



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze  
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
IN  
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**UN'ANALISI NUMERICA CRITICA DELLA  
FRANA DI CARRÈ (VI)**

*Relatore: Prof. Mario Floris*  
*Correlatori: Prof. Rinaldo Genevois*  
*Prof.ssa Claudia Meisina*  
*Dott. Michele Secco*

*Laureando: Sandro Zanchetti*

ANNO ACCADEMICO 2015 / 2016



# Indice

Introduzione.....	5
1 Inquadramento geografico e geologico .....	7
1.1 Inquadramento geologico di dettaglio .....	11
1.2 Descrizione del fenomeno gravitativo .....	13
2 Metodologie.....	15
2.1 Prove in sito .....	15
2.1.1 Perforazione a carotaggio continuo .....	15
2.1.2 Prove penetrometriche DPSH .....	17
2.1.3 Scavo trincea .....	20
2.1.4 Indagine sismica a rifrazione.....	21
2.1.5 Inclinatori .....	22
2.2 Prove di laboratorio .....	24
2.2.1 Analisi granulometrica .....	24
2.2.2 Limiti di Atterberg.....	26
2.3 Analisi mineralogiche .....	30
2.3.1 Aspetti teorici .....	30
2.3.2 Preparazione del campione.....	32
2.3.3 Trattamento con glicole etilenico .....	37
3 Risultati .....	39
3.1 Caratteristiche fisiche .....	39
3.2 Caratteristiche mineralogiche .....	51
3.3 Caratteristiche di resistenza .....	60
3.4 Indagine sismica a rifrazione .....	61

3.5	Inclinometri .....	63
3.6	Modello geologico-tecnico .....	65
4	Modellazione numerica .....	69
4.1	Modellazione con FLAC 7.0 .....	69
4.2	Modellazione Sezione 1 .....	72
4.2.1	Falda bassa .....	74
4.2.2	Falda medio-alta .....	78
4.2.3	Falda al piano campagna .....	81
4.3	Modellazione Sezione 2 .....	84
4.3.1	Falda bassa .....	86
4.3.2	Falda medio-alta .....	91
4.3.3	Falda al piano campagna .....	95
5	Conclusioni .....	99
	Bibliografia .....	103
	Allegati .....	105



## Introduzione

Il territorio italiano negli ultimi anni è stato colpito da fenomeni di intensa precipitazione e la frequenza di questi eventi eccezionali risulta essere aumentata negli ultimi decenni (Salbego et al, 2015), mettendo in evidenza l'estrema vulnerabilità di questo territorio. Uno di questi eventi ha colpito la Regione Veneto nel Novembre 2010, in particolare la Provincia di Vicenza, dove intense precipitazioni si sono abbattute per una durata complessiva di circa 3 giorni. Tali eventi eccezionali hanno causato il verificarsi di moltissime frane, interessando soprattutto il territorio collinare della Provincia di Vicenza, in particolar modo le colline del Marosticano, dove sono presenti terreni argillosi derivati dall'alterazione di rocce vulcaniche presenti nell'area, quali basalti e tufi. Nel presente studio è stata presa in considerazione una frana in particolare, ovvero il fenomeno franoso avvenuto nel territorio comunale di Carrè (VI) che, a seguito dell'evento eccezionale del Novembre 2010, ha subito una riattivazione, provocando danni consistenti sia a strutture pubbliche che private.

La frana è stata oggetto di numerosi studi, commissionati sia dal Comune di Carrè che da aziende private, coinvolgendo anche l'Università per studi più approfonditi. I risultati ottenuti da tali analisi, che sono stati presi in considerazione per lo svolgimento di questo studio, hanno portato ad alcune interpretazioni del fenomeno gravitativo, fornendo una maggiore comprensione riguardo certi aspetti come ad esempio i fattori predisponenti, senza però verificare quali siano state le condizioni di innesco.

Il presente scritto si inserisce all'interno di un progetto di ricerca, ed ha come obiettivo quello di definire un modello numerico partendo dai dati ricavati dalle varie prove eseguite sia in sito che in laboratorio, potendo così riprodurre il cinematismo del fenomeno gravitativo e quindi verificare quali sono state le condizioni d'innesco che hanno portato al verificarsi dell'evento.

Inizialmente sono state raccolte e valutate tutte le relazioni esistenti riguardanti la frana di Carrè, prendendo in considerazione tutte le prove effettuate. Tra queste, è stato realizzato uno scavo di trincea dal quale sono stati prelevati dei campioni

che sono stati poi utilizzati per la caratterizzazione geologico-tecnica e mineralogica tramite prove di laboratorio; è stata eseguita un'indagine sismica a rifrazione che ha permesso una valutazione dei diversi rifrattori principali presenti nel sottosuolo, ed infine sono state eseguite delle prove penetrometriche, che hanno consentito di ricavare le diverse resistenze all'infissione in vari punti dell'area franosa. Inoltre sono stati installati due tubi inclinometrici che hanno permesso di stabilire a che profondità risultava essere la superficie di scivolamento. Successivamente all'analisi dei dati già esistenti, sono state svolte ulteriori prove sia in sito che di laboratorio, utili queste per un confronto incrociato dei risultati ottenuti. È stata eseguita una prova a carotaggio continuo, dalla quale sono stati prelevati dei campioni. Sono state successivamente effettuate delle prove geotecniche, ovvero le analisi granulometriche e aerometriche, utili al fine di determinare le frazioni granulometriche presenti, ed i limiti di Atterberg, grazie ai quali è stato possibile definire i contenuti d'acqua critici ai quali avvengono le transizioni di comportamento del materiale. Sono state poi eseguite delle analisi mineralogiche mediante l'utilizzo del diffrattometro per polveri, dal quale sono state determinate le varie fasi mineralogiche presenti nei campioni. Infine, grazie ai dati ottenuti, è stato creato un modello geologico-tecnico della frana, su cui poi sono state eseguite delle simulazioni numeriche dello stato tenso-deformativo del versante in differenti condizioni di falda. Tali simulazioni sono state condotte con l'utilizzo del software FLAC 7.0 (di Itasca) e hanno consentito di riprodurre il fenomeno franoso e di capire in quali condizioni il versante sia instabile.

# 1 Inquadramento geografico e geologico

L'area oggetto di studio è ubicata nella zona settentrionale della Provincia di Vicenza, più precisamente sulle colline del Marosticano occidentale, ed è compresa nel Sudalpino (Figura 1).

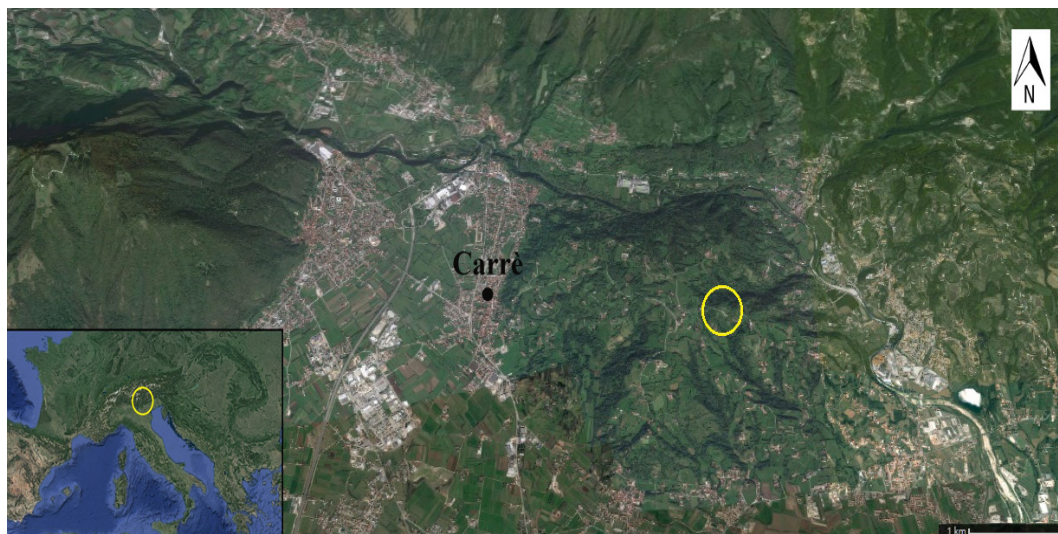


Figura 1: Ubicazione dell'area in esame (cerchiata in giallo) (Fonte: Google Maps).

Questa zona si trova all'interno della Piattaforma di Trento, ovvero una regione originatasi a seguito di una sedimentazione carbonatica di mare poco profondo (fino al Giurassico inferiore) e successivamente sommersa diventando un plateau di mare profondo.

Durante l'orogenesi alpina, e quindi durante un periodo di intensa attività tettonica, la Piattaforma di Trento venne segmentata, dando luogo ad alti e bassi strutturali. Gli alti strutturali permisero la formazione di piattaforme carbonatiche di mare poco profondo che, espandendosi, diedero origine alla Lessini Shelf (Bosellini, 2004) (Figura 2).

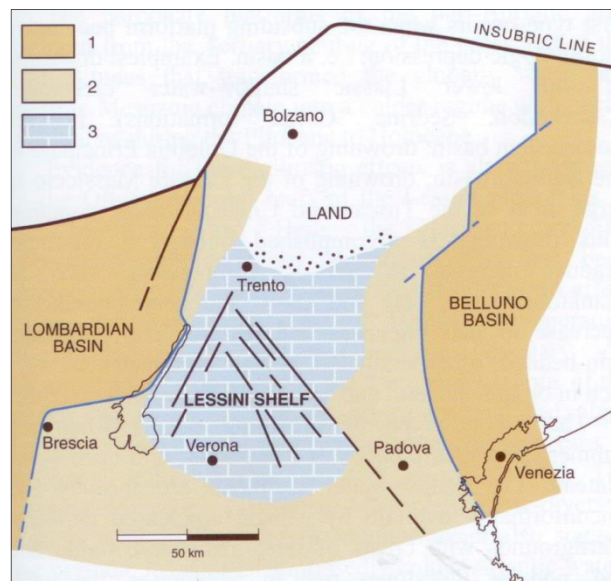


Figura 2: Lessini Shelf. 1) Sedimenti marini dei precedenti bacini giurassici (bacino Lombardo e bacino di Belluno); 2) Argilliti e marne pelagiche paleogene sovrastanti la piattaforma giurassica di Trento; 3) Calcari di barriera paleogene della Lessini Shelf (Fonte: Bosellini, 2004).

Durante l'era Cenozoica, in quest'area si verificò un'intensa attività vulcanica con effusione di magmi prevalentemente basici e ultrabasici, i quali costituiscono la Provincia Vulcanica Veneta (Bellieni, 2010).

L'inizio del vulcanismo veneto si verificò durante il Paleocene superiore ed interessò, inizialmente, solo la parte nord occidentale dei Lessini: in seguito, le sue manifestazioni si estesero verso ovest nel Veronese, per poi interessare la parte poco più a nord nel Trentino meridionale, ed infine coinvolse i Colli Euganei a sud e l'area del Marosticano ad est.

La prima fase eruttiva è testimoniata essenzialmente nella Valle del Chiampo e nella Valle dell'Agno (Barbieri et al., 1982).

Nell'Eocene inferiore e medio si ebbero manifestazioni eruttive imponenti e costituirono la fase eruttiva principale, anche per la quantità dei prodotti emessi (Piccoli, 1969). Queste eruzioni interessarono le zone che comprendono il Trentino, i Lessini, i Berici e gli Euganei, mentre nel Marosticano sono assenti.

Alla fine di questo periodo, ovvero nell'Eocene superiore, si verificò un periodo di quiescenza vulcanica generale, ad eccezione dei Colli Euganei, dove iniziò una fase eruttiva di tipo basico.

Il vulcanismo riprese la sua attività nell'Oligocene ed interessò una più piccola area rispetto a quella Eocenica, comprendendo i Lessini orientali, i Berici, il Marosticano e gli altopiani vicentini.

Nei Lessini orientali, nei Berici e nel Marosticano sono documentate eruzioni oligoceniche sia sottomarine, in più fasi, che subaeree, soprattutto nell'ultima parte del periodo. Il vulcanismo oligocenico fu soprattutto di natura esplosiva nei Lessini orientali e nei Berici, mentre nel Marosticano si conoscono molte lave, soprattutto subaeree, con alcuni episodi effusivi subacquei, testimoniati da ialoclastiti (Piccoli, 1969).

L'attività eruttiva basica che interessò il Veneto si concluse verso la fine dell'Oligocene, eccezion fatta per alcune località dove sono state documentate rocce contenenti fossili che sembrano indicare un'età miocenica basale. La fine del vulcanismo basico in questa Regione è stata ipotizzata dal fatto che le rocce mioceniche rinvenute quasi ovunque nel Veneto centrale mostrano caratteristiche di trasgressività sulle rocce oligoceniche (Piccoli, 1969).

L'attività vulcanica, quindi, durò all'incirca 40 milioni di anni e si manifestò in diverse zone in età differenti, interessando il Marosticano con un'intensa attività eruttiva soprattutto nell'Oligocene.

L'evoluzione tettonica della zona comprende ripetuti episodi distensivi del Mesozoico e del Terziario inferiore, correlate allo sviluppo del margine passivo della Placca Adriatica, che permisero l'attivazione di linee tettoniche con una direzione prevalente NNW-SSE (Faglia Schio-Vicenza)(Figura 3).

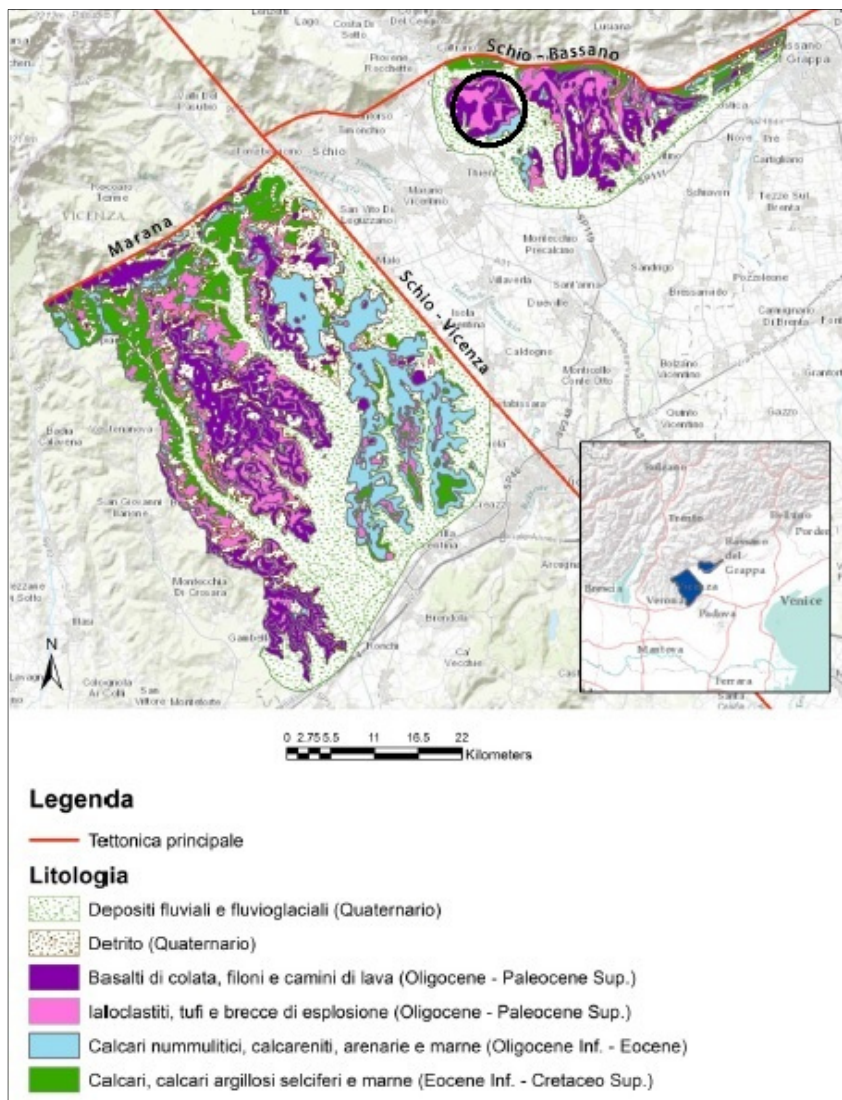


Figura 3: Inquadramento geologico generale dell'area in esame (cerchiata in nero l'esatta ubicazione dell'area di Carrè) (Fonte: Toaldo, 2014).

