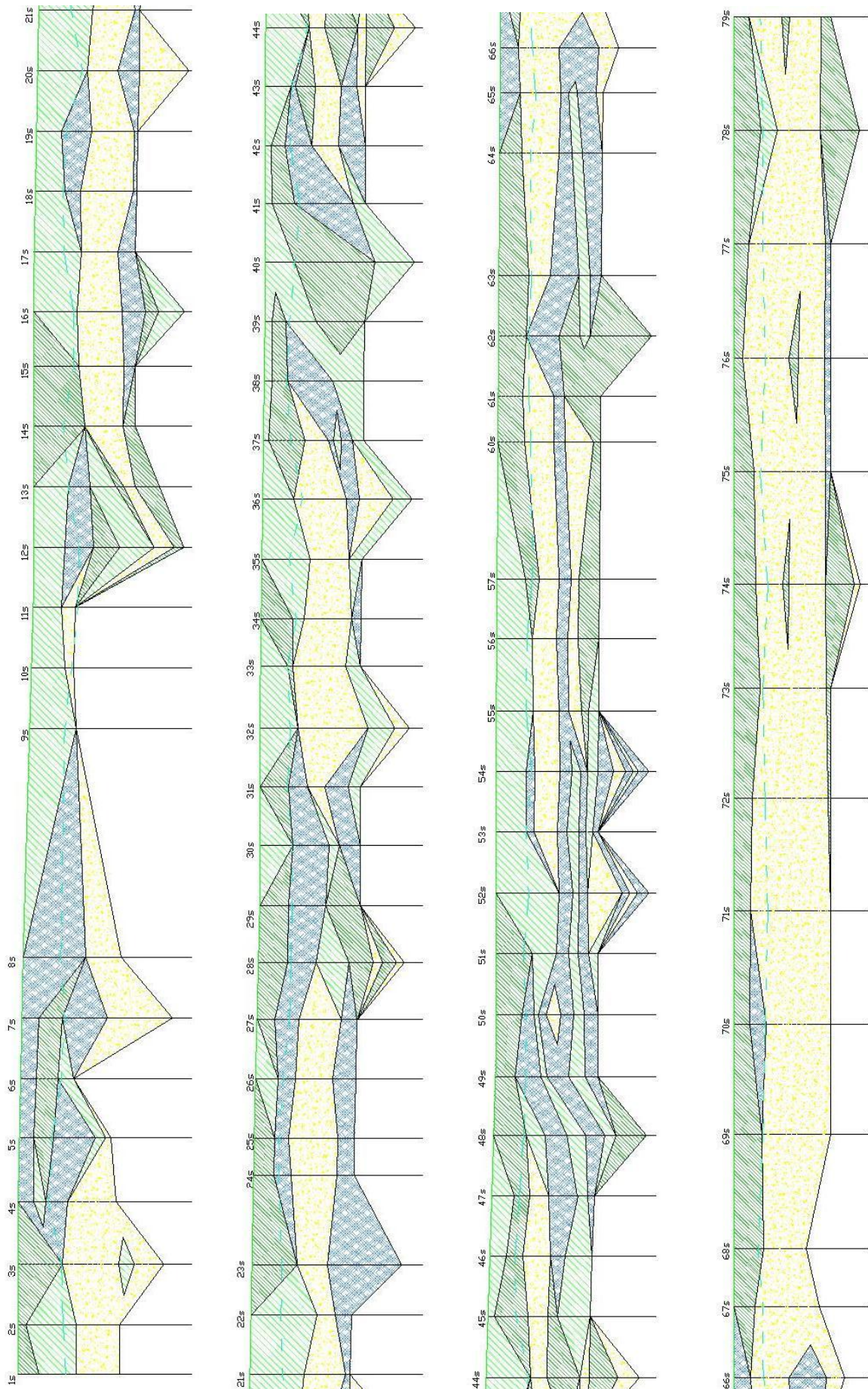
Per questo motivo, nella trattazione successiva, le classi di Robertson riconosciute nella CPTu sono state sostituite con altre aventi numero SBT maggiore, come da tabella seguente.

Classe riconosciuta	Classe assegnata
3	Limo argilloso sabbioso (6)
4+5	Sabbia con limo debolmente argillosa (7)
6+7	Sabbia limosa (8)
8+9	Sabbia (9)

Questo lavoro ha permesso la ricostruzione del profilo stratigrafico longitudinale di ciascun argine, con l'individuazione del susseguirsi di strati di materiali diversi lungo tutto il corso del fiume attraverso la provincia pisana.

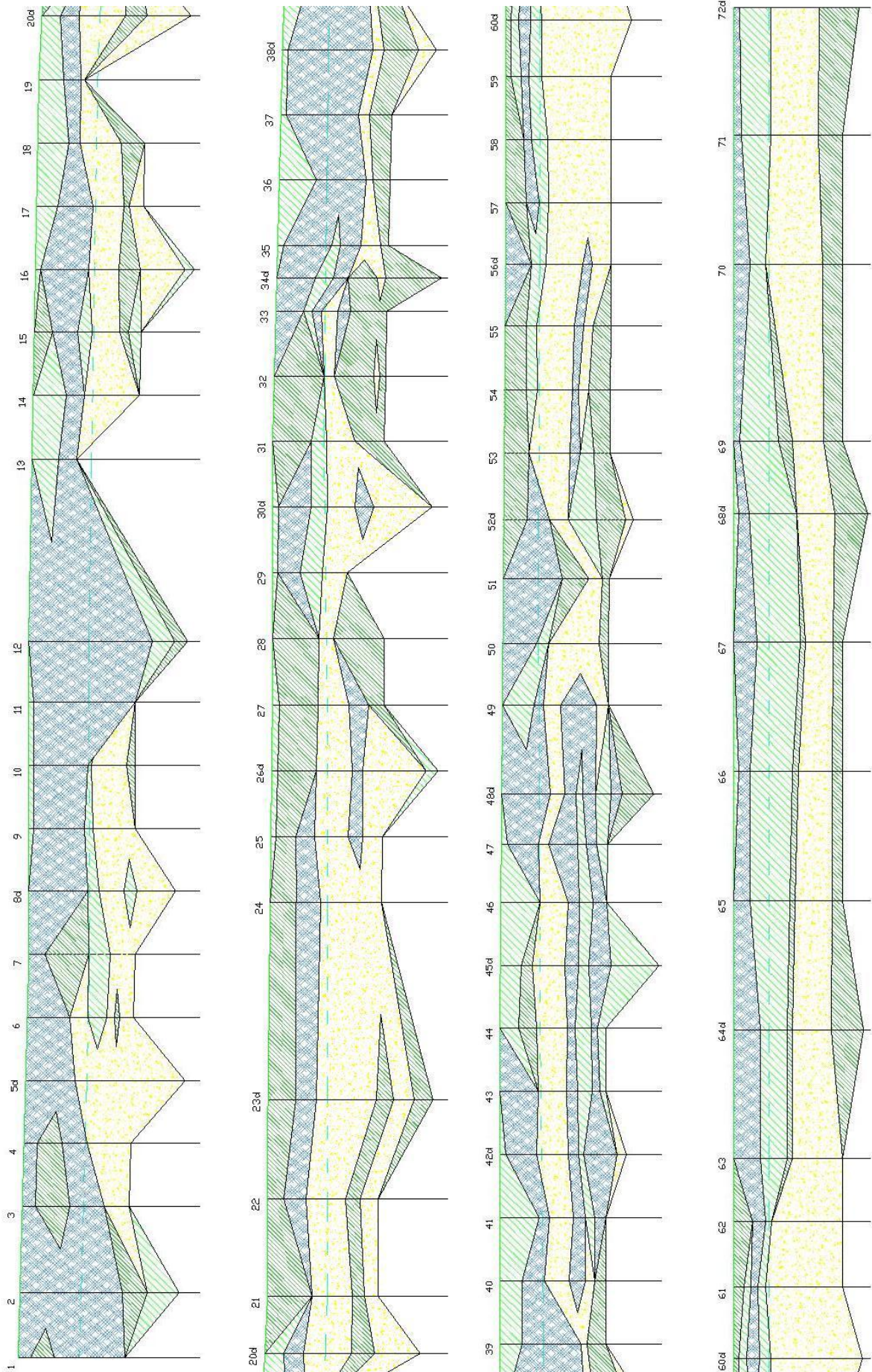
4. Indagini in situ

Profilo sinistro



4. Indagini in situ

Profilo destro



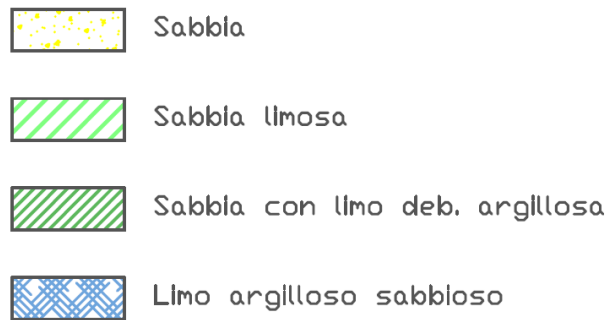


Figura 33. Legenda materiali

Il profilo stratigrafico è stato ricostruito in dettaglio per la porzione di argine in località Nodica (PI), interessata dalla rotta del 2009.



Figura 34. Vista aerea della rotta di Nodica

Tale zona, che risulta compresa fra le verticali delle prove CPTu 39 e 44 (sulla sponda destra), era stata indagata immediatamente dopo l'alluvione con prove in situ e prove di laboratorio. Nella presente tesi, ci siamo avvalsi delle prove

4. Indagini in situ

penetrometriche realizzate allora, come strumento per la ricostruzione del modello geologico, secondo le procedure spiegate sopra.

Le verticali di queste prove CPTu non sono allineate lungo l'asse longitudinale dell'argine, come invece capita per la campagna d'indagini successiva; pertanto, le verticali sono state proiettate geometricamente sull'asse stesso.

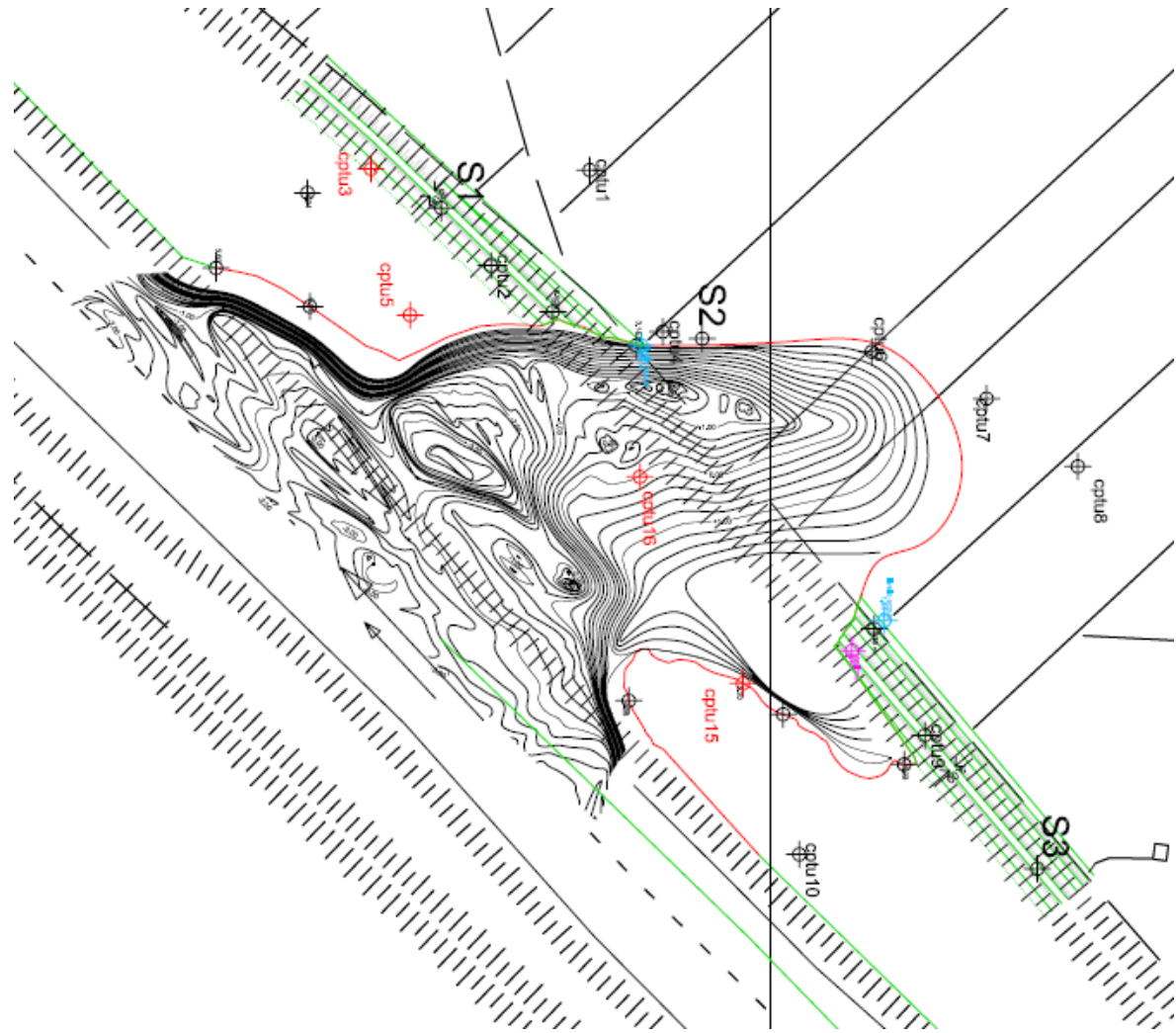
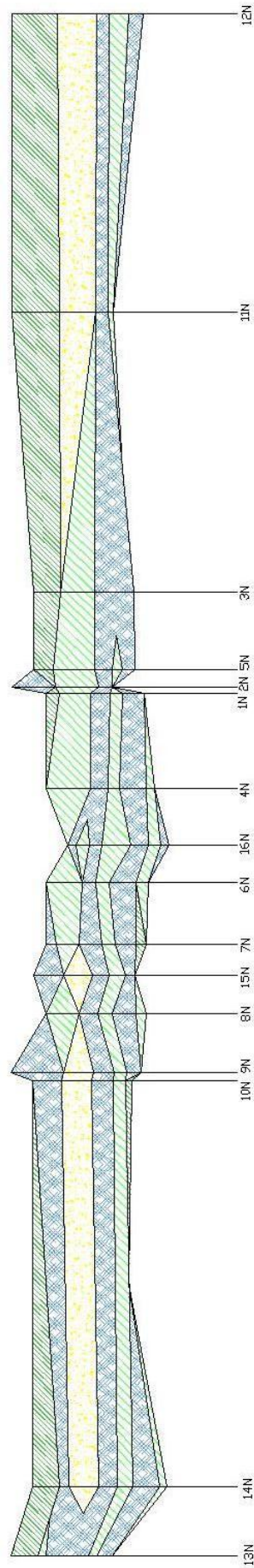


Figura 35. Planimetria delle indagini in prossimità della rotta

Inoltre, le prove non sono state effettuate tutte dalla sommità arginale, ma le quote di inizio prova sono varie: sommità arginale, banca, piede dell'argine, golena, piano di campagna. Nella restituzione del profilo si è tenuto conto di tale problematica, riferendo tutte le misure rispetto alla quota di riferimento 0.00, posta nel punto maggiormente depresso. Questa è la causa dell'aspetto frastagliato del piano di campagna del profilo.

Profilo destro a Nodica



4.5.2. Calcolo dei parametri di resistenza

Il programma sopra citato contiene al suo interno una funzione per il calcolo automatico dei valori di densità relativa e di angolo di attrito dei materiali riconosciuti come a grana grossa. In questo lavoro di tesi si è però preferito fare affidamento alle correlazioni assodate dalla letteratura.

Dall'applicativo abbiamo così esportato i seguenti valori grezzi e di prima elaborazione:

- profondità, d
- resistenza alla punta, q_c
- tensione geostatica verticale, σ'_{v0}

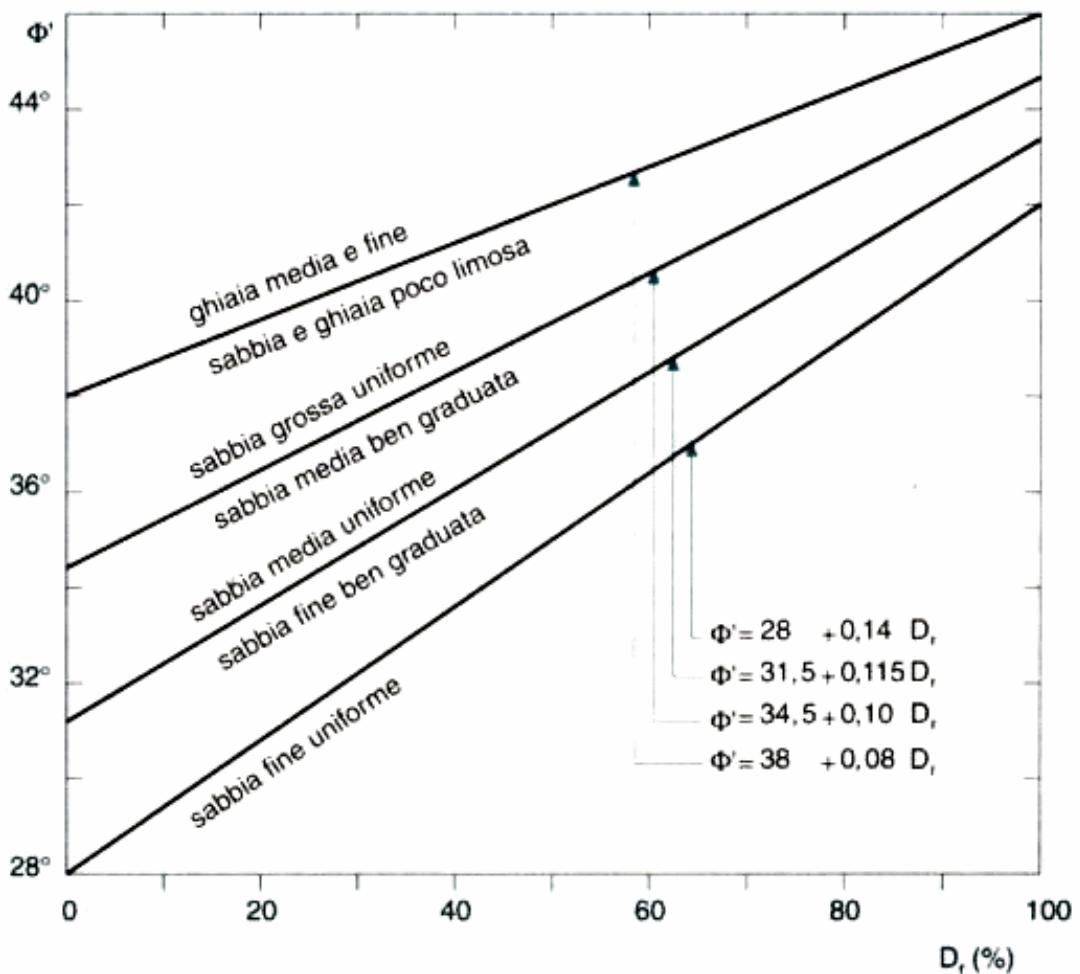


Figura 36. Correlazioni di Schmertmann

Da questi, otteniamo

$$\bullet \quad D_R = 68 \cdot \left[\log \left(\frac{q_c}{\sqrt{p_a \cdot \sigma'_{v0}}} - 1 \right) \right] \quad \text{Lancellotta, 1983}$$

Per il calcolo dell'angolo d'attrito, ricorriamo alle correlazioni di Schmertmann; in particolare, facciamo riferimento alla retta data per sabbie fini uniformi:

$$\bullet \quad \varphi' = 28 + 0.14 \cdot D_R$$

Questa procedura ci fornisce un valore di φ' per ogni punto della verticale in cui viene riconosciuto un materiale a grana media e grossa.

La coesione è stata assunta pari a zero, in sequela dei risultati ottenuti dalle prove triassiali (paragrafo 5.2).

In ogni verticale è stata fatta la media per ogni materiale dei valori di φ' ottenuti, scartando lo strato superficiale di 1.5 m, che risente delle condizioni ambientali.

Vale la pena di spiegare il motivo per cui si ottengono dei valori anche per i materiali più fini. Tali valori sono relativi ai picchi di resistenza incontrati all'interno di un materiale omogeneo e quindi danno una misura della resistenza delle intercalazioni più grosse. I dati ottenuti sono stati comunque estesi a tutto il materiale.

Dal programma CPeT-IT è stato anche estratto il valore, calcolato automaticamente, della resistenza a taglio non drenata. Limitatamente al solo limo argilloso sabbioso, è stata fatta la media su ogni verticale di tale valore. Per gli altri materiali, infatti, tale parametro perde di significato, poiché si verificano le condizioni drenate.

Sia per l'angolo di attrito, sia per la coesione non drenata, sono state poi calcolate la media e la deviazione standard per ogni materiale, considerando l'insieme di tutte le verticali come campione della popolazione.

4. Indagini in situ

I risultati ottenuti sono riportati di seguito:

Materiale	ϕ' (°)	St.Dev. ϕ'	Cu (kPa)	St.Dev. Cu
Sabbia	33.9	0.9	/	/
Sabbia limosa	32.3	0.8	/	/
Sabbia con limo debolmente argillosa	32.2	1.1	/	/
Limo argilloso sabbioso	32.6	1.4	73	28

Si osserva che la deviazione standard sulla coesione non drenata è piuttosto alta, a causa della notevole dispersione di tale parametro nelle diverse sezioni. Questa peculiarità ha suggerito di trascurare tale parametro nel corso delle analisi di stabilità.

4.6. Prove geoelettriche

Sono inoltre state fatte 82 indagini geofisiche tomografiche elettriche, al fine di individuare eventuali disomogeneità nelle sezioni trasversali degli argini e del terreno di fondazione.

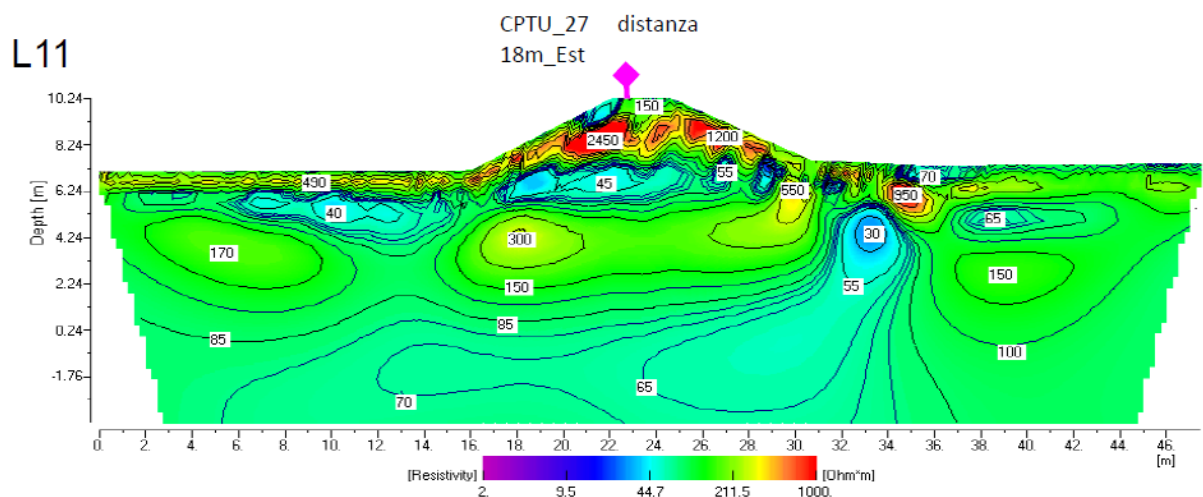


Figura 37. Tomografia elettrica L11

Infatti, le altre prove geonostiche eseguite (sondaggi, CPTu) restituiscono soltanto la sezione longitudinale ricadente sotto la verticale della sommità arginale, mentre

4. Indagini in situ

non forniscono alcuna informazione circa la distribuzione degli strati di terreno in direzione trasversale rispetto all'asse fluviale.

Le tomografie sono inoltre servite per ricavare la geometria delle sezioni, necessaria per la successiva analisi di stabilità.

5. Analisi di laboratorio

5.1. Distribuzione granulometrica

Per tutti i campioni raccolti durante i sondaggi è stata eseguita l'analisi di distribuzione granulometrica, con stacciatura e successiva sedimentazione della parte fine. Limitatamente ai sondaggi S17, S19 e S20, i risultati delle analisi di laboratorio non sono però pervenuti in tempo utile e sono stati pertanto trascurati.

Il dato misurato nella prova è la massa trattenuta nei vagli, elaborata poi per ottenere la frazione di passante e costruire la curva granulometrica.

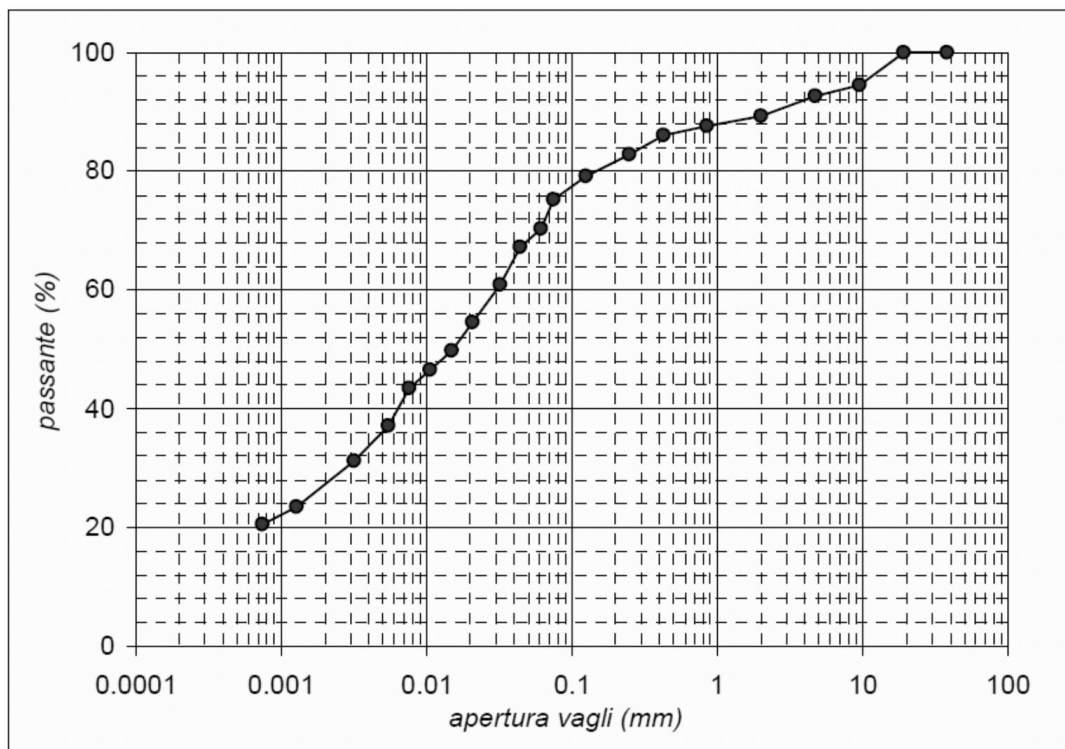


Figura 38. Curva granulometrica del campione S1C1

Per l'interpretazione, tutte le curve sono state raccolte e poi suddivise nelle varie classi di materiale. Per omogeneità con lo studio eseguito nella provincia di Lucca, si è scelto come parametro discriminante la frazione di passante a 0.075mm.

Frazione di passante a 0.075mm	Materiale
<10%	Sabbia
10%-35%	Sabbia limosa
35%-60%	Sabbia con limo debolmente argillosa
>60%	Limo argilloso sabbioso

Da questo deriva la seguente classificazione

Materiale	Campioni
Sabbia	S1C5, S2C5, S11C5, S12C4, S16C4
Sabbia limosa	S4C5, S5C5, S7C5, S9C4, S9C5, S10C3, S11C2, S12C5, S12C6, S12C9, S15C5
Sabbia con limo debolmente argillosa	S1C3, S2C3, S2C4, S3C1, S3C5, S4C2, S4C3, S6C1, S6C2, S7C1, S8C3, S8C5, S9C1, S9C3, S10C1, S10C2, S10C10, S11C1, S11C3, S12C8, S13C1, S14C1, C14C2, S16C1, S16C2, S16C6
Limo argilloso sabbioso	S1C1, S1C2, S1C4, S2C1, S2C2, S3C2, S3C3, S3C4, S4C1, S4C4, S4C6, S5C1, S5C2, S5C3, S5C4, S6C3, S6C4, S6C5, S7C2, S7C3, S7C4, S8C1, S8C2, S8C4, S9C2, S10C4, S10C5, S10C6, S10C7, S10C8, S10C9, S11C4, S11C6, S12C1, S12C2, S12C3, S12C7, S12C10, S13C2, S13C3, S13C4, S13C5, C13C6, S14C3, S14C4, S14C5, S15C1, S15C2, S15C3, S15C4, S16C3, S16C5

Di seguito, riportiamo i diagrammi di sintesi, in cui sono riportati i fusi granulometrici dei singoli campioni, raggruppati per materiale.

5. Analisi di laboratorio

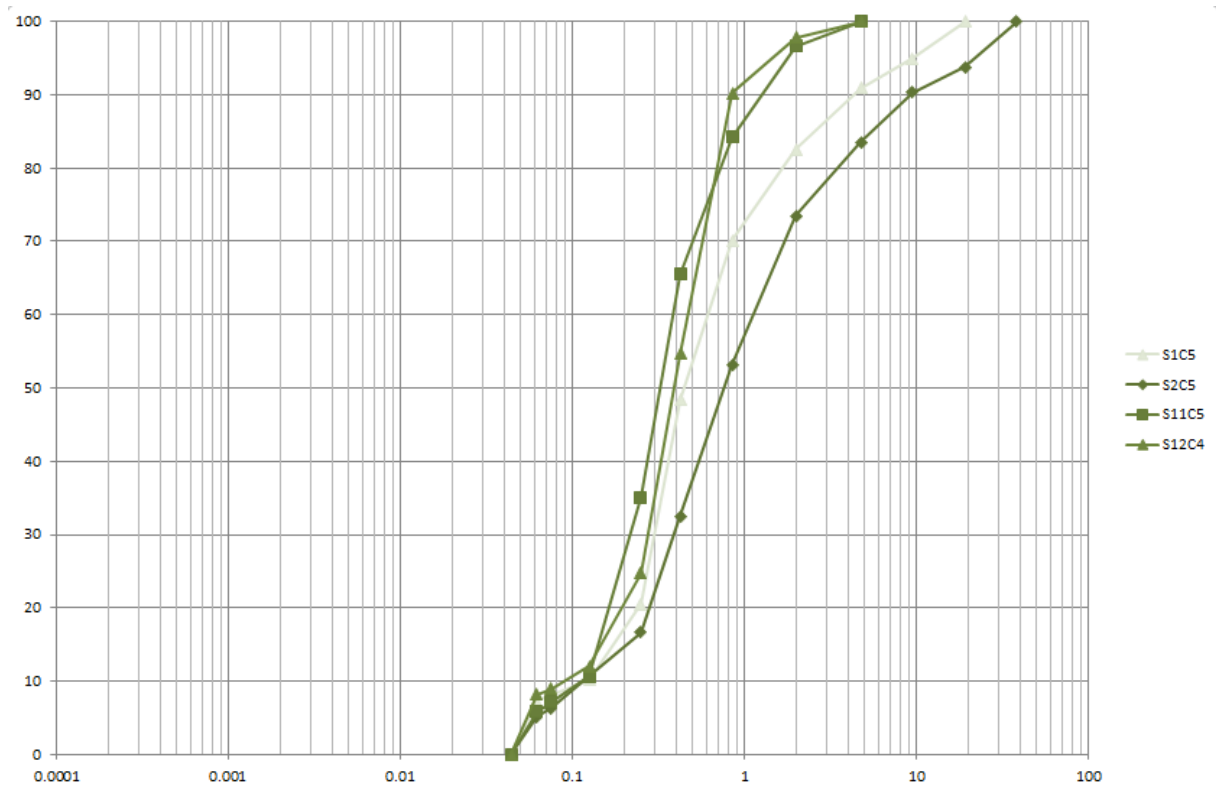


Figura 39. Fusi granulometrici delle sabbie.