Durante l'Eocene inferiore e medio, il Marosticano occidentale subì un forte sollevamento fino all'emersione, mentre nel corso dell'Oligocene, sempre in corrispondenza del Marosticano, si impostò una struttura a graben entro la quale si accumulò la maggior parte delle vulcaniti, limitata ad est da una o più faglie, la più esterna delle quali situata all'altezza di Bassano del Grappa e testimoniata dalla scomparsa delle vulcaniti nelle serie oligoceniche ad oriente del fiume Brenta (Barbieri et al., 1982).



## ***1.1 Inquadramento geologico di dettaglio***

Il sito in esame è situato nel territorio prevalentemente collinare del Comune di Carrè, in Provincia di Vicenza. L'evento franoso che si è verificato in quest'area ha interessato la pendice meridionale del Monte Grumo (Figura 4) e, in seguito ad una riattivazione, ha coinvolto nel Febbraio del 2014 la strada comunale (più precisamente via Valdaro) che collega i Comuni di Carrè e Zugliano (Figura 5) (Toaldo, 2014).

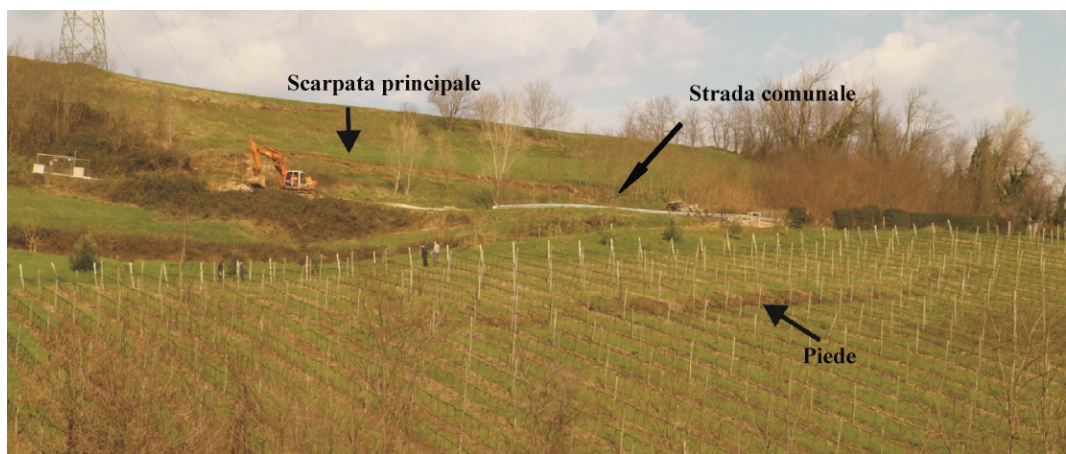


Figura 4: Pendice meridionale del Monte Grumo e visuale della frana (Fonte: Salbego et al., 2015).



Figura 5: Strada comunale dissestata che collega Carrè e Zugliano (Fonte: Toaldo, 2014).

In queste colline, l'intensa attività vulcanica che si è sviluppata soprattutto nell'Oligocene ha prodotto l'effusione di grandi quantità di magma basico, originando le rocce basaltiche che caratterizzano questo territorio (Figura 6). Presentano un colore rossastro o grigio-nerastro dovuto all'ossidazione, e sono quindi facilmente interessate da fenomeni di alterazione. I terreni di copertura presenti in quest'area sono costituiti da materiale detritico derivante dall'alterazione e degradazione del substrato roccioso basaltico, con la presenza di una componente argillosa dominante, la quale possiede scadenti caratteristiche meccaniche. La frana oggetto di disamina copre una superficie di circa 5500 m<sup>2</sup> (100 m di lunghezza x 65 m di larghezza) e presenta una pendenza che varia dai 15° ai 20°. La pendenza modesta di questo versante mette in evidenza la particolare situazione presente in questo territorio, dove i terreni possiedono sicuramente scadenti proprietà meccaniche grazie alla presenza abbondante di argilla e che, in condizioni di eventi eccezionali quali precipitazioni intense, possono indurre il pendio all'instabilità grazie alla scarsa capacità di drenaggio del terreno, inducendo un incremento delle pressioni interstiziali e quindi provocando una diminuzione delle resistenze disponibili: instabilità quindi possibile anche con ridotte pendenze.

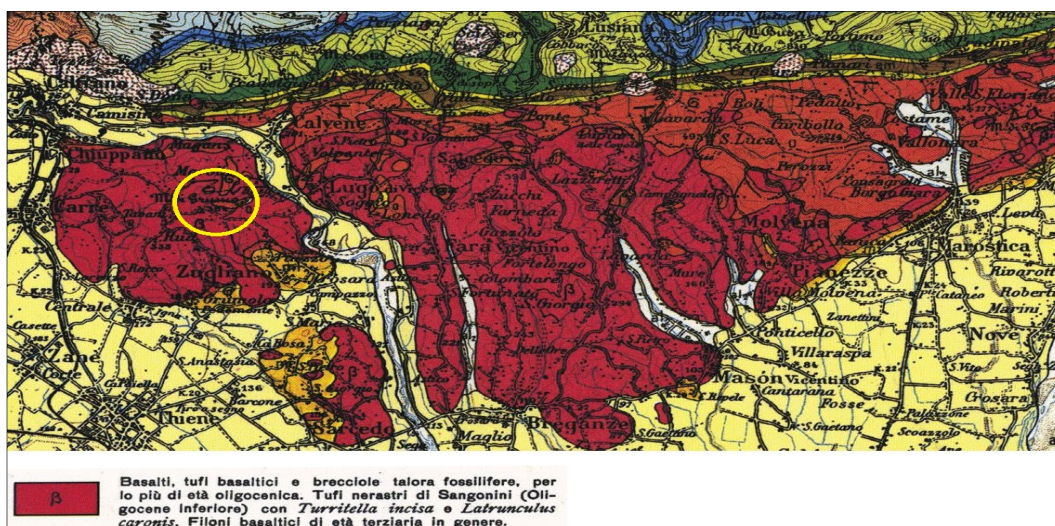


Figura 6: Stralcio della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000, Foglio n.37 Bassano del Grappa. Cerchiata in giallo l'area in esame (Fonte: Ispra, a cui si rimanda anche per la legenda completa).



## 1.2 Descrizione del fenomeno gravitativo

L'area in esame, come detto in precedenza, è situata nelle colline del Marosticano. Questo territorio collinare è stato interessato da numerosi fenomeni franosi, dei quali la tipologia più frequente è rappresentata dagli scivolamenti e dalle colate di terra (Busnardo, 2016), secondo la classificazione di Varnes (1978)(Figura 7). Questi fenomeni gravitativi hanno interessato maggiormente depositi di natura eluvio-colluviale, che sono stati originati dai processi di alterazione delle rocce vulcaniche presenti nell'area, quindi da basalti e tuffi.

Tipo di movimento	Tipo di materiale		
	Roccia ( <i>rock</i> )	Roccia sciolta o terra ( <i>engineering soil</i> )	
		Detrito grossolano ( <i>debris</i> )	Detrito fine ( <i>earth</i> )
<b>Crollo (<i>fall</i>)</b>	Crollo di roccia	Crollo di detrito	Crollo di terra
<b>Ribaltamento (<i>topple</i>)</b>	Ribaltamento di roccia	Ribaltamento di detrito	Ribaltamento di terra
<b>Scivolamento (<i>slide</i>)</b>			
<b>rotazionale (<i>rotational</i>)</b>	Scivolamento rotaz. di roccia	Scivolamento rotaz. di detrito	Scivolamento rotaz. di terra
<b>traslativo (<i>translational</i>)</b>	Scivolamento trasl. di roccia	Scivolamento trasl. di detrito	Scivolamento trasl. di terra
<b>Espansione laterale (<i>spread</i>)</b>	Espansione di roccia	Espansione di detrito	Espansione di terra
<b>Colata (<i>flow</i>)</b>	Colata di roccia	Colata di detrito	Colata di terra

Figura 7: Classificazione di Varnes (1978).

Il dissesto in esame è classificabile come uno *scivolamento traslativo*, di terreno, con una componente rotazionale.

Una frana di scivolamento è caratterizzata da uno scorrimento di blocchi di roccia o lame di terreno lungo una superficie che coincide con un orizzonte di debolezza in cui si concentra lo sforzo di taglio. Le cause predisponenti all'attivazione o riattivazione sono dovute alla presenza di un livello di debolezza o dovute all'elevata pendenza del versante, mentre le cause scatenanti possono riguardare intense precipitazioni, sollecitazioni sismiche e scalzamento al piede.

La zona interessata dal dissesto può essere suddivisa in due zone:

- zona di distacco: comprende la nicchia di distacco, la scarpata principale e i fianchi;
- zona di accumulo: comprende la testata, il corpo di frana, il piede e l'unghia.

Questi caratteri appena elencati sono caratteri diagnostici di una frana e permettono di classificare una tipologia di dissesto da un'altra.

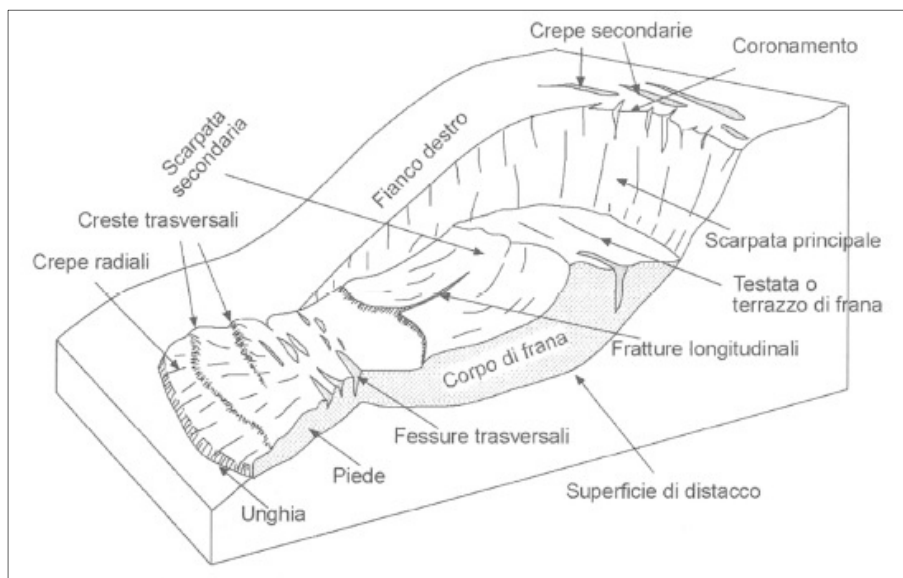


Figura 8: Morfologia di una frana di scivolamento.

In particolare, una frana di scivolamento traslativo ha la superficie di rottura generalmente planare o ondulata, disposta a franapoggio: la forma di tale superficie dipende dall'omogeneità litologica o dalla granulometria del terreno. Generalmente il corpo di frana è composto da un'unica o poche parti ed è generalmente indisturbato, mentre la zona al piede è caratterizzata dalla formazione di un lobo di accumulo che può essere, a seconda della massa di terreno coinvolta e dall'andamento della superficie di rottura, di varie dimensioni. Questa tipologia di fenomeno gravitativo si verifica molto spesso in versanti caratterizzati dalla presenza di materiale argilloso.

## 2 Metodologie

### 2.1 Prove in sito

Al fine di ricostruire il modello geologico-tecnico del terreno in esame, sono state effettuate diverse prove in sito, descritte nei paragrafi seguenti, effettuate in diversi punti dell'area, come si evince dalla Figura 9.

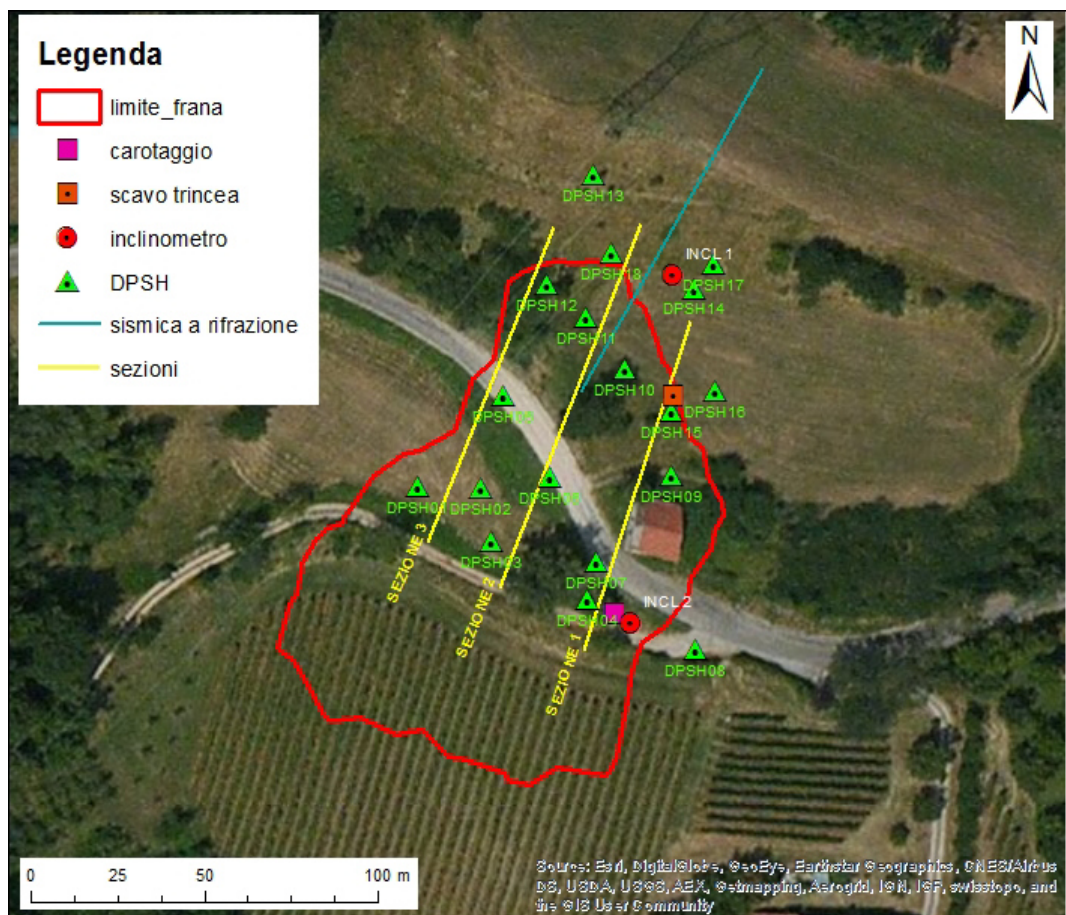


Figura 9: Ubicazione delle indagini e delle sezioni di riferimento.

#### 2.1.1 Perforazione a carotaggio continuo

All'interno dell'area franosa è stata eseguita una perforazione a carotaggio continuo, raggiungendo una profondità di 8.00 m dal piano campagna. All'interno

del sondaggio è stato successivamente installato un piezometro, con tappo di fondo alla profondità di 8.00 m dal piano campagna.

La perforazione a rotazione consiste nell'infiggere nel terreno un carotiere (tubo d'acciaio), dotato ad una estremità di un utensile tagliente (corona), collegato alla superficie mediante una batteria di aste cave: queste, attaccate ad una testa motrice, vengono spinte e ruotate contemporaneamente in profondità da un macchinario dotato di potenza adeguata. I campioni di terreno (carote) vengono prelevati tramite un dispositivo che impedisce la perdita dello stesso.

Le finalità della presente prova sono sintetizzabili in questo modo:

- ricostruire il profilo stratigrafico analizzando i campioni estratti;
- prelievo di campioni per prove di laboratorio;
- predisposizione per ulteriori strumenti.



Figura 10: Esecuzione della perforazione a carotaggio continuo.

I campioni estratti sono poi stati depositati in cassette catalogatrici, ovvero dei contenitori dove vengono posate in sequenza le carote estratte, normalmente contenente 5 metri dello stesso, suddivise per ogni metro.

### ***2.1.2 Prove penetrometriche DPSH***

Su incarico del Comune di Carrè è stato eseguito dal Dott. Geol. Andrea Massagrande uno studio finalizzato alla caratterizzazione litologico-stratigrafica ed alla parametrizzazione fisico-meccanica del terreno in esame. In questo studio sono stati eseguiti 18 sondaggi penetrometrici DPSH, i quali sono stati presi in considerazione per questo lavoro di tesi. L'analisi dei risultati di queste prove penetrometriche ha portato ad un quadro più completo del contesto stratigrafico.