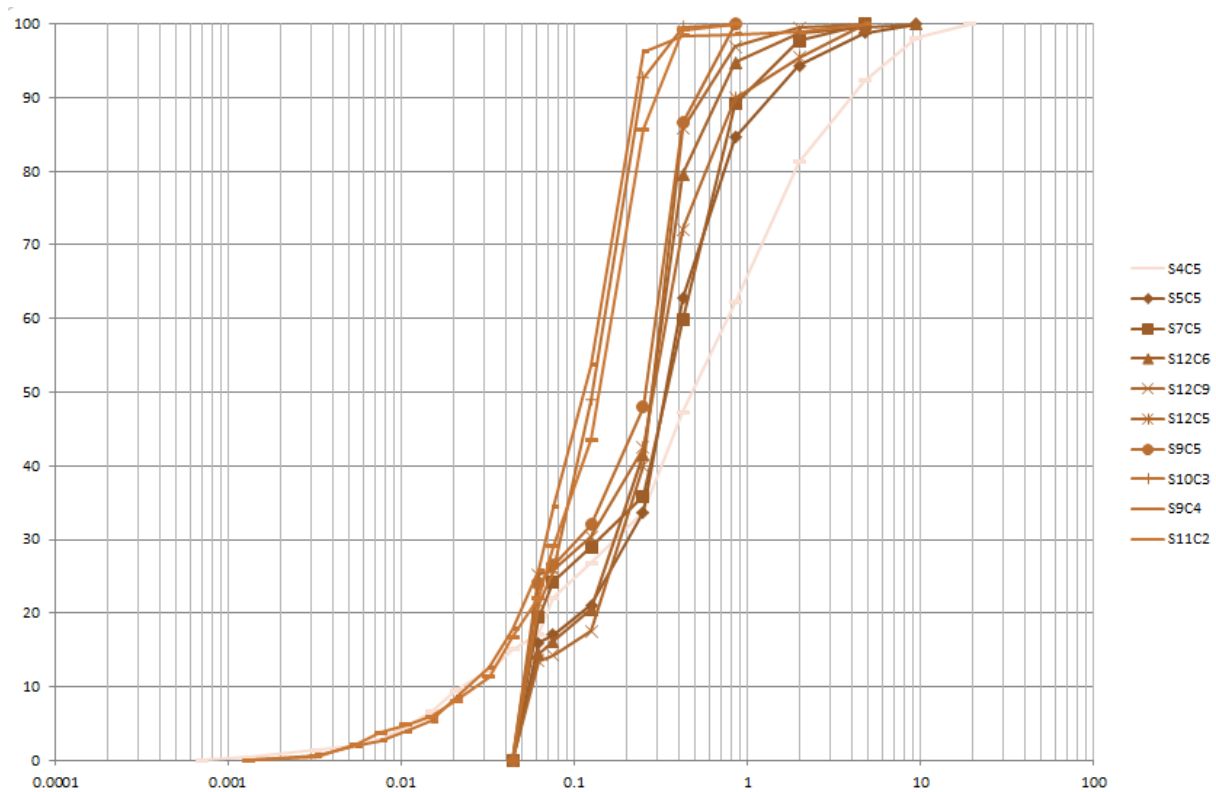
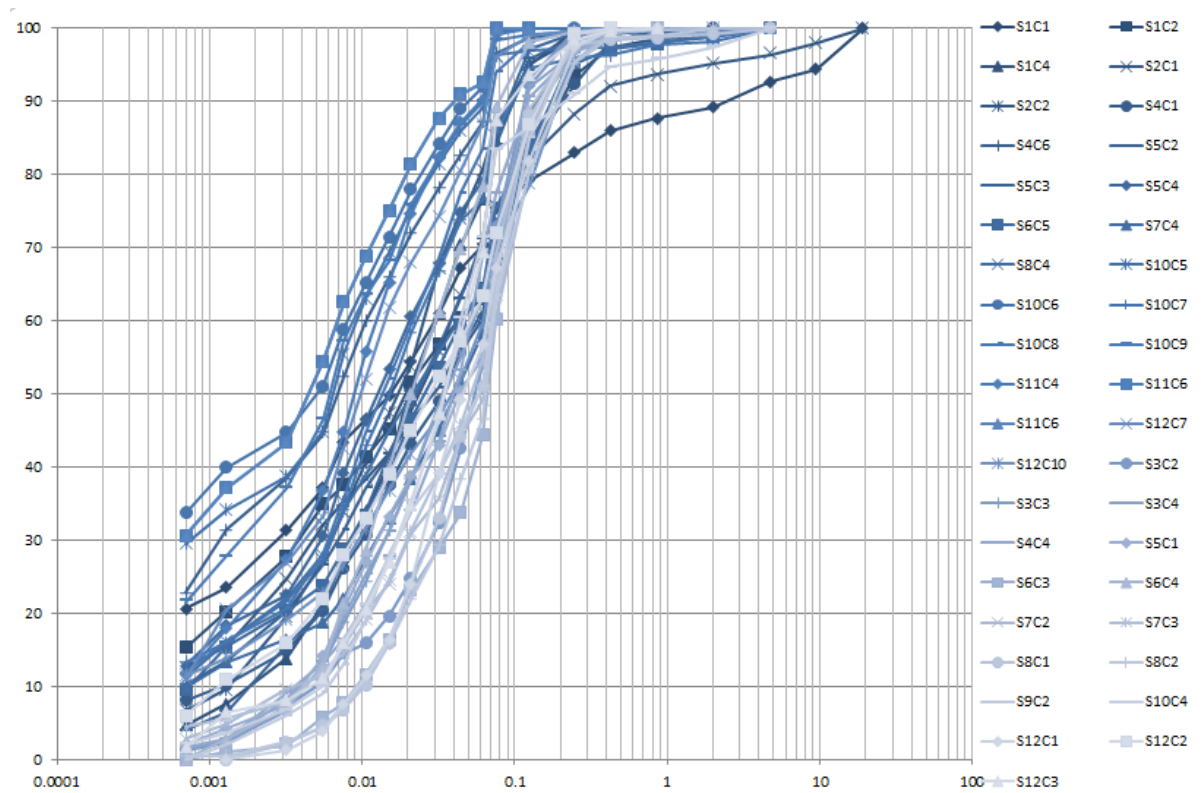
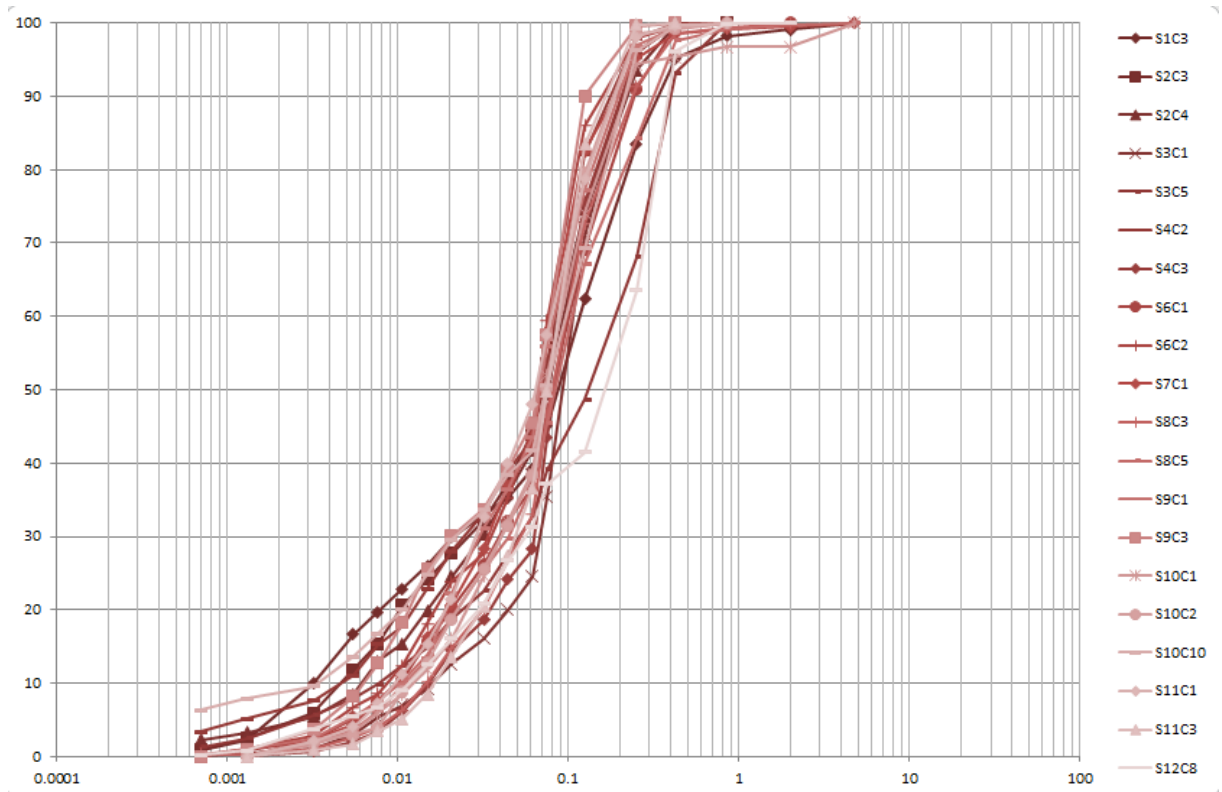


Figura 40. Fusi granulometrici delle sabbie limose.

5. Analisi di laboratorio



5.2. Prova triassiale

Su alcuni campioni superficiali (generalmente due per sondaggio) è stata eseguita la prova triassiale consolidata isotropicamente non drenata, TX-CIU. Su ciascun campione sono state ripetute tre prove, per diversi valori della pressione di confinamento.

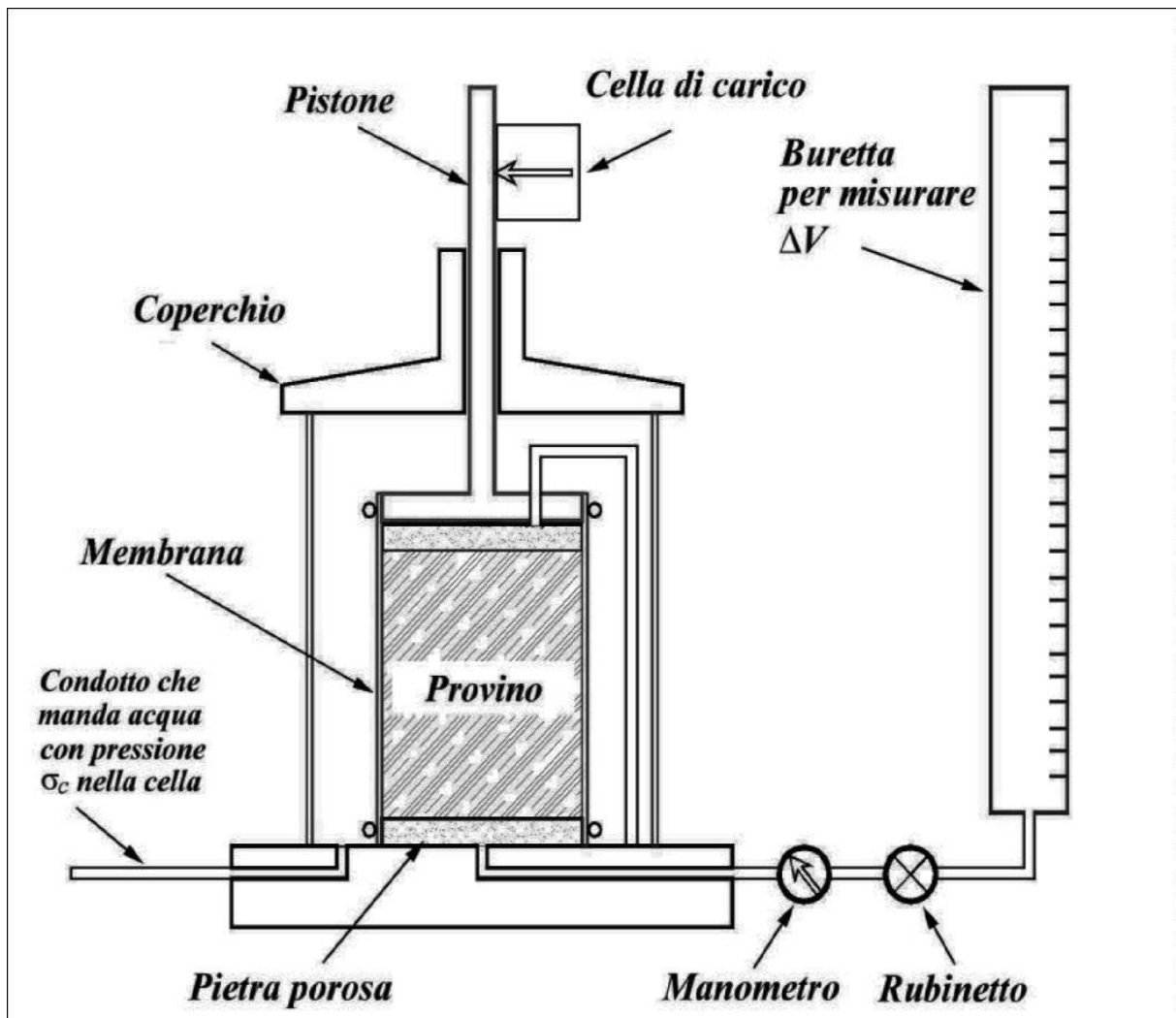


Figura 43. Schema dell'apparecchio triassiale

Durante la prova si costruisce lo stress path, dato dalle coppie di valori

- $s = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$
- $t = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}$

5. Analisi di laboratorio

Ricorrendo alla classificazione riportata nel paragrafo precedente, i campioni sono stati raccolti per classi di materiale. Su ciascun materiale è stata eseguita un'interpolazione lineare dei valori a rottura, in modo da ottenere la retta

- $t = a' + \operatorname{tg} \alpha' \cdot s$

L'interpolazione è stata fatta con riferimento al principio dei minimi quadrati, il quale, per una funzione di primo grado, fornisce le relazioni:

- $a' = \frac{\sum s^2 \cdot \sum t - \sum s \cdot \sum s \cdot t}{N \cdot \sum s^2 - (\sum s)^2}$
- $\operatorname{tg} \alpha' = \frac{N \cdot \sum s \cdot t - \sum s \cdot \sum t}{N \cdot \sum s^2 - (\sum s)^2}$

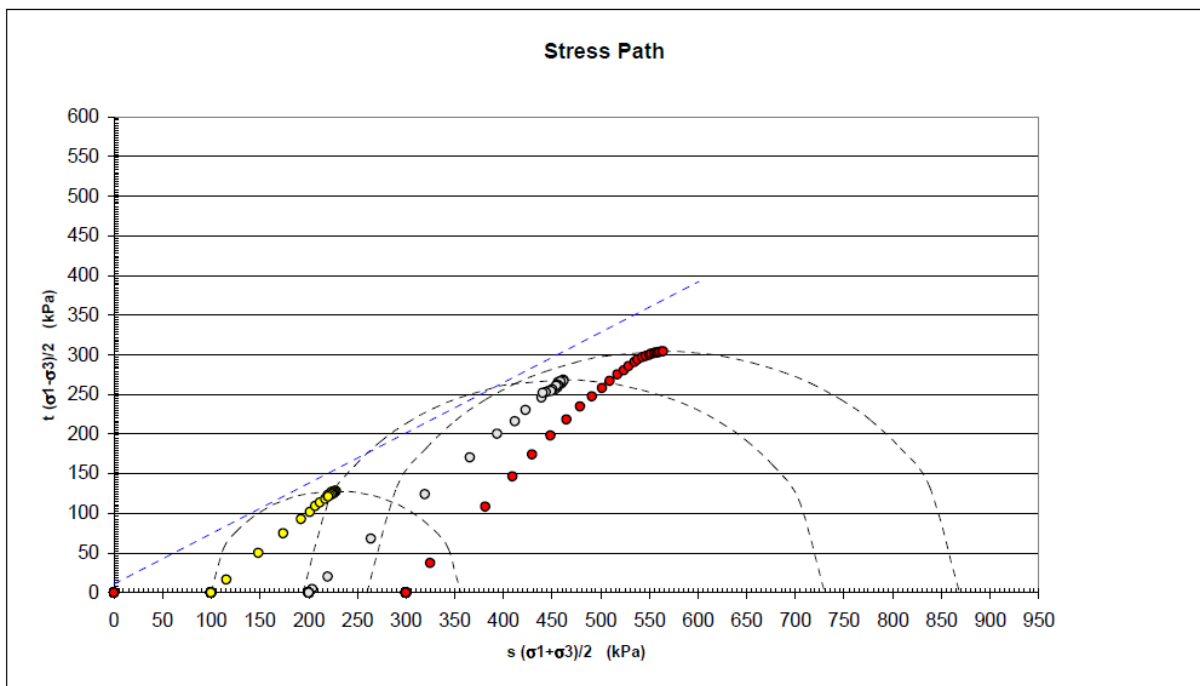


Figura 44. Stress path del campione S1C3

In certi casi, nella prima interpolazione risulta a' (e quindi la coesione c') negativa, evidentemente contro il significato fisico. In tali situazioni, l'interpolazione è stata ripetuta, imponendo l'intercetta nulla. Sotto le suddette condizioni, dal metodo dei minimi quadrati otteniamo:

- $a' = 0$
- $\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\sum s \cdot t}{\sum s^2}$

Per ricavare successivamente l'involuppo di rottura, dato dalla forma

- $\tau' = c' + \operatorname{tg} \varphi' \cdot \sigma'$

si sfruttano le relazioni che legano i parametri dell'involuppo di rottura nel piano (s,t) e nel piano (σ', τ'), date da:

- $\varphi' = \operatorname{arcsen}(\operatorname{tg} \alpha')$
- $c' = \frac{a'}{\cos \varphi'}$

Riassumiamo di seguito i valori così ottenuti

Materiale	Sponda sinistra		Sponda destra	
	c' (kPa)	ϕ' (°)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Sabbia	/	/	/	/
Sabbia limosa	0.3	31.0	/	/
Sabbia con limo debolmente argillosa	14.3	32.0	15.2	32.1
Limo argilloso sabbioso	0.0	32.3	11.3	32.5

Per il materiale “sabbia” e “sabbia limosa” nella sponda destra, non è stato indagato in questo senso nessun campione, a causa della difficoltà di reperire gli stessi in forma indisturbata; a questo è dovuta la mancanza d'informazioni a riguardo.

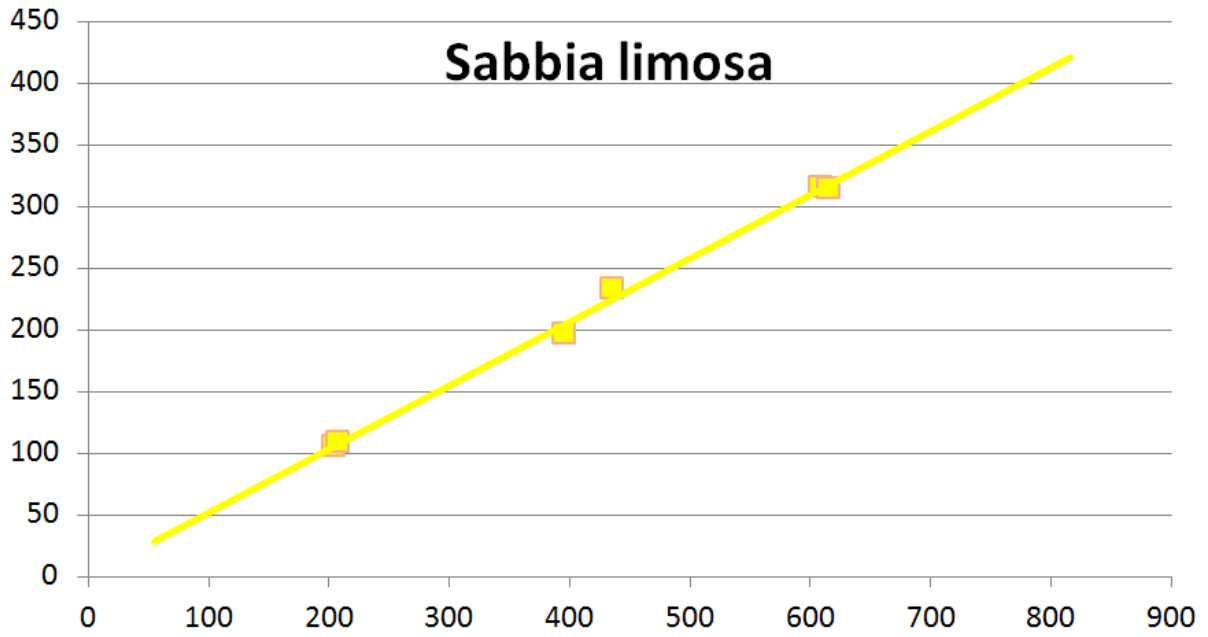


Figura 45. Diagramma (s' , t) per la sabbia limosa

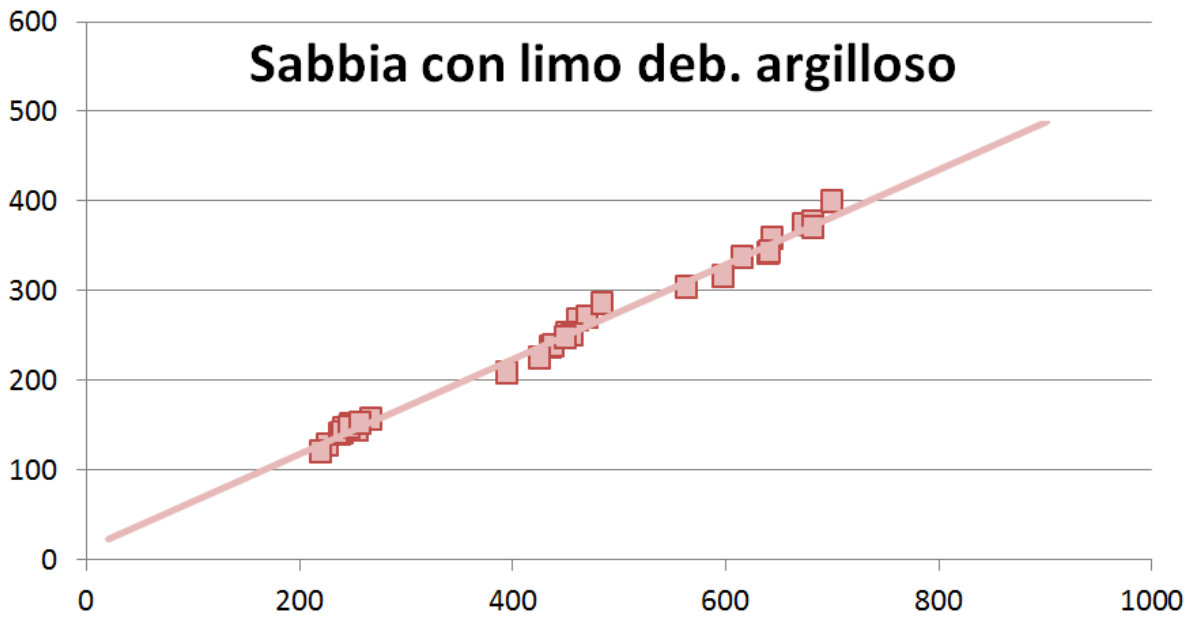


Figura 46. Diagramma (s' , t) per la sabbia con limo debolmente argilloso.