La prova consiste nell'infiggere nel terreno una punta conica tramite una massa battente, misurando il numero di colpi (N) necessari ad ottenere un approfondimento nel terreno per tratti consecutivi di 30 cm, e viene considerata sospesa per raggiunto rifiuto quando N supera il valore di 50. La classificazione della prova viene fatta in base al peso del maglio utilizzato, che in questo caso equivale a 63.5 kg, per cui viene definita DPSH (ovvero con maglio "superpesante"), ma anche in base all'altezza di caduta dello stesso, che in questo caso corrisponde a 0.75 m.

I sondaggi penetrometrici sono stati spinti dal piano campagna fino al raggiungimento del rifiuto strumentale.



Figura 11: Macchina utilizzata per l'esecuzione delle prove penetrometriche DPSH  
(Fonte: Massagrande, 2012).

Pertanto, lo svolgimento della prova ha portato a conoscenza il numero dei colpi  $N$  necessari per ogni avanzamento di 30 cm della punta nel terreno, registrandoli separatamente: tali dati, sono poi stati correlati con altri valori riguardanti le caratteristiche del macchinario penetrometrico e le modalità di esecuzione della prova stessa, ricavando così, tramite la Formula degli Olandesi, la resistenza dinamica alla punta (rpd):

$$\text{rpd} = M^2 H / [A e (M+P)] = M^2 H N / [A \delta (M+P)]$$

dove:

$M$  = maglio (kg);

$H$  = altezza caduta maglio (cm);

$A$  = area base punta conica (cm<sup>2</sup>);

$P$  = massa totale delle aste e del sistema (kg);

$\delta$  = avanzamento punta (cm);

$N$  = numero colpi punta relativo ad un avanzamento di 30 cm;

$e = \delta / N$  = infissione per colpo.

Per poter ricavare informazioni dal terreno tramite le prove penetrometriche dinamiche DPSH è necessario utilizzare delle correlazioni empiriche che permettono di ottenere i valori dei diversi parametri meccanici, estrapolandoli dai risultati di resistenza dinamica alla punta ottenuti da tali prove. Siccome la maggior parte delle prove penetrometriche dinamiche eseguite a livello mondiale sono le prove SPT (Standard Penetration Test), a causa del fatto di essere una prova con un'estrema semplicità operativa e con costi relativamente modesti, la maggior parte delle correlazioni empiriche esistenti riguardano tale prova; ragion per cui si presenta la necessità di rapportare il numero di colpi  $N$  della prova DPSH con il numero di colpi della prova SPT, ovvero l' $N_{SPT}$ , con la relazione:

$$N_{SPT} = \beta_t * N$$

dove:

$$\beta_t = \frac{Q}{Q_{SPT}}$$

in cui  $Q$  è l'energia specifica per colpo e  $Q_{SPT}$  è quella riferita alla prova SPT.

L'energia specifica per colpo viene calcolata con la relazione:

$$Q = \frac{M^2 * H}{A * \delta * (M + M')}$$

dove:

$M$  = peso massa battente;

$M'$  = peso aste;

$H$  = altezza di caduta;

$A$  = area base punta conica;

$\delta$  = avanzamento punta.

Per ricavare i parametri meccanici dalle prove penetrometriche, sono state utilizzate le seguenti formule empiriche:



- $\phi'$  (angolo di attrito efficace): Shioi – Fukuni, 1982
- $\gamma_{SAT}$  (peso dell'unità di volume saturo): Bowles (1982), Terzaghi-Peck, 1948-1967
- $C_u$  (coesione non drenata): Shioi – Fukuni
- $E$  (modulo di Young): Bowles, 1982

### **2.1.3 Scavo trincea**

In un precedente studio riguardante la frana in esame, durante i lavori di sistemazione della stessa, è stata fatta scavare una trincea di 4.5 m di profondità e circa 1 metro di larghezza (Figura 12). Grazie all'utilizzo di una cordella metrica, è stato effettuato un campionamento partendo dal piano campagna fino ad arrivare ad una profondità di 4.4 m, con un passo di campionamento di 20 cm da 0 a 3.2 m, mentre da 3.2 a 4.4 m è stato di 40 cm. I campioni sono stati prelevati con cazzuola e martello da muratore, e successivamente inseriti e catalogati all'interno di sacchetti di nylon dotati di etichettatura (Toaldo, 2014).





Figura 12: Fase di rimozione del terreno con l'ausilio di macchina escavatrice (Fonte: Toaldo, 2014).

#### ***2.1.4 Indagine sismica a rifrazione***

Su incarico dell'azienda Terna S.p.A. è stato eseguito dal Dott. Geol. Mario Naldi uno studio per valutare le condizioni di stabilità geomorfologica del versante a causa della presenza, nelle vicinanze della frana in questione, di un traliccio

dell'alta tensione, di proprietà della suddetta azienda. In questo studio sono state svolte diverse indagini, tra le quali un'indagine sismica a rifrazione, che verrà presa in considerazione in questo lavoro di tesi.

Lo stendimento dell'indagine sismica, il cui posizionamento è illustrato in Figura 9, presenta le seguenti caratteristiche geometriche:

- n. 24 geofoni;
- spaziatura di 3 m;
- lunghezza totale: 69 m.

L'acquisizione dei dati sismici è stata effettuata con un sismografo a 24 canali dotato di un convertitore analogico digitale a 24 bit. I geofoni utilizzati possiedono una frequenza di risonanza pari a 40 Hz, e l'energizzazione è stata ottenuta con massa battente da 8 kg su piastra metallica per la generazione di onde di compressione. Per l'innesco è stato utilizzato uno "shock sensor" collegato alla massa battente e connesso via cavo al sismografo. Per l'elaborazione dei dati sismici a rifrazione sono stati riconosciuti e raccolti i dati dei primi arrivi: successivamente, sono stati elaborati con il metodo GRM (General Reciprocal Method) accoppiato ad un'inversione tomografica su una griglia di nodi equispaziati per una modellazione della distribuzione delle velocità delle onde di compressione nel sottosuolo (Naldi, 2014).

### ***2.1.5 Inclinatori***

Su incarico del Comune di Carrè, sono stati installati 2 tubi inclinometrici, in corrispondenza della frana, dallo Studio Tecnico Geom. Natalino Zoggia. Il primo inclinometro è stato posizionato nella zona più a monte dell'area franosa, all'esterno del perimetro di frana, mentre il secondo inclinometro è stato collocato all'interno dell'area franosa, in particolare nella parte centrale della stessa ed in prossimità del perimetro di frana (Figura 9).

Gli inclinometri sono strumenti in grado di fornire una stima degli spostamenti relativi ad una verticale scelta, consentendo di capire a che profondità avvengono tali movimenti. I rilievi sono generalmente effettuati in modo manuale con

attrezzature removibili munite di guide (sonde inclinometriche) che vengono calate in appositi tubi scanalati, cementati in un foro di sondaggio (Tanzini, 2002).



Figura 13: Tubo inclinometrico 1 (Fonte: Zoggia, 2014).

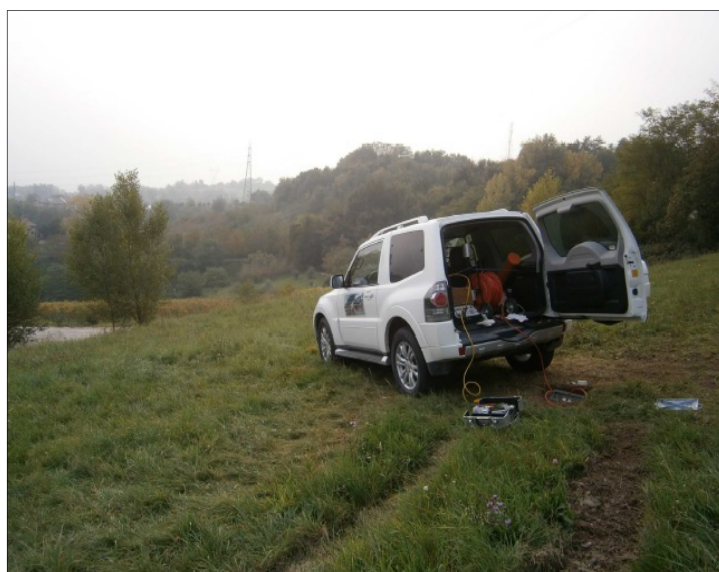


Figura 14: Lettura dei dati relativi all'inclinometro (Fonte: Zoggia, 2014).

## ***2.2 Prove di laboratorio***

Al fine di identificare e classificare il terreno in esame, sono state effettuate delle prove di laboratorio sui campioni prelevati dalle prove eseguite in sito. In particolare, sono state svolte le analisi granulometriche ed i limiti di Atterberg sui campioni ricavati dalla perforazione a carotaggio continuo. Tali prove di laboratorio sono state eseguite presso il Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente a Pavia.

Inoltre, sono state prese in considerazione anche prove di laboratorio effettuate sui 19 campioni prelevati dallo scavo di trincea realizzato in un precedente studio facente parte dello stesso progetto di ricerca, realizzate presso il Dipartimento di Ingegneria in via Ognissanti a Padova.

Per l'esecuzione delle prove di laboratorio descritte in questo capitolo, sono state rispettate le procedure dettate dalla normativa ASTM.

### ***2.2.1 Analisi granulometrica***

Questa prova ha come obiettivo quello di determinare le dimensioni delle particelle che compongono il terreno e di stabilire le loro percentuali in peso. Per la sua esecuzione si sfruttano due tecniche differenti: la prima consiste in un'analisi per setacciatura a secco delle particelle con dimensioni superiori a 0.075 mm, mentre per le particelle con dimensioni inferiori viene effettuata l'analisi per sedimentazione.

#### ***2.2.1.1 Analisi per setacciatura a secco***

La prima fase della procedura consiste nel prelievo di 200 grammi di materiale che viene poi fatto passare al setaccio da 0.075 mm. Successivamente, il materiale trattenuto da tale setaccio viene fatto essiccare in forno a 105° per 24 ore. Trascorso il periodo di essiccazione, il terreno è pronto per la setacciatura, che consiste nel passaggio del materiale attraverso una serie di setacci (Figura 15), costituiti da una rete metallica a maglie quadrate, con grandezze differenti per



ognuno di essi. I setacci sono disposti verticalmente uno sopra l'altro, dove nella parte più alta si colloca quello con maglie di dimensioni maggiori mentre, al di sotto di quest'ultimo, vengono posizionati i piatti con maglie di dimensioni minori in modo progressivo, ponendo alla base inferiore della pila un fondello raccogliatore. L'operazione di setacciatura si effettua per scuotimento manuale ed il materiale trattenuto ad ogni setaccio viene pesato e rapportato al peso iniziale del campione, ottenendo così la percentuale in peso della frazione granulometrica interessata.



Figura 15: Setacci utilizzati per la setacciatura.

### ***2.2.1.2 Analisi per sedimentazione***

L'analisi per sedimentazione viene svolta sulla frazione più fine del campione, ovvero quella passante al setaccio da 0.075 mm effettuata precedentemente nell'analisi per setacciatura (40 grammi), e consente di determinare la percentuale in peso delle frazioni più fini attraverso la misura della variazione nel tempo della densità della soluzione terreno-fluido analizzata.

La prima fase consiste nel mescolare il campione con circa 700 ml di acqua distillata tramite un miscelatore elettrico, ottenendo una soluzione omogenea. Il

tutto viene versato all'interno di un beaker graduato (Figura 16) con 20 ml di antiflocculante e con l'aggiunta di un'ulteriore quantità di acqua distillata fino al raggiungimento di 1 litro. L'antiflocculante viene utilizzato con lo scopo di ridurre la naturale tendenza delle particelle argillose ad aggregarsi elettrochimicamente. Successivamente si mescola il tutto finché il terreno risulti essere tutto in sospensione ed in modo omogeneo. Al raggiungimento di tale condizione, si pone il densimetro all'interno del liquido e si effettuano le letture a 10'', 20'', 30'', 1', 2', 8', 15', 30', 1h, 2h, 4h, 8h, 24h, 48h dall'inizio della prova. Si determina quindi la percentuale di concentrazione delle diverse grandezze delle particelle presenti nella soluzione terreno-fluido attraverso l'utilizzo di formule empiriche.

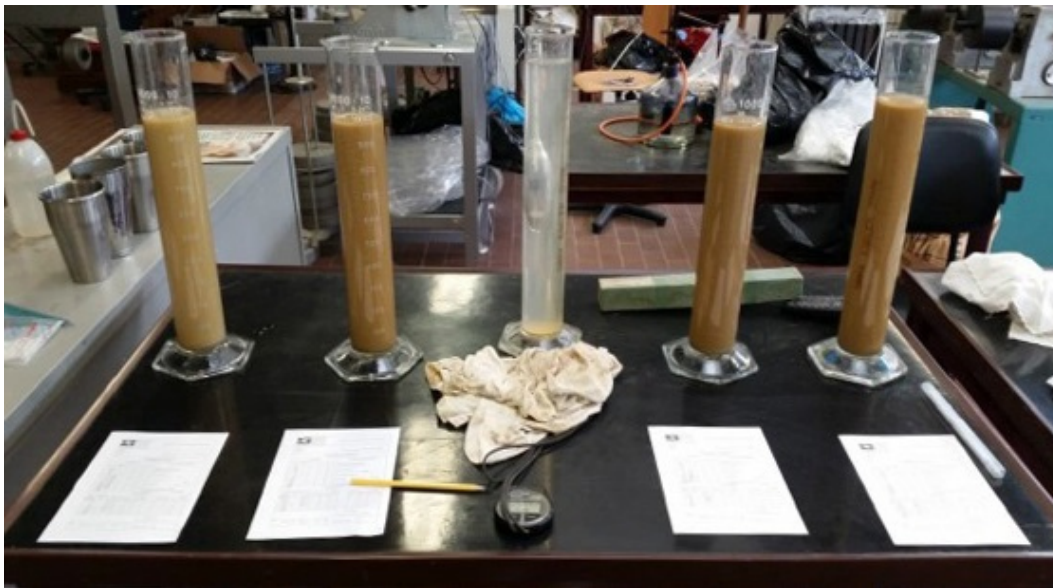


Figura 16: Beaker con all'interno la soluzione terreno-fluido nell'analisi per sedimentazione.

### ***2.2.2 Limiti di Atterberg***

La resistenza a trazione in un terreno a grana fine varia quantitativamente al variare dell'umidità presente al suo interno: più in particolare, una diminuzione di umidità comporta una maggiore resistenza alla trazione. Un cambiamento del contenuto d'acqua al suo interno provoca una mutazione del suo stato fisico, che

può essere “solido”, “semisolido”, “plastico” o “liquido” (Figura 17): tali stati vengono raggiunti se il contenuto d’acqua naturale è maggiore o minore di certi valori limite, detti appunto “limiti di Atterberg”.

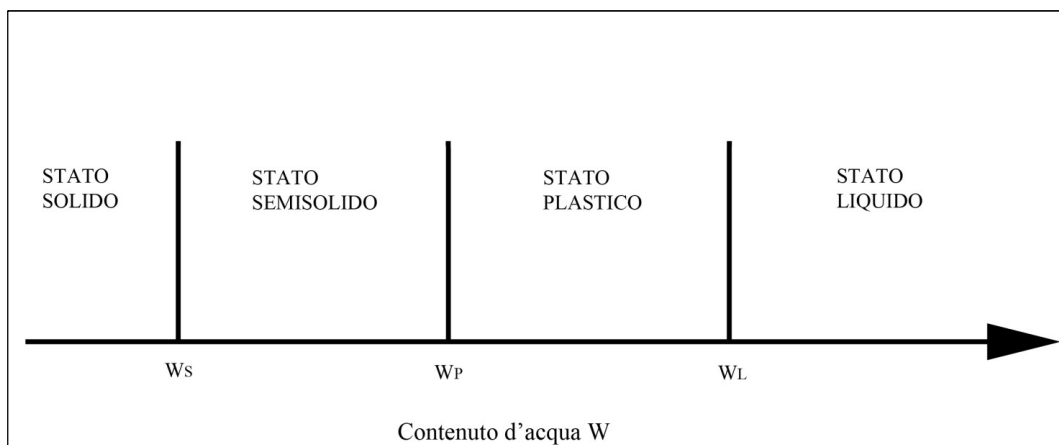


Figura 17: Stati di consistenza e limiti di Atterberg.