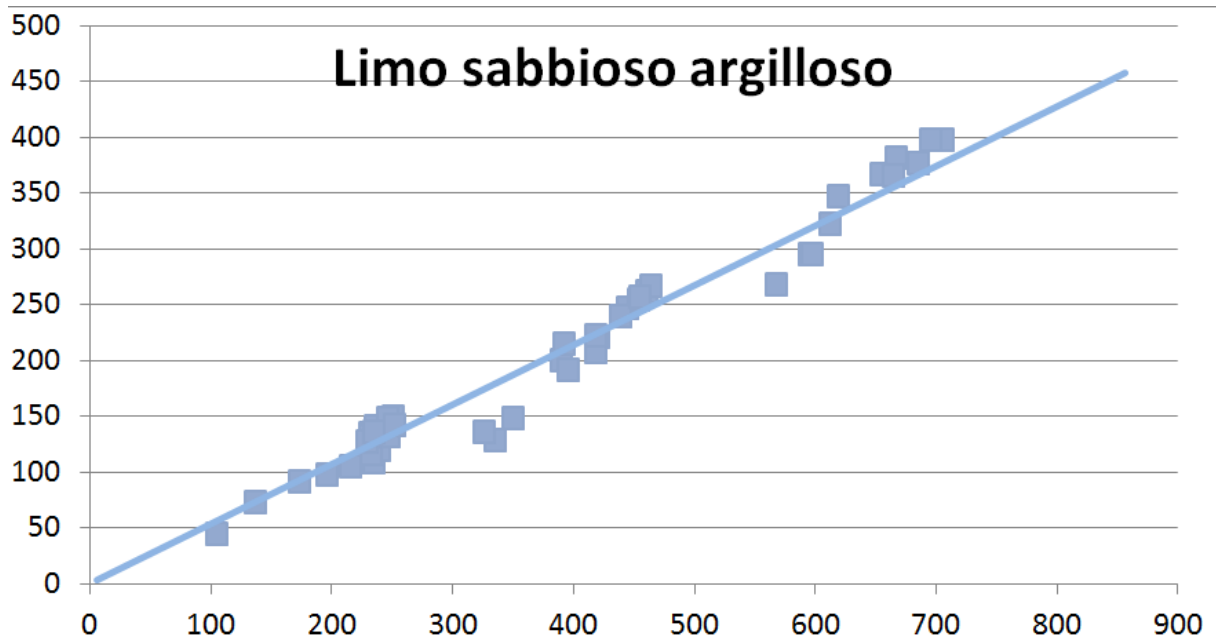


Figura 47. Diagramma (s', t) per limo sabbioso argilloso.

5.3. Massa volumica

Per i campioni citati sopra, sui quali è stata condotta la prova triassiale, è stata misurata la massa volumica in sito.

I campioni sono stati raggruppati per materiale e per ogni materiale è stata calcolata la media dei valori registrati.

Materiale	Massa volumica, γ_{nat} (t/m^3)
Sabbia	/
Sabbia limosa	1.65
Sabbia con limo debolmente argillosa	1.76
Limo argilloso sabbioso	1.83

Anche stavolta, non abbiamo informazioni circa le caratteristiche della sabbia.

5. Analisi di laboratorio

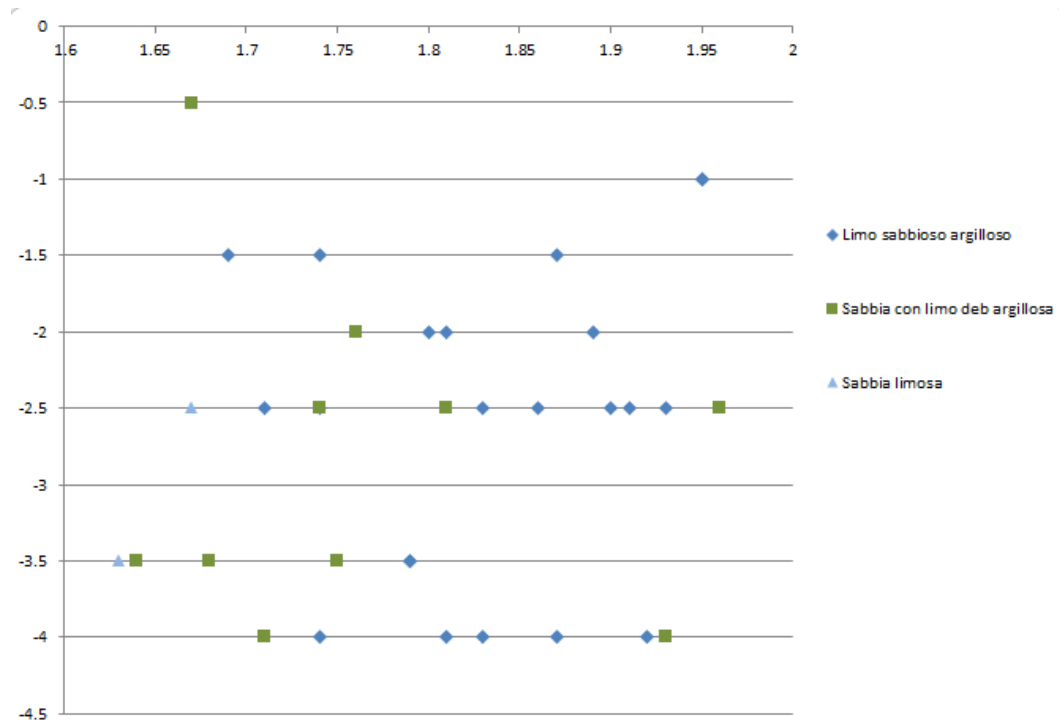


Figura 48. Andamento della massa volumica con la profondità.

Vediamo che i dati sono parecchio dispersi; in un caso del genere, fare la media serve soltanto ad avere un valore indicativo.

Si osserva però che la massa volumica non risente della profondità; infatti a ogni profondità la dispersione intorno alla media ha sempre lo stesso andamento.

6. Analisi di stabilità

6.1. Scelta delle sezioni da indagare

Di tutte le possibili sezioni trasversali, sulle quali effettuare gli studi di stabilità, ne sono state scelte sei tra quelle di geometria nota.

La scelta è stata condotta dall'osservazione combinata della geometria delle sezioni stesse e del profilo stratigrafico, volta alla ricerca delle situazioni di maggior pericolo. Tra le sezioni che presentano maggiori pendenze del rilevato arginale sono così state scelte quelle aventi le formazioni superficiali a grana grossa, e quindi maggiormente soggette a fenomeni di filtrazione (sifonamento, piping).

6.2. Rilievo delle sezioni

Per quanto riguarda il rilievo geometrico delle sezioni individuate, abbiamo fatto affidamento a quello restituito nella presentazione dei risultati delle prove tomografiche elettriche.

6.3. Parametri

Riassumiamo di seguito i parametri ottenuti dalle elaborazioni delle prove in situ e dalle analisi di laboratorio, utilizzati ai fini dell'analisi di stabilità.

I parametri d'interesse sono:

- massa volumica media, γ_m ;
- coesione, c' ;
- angolo di resistenza al taglio medio, φ'_m ;
- permeabilità, k .

Materiale	γ_m (kN/m ³)	c'	φ'_m (°)	K (m/s)
Sabbia	16.5	0	33.9	7.62E-05
Sabbia limosa	16.5	0	32.3	5.84E-05
Sabbia con limo debolmente argillosa	17.6	0	32.2	8.25E-05
Limo argilloso sabbioso	18.3	0	32.6	2.50E-04

6.4. Metodi di analisi

Le analisi sono state svolte con due applicativi, in modo da avere un maggiore controllo sui risultati.

- SLIDE di RocScience
- PC-STABL, della Purdue University

In entrambi i casi è stata eseguita la ricerca delle superfici di scorrimento e del relativo coefficiente di sicurezza. Come possibili superfici sono state indagate quelle circolari, secondo il metodo di analisi di Bishop.

6.5. Analisi idrodinamica

Il programma SLIDE incorpora un modulo idrogeologico, capace di studiare il moto di filtrazione attraverso il terreno. Al contrario, PC-STABL non esegue tale calcolo, ma richiede come input la posizione della tavola d'acqua. Pertanto, i risultati dell'elaborazione idrodinamica di SLIDE sono stati usati come dati di partenza sia per la fase di analisi di stabilità vera e propria dello stesso SLIDE, sia per PC-STABL.

Poiché la superficie piezometrica (linea di saturazione) non è nota a priori, il problema è di moto non confinato: anche la sezione filtrante è un'incognita.

Come condizioni al contorno del problema idraulico, sono state studiate due configurazioni:

- problema idrostatico: in ogni punto del reticolo idrodinamico il carico è stato fissato pari alla quota della falda rilevata. Questo caso simula sia il periodo di magra e morbida del fiume, sia l'occorrenza di piene anche intense, ma di breve durata, tali da non innescare fenomeni idrodinamici.
- filtrazione stazionaria: dalla parte del fiume è stata assunta una quota dell'acqua pari alla quota arginale, depurata di un franco di 0.5m. Dal lato della campagna, si è immaginato che l'acqua affiorasse a una distanza tale da non risentire dell'argine e avere moto stazionario.

La scelta del franco è dovuta a considerazioni probabilistiche. Infatti, tale franco permette il deflusso almeno della piena trentennale; è però improbabile che piene aventi tempi di ritorno maggiori si mantengano oltre tale livello per periodi abbastanza lunghi da raggiungere la stazionarietà.

6.6. Analisi di stabilità

Nella fase di analisi di stabilità vera e propria, entrambi i programmi cercano i fattori di sicurezza allo scorrimento di varie superfici ipotetiche, secondo il metodo di Bishop semplificato.

In particolare, il programma SLIDE ricerca i fattori di sicurezza, partendo da una griglia di centri. In prima analisi, si lascia che sia il software stesso a fissare automaticamente la posizione di tale griglia, riservandoci eventualmente di ripetere altri tentativi con la griglia in posizioni diverse.

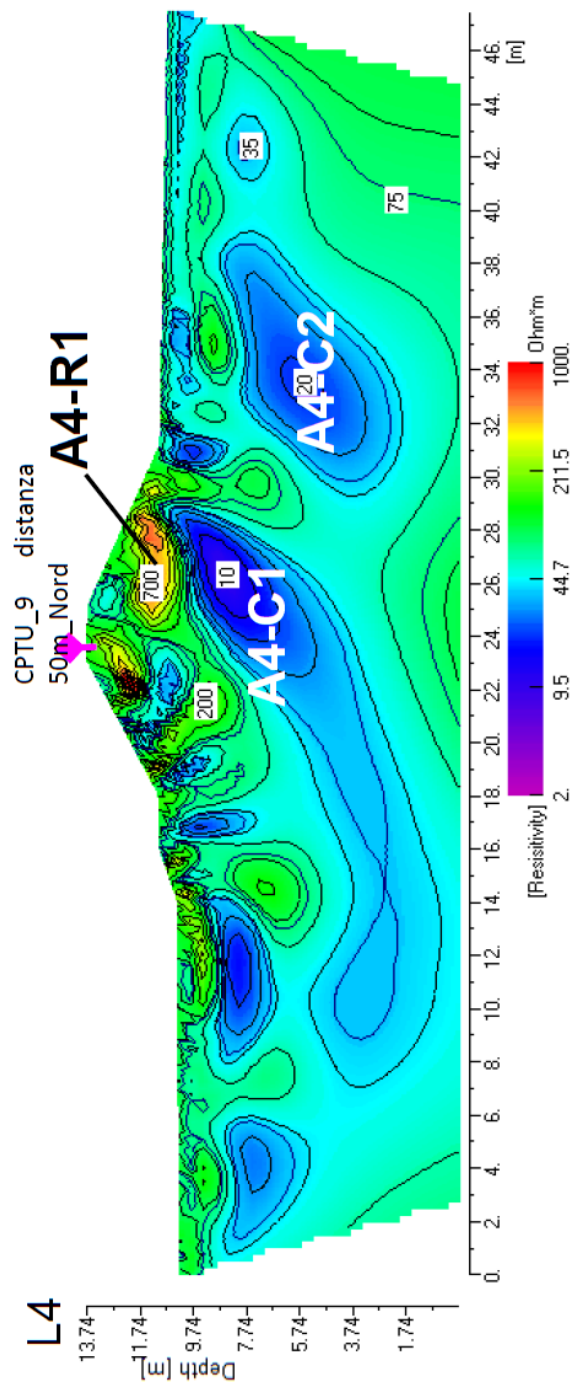
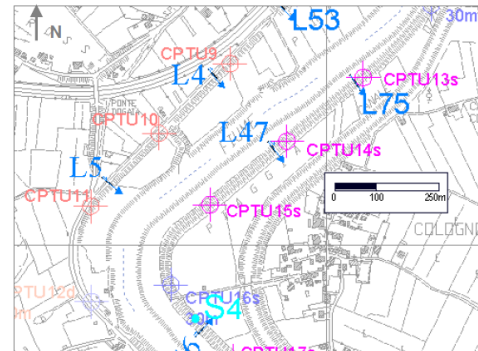
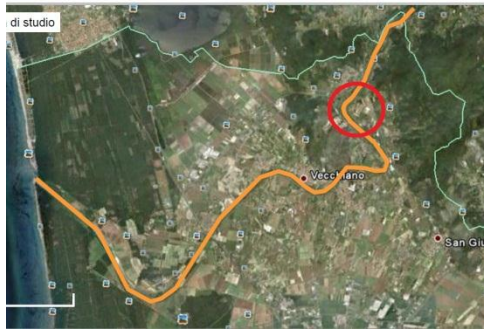
Delle superfici proposte dal programma devono essere scartate tutte quelle che non rappresentano un vero caso d'instabilità, poiché interessano soltanto una porzione piccola e superficiale del rilevato arginale. Per ottenere tale scopo, si impone che le superfici di scorrimento partano dalla sommità arginale, per arrivare al piano di campagna.

Successivamente, tra le superfici di reale interesse, si va a cercare quale presenta il minor fattore di sicurezza. Essa rappresenta la più probabile superficie di scorrimento.