I limiti di Atterberg variano da terra a terra in funzione della percentuale di argilla e di minerale argilloso presente e vengono determinati in laboratorio mediante semplici prove standardizzate (Berardi, 2013).

Il limite liquido (WL) definisce il valore del contenuto d’acqua in corrispondenza del quale il terreno può convenzionalmente essere ritenuto un fluido. Per definire tale limite è stato utilizzato il cosiddetto “cucchiaio di Casagrande” (Figura 18), ovvero un’apparecchiatura costituita da un contenitore a forma di cucchiaio, che può essere fatto cadere sopra un supporto rigido.



Figura 18: Cucchiaino di Casagrande.

Per lo svolgimento della prova sono stati presi i campioni interessati e fatti passare al setaccio da 0.425 mm, prelevando poi circa 300 grammi di materiale passante per ogni campione, lasciandoli successivamente ad umidificare in acqua per circa 12 ore. Trascorso tale periodo, il campione è stato nuovamente inumidito ed omogeneizzato fino all'eliminazione di acqua libera. Con l'aiuto di una spatola, il materiale è stato posato all'interno del cucchiaino per un'altezza non superiore al centimetro di spessore. Successivamente è stato creato un solco al centro del cucchiaino con l'aiuto di un utensile metallico con punta smussata. A questo punto, girando l'apposita manovella, si conta il numero di cadute del "cucchiaino di Casagrande" necessario a far richiudere il solco praticato. La prova è stata condotta 3 volte per ogni campione, variando per ognuna di esse il contenuto d'acqua. Si assume come limite liquido (WL) il contenuto d'acqua corrispondente alla chiusura del solco con 25 colpi.



Il limite plastico (WP) definisce invece il valore del contenuto d'acqua in corrispondenza della transizione tra comportamento plastico e comportamento semisolido del terreno. Per definirlo, sono stati utilizzati i materiali passanti al setaccio da 0.425 mm derivanti dalla prova di Casagrande e sono stati stesi su una pietra porosa in modo tale da ridurre il loro contenuto d'acqua, essendo quest'ultimo minore per la definizione del suddetto limite. La prova consiste nel formare tra le dita della mano e una lastra di vetro un cilindro di terreno del diametro di 3 mm: il contenuto d'acqua corrispondente al limite plastico è definito quando al raggiungimento di tale spessore si formano le prime fessure nel cilindretto.



Figura 19: Pietra porosa e spatola (a sinistra) utilizzati per la creazione di piccoli cilindri di terreno (a destra) per la determinazione del limite plastico.

Le prove svolte per la determinazione dei limiti di Atterberg sono state eseguite utilizzando acqua distillata e successivamente sono state ripetute una seconda volta utilizzando una soluzione al 4% di esametafosfato di sodio ( $\text{NaPO}_3$ ). Quest'ultimo è dotato di proprietà antiflocculanti ed è stato utilizzato per contrastare la naturale tendenza delle argille ad aggregarsi.

## ***2.3 Analisi mineralogiche***

Per poter caratterizzare dal punto di vista mineralogico il deposito franoso in esame, sono state eseguite delle analisi mineralogiche presso il Dipartimento di Geoscienze in Via Gradenigo 6 a Padova. Sono state utilizzate tecniche diffrattometriche a raggi X, in particolare è stata utilizzata la diffrattometria per polveri perché è la tecnica più efficace e potente per poter identificare, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, le varie fasi mineralogiche presenti. Questa tecnica risulta essere la più utilizzata sia quando si studiano campioni multifase come quello oggetto di studio, sia quando il materiale contiene al suo interno minerali che hanno una dimensione troppo piccola per poter essere individuati al microscopio ottico.

### ***2.3.1 Aspetti teorici***

I raggi X sono onde elettromagnetiche che comprendono l'intervallo che va da 10 a 0,001 nanometri dello spettro elettromagnetico. Quando un fascio di raggi X colpisce un reticolo cristallino provoca un'accelerazione degli elettroni del cristallo, inducendo così l'emissione di una radiazione con la stessa frequenza dell'onda incidente, comportandosi quindi come una nuova sorgente secondaria di raggi X. I fronti d'onda irradiati dagli elettroni colpiti interferiscono tra loro in modo distruttivo o costruttivo, generando nuove sorgenti di diffusione nel primo caso e annullando invece l'intensità nel secondo caso. L'interferenza costruttiva è causata dalla spaziatura regolare delle sorgenti di diffusione ed è possibile solo se la differenza del percorso tra i raggi riflessi da piani adiacenti è pari ad un multiplo della lunghezza d'onda. La diffrazione da una famiglia di piani si ha quando viene soddisfatta la legge di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

dove:

n: numero intero che definisce l'ordine di diffrazione;

$\lambda$ : lunghezza d'onda;

$d$ : distanza interplanare tra i piani reticolari;

$\theta$ : angolo di incidenza del fascio nel piano reticolare.

Questa relazione descrive la diffrazione come se fosse una riflessione selettiva perché i raggi diffratti non si hanno per ogni angolo  $\theta$ , ma solo per ben determinati angoli dei raggi X rispetto ai piani reticolari, ovvero quelli che soddisfano la legge di Bragg (Klein, 2004).

Il diffrattometro è costituito da tre componenti fondamentali:

- sorgente di raggi X: questi fuoriescono da un collimatore di acciaio;
- un goniometro, mediante il quale è possibile orientare in modo opportuno il campione rispetto ai raggi X incidenti;
- rivelatore, che misura gli effetti di diffrazione.

Quello che si ottiene da un'analisi di diffrazione a raggi X da polveri è un diffrattogramma che ha in ascissa il valore angolare  $2\theta$  e in ordinata le intensità misurate degli effetti di diffrazione, tutto questo mediante l'utilizzo di un software: i risultati sono dei picchi di diffrazione che rappresentano le fasi mineralogiche presenti nel campione. I risultati ottenuti vengono poi confrontati con dei modelli strutturali definiti relativi alle varie specie mineralogiche che costituiscono il database del software, potendo così identificare in modo preciso la composizione mineralogica presente nel campione. Le caratteristiche tecniche del diffrattometro a polveri utilizzato per l'analisi sono riportate in Tabella 1.

Diffratometro	Panalytical X' Pert Pro
Geometria	Parafocalizzante Bragg-Brentano
Goniometro	$\theta$ - $2\theta$
Raggio Goniometrico	240 mm
Sorgente	Cu K $\alpha$ ( $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ )
Generatore	40 kV – 40 mA
Slitte divergenti	$1/4^\circ$
Slitte antiscatter	$1/2^\circ$
Slitte soller	0.04 radianti
Monocromatore	Filtro al nickel
Rilevatore	X' Celerator
Range angolare	$3 - 80^\circ 2\theta$
Step	$0.017^\circ 2\theta$

Tabella 1: Caratteristiche strumentali e operative utilizzate per le analisi diffrattometriche a raggi X su polveri.

### ***2.3.2 Preparazione del campione***

Le analisi diffrattometriche sono state eseguite con gli stessi campioni con i quali sono stati fatti i limiti di Atterberg, ovvero con materiale passante al setaccio da 0.425 mm, e per entrambe le tipologie di trattamento (sia per i campioni trattati con acqua distillata, sia per i campioni trattati con esametafosfato, per un totale quindi di 12 campioni). La diffrattometria per polveri necessita l'utilizzo di campioni con granulometria fine, quindi la prima fase della preparazione del campione è stata quella di micronizzare il materiale. La micronizzazione consiste nella macinazione del terreno preso in esame (circa 4 grammi per campione) con mortaio e pestello d'agata (Figura 20). Il campione così macinato è stato quindi inserito, con l'ausilio di un piccolo cucchiaino, all'interno di una "giara" contenente al suo interno dei cilindretti in zirconio (Figura 21): a questi sono stati poi aggiunti 15 ml di acqua distillata con successiva chiusura con tappo della giara.

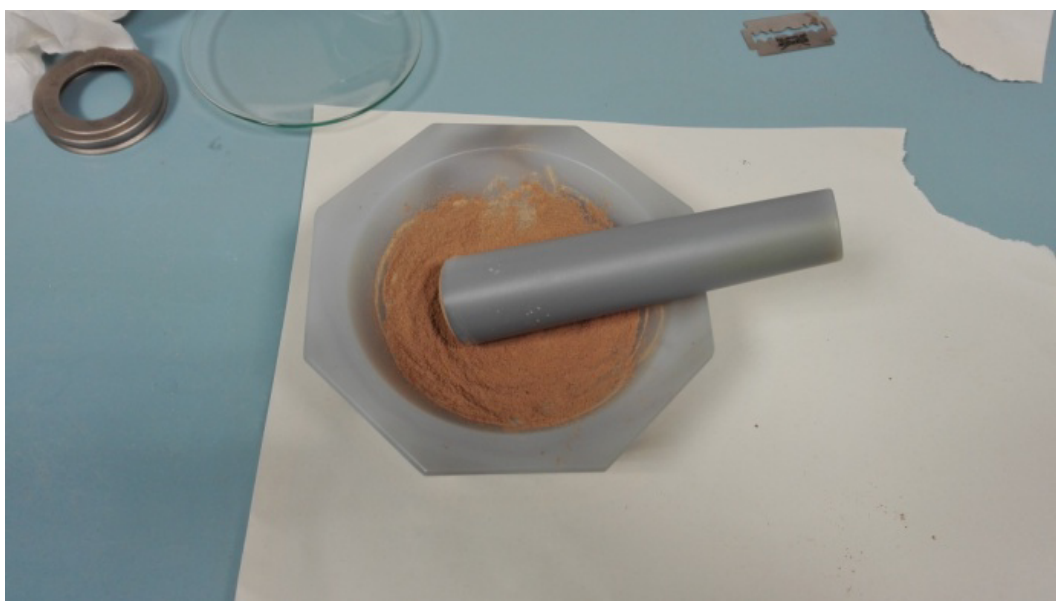


Figura 20: Mortaio e pestello d'agata.



Figura 21: Giara con all'interno cilindretti in zirconio.

Infine il tutto è stato poi inserito all'interno di una macchina scuotitrice (McCrone Micronizing Mill) (Figura 22), che ha permesso di ottenere una soluzione omogenea del campione con l'acqua distillata.

Per evitare un'eventuale contaminazione tra le varie preparazioni dei diversi campioni, sono state utilizzate delle procedure con lo scopo di annullare questa

possibilità, dette di “avvinamento”. Il primo step consiste in un primo lavaggio della giara con solo 10 ml di acqua distillata e la si inserisce nella macchina scuotitrice per 5 minuti, al termine dei quali la si svuota e si ripete la stessa procedura con l’aggiunta però di un piccolo quantitativo di campione che sarà poi utilizzato. Il terzo step costituisce la vera micronizzazione, ovvero si aggiungono nella giara circa 1 grammo di campione e 15 ml di acqua distillata, che viene poi trattata nella macchina scuotitrice per 10 minuti. Infine, la miscela omogenea ottenuta viene versata in un vetrino ad orologio (Figura 23) e posta ad essiccare in forno a 70 ° per 24 ore.

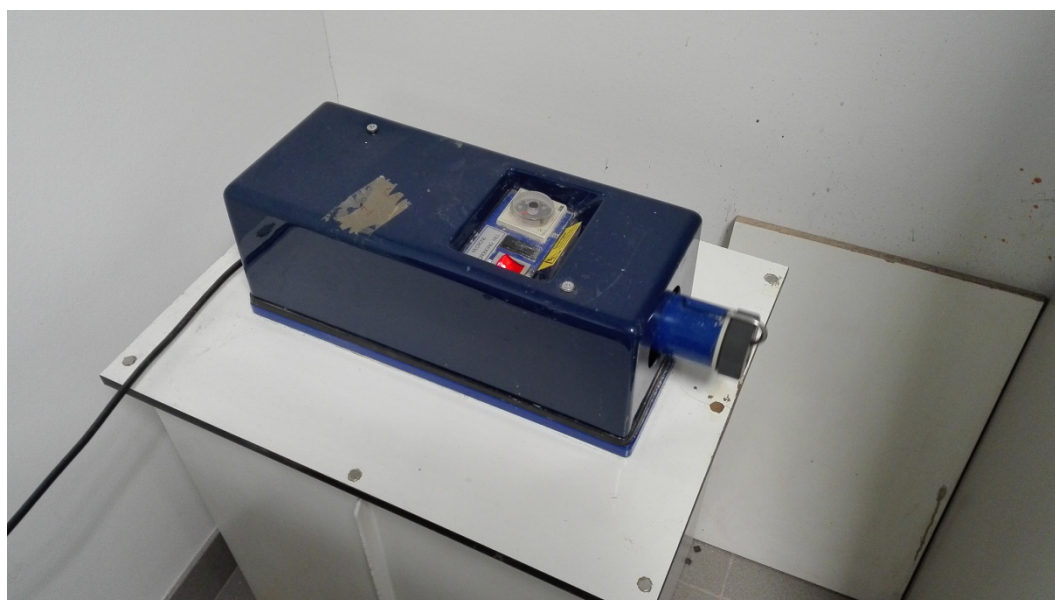


Figura 22: Macchina scuotitrice con giara inserita.

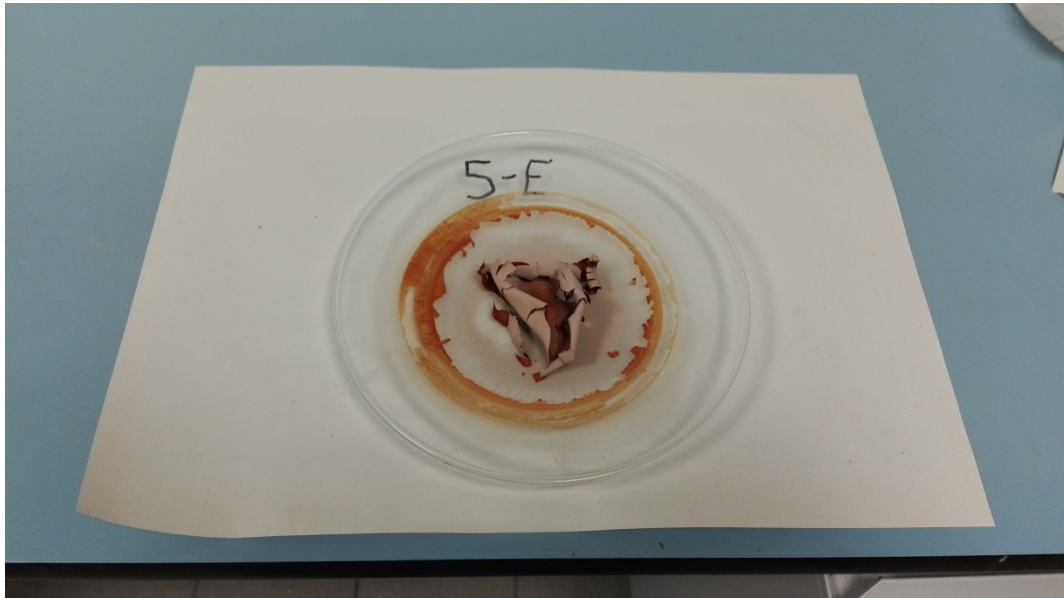


Figura 23: Vetrino ad orologio con campione essiccato.

Una volta essiccato, il campione viene asportato dal vetrino ad orologio tramite l'utilizzo di una lametta, per poi essere rimacinato nel mortaio. Per l'analisi diffrattometrica sono stati utilizzati dei porta campioni piatti con riduttore, all'interno dei quali è stato caricato un quantitativo di campione pari a 0.8 grammi e un'aliquota di zincite (ossido di zinco) pari a 0.2 grammi, ovvero un 20 % del campione totale che verrà poi analizzato. La preparazione del campione ultimato con queste percentuali è stata possibile grazie all'utilizzo di una bilancia con una sensibilità al decimillesimo di grammo (Figura 24). Il campione totale comprendente il terreno e la zincite è stato prima omogeneizzato grazie all'utilizzo del mortaio e poi inserito nel portacampioni (Figura 25) che verrà poi utilizzato per l'analisi diffrattometrica. Siccome il portacampione piatto è affetto da orientazione preferenziale, è stata utilizzata la tecnica del retrocaricamento al fine di ridurre la tendenza dei cristalli a disporsi secondo determinati piani.