7. Risultati

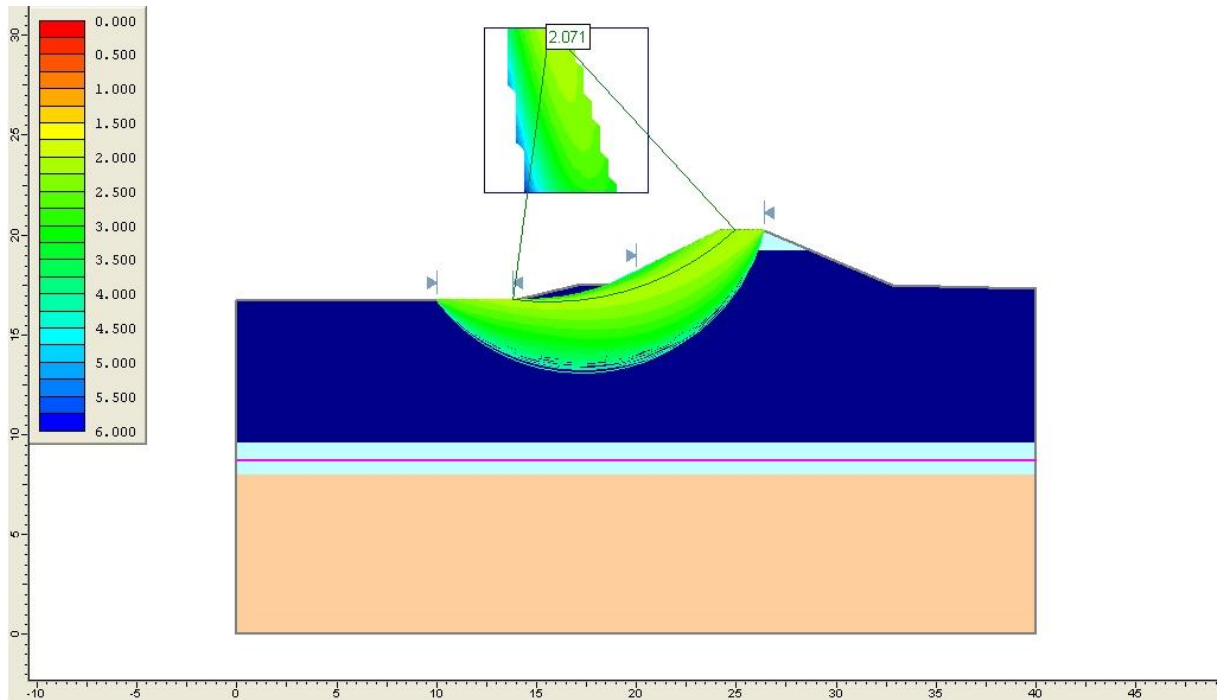
7. Risultati

7.1. Sezione L4



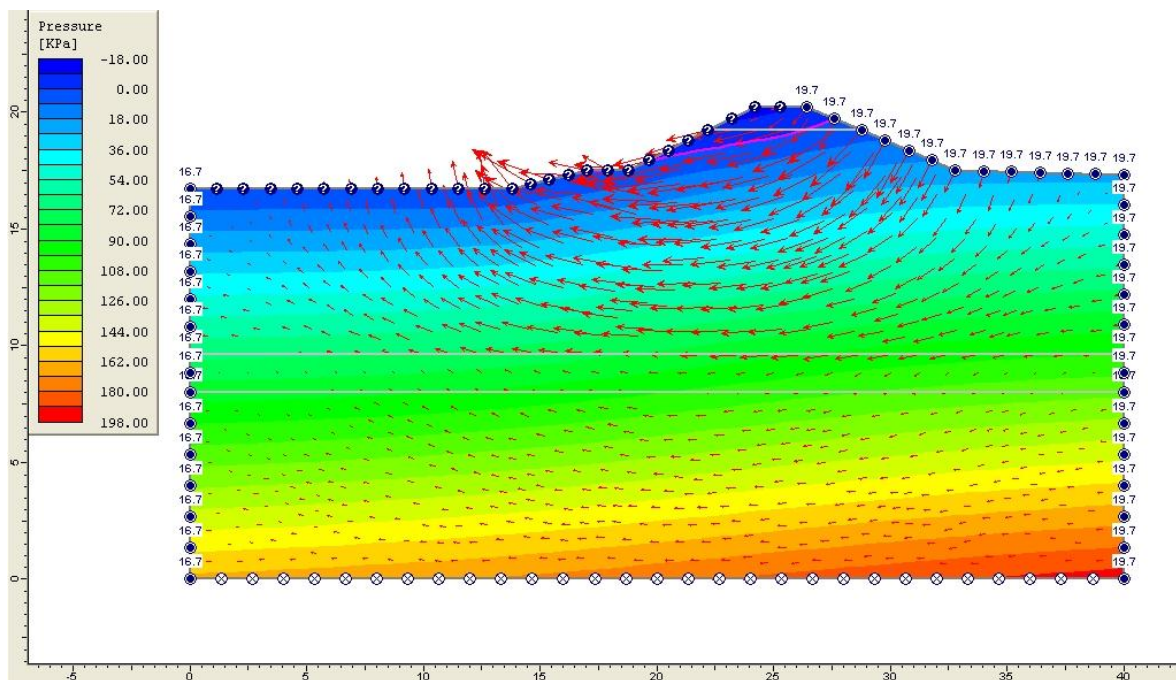
7. Risultati

7.1.1. Sezione L4 – problema idrostatico

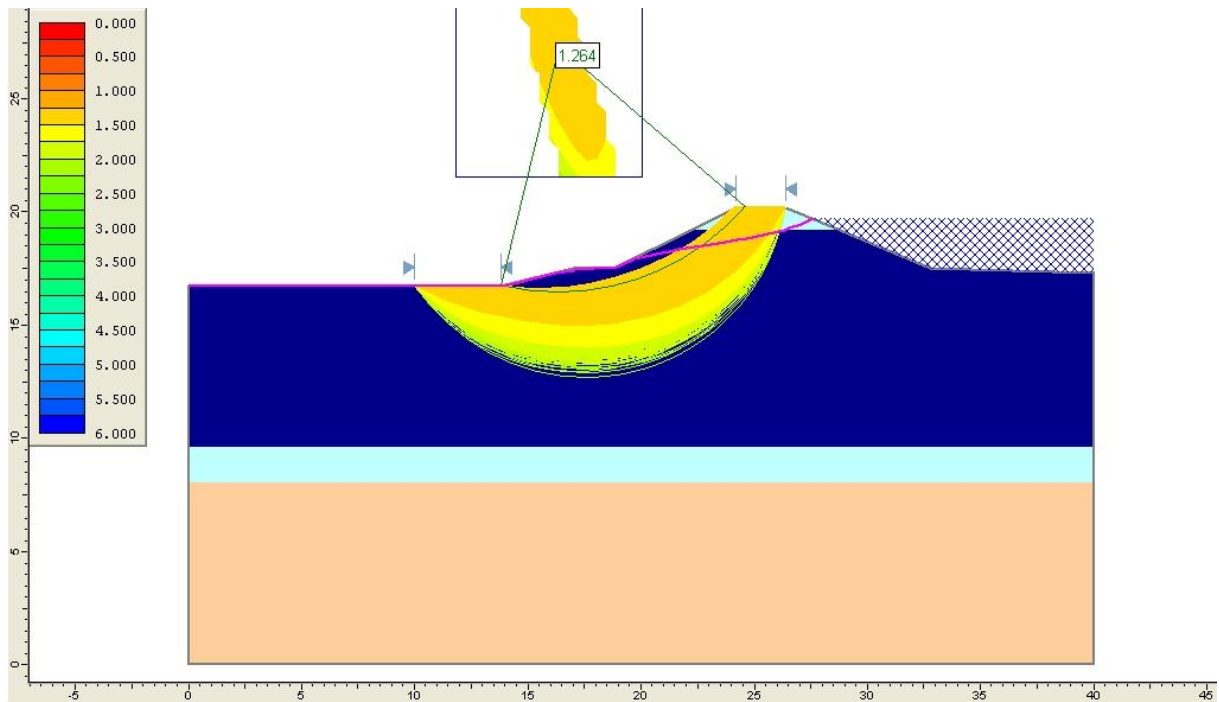


In assenza di filtrazione la sezione risulta abbondantemente stabile, con un fattore di sicurezza di poco superiore a 2. La presenza della banca contribuisce senz'altro all'aumento della stabilità.

7.1.2. Sezione L4 – filtrazione stazionaria



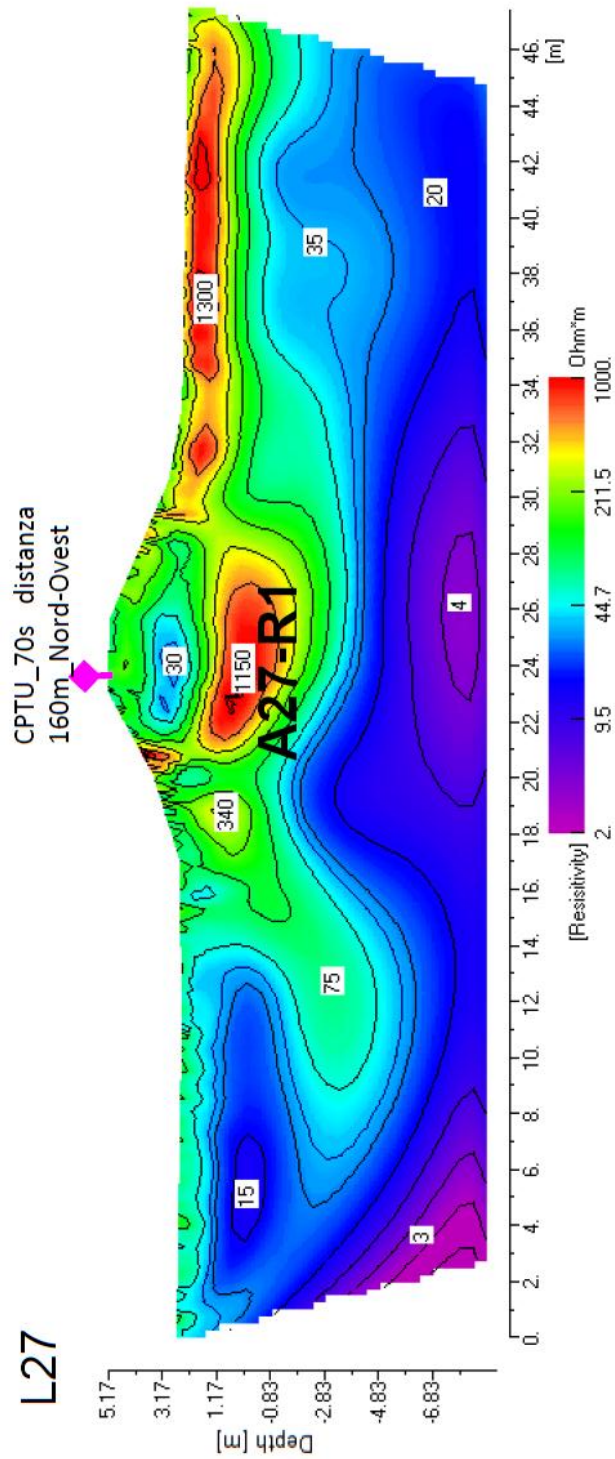
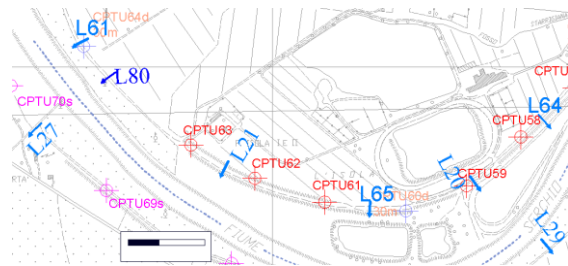
7. Risultati



Anche col moto di filtrazione innescato, la sezione rimane verificata, con un fattore di sicurezza di 1.26.

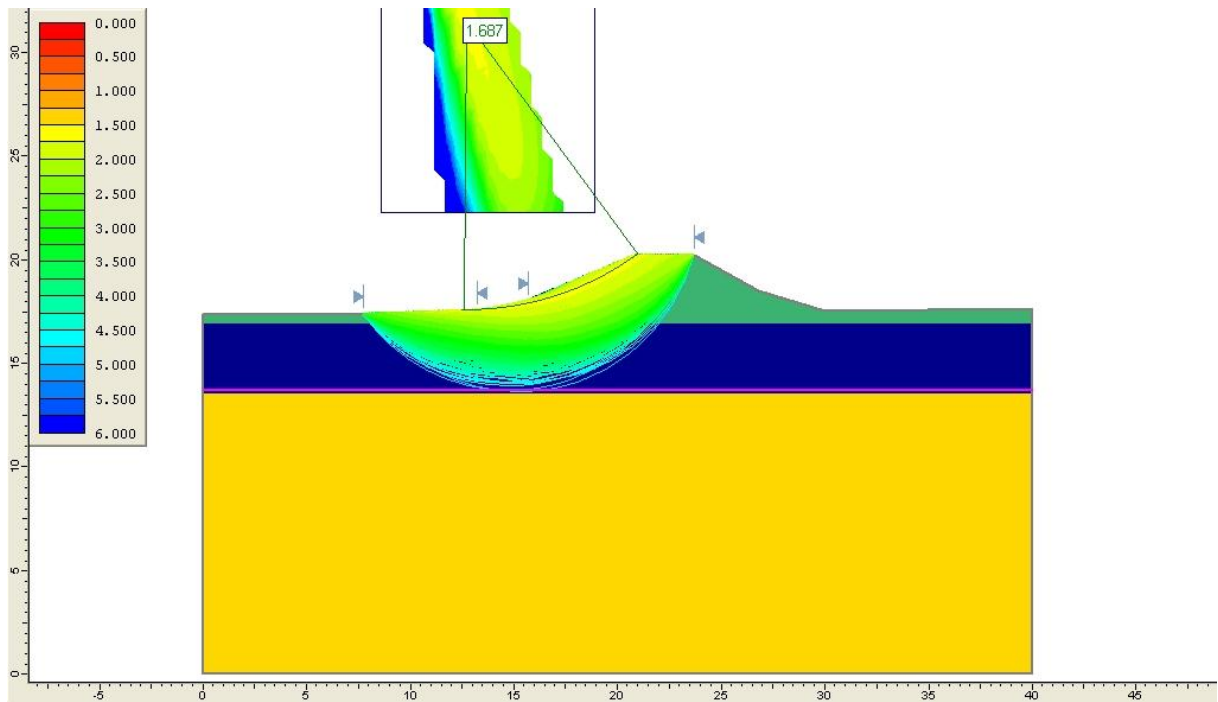
Osserviamo che l'acqua filtrante affiora sul paramento di valle già più in alto della banca. Non si ha una sensibile risalita, e quindi un sensibile aumento delle pressioni interstiziali per fenomeni dinamici.

7.2. Sezione L27



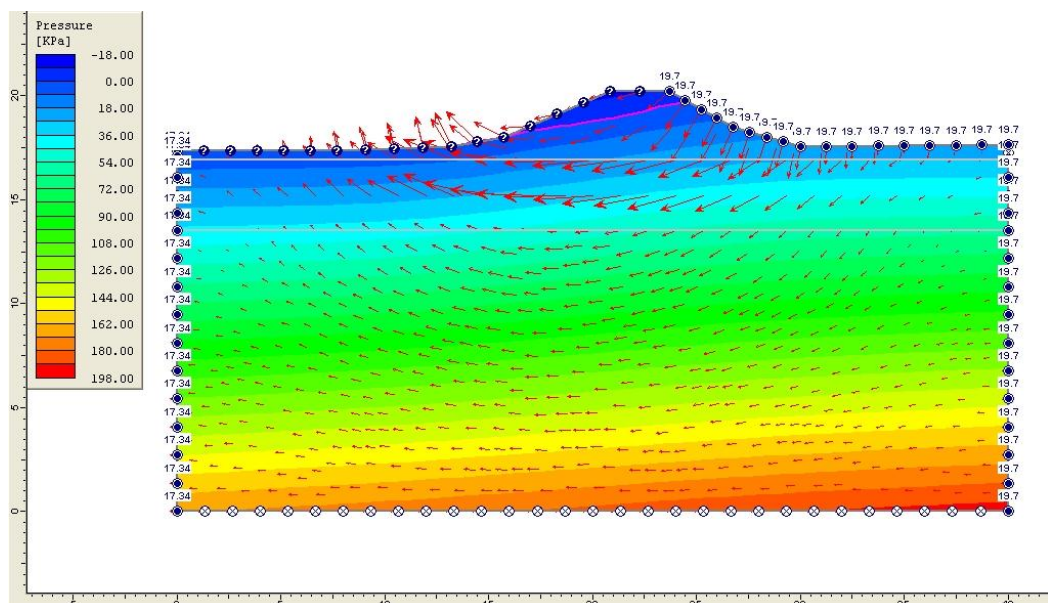
7. Risultati

7.2.1. Sezione L27 – problema idrostatico

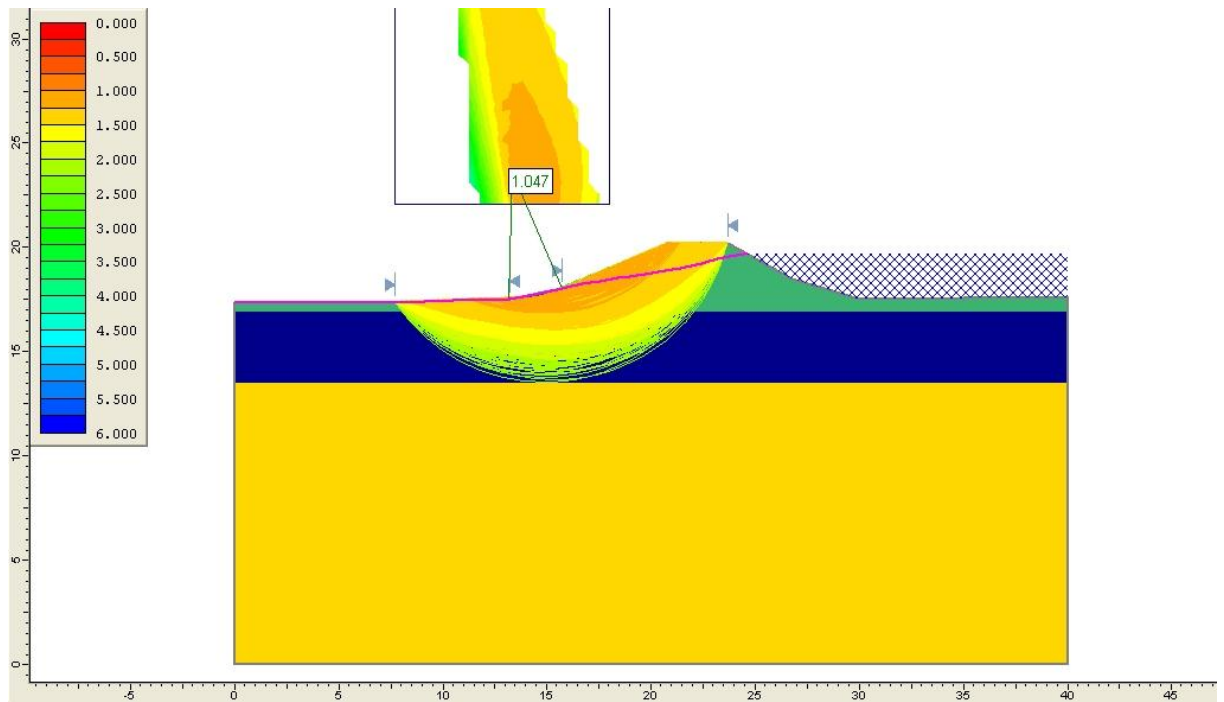


Le superfici di scorrimento a minor fattore di sicurezza (circa 1.7) interessano completamente lo strato più superficiale del terreno, dato da sabbie con limo debolmente argillose. Il fattore di sicurezza moderatamente alto rende tranquilli circa la stabilità del rilevato in questa configurazione.

7.2.2. Sezione L27 – filtrazione stazionaria



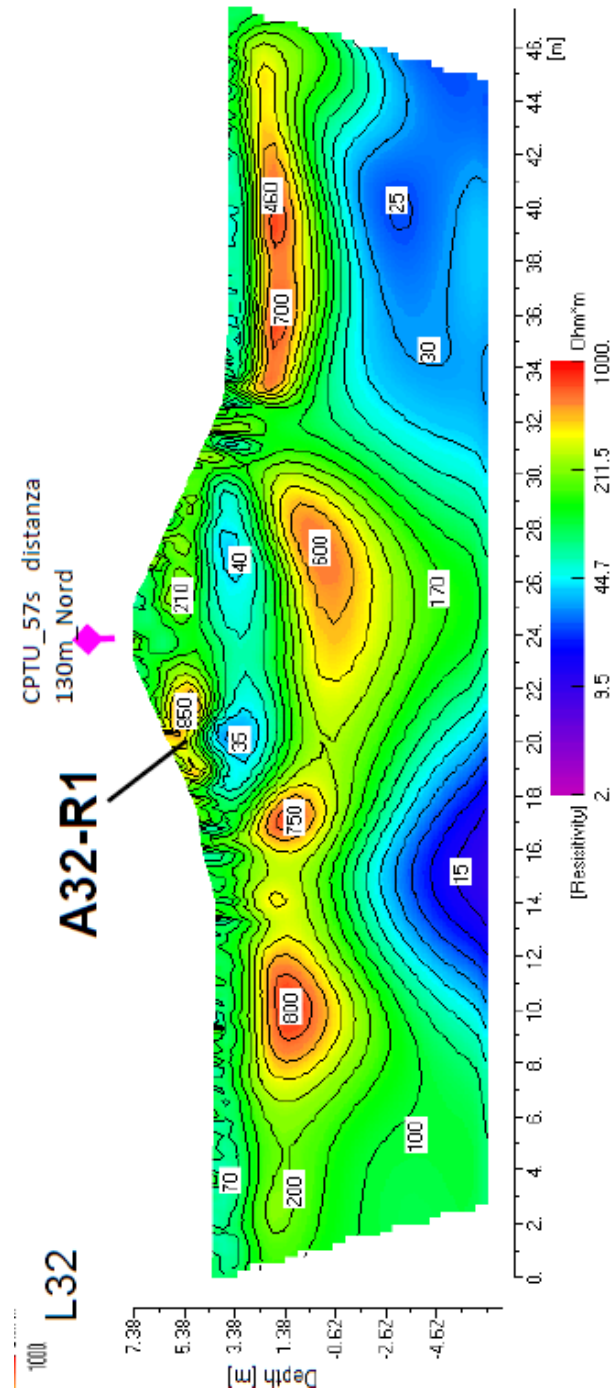
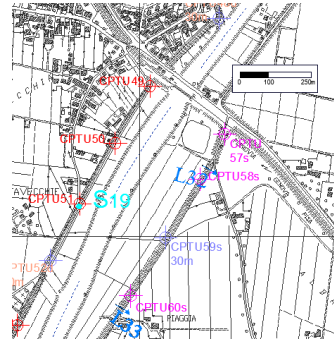
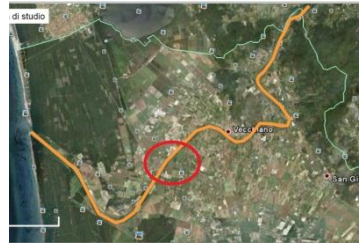
7. Risultati



In questo caso la sezione risulta appena verificata (fattore di sicurezza minimo di 1.05). Anche trascurando la superficie più instabile, che non interessa globalmente l'argine, ci sono numerose superfici significative con fattori di sicurezza compresi entro 1.25.

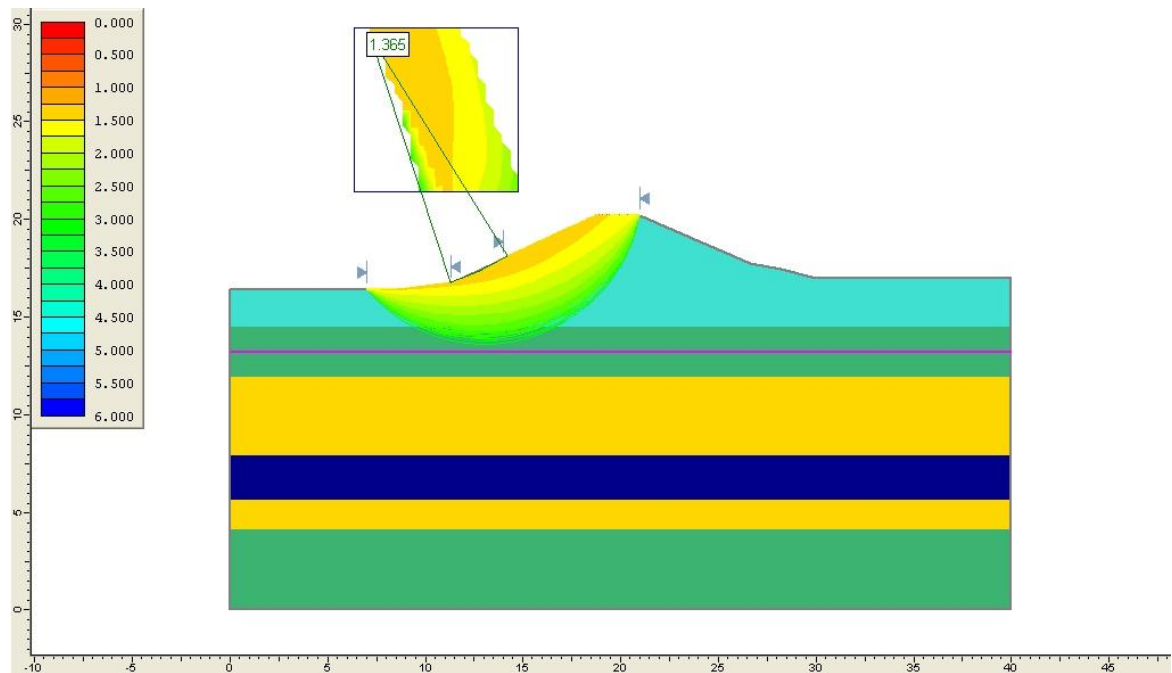
Possiamo quindi dire che la sezione risulta stabile, ma meriterebbero indagini più approfondite, per studiare eventuali vulnerabilità locali.

7.3. Sezione L32



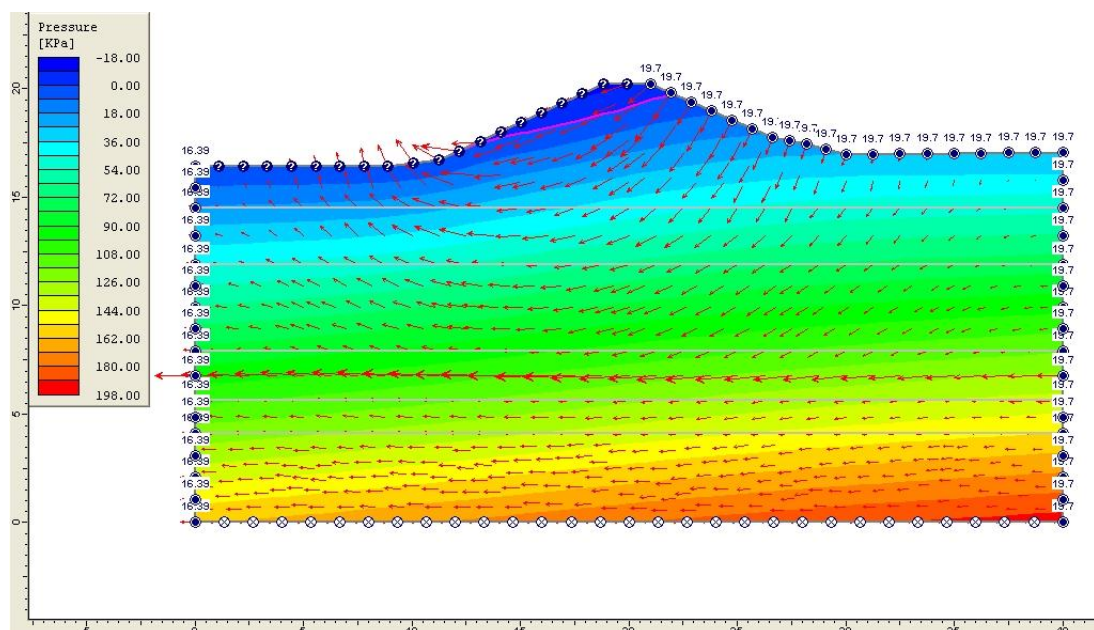
7. Risultati

7.3.1. Sezione L32 – problema idrostatico

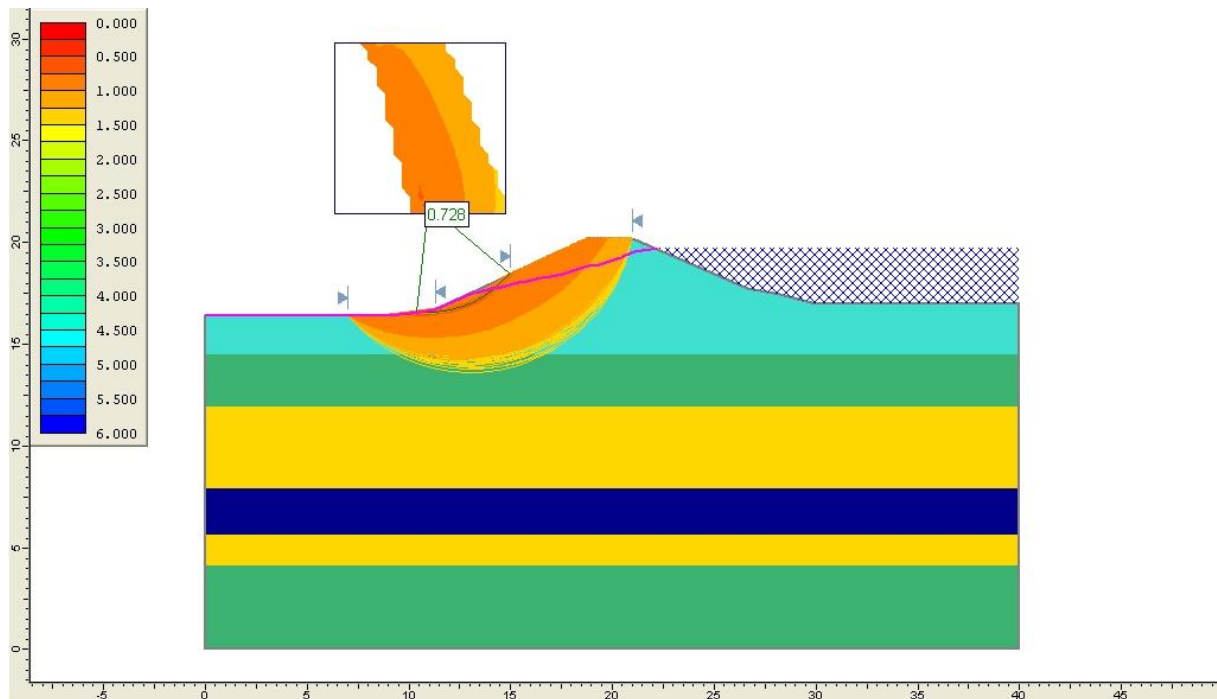


Tutte le superfici di scorrimento con fattori di sicurezza di significativo interesse (minori di 2) risultano comprese entro il primo strato di terreno, che è sabbia limosa. La sezione è verificata, con un moderato margine di sicurezza (fattore di sicurezza minimo: 1.37).

7.3.2. Sezione L32 – filtrazione stazionaria

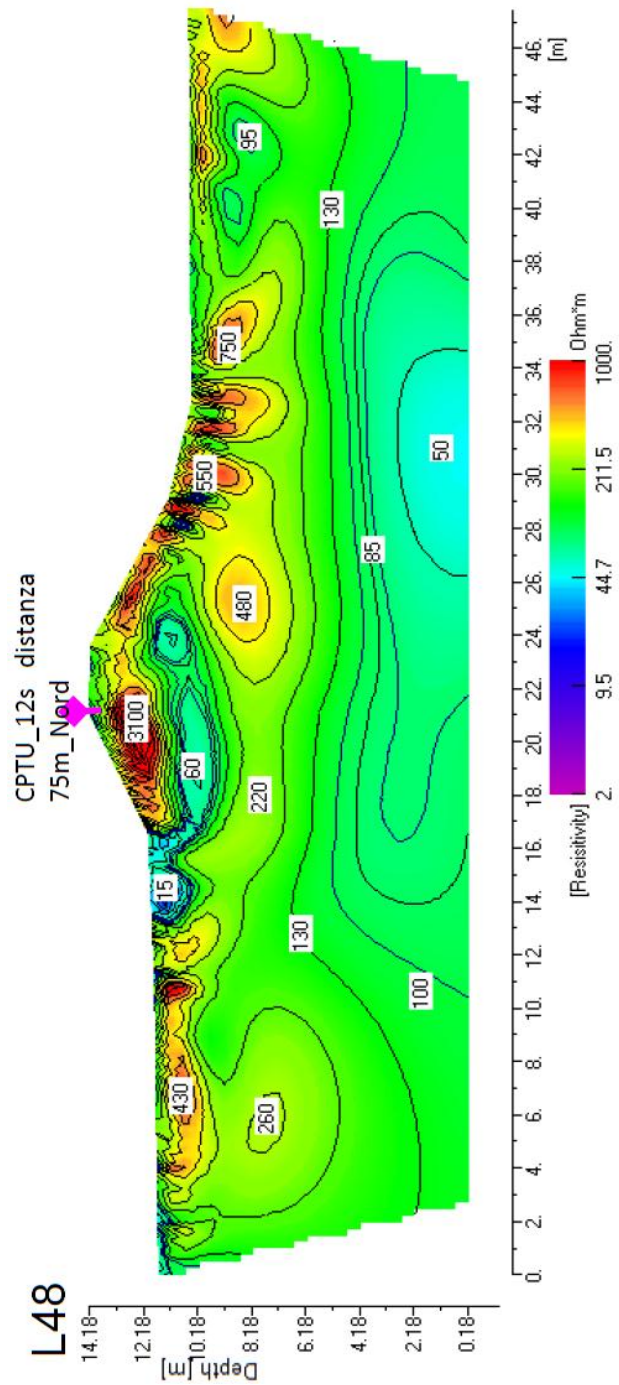
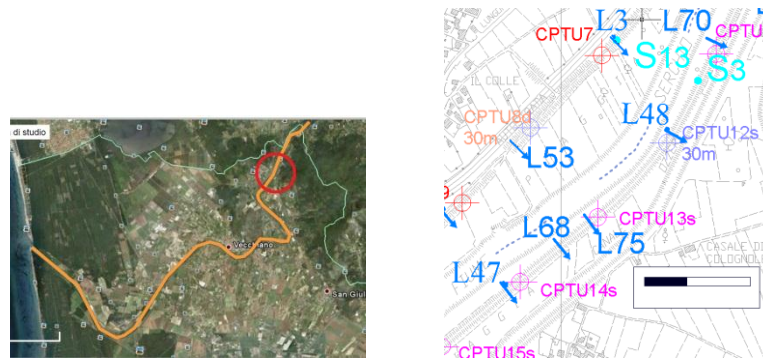


7. Risultati



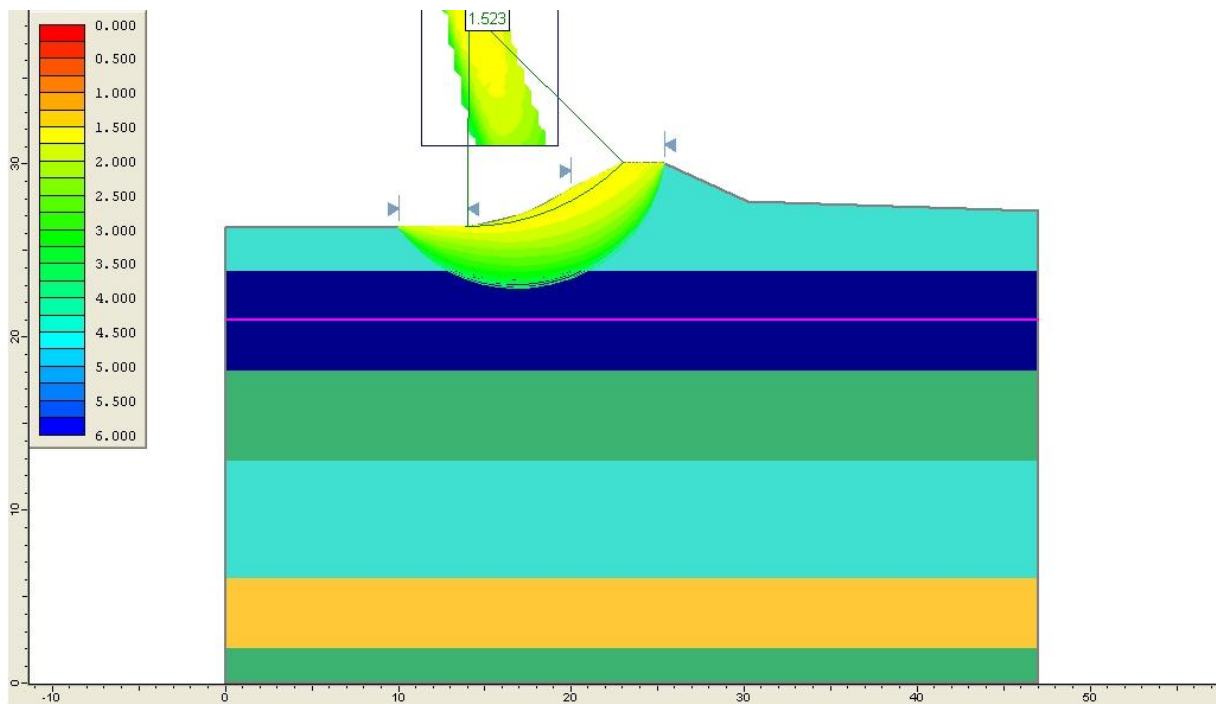
La sezione risulta non verificata. Infatti, oltre alla superficie riportata con fattore di sicurezza di 0.73, che per noi è dotata di scarso interesse, poiché non coinvolge l'interezza dell'argine, è presente tutta una fascia di superfici sensate, aventi fattori di sicurezza comunque minori di 1. Questo è dovuto in primis all'elevata permeabilità del materiale superficiale (sabbia limosa), che conferisce all'acqua di filtrazione una velocità considerevole, andando così a ridurre le tensioni efficaci.