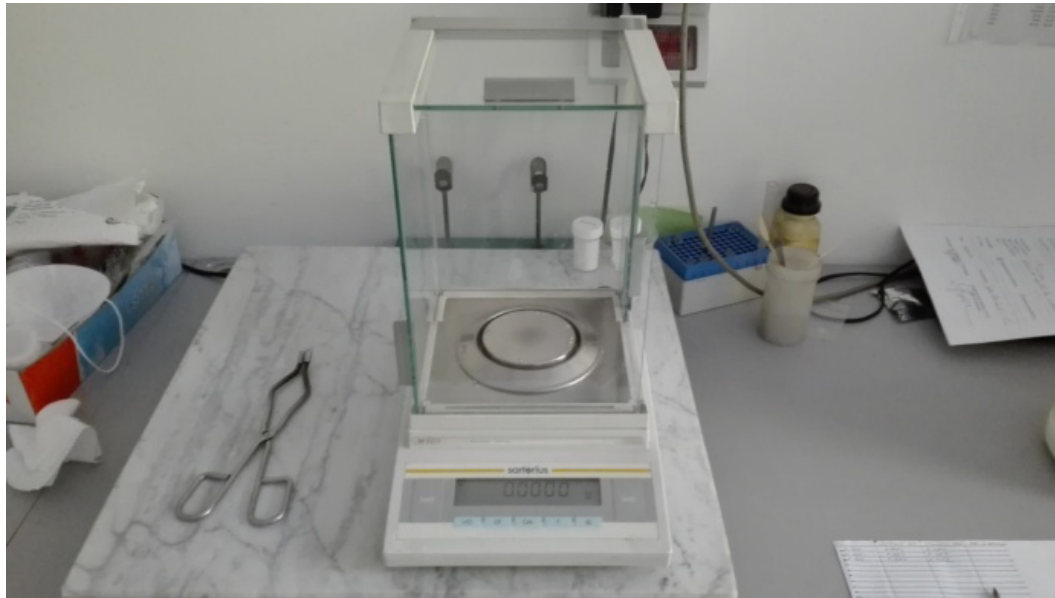


Figura 24: Bilancia con sensibilità al decimillesimo di grammo.



Figura 25: Portacampioni utilizzati per le analisi diffrattometriche.

L'utilizzo dell'ossido di zinco è stato necessario a causa del fatto che dalle prove geotecniche è emersa la presenza di una componente argillosa nei campioni, ovvero la smectite: per questa fase non ci sono modelli strutturali buoni da poter utilizzare per il raffinamento, quindi è stato scelto di utilizzare uno standard interno, ovvero la zincite. Con questa metodologia dello standard interno si



utilizza quindi l'ossido di zinco come "sonda" per poter rilevare e quantificare la smectite: infatti, quando si cerca di quantificare una fase amorfa come quest'ultima, l'intensità dei picchi di questa fase non è proporzionale alle percentuali contenute nel campione che va in diffrazione a causa dell'ordine cristallino dell'argilla. Quindi essendo noto il contenuto di standard presente nel campione analizzato, sarà possibile quantificare il contenuto di fasi amorfiche semplicemente sottraendolo alla percentuale rimanente, potendo così quantificare con precisione anche fasi che non hanno un modello strutturale ben definito.

### ***2.3.3 Trattamento con glicole etilenico***

Successivamente all'analisi qualitativa e quantitativa delle varie fasi mineralogiche presenti nei campioni, si è deciso di trattare un campione con glicole etilenico per poter comprendere la struttura dell'argilla presente nel terreno in esame. Il campione selezionato per questo trattamento è il 3A (Tabella 2), perché tra tutti i campioni disponibili è quello con una percentuale maggiore di argilla.

#### ***2.3.3.1 Preparazione del campione***

Il campione scelto per questa prova deriva da quelli utilizzati per i limiti di Atterberg, quindi passante al setaccio da 0.425 mm. La fase iniziale della preparazione di questa prova consiste nel prendere il campione scelto e disgregarlo con il mortaio, ottenendo così un materiale fine: lo si pone poi all'interno di una provetta contenente acqua deionizzata e si agita il tutto in modo energico, portando così tutto il materiale in sospensione in modo omogeneo. A questo punto, si deposita la provetta in un tavolo e si lascia decantare il materiale in sospensione. In base alla legge di Stokes, le particelle più grandi tendono a depositarsi prima, quindi trascorso un determinato periodo di tempo rimane in sospensione solo la parte più fine del materiale, ovvero l'argilla, che è quella che poi è stata analizzata per questa prova. Trascorso questo tempo viene prelevato, con l'ausilio di una pipetta da laboratorio, il materiale in sospensione e lo si

deposita su una base porta campioni, lasciando che l'acqua presente evapori. L'evaporazione permette alle particelle di argilla di orientarsi lungo una direzione specifica perché, essendo dei fillosilicati, hanno una struttura a strati: in questo modo i picchi delle basali, che sono diagnostici per il riconoscimento del tipo di argilla, risultano essere più alti e di conseguenza è possibile capire in modo univoco come è strutturata. Il campione così trattato è detto "levigato".

Successivamente si prende il levigato e lo si pone all'interno di un essiccatore con un'atmosfera satura di glicole etilenico: quest'ultimo, essendo disperso nell'atmosfera del materiale, si intercala all'interno dell'argilla, variando le posizioni dell'interstrato. In base alla variazione della distanza interplanare (d-spacing) delle sezioni basali ed essendo questa strettamente correlata alla tipologia del minerale, è possibile caratterizzare più nel dettaglio il tipo di minerale argilloso presente. Con il campione così preparato si effettua la misura con il diffrattometro.

Infine, si prende lo stesso campione trattato con glicole etilenico e lo si mette in forno a 550° ad essiccare: questo trattamento comporta una distruzione totale della struttura dell'argilla, permettendo di individuare eventuali ossidi e/o idrossidi metallici presenti nel campione, permettendo così di capire se nella struttura dell'argilla sono intercalate queste componenti.

Con questi procedimenti si hanno quindi informazioni dettagliate sulla struttura dell'argilla, ovvero è possibile essere a conoscenza se si tratta di un'argilla pura, se è interstratificata e, in tal caso, che tipo di interstratificazione possiede. Inoltre sono importanti per capire il comportamento dell'argilla stessa: ad esempio, un'argilla non interstratificata avrà una certa capacità espansiva, che si riduce ovviamente se invece è interstratificata. L'aumento della capacità espansiva è correlata alla possibilità del materiale di assorbire acqua e quindi anche alla possibilità di espandersi: queste proprietà sono strettamente legate alla stabilità del materiale di fronte ad un cambiamento delle condizioni idrometriche del terreno.

## 3 Risultati

### 3.1 Caratteristiche fisiche

La perforazione a carotaggio continuo ha evidenziato quanto riportato dalla Figura 26 e dalla Figura 27.



Figura 26: Cassetta catalogatrice n.1 (dal piano campagna fino a 5 metri di profondità).



Figura 27: Cassetta catalogatrice n.2 (da 5 a 8 metri di profondità).

Ad una visione diretta delle carote ottenute e ad una valutazione qualitativa al tatto, è stato possibile definire indicativamente i caratteri granulometrici dei livelli attraversati:

- da 0.00 a 0.75 m: argilla limosa bruna con ciottoli di dimensioni da cm a dm di composizione basaltica;
- da 0.75 a 1.50 m: argilla limosa con ciottoli sub-cm arrotondati e friabili di natura basaltica, con presenza di livelli organici;
- da 1.50 a 1.70 m: zona di transizione, con presenza di screziature chiare di dimensioni mm;
- da 1.70 a 2.00 m: argilla limosa con presenza di ciottoli mm e cm di natura basaltica e friabili di colore nero;
- da 2.00 a 2.90 m: argilla limosa con presenza di sostanza organica con scarsi ciottoli friabili e con forte reagenza a HCl di dimensioni cm, con presenza di screziature grigiastre in aumento in profondità;
- da 2.90 a 3.60 m: argilla limosa con ciottoli carbonatici cm, con presenza di screziature grigiastre e nerastre;
- da 3.60 a 4.40 m: limo argilloso con presenza di ciottoli carbonatici nella parte superiore dello strato, nella parte inferiore invece vi è la presenza di ciottoli a spigoli vivi non reagenti ad HCl;
- da 4.40 a 4.50 m: limo argilloso con presenza poco abbondante di ciottoli non reagenti ad HCl;
- da 4.50 a 4.75 m: limo argilloso con presenza di ciottoli di tufo di colore bianco e di dimensioni cm;
- da 4.75 a 5.00 m: limo argilloso rossastro con abbondanti ciottoli tufacei;
- da 5.00 a 6.10 m: limo argilloso poco consistente e facilmente disgregabile con il martello;
- da 6.10 a 7.00 m: limo argilloso facilmente disgregabile con il martello, con abbondante presenza di ciottoli basaltici a spigoli vivi e presenza di concrezioni calcaree friabili;
- da 7.00 a 8.00 m: limo argilloso con abbondanti clasti basaltici a spigoli vivi di dimensioni cm.

Le prove di laboratorio sono state eseguite sui campioni prelevati dalle carote ottenute dalla perforazione a carotaggio continuo ed inoltre sono state analizzate le prove di laboratorio effettuate sui campioni ottenuti dallo scavo di trincea eseguito in un precedente studio. I campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo sono stati denominati ed utilizzati diversamente per le varie prove di laboratorio, come mostrato nella Tabella 2.

Denominazione campioni e profondità			Prove effettuate			Denominazione campioni per limiti di Atterberg	
Codice campione	N° campione	Profondità campione (m)	Granulometria	Limiti di Atterberg	Diffrattometria	Trattamento campioni con acqua distillata (A)	Trattamento campioni con esametafosfato (E)
S1-C1	2	1.00 - 1.33	X	X	X	2-A	2-E
S1-C2	3	1.70 - 2.00	X	X	X	3-A	3-E
S1-C3	4	2.20 - 2.50	X	X	X	4-A	4-E
S1-C4	5	3.00 - 3.40	X	X	X	5-A	5-E
S1-C5	6	3.90 - 4.15	X	X	X	6-A	6-E
S1-C6	7	4.50 - 4.75	X				
S1-C7	8	5.45 - 5.70	X	X	X	8-A	8-E
S1-C8	9	6.25 - 6.40	X				
S1-C9	10	7.60 - 7.70	X				

Tabella 2: Denominazione dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo.

I risultati ottenuti nel corso dell'analisi granulometrica e dall'analisi per sedimentazione sono stati riportati in un diagramma semilogaritmico: in ordinata sono riportate le percentuali in peso di materiale passante, mentre in ascissa è riportato il diametro dei grani espresso in mm (in scala logaritmica a base decimale). Dall'unione dei dati inseriti in questo diagramma si ottiene una linea detta curva granulometrica, riportata a titolo di esempio in Figura 28.

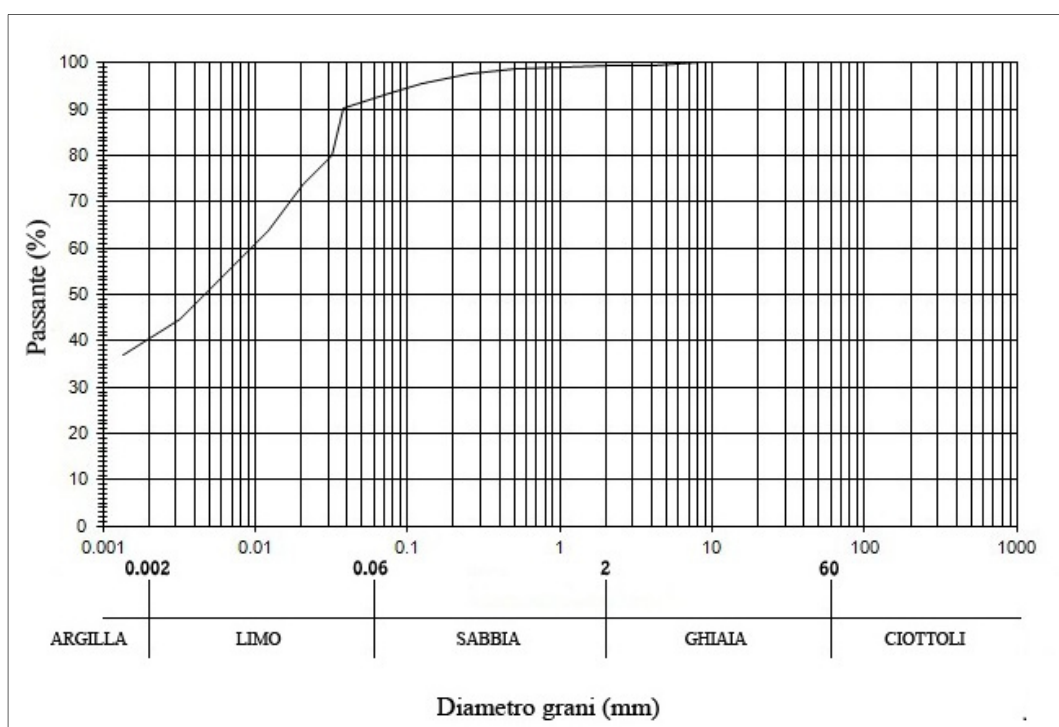


Figura 28: Curva granulometrica del campione N.6 riferito ad una profondità di 3.90-4.15 metri.

Le analisi granulometriche sono state svolte sui 9 campioni ricavati dal sondaggio a carotaggio continuo ed i risultati sono stati plottati in un unico grafico, come mostrato in Figura 29.

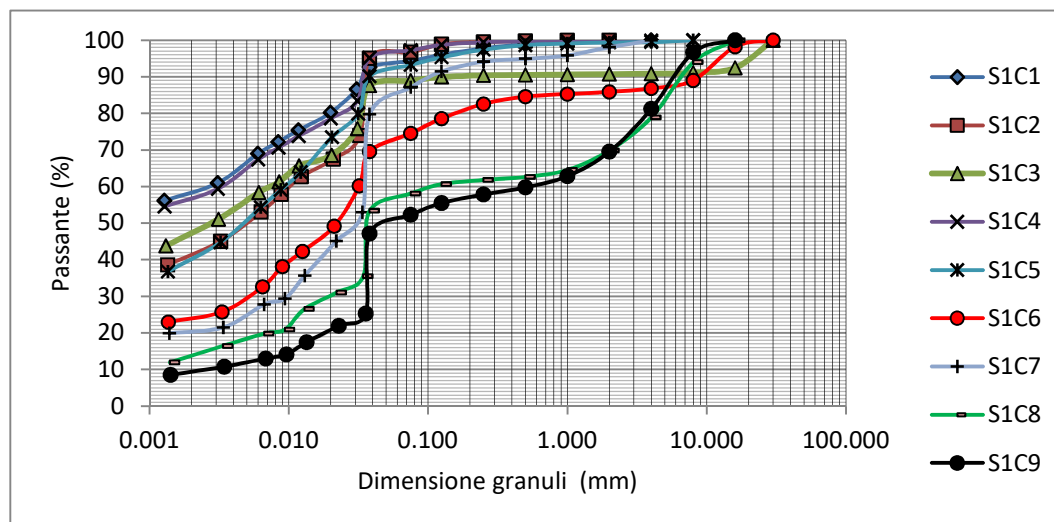


Figura 29: Curve granulometriche dei 9 campioni ricavati dal sondaggio a carotaggio continuo.

Per una migliore comprensione della rappresentazione dei valori ottenuti, i risultati sono stati plottati in un diagramma triangolare (Figura 30). Questo consente la possibilità di rappresentare un notevole numero di campioni, ognuno dei quali è rappresentato da un punto, le cui proiezioni sui lati del triangolo corrispondono alle percentuali delle frazioni granulometriche presenti.

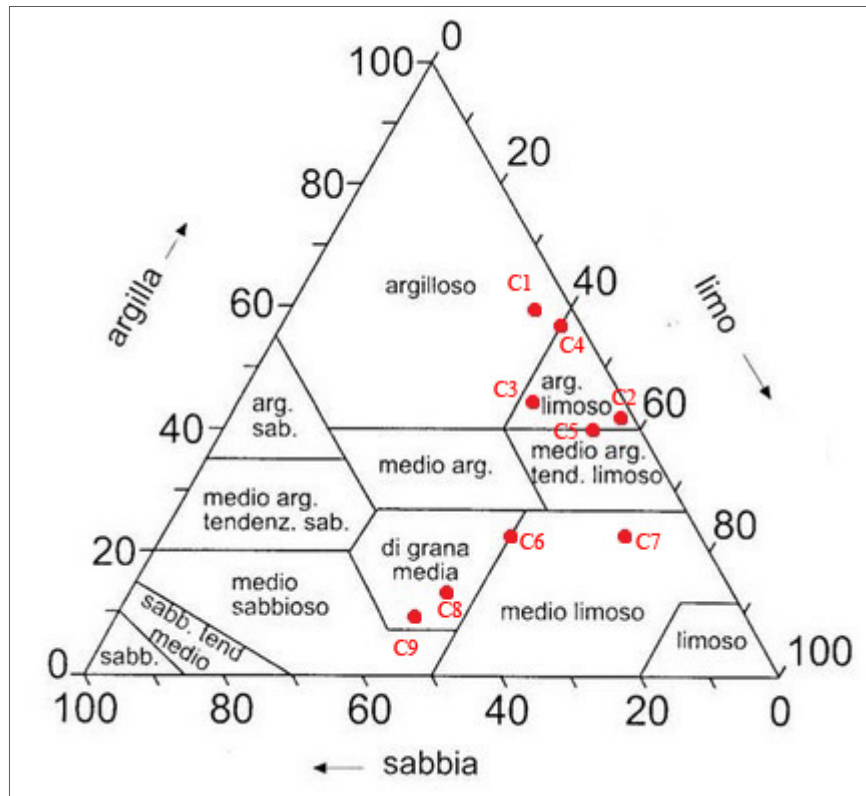


Figura 30: Diagramma triangolare rappresentate i risultati delle analisi granulometriche dei 9 campioni ricavati dalla perforazione a carotaggio continuo.

Per rappresentare il trend delle variazioni granulometriche con la profondità, i risultati ottenuti sono stati plottati in un grafico lineare, come mostrato in Figura 31.

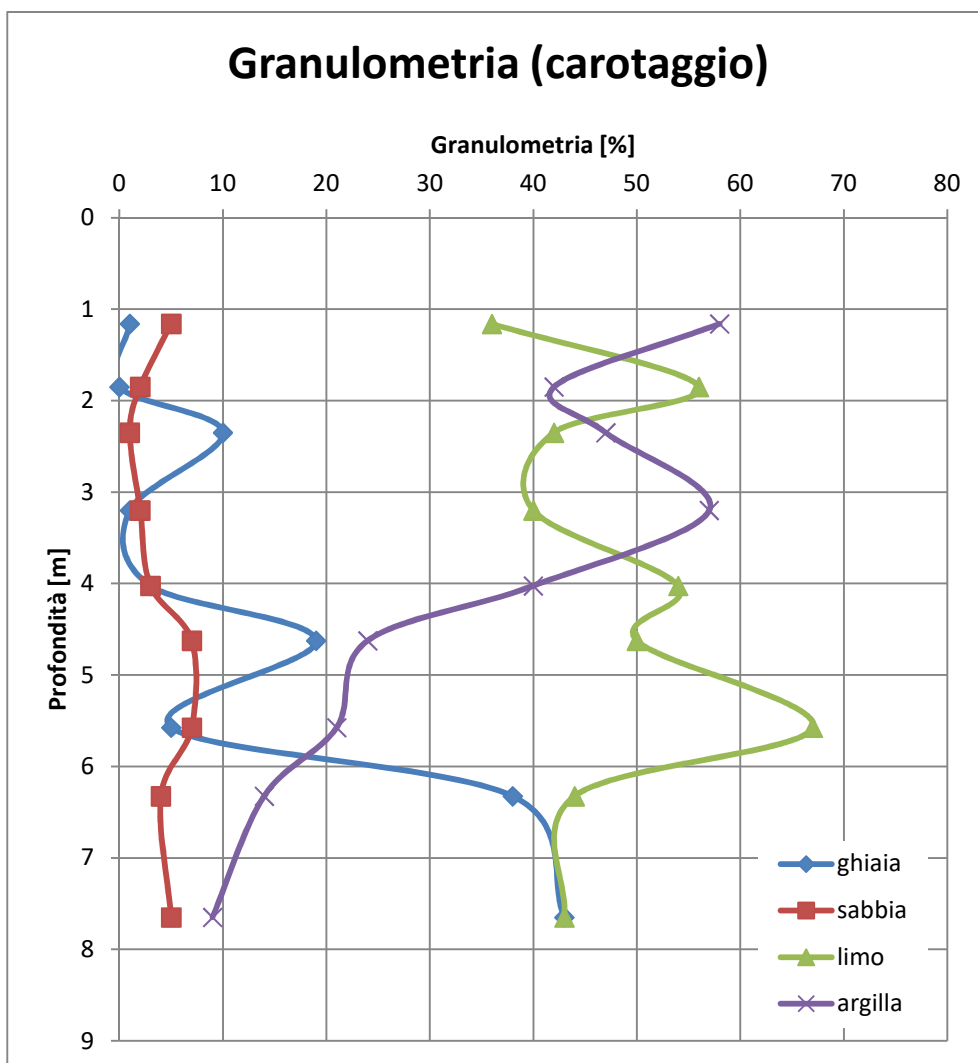


Figura 31: Grafico rappresentante il trend delle variazioni granulometriche dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo.

Dalla Figura 31 si può vedere come l'andamento delle frazioni granulometriche sia molto oscillante. Nei primi 4 m si nota un'alternanza predominante di limo e argilla, con quest'ultima che tende a diminuire con l'aumentare della profondità. L'argilla presenta valori massimi alle profondità di 1 m e di 3.4 m, mentre il limo tende ad essere predominante alla profondità di 5.7 m. La sabbia presenta un andamento abbastanza costante, senza significative variazioni, mentre la ghiaia, quasi assente in superficie, tende ad aumentare con la profondità.

I valori numerici sono riportati nell'Allegato 1.



Dai risultati delle prove granulometriche è stato possibile classificare il terreno in orizzonti differenti (Tabella 3), considerando la normativa AGI. Quest'ultima permette una classificazione basata sulla percentuale approssimativa delle varie frazioni presenti nei campioni, associando a ciascuno di essi una denominazione composta da sostantivi e attributi:

- *I termine*: nome della frazione granulometrica dominante;
- *II termine*: nomi delle possibili frazioni superiori al 25% in peso rispetto al campione totale, precedute dalla preposizione *con*;
- *III termine*: nomi delle possibili frazioni comprese tra il 10% e il 25% con suffisso *oso*;
- *IV termine*: nomi delle eventuali frazioni comprese tra il 5% e il 10% con il suffisso *oso*, accompagnate da *debolmente*.

Stratigrafia		
Denominazione	Profondità (m)	Orizzonte
1° orizzonte	0.00 - 4.15	Argilla con limo
2° orizzonte	4.15 - 5.70	Limo argilloso debolmente sabbioso
3° orizzonte	5.70 - 7.70	Limo con ghiaia debolmente argilloso

Tabella 3: Stratigrafia desunta dalle prove granulometriche dei campioni ricavati dalla perforazione a carotaggio continuo.

I campioni ottenuti dallo scavo di trincea (Figura 32) sono caratterizzati da una prevalenza di limo, che è la frazione predominante fino alla profondità di 3.7 m di profondità. L'andamento è oscillatorio, e risulta avere un andamento speculare rispetto alla sabbia presente. L'argilla presenta un trend molto variabile e mostra una tendenza al decremento con l'aumentare della profondità. Il valore massimo raggiunto è pari al 25% ad una profondità di 0.3 m, mentre il valore minimo corrisponde a 2.13% ad una profondità di 3.8 m. La ghiaia è presente in un solo campione, ovvero alla profondità di 3.6 m con un valore del 3%.

I valori numerici sono riportati nell'Allegato 2.

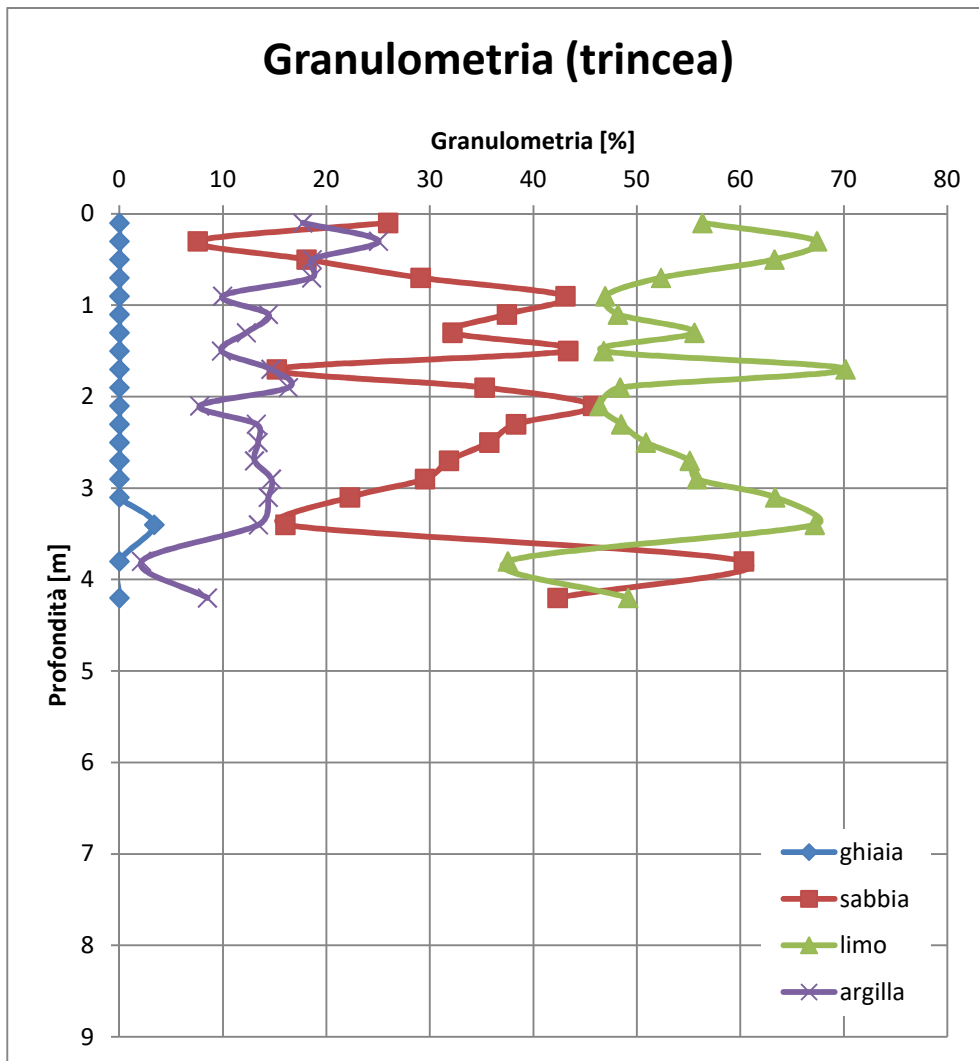


Figura 32: Grafico rappresentante il trend delle variazioni granulometriche dei campioni derivati dallo scavo di trincea.

Analogamente al caso precedente, per una migliore comprensione dei risultati ottenuti, i campioni sono stati plottati in un diagramma ternario, come riportato nella Figura 33.

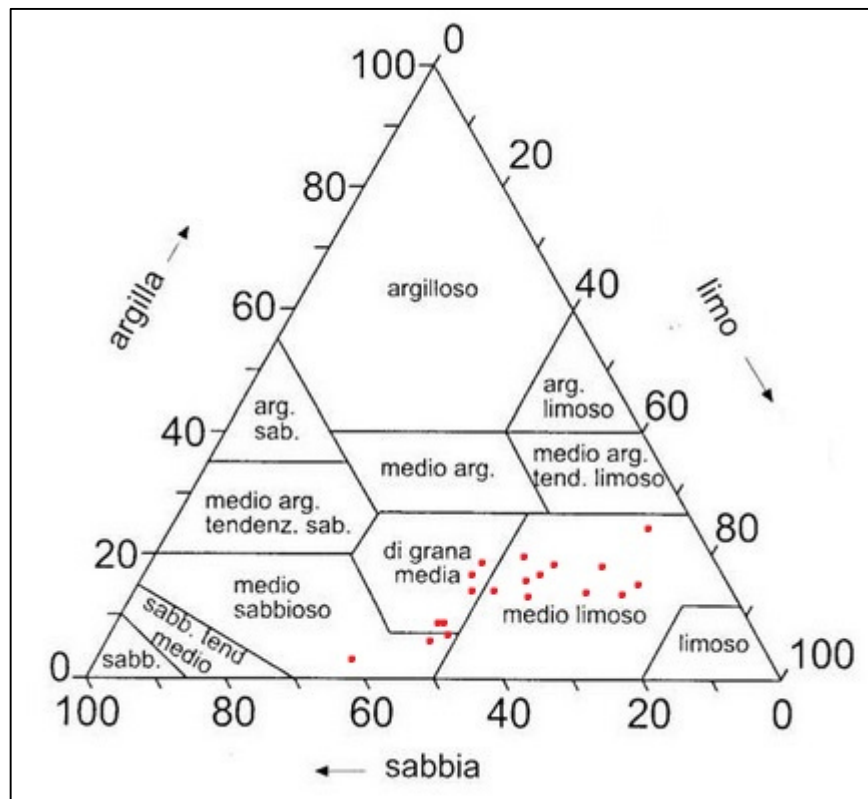


Figura 33: Diagramma triangolare rappresentate i risultati delle analisi granulometriche dei 19 campioni ricavati dallo scavo di trincea.

Infine, dai risultati ottenuti dalle prove granulometriche è stato possibile classificare il terreno in orizzonti differenti (Tabella 4).

Stratigrafia	
Profondità (m)	Orizzonte
0.00 - 0.90	Limo sabbioso argilloso
0.90 - 3.40	Limo con sabbia argilloso
3.40 - 4.20	Sabbia con limo

Tabella 4: Stratigrafia desunta dalle prove granulometriche dei campioni ricavati dallo scavo di trincea.

I risultati ottenuti dai limiti di Atterberg dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo sono stati plottati in un grafico lineare con in ascissa i valori dei limiti e in ordinata i valori della profondità (Figura 34). Sono stati aggiunti in

questo grafico i valori dell'indice di plasticità (IP), ottenuto dalla differenza tra il limite liquido (WL) e il limite plastico (WP):

$$IP = WL - WP$$

che rappresenta l'intervallo di contenuto d'acqua all'interno del quale il terreno mantiene una consistenza plastica.

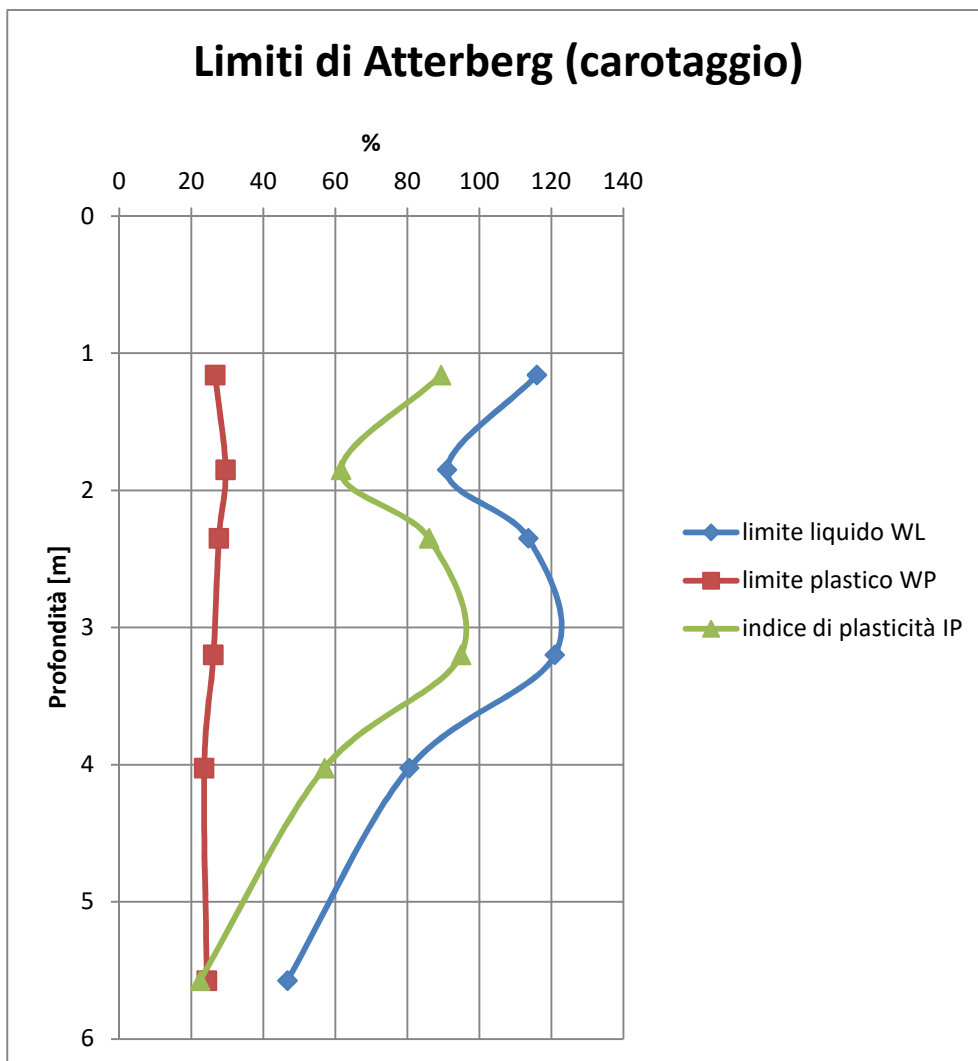


Figura 34: Grafico delle variazioni dei limiti di Atterberg all'aumentare della profondità dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo.