7.4. Sezione L48



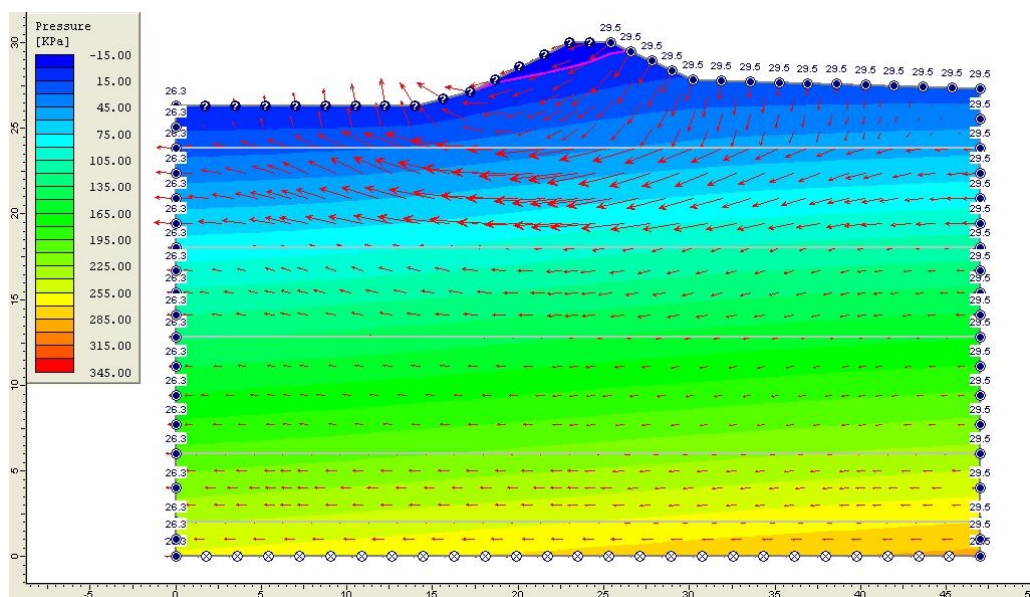
7. Risultati

7.4.1. Sezione L48 – problema idrostatico

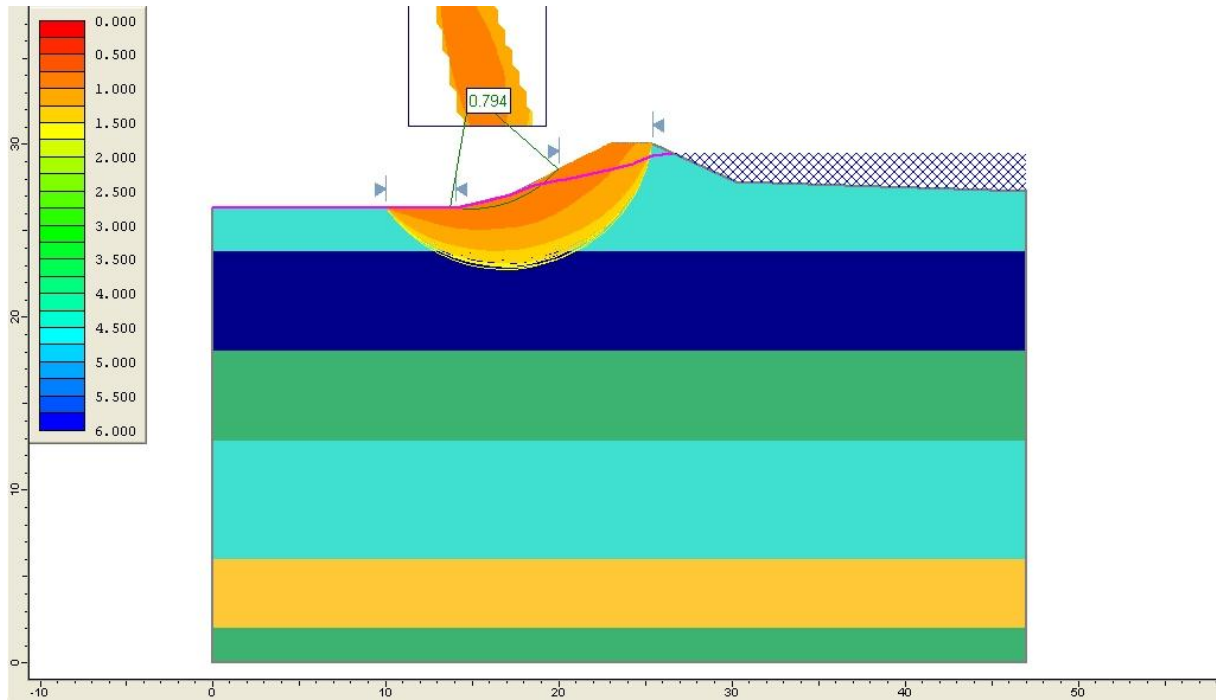


Il programma riporta come critica una superficie già dotata di significato fisico. Il fattore di sicurezza della sezione è quindi dato dal valore di 1.52 rappresentato a schermo. In questa configurazione non si hanno fenomeni d'instabilità.

7.4.2. Sezione L48 – filtrazione stazionaria



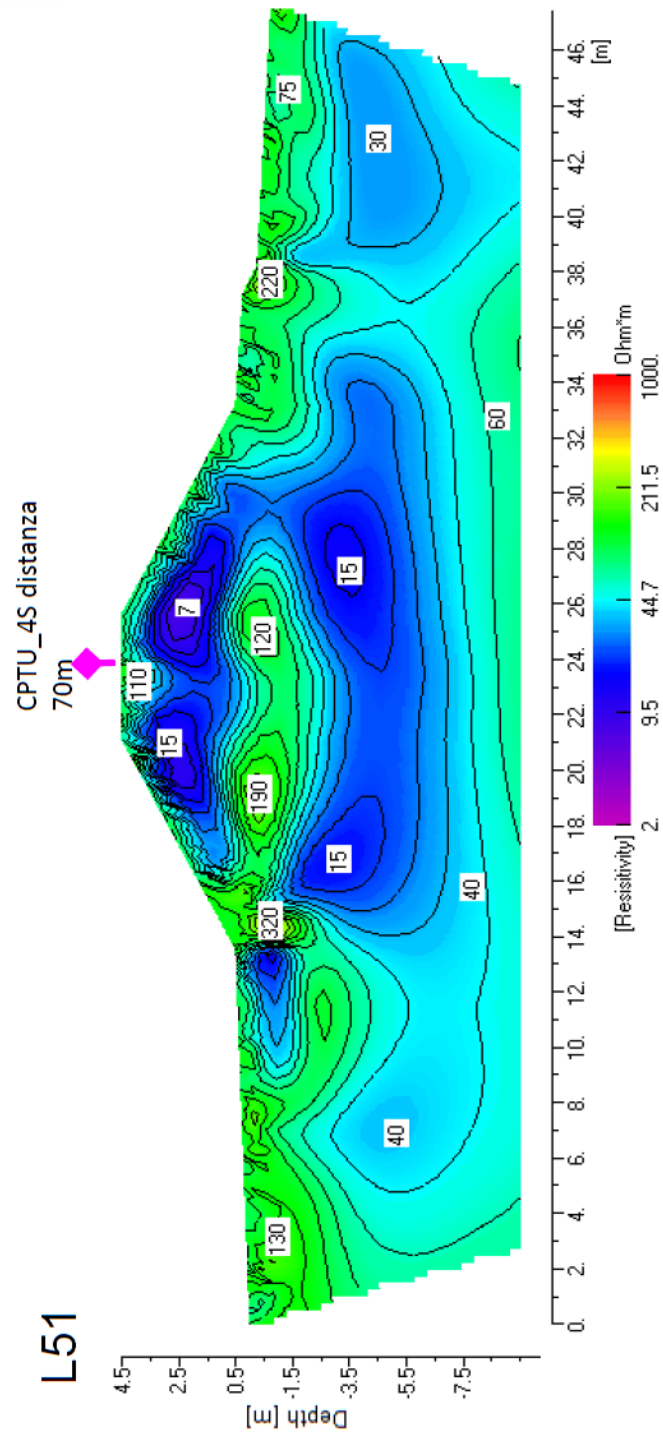
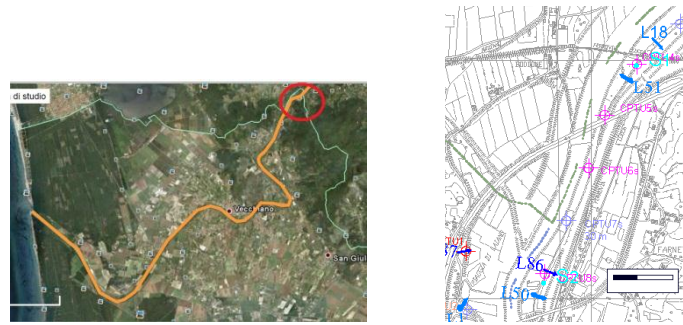
7. Risultati



La sezione risulta non verificata. Infatti, come per la sezione precedente (L32), oltre alla superficie riportata con fattore di sicurezza minimo di 0.79, è presente tutta una fascia di superfici sensate, aventi fattori di sicurezza comunque minori di 1.

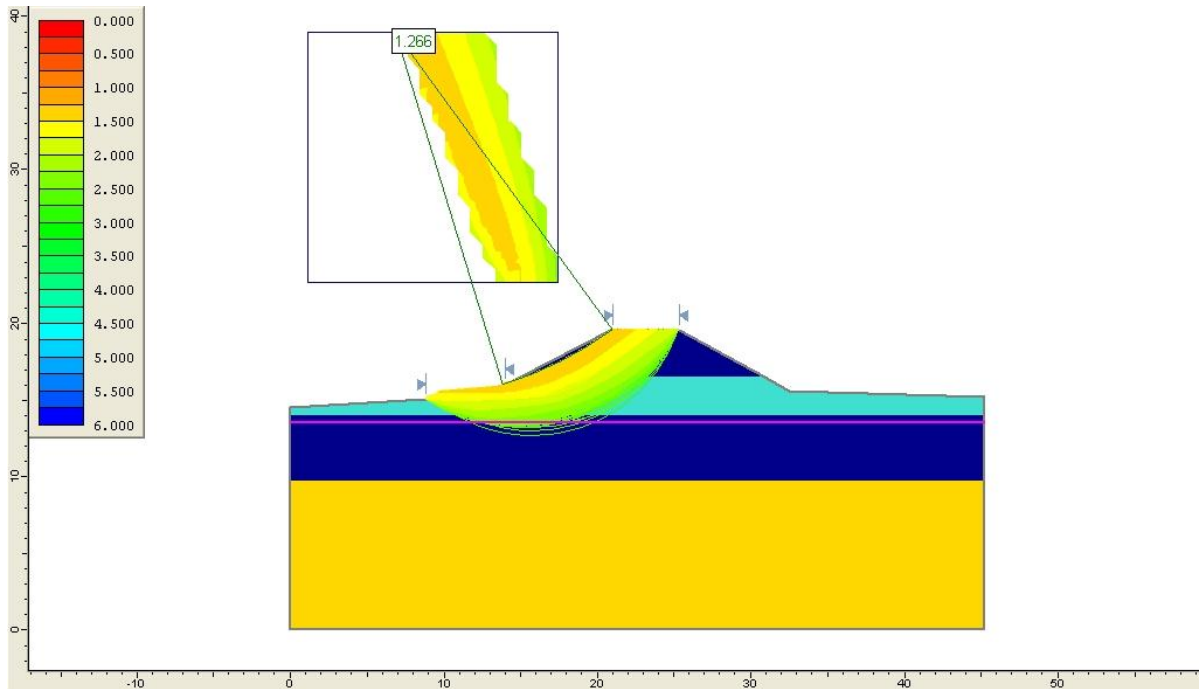
Si nota che anche in questo caso il materiale superficiale è a grana medio-grossa (sabbia limosa), ossia più sensibile a fenomeni d'instabilizzazione per sifonamento.

7.5. Sezione L51



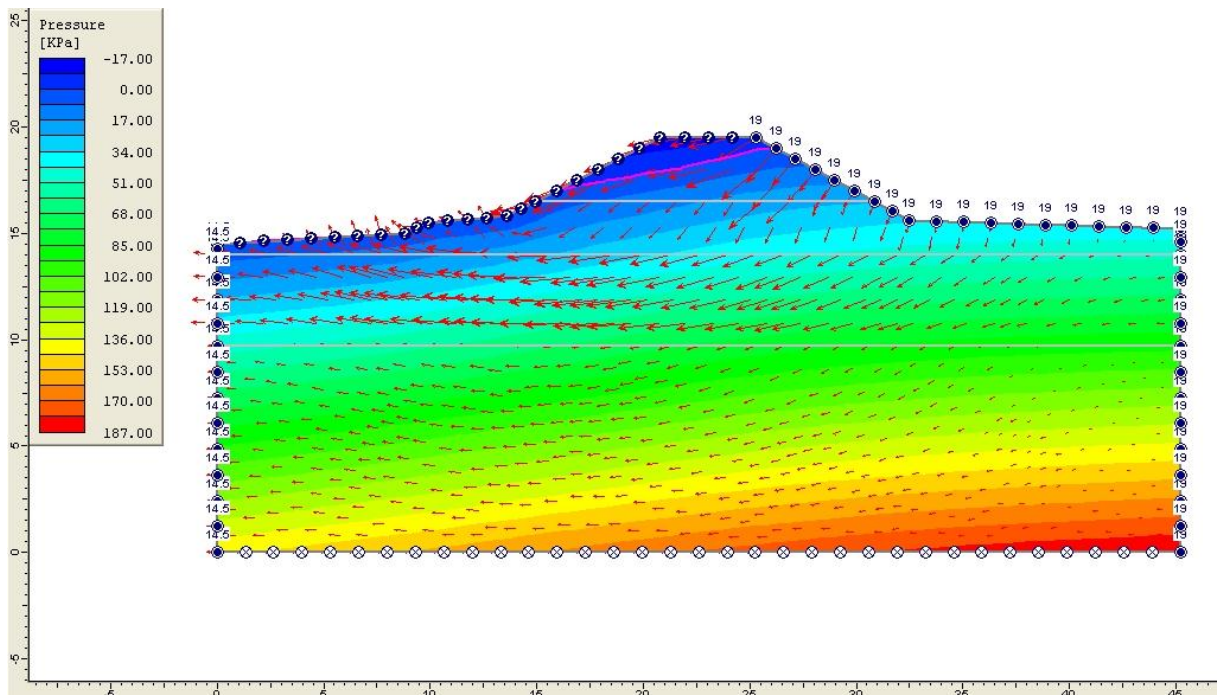
7. Risultati

7.5.1. Sezione L51 – problema idrostatico

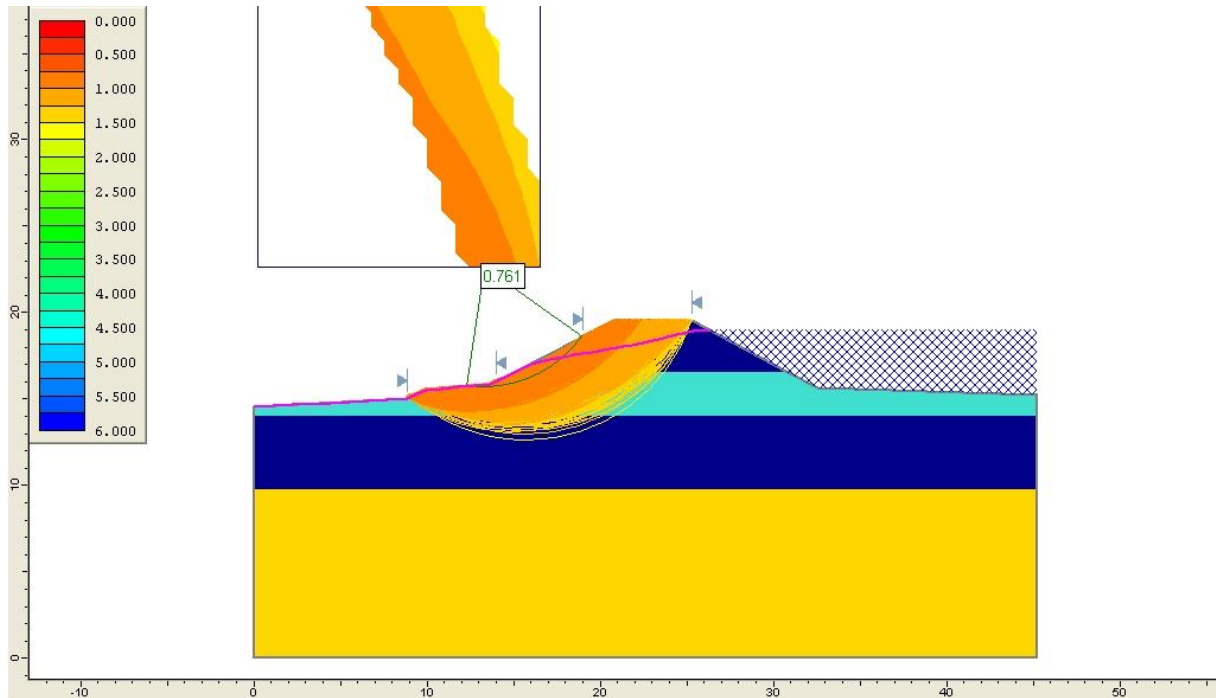


Per il problema idrostatico la sezione risulta verificata, anche se non con ampio margine. Infatti, il fattore di sicurezza minimo vale 1.27.

7.5.2. Sezione L51 – filtrazione stazionaria



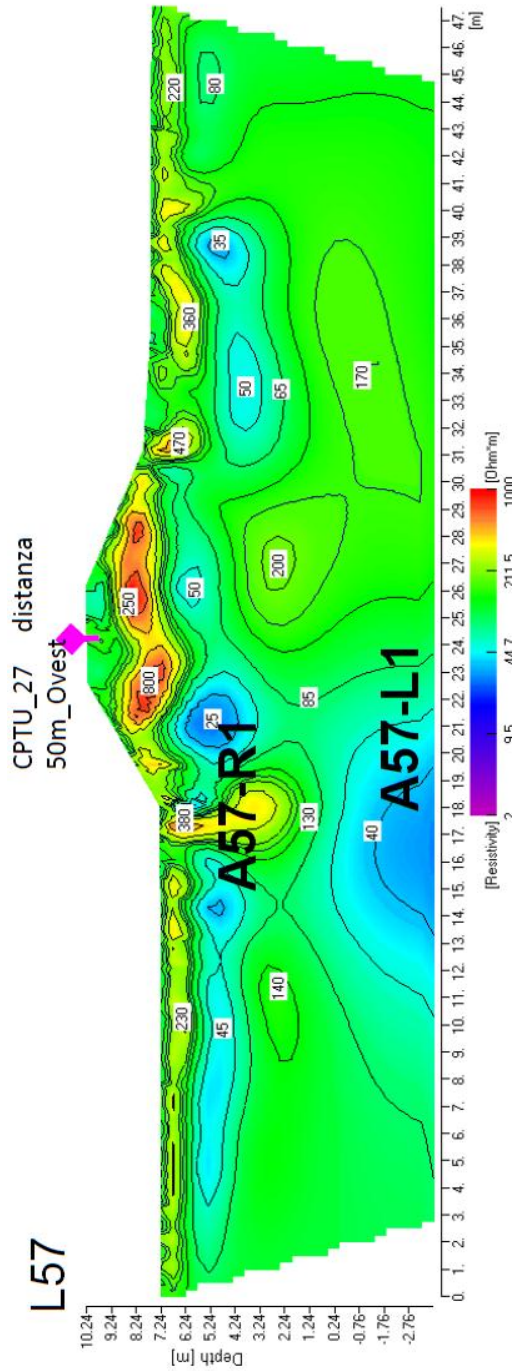
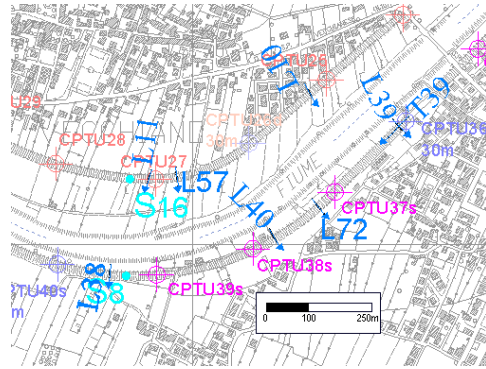
7. Risultati



La sezione risulta non verificata. Vediamo infatti la presenza di un'ampia fascia di superfici di scorrimento con fattore di sicurezza inferiore a 1, che interessano buona parte del rilevato arginale.