Si può vedere come il limite plastico assuma un valore abbastanza costante per tutti i campioni analizzati. Il limite liquido tende ad avere un andamento

oscillatorio, assumendo un valore massimo del 120.93% alla profondità di circa 3 m, diminuendo poi costantemente fino ad un valore del 46.65% alla profondità di circa 5.5 m.

L'indice di plasticità assume il valore massimo del 94.87% alla profondità di circa 3 m, e si ha una sensibile diminuzione con l'aumentare della profondità, dovuta principalmente alla diminuzione del valore del limite liquido, essendo il trend del limite plastico relativamente costante.

I valori numerici sono riportati nell'Allegato 1.

Per classificare i campioni di terreno a grana fine utilizzati per i limiti di Atterberg, è stato utilizzato il sistema USCS (Unified Soil Classification System) elaborato da Casagrande nel 1948. La classificazione consiste nel riportare in un grafico chiamato "Carta di plasticità di Casagrande" (Figura 35) i valori dell'indice di plasticità (in ordinata) ed i valori del limite liquido (in ascissa) riferiti ai vari campioni analizzati. Questa è suddivisa in 4 zone principali denominate in 6 modi differenti:

- ML: limi inorganici e sabbie finissime, sabbie fini limose o argillose, limi argillosi di scarsa plasticità;
- CL: argille inorganiche di bassa o media plasticità, argille ghiaiose, sabbiose, limose, argille magre;
- OL: limi organici e argille limose organiche di bassa plasticità;
- MH: limi inorganici, sabbie fini e limi micacei o diatomici, limi elastici;
- CH: argille inorganiche di alta plasticità, argille grasse;
- OH: argille organiche di media o alta plasticità, terreni organici.

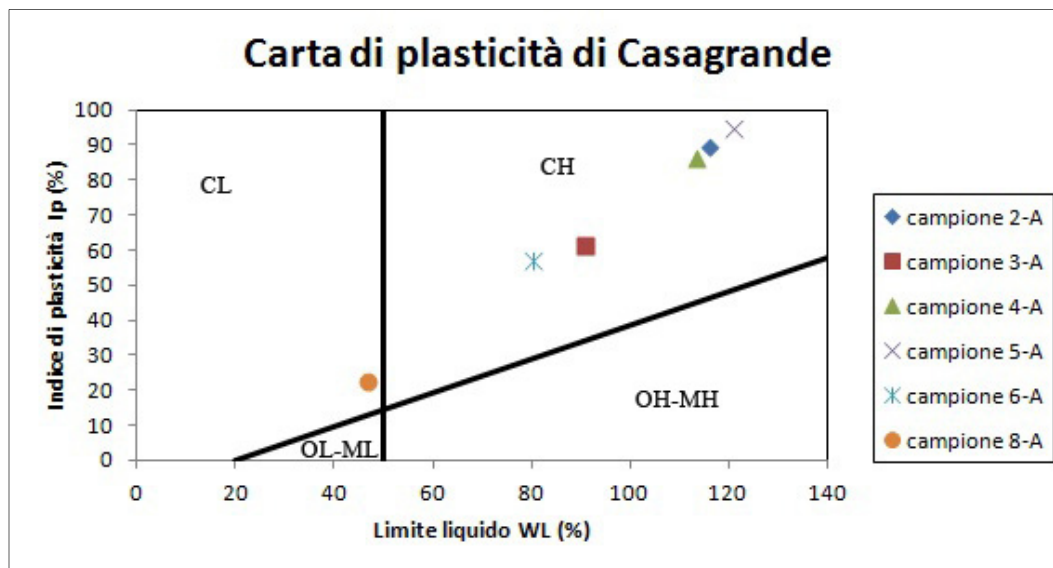


Figura 35: Campioni plottati all'interno della "Carta di plasticità" dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo.

I campioni ricadono quasi tutti nel campo CH, ovvero nel campo riferito ad argille inorganiche di alta plasticità, eccetto un campione (che corrisponde ad una profondità più elevata) che ricade nel campo CL, appartenente quindi ad argille inorganiche di bassa o media plasticità.

Per quanto riguarda i campioni derivati dallo scavo di trincea (Figura 36) si può notare come il limite liquido assuma un valore relativamente oscillatorio, con un massimo che sfiora il 90% alla profondità di circa 1.5 m, mentre tende a diminuire con l'aumentare della profondità. Il limite plastico tende ad avere un andamento abbastanza costante, eccetto un valore massimo alla profondità di circa 1 m. Il massimo valore dell'indice di plasticità risulta essere a bassa profondità con valori del 45%, mentre si ha una diminuzione con l'aumentare della profondità.

I valori numerici dei risultati ottenuti, sono riportati nell'Allegato 2.

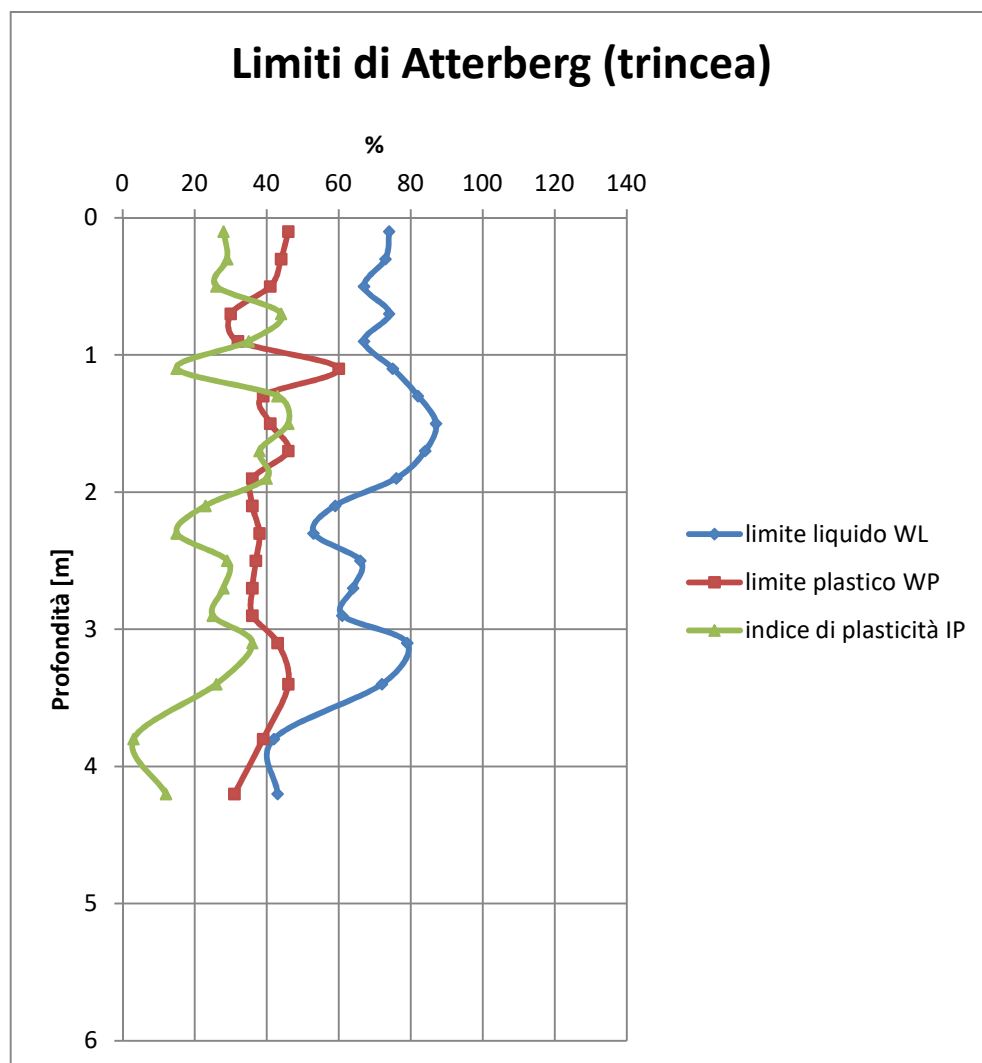


Figura 36: Grafico delle variazioni dei limiti di Atterberg all'aumentare della profondità dei campioni derivati dallo scavo di trincea.

### 3.2 *Caratteristiche mineralogiche*

Dai risultati delle analisi mineralogiche, dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo, effettuate con la tecnica della diffrattometria a raggi X è stato possibile individuare le fasi mineralogiche presenti nei campioni analizzati e di quantificarne il contenuto per ognuna di esse. Il terreno in esame presenta una composizione mineralogica che è tipica del prodotto di un'alterazione spinta di rocce vulcaniche, confermata da un'elevata presenza di smectite, come si evince dalla Tabella 5.



Campioni	profondità (m)	Mtn (%)	Ana (%)	Qtz (%)	And (%)	Ilm (%)	Mgn (%)	Gth (%)	Ms (%)	Aug (%)
2-A	1,00-1,33	86.111	1.266	4.651	7.836	0.135	0	0	0	0
2-E		83.890	0.849	4.639	10.337	0.284	0	0	0	0
3-A	1,70-2,00	90.979	1.223	4.225	3.342	0.130	0.102	0	0	0
3-E		89.423	1.007	4.305	5.197	0.026	0.042	0	0	0
4-A	2,20-2,50	90.747	1.325	4.136	3.645	0.147	0	0	0	0
4-E		86.483	1.007	4.817	7.598	0.095	0	0	0	0
5-A	3,00-3,40	86.525	0.915	4.400	6.760	0.046	0	1.353	0	0
5-E		82.734	0.848	5.130	9.925	0.405	0	0.958	0	0
6-A	3,90-4,15	75.084	0.813	5.579	12.480	0.661	0.452	2.022	1.948	0.961
6-E		68.934	1.524	7.309	11.900	0.081	0.213	3.175	5.515	1.349
8-A	5,45-,570	54.529	0	0.433	36.463	0.821	0.067	0	0	7.686
8-E		52.376	0	0.686	38.340	0.790	0	0	0	7.808

Tabella 5: Risultati delle analisi mineralogiche dei campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo.

#### Legenda Tabella 5:

- Mnt = montmorillonite;
- Ana = anatasio;
- Qtz = quarzo;
- And = andesina;
- Ilm = ilmenite;
- Mgn = magnetite;
- Gth = goethite;
- Ms = muscovite;
- Aug = augite.

I minerali riscontrati nei vari campioni sono stati suddivisi in 3 gruppi differenti, ad eccezione per la smectite (che è stata considerata come una fase mineralogica a se stante), ognuno dei quali rappresenta il risultato dei processi avvenuti nell'ambiente di formazione (Figura 37 e Figura 38).

Le *fasi residuali* comprendono i minerali del substrato roccioso interessati in misura minore da fenomeni di alterazione all'aumentare della profondità. Le fasi principali sono costituite da augite (clinopirosseno) e andesina (plagioclasio con componente anortitica compresa tra 30 e 50%).

Le *fasi lateritiche* sono il prodotto di alterazione di rocce caratteristico delle regioni equatoriali-tropicali, ove persiste un'alternanza di periodi piovosi e umidi

con periodi di siccità. La laterizzazione consiste essenzialmente in un'idrolisi completa dei silicati alluminosi (es. feldspati) ad opera di acque con pH acido con la conseguente formazione di orizzonti ad alta concentrazione di ossidi e idrossidi. Le fasi mineralogiche riscontrate nei campioni in esame sono rappresentate da ossido di ferro (magnetite), di titanio (anatasio), idrossido di ferro (goethite) e ossido di ferro e titanio (ilmenite).

Le *fasi colluviali* comprendono i minerali contenuti nei sedimenti rimaneggiati sia per azione combinata della gravità e del ruscellamento superficiale sia per le attività antropiche. Le fasi mineralogiche sono rappresentate da quarzo e muscovite.

La *smectite* è il prodotto dell'alterazione chimica di bassa temperatura delle rocce vulcaniche, in particolare della componente vetrosa e dei silico-alluminati a Na, K, Ca e Mg (feldspati, pirosseni e olivine) (Meunier, 2005).

Dall'analisi dei profili mineralogici (Figura 37 e Figura 38) è possibile notare una presenza predominante di smectite nella parte più superficiale del terreno in esame, con una percentuale superiore all' 80% nei primi 3.5 m, diminuendo progressivamente con l'aumentare della profondità. Le fasi residuali mostrano un andamento speculare a quello della smectite, con percentuali minori del 40% fino alla profondità di 4 m, e con un picco massimo che supera il 40% alla profondità di circa 5.5 m. Infine, le fasi lateritiche e colluviali mostrano un andamento abbastanza costante per tutto lo spessore indagato, con percentuali che rimangono entrambe inferiori al 20%.

Le analisi mineralogiche sono state effettuate su entrambe le serie di campioni utilizzati per i limiti di Atterberg, ovvero su campioni trattati con acqua distillata e su campioni trattati con esametafosfato, mettendo così in evidenza eventuali differenze dovute al diverso trattamento. Dai risultati ottenuti non sono state riscontrate significative differenze.

## Analisi mineralogiche (carotaggio) Campioni A (acqua distillata)

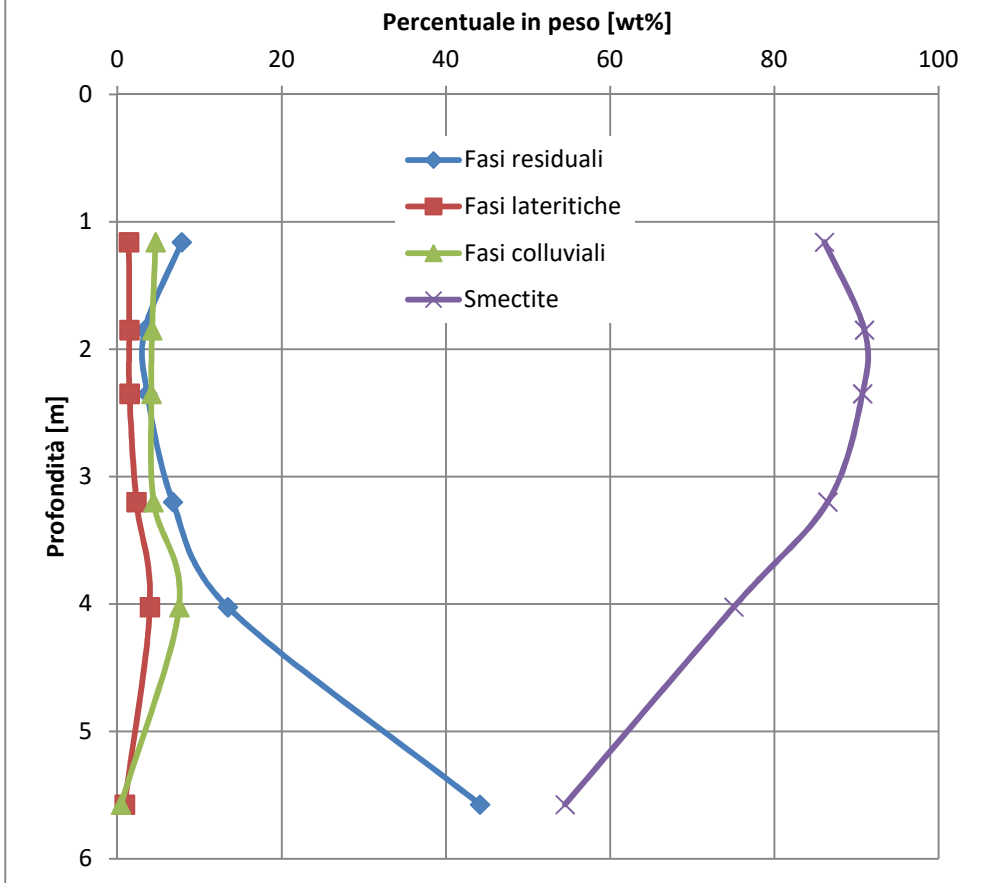


Figura 37: Distribuzione delle fasi al variare della profondità.