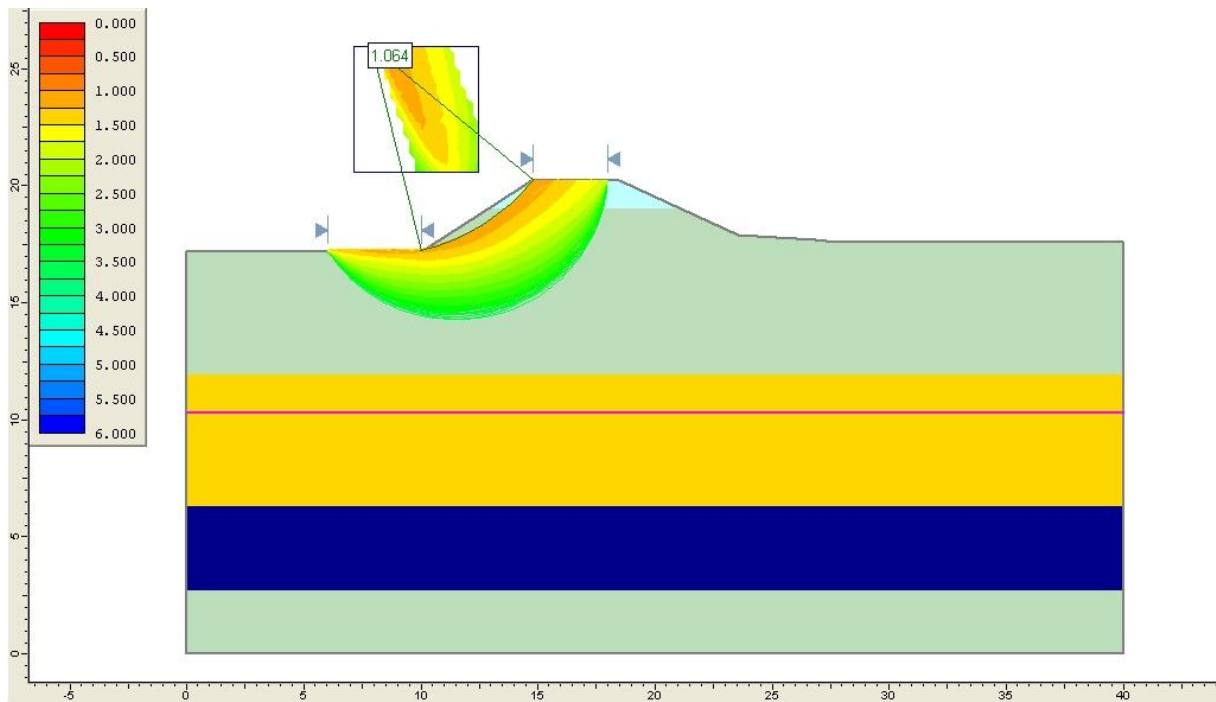
La particolarità del problema è data dal fatto che la linea di saturazione s'interseca con la scarpata del rilevato in una posizione piuttosto alta e la filtrazione ha un moto prevalentemente orizzontale. Nonostante ciò, la stabilità della presente sezione risulta gravemente compromessa.

7.6. Sezione L57



7. Risultati

7.6.1. Sezione L57 – problema idrostatico



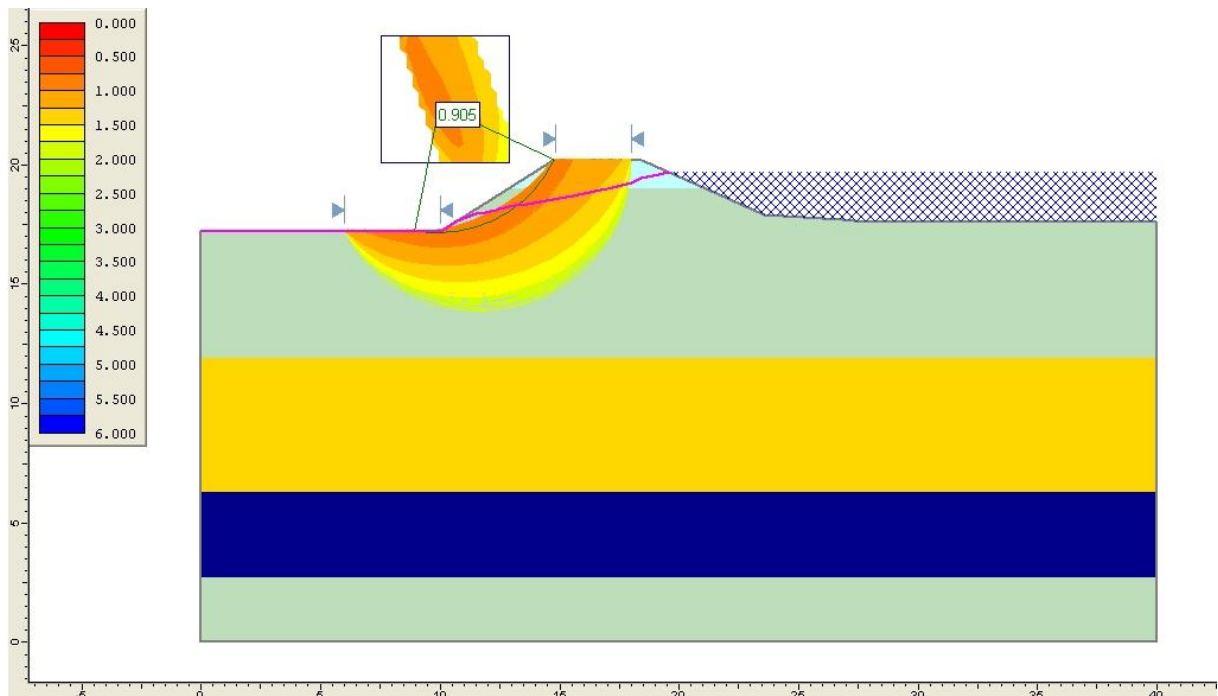
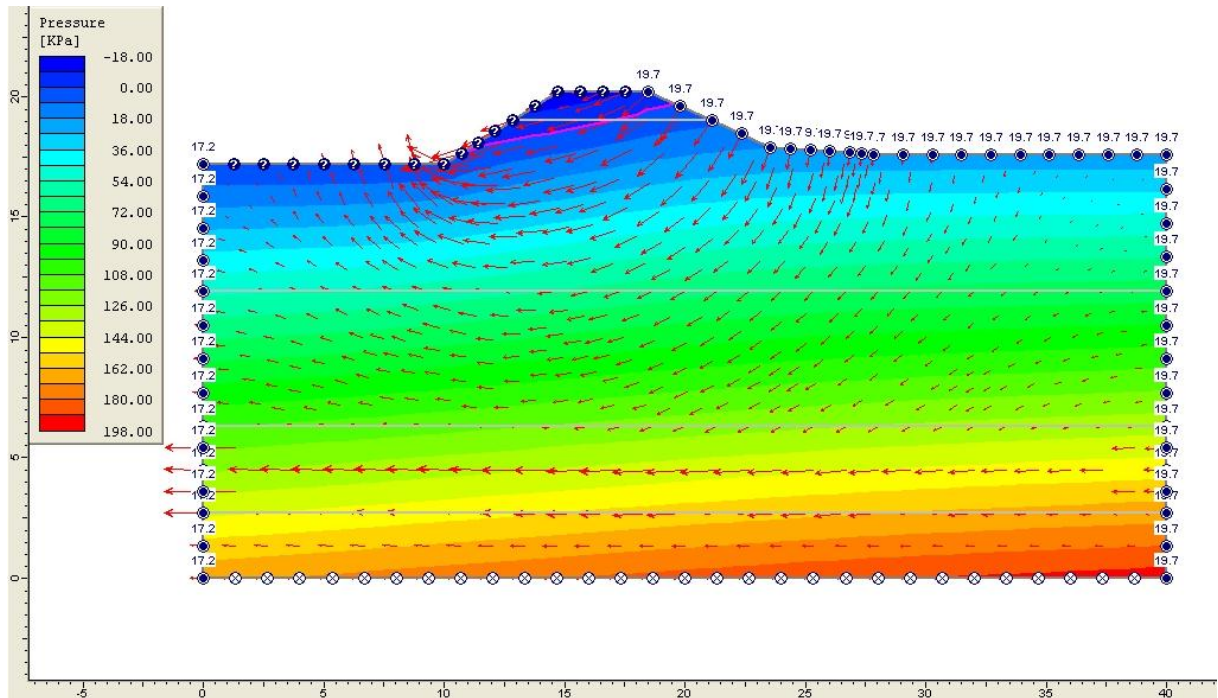
Già nel caso idrostatico, la sezione risulta verificata solo per poco. Infatti, il fattore di sicurezza minimo riportato vale 1.06.

La scarsa stabilità della sezione anche in condizioni idrostatiche è senz'altro dovuta alla concorrenza di due fenomeni:

- moderata resistenza del materiale principalmente interessato (sabbia con limo debolmente argilloso);
- elevata pendenza della scarpata lato campagna.

7. Risultati

7.6.2. Sezione L57 – filtrazione stazionaria



La sezione non è verificata. Si verifica infatti un fattore di sicurezza minimo di 0.91, che resta comunque inferiore all'unità, ma non è esageratamente basso; soprattutto, non è basso quanto potevamo aspettarci, vista la scarsa stabilità mostrata dalla stessa sezione nel caso idrostatico.

7.7. Fattori di sicurezza - resoconto



Figura 49. Ubicazione delle sezioni indagate.

Riportiamo di seguito i fattori di sicurezza ottenuti nelle diverse sezioni per le varie analisi eseguite.

Sezione	SLIDE		PC-STABL
	Problema idrostatico	Filtrazione stazionaria	Filtrazione stazionaria
L4	2.07	1.26	1.40
L27	1.69	1.05	1.19
L32	1.37	0.73	0.99
L48	1.52	0.79	1.02
L51	1.27	0.76	1.09
L57	1.06	0.91	0.93

Dalla tabella precedente, si osserva che i valori riportati da PC-STABL sono sistematicamente maggiori di quelli di SLIDE. In assenza di uno studio maggiormente approfondito, si può quindi assumere che il reale fattore di sicurezza sia un valore medio tra i due ottenuti coi diversi programmi.

Pertanto, nonostante che le sezioni L48 e L51 risultino di poco verificate per PC-STABL, è lecito, nonché cautelativo, supporre che esse siano instabili.

Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi è stata studiata la stabilità degli argini del fiume Serchio, nell'area compresa entro la provincia di Pisa. Lo studio muove dall'alluvione del dicembre 2009, dovuta al collasso arginale verificatosi in tre diversi punti della sponda destra del fiume.

Dopo un primo studio globale del bacino imbrifero, della sua morfologia e delle sue peculiarità pluviometriche, sono stati elaborati i risultati ottenuti da un'approfondita campagna d'indagine, comprendente prove in situ e analisi di laboratorio. In situ sono stati eseguiti sondaggi geognostici, misure di soggiacenza della falda idrica, tomografie geoelettriche, prove di permeabilità e prove penetrometriche statiche con piezocono. Per i campioni estratti durante i sondaggi, in laboratorio sono state misurate la granulometria, la massa volumica e, mediante prova triassiale, la resistenza.

L'elaborazione di tutti questi dati ha permesso di ricostruire un modello geologico e geotecnico dell'argine per tutto il suo sviluppo longitudinale, dal confine con la provincia di Lucca sino alla foce a Marina di Vecchiano.

Dall'osservazione congiunta della geometria delle sezioni arginali e della stratigrafia ottenuta, sono state scelte sei sezioni trasversali sulle quali eseguire le analisi di stabilità.

Le analisi sono state condotte con due programmi di calcolo agli elementi finiti secondo il metodo di equilibrio limite globale semplificato di Bishop, in due diverse configurazioni di flusso idrico sotterraneo: problema idrostatico senza filtrazione e problema a filtrazione stazionaria.

Nel caso idrostatico la verifica di stabilità è soddisfatta per ogni sezione; soltanto la L57 riporta un valore del fattore di sicurezza prossimo all'unità (1.06).

Ben diversa è la situazione nel caso di filtrazione stazionaria. In questa configurazione, infatti solamente due sezioni (L4 e L27) risultano verificate per entrambi i software; altre due (L32 e L57) non soddisfano la verifica per nessuno dei due programmi, mentre le sezioni L48 e L51 presentano fattore di sicurezza inferiore all'unità per SLIDE e maggiore di 1, seppur di poco, per PC-STABL. Possiamo quindi

dire che quattro sezioni sulle sei indagate non rispettano le verifiche di stabilità richieste. Questo dato rivela che l'argine è a rischio per uno sviluppo notevole.

Si può quindi affermare che la stabilità dell'argine non è minata tanto dall'entità della portata della piena, quanto dalla sua durata. I problemi d'instabilità occorrono, infatti, soltanto al realizzarsi delle condizioni stazionarie del moto di filtrazione; per raggiungere tali condizioni è necessario che il livello idrometrico si mantenga elevato a lungo.

In conclusione, gli argini oggetto d'indagine risultano stabili per piene brevi di qualsiasi portata, purché inferiore alla capacità di deflusso. Se però si dovesse presentare nuovamente una piena simile all'evento del dicembre 2009, caratterizzata cioè da portate anche non esageratamente elevate, ma che si mantengono alte per una durata notevole, numerosi punti dello sviluppo dell'argine potrebbero andar soggetti a fenomeni di collasso.

Ringraziamenti

È difficile riassumere in poche righe i ringraziamenti dovuti a tutti coloro che in qualche modo hanno collaborato per farmi raggiungere questa meta. Difficile sia perché costoro sono veramente tanti, sia perché ciascuno ha dato un contributo tutto suo.

Per lo sviluppo della tesi, non posso che cominciare col ringraziare i professori **Diego Lo Presti** e **Nunziante Squeglia** che, con la maestria di direttori d'orchestra, hanno coordinato il lavoro delle persone coinvolte in questo progetto, rendendolo organico e completo.

A seguire, ringrazio

- l'ingegner **Barbara Cosanti** per la disponibilità e la pazienza che ha dimostrato nel lavoro fianco a fianco con noi laureandi;
- il geometra **Stefano Giusti**, per non aver mai fatto mancare la sua presenza e per aver alleggerito la fatica del lavoro con la sua simpatia;
- la dottoressa **Alessia Pierotti**, perché non si è mai tirata indietro nella spartizione del lavoro, accollandosi spesso più di quanto le spettasse.

Tengo anche a ricordare le persone che, pur essendo rimaste dietro le quinte, mi hanno comunque dato un sostegno fondamentale in questi cinque anni. Ringrazio:

- quei **docenti** appassionati al loro lavoro, che mi hanno trasmesso il loro entusiasmo per il mondo dell'ingegneria;
- **Giuseppe** e **Francesco Nucara**, dello studio Strutture, per avermi dato l'occasione di passare dalla teoria alla pratica;
- **Matteo Lelli**, compagno di studio per esami più e meno importanti, perché camminare in compagnia è meno faticoso;
- **Alessandro Cini**, per un'amicizia che non è mai venuta meno;
- **Roberto Sposito**, guida sempre presente nel bisogno;
- i miei **genitori**, che per primi hanno creduto in me e investito su di me; che mi hanno saputo indirizzare nella mia vita, sino a questo traguardo;

9. Ringraziamenti

- mio fratello **Ranieri**, che mi ha insegnato a barcamenarmi per rimanere a galla nel mondo dispersivo dello studio universitario;
- la mia fidanzata **Simona**, che non ha mai smesso di fidarsi di me; che mi ha sostenuto nella fatica, incoraggiato nello sconforto, motivato nella stanchezza; che si è ascoltata i ripassi di tutte le materie, tanto da saperne ormai anche più di me. La ringrazio per i passi fatti finora e per quelli che faremo nel cammino di una vita insieme.

Bibliografia

- [0] Milano V. – *Costruzioni idrauliche – Sistemazioni dei corsi d’acqua*.
- [1] Lancellotta R. - *Geotecnica*, 2004.
- [2] Lancellotta R., Calavera J. - *Fondazioni*, 1999.
- [3] Cestari F. – *Prove geotecniche in sito*, 1990.
- [4] Jamiolkowski, Lancellotta, Tordella, Battaglio – *Undrained strenght from CPT*, 1982.
- [5] ASTM - *Standards Tests Method for Deep Quasi-Static, Cone and Friction-Cone Penetration Tests of Soil*, 1986.
- [6] Viggiani C. - *La Misura delle Pressioni Neutre In Sito*, 1974.
- [7] Lo Presti C., Meisina, Squeglia N. - *Applicabilità di prove penetrometriche statiche nella ricostruzione del profilo stratigrafico*, 2009.
- [8] Viggiani C., Pepe - *Il sottosuolo della Torre*, 2006.
- [9] A.G.I - *Raccomandazioni sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche*, 1977.
- [10] Viggiani C. - *Fondazioni*, 2003.
- [11] Adami A. - *Criteri generali di progetto di un argine*, 1997.
- [12] Da Deppo L. - *Moderni criteri di sistemazione degli alvei fluviali*, 1995.
- [13] Bishop - *The use of the slip circle in the stability analysis of slopes*, 1955.