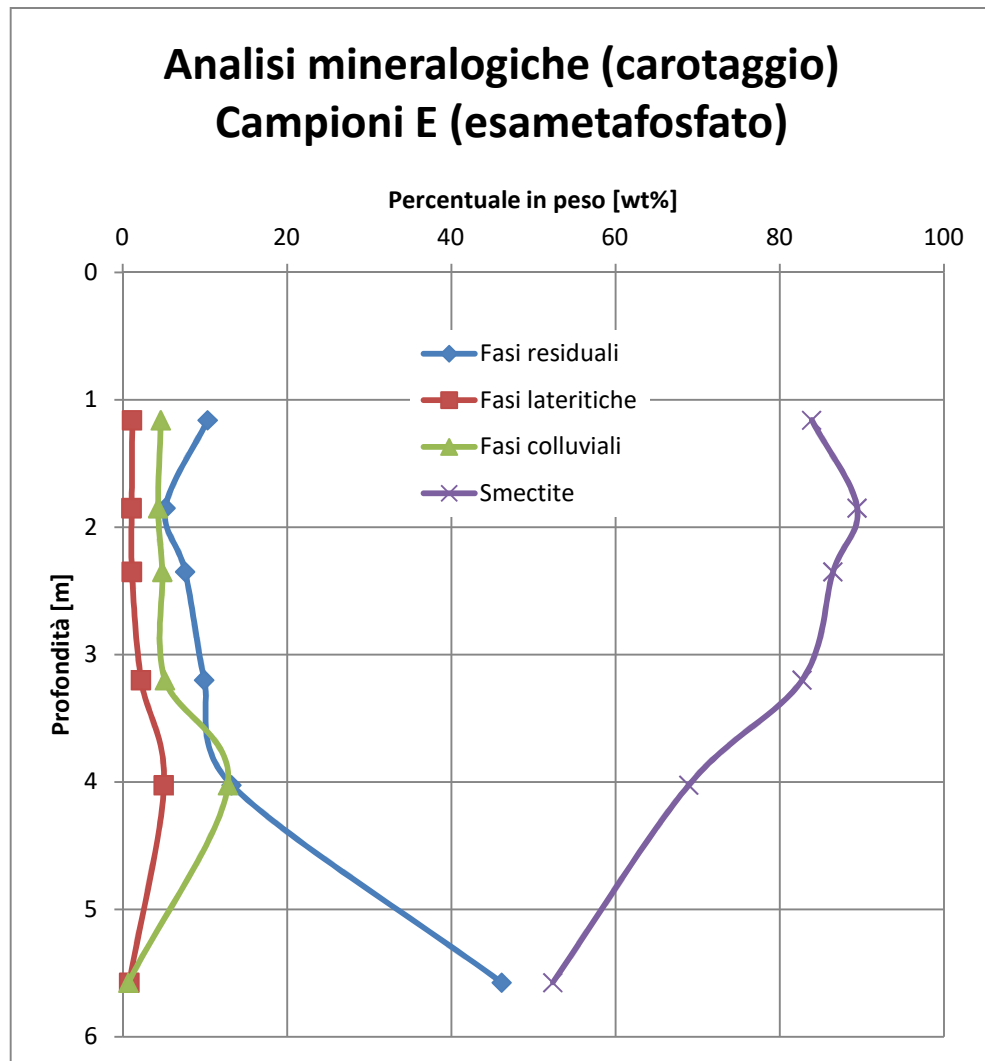


Figura 38: Distribuzione delle fasi al variare della profondità.

Il profilo mineralogico derivato dai campioni dello scavo di trincea è suddivisibile in tre orizzonti (Figura 39). L'orizzonte più superficiale presenta una maggiore quantità di smectite rispetto agli orizzonti più profondi, con valori medi dell' 88%. Le fasi lateritiche e colluviali hanno valori inferiori al 5% mentre le fasi residuali presentano valori compresi tra il 5 e il 7%.

Il secondo orizzonte, compreso tra 2 e 3.5 m di profondità, presenta una diminuzione dei valori di smectite, con valori medi del 70%, mentre le fasi lateritiche e colluviali mantengono valori costanti simili al primo orizzonte. Le fasi residuali, invece, presentano un aumento rilevante, con valori del 20-30%.

Nell'orizzonte più profondo, a partire dalla profondità di 3.8 m, si ha una notevole diminuzione della smectite, con valori di circa il 50%, mentre si nota l'assenza delle fasi colluviali. Le fasi lateritiche presentano un aumento dei valori fino al 10%, mentre le fasi residuali risultano incrementate fino a valori superiori del 40%.

I valori numerici dei risultati sono riportati nell'Allegato 3.

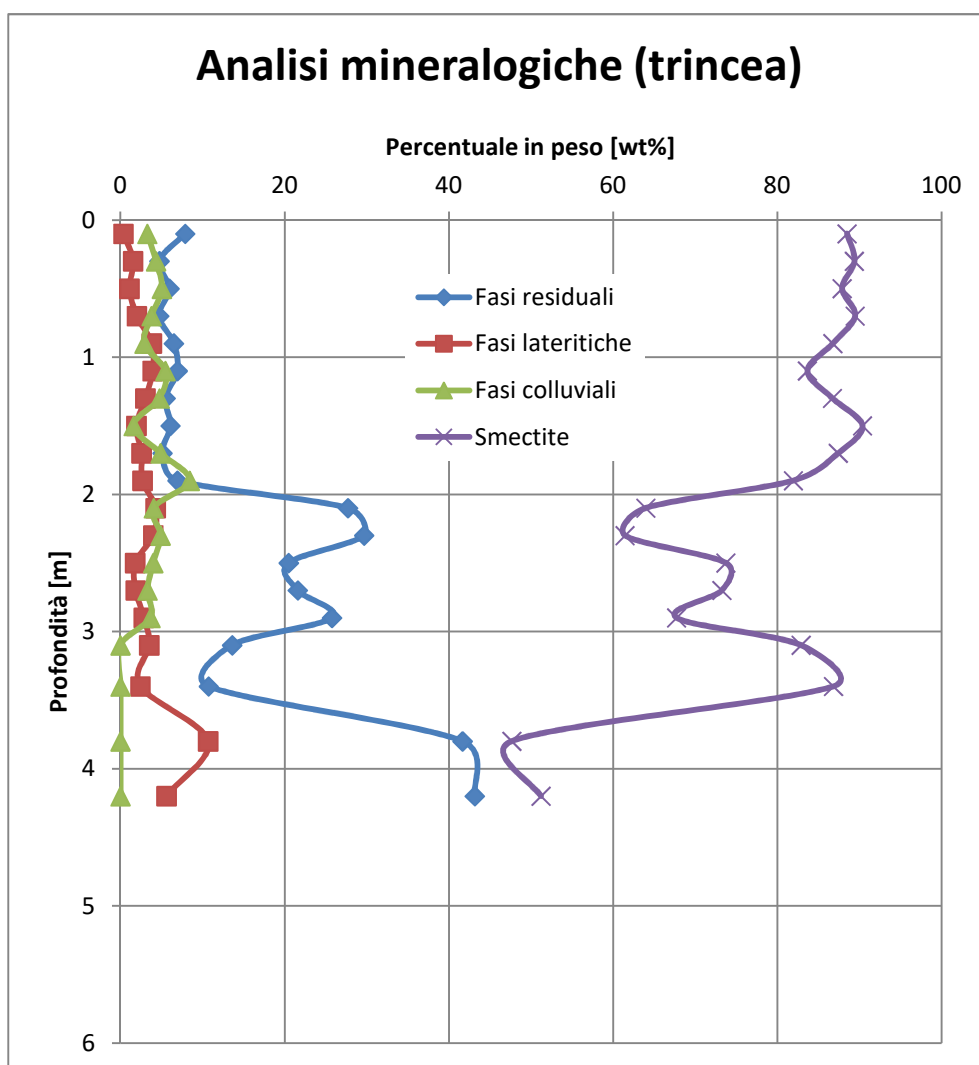


Figura 39: Distribuzione delle fasi al variare della profondità.

L'analisi di diffrazione a raggi X eseguita sul campione "levigato", ovvero solo sul materiale inferiore a 0.002 mm, ha permesso di caratterizzare nel

dettaglio la frazione fine presente, che in questo caso risulta essere Montmorillonite (minerale argilloso appartenente al gruppo delle smectiti). Dai risultati ottenuti è stato possibile comprendere la sua percentuale di purezza, ossia se al suo interno fossero presenti altre componenti mineralogiche intercalate.

Le smectiti sono un sottogruppo di minerali argillosi appartenenti al gruppo dei fillosilicati, costituiti da strutture planari a strati con sequenza T-O-T (T = strato tetraedrico; O = strato ottaedrico) (Figura 40) che può essere sia diottaedrica che triottaedrica, in quanto il catione presente nell'ottaedro può essere bivalente (es.:  $Mg^{2+}$  o  $Fe^{2+}$ ) o trivalente (es.:  $Al^{3+}$ ).

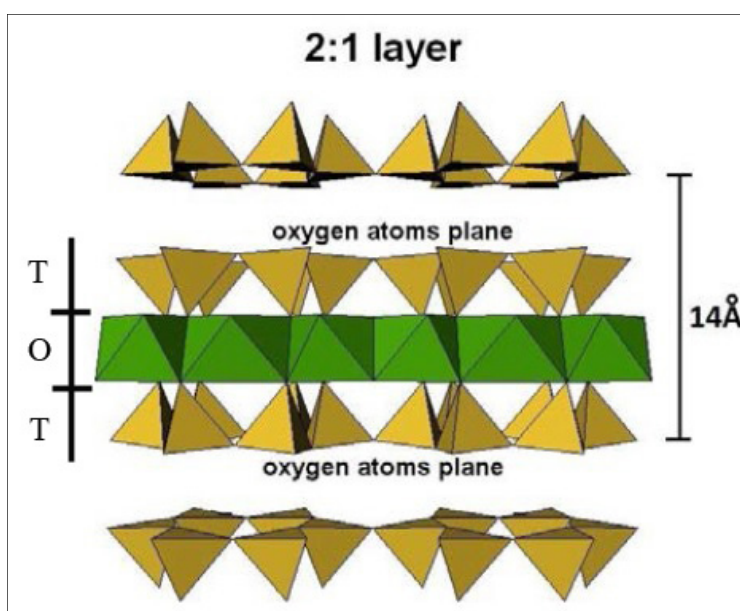


Figura 40: Struttura T-O-T della smectite.

La smectite più comune è la montmorillonite che ha formula  $(Ca,Na)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10} \cdot nH_2O$  (Klein, 2004).

Lo strato ottaedrico può racchiudere, al centro degli ottaedri, atomi di Alluminio, Ferro, Magnesio o una combinazione di questi; nello strato tetraedrico, gli atomi di Silicio possono essere sostituiti da altrettanti atomi di Alluminio (Figura 41).



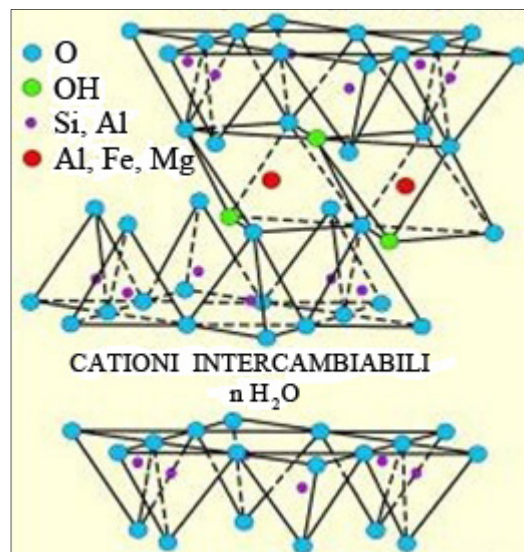


Figura 41: Struttura della montmorillonite.

La conseguenza di questa sostituzione è la comparsa di una carica elettrica negativa sulla superficie del cristallo, la quale viene in gran parte neutralizzata dai cationi presenti nell'acqua (Sodio, Calcio, Potassio, etc.). Questi cationi sono facilmente intercambiabili. Le unità di 10 Å di spessore si sovrappongono, tenute insieme da un'attrazione reciproca dovuta ai cationi; a questa attrazione si aggiungono le forze di attrazione di Van der Waals, più deboli. I legami tra le unità sono deboli e dipendono soprattutto dalla natura dei cationi intercambiabili. L'acqua può penetrare tra i pacchetti e provocare un rigonfiamento, cosicché non ha molta difficoltà a dissociare il cristallo in unità elementari di 10 Å. Questa capacità di assorbire molecole d'acqua tra i pacchetti T-O-T, e quindi di espandersi, provoca nella struttura della Montmorillonite una spaziatura sull'asse  $c$  variabile in relazione alla quantità d'acqua interposta tra gli interstrati, con un intervallo che comprende un d-spacing di 14 Å in condizioni anidre fino ad arrivare anche ad un d-spacing maggiore di 20 Å in condizioni idrate.

Il campione scelto per essere trattato con il metodo della "levigatura" è il campione 3-A relativo ad una profondità di 1.70-2.00 metri, essendo il campione con un maggior contenuto in montmorillonite. Il diffrattogramma ottenuto dall'analisi di questo campione mostra uno shift dei picchi relativi alla smectite,

legato alla variazione del d-spacing delle  $hkl$  dei piani basali in seguito al trattamento con glicole etilenico (Figura 42).

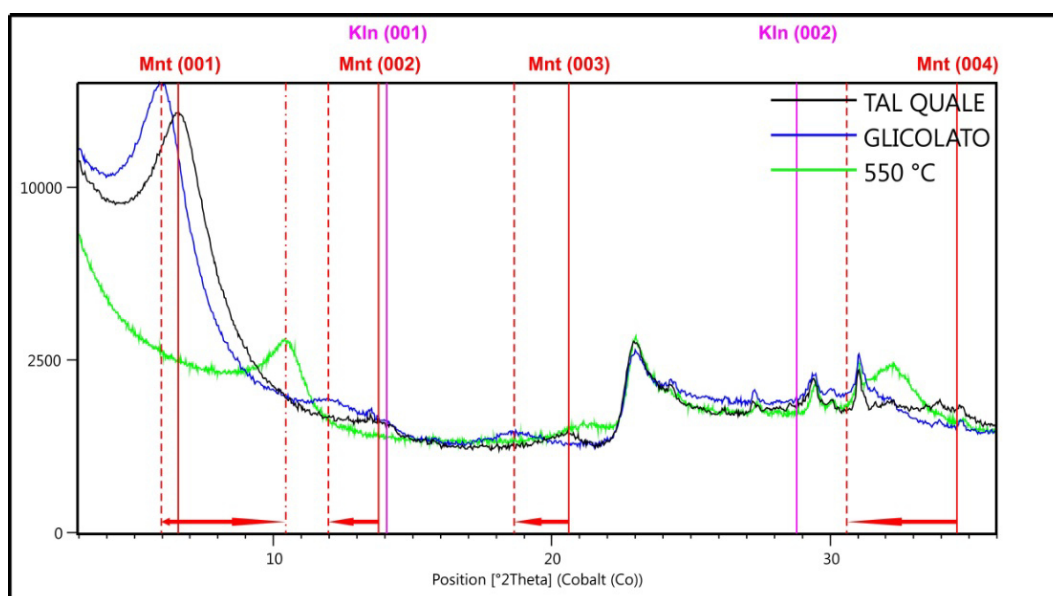


Figura 42: Diffrattogramma del campione 3-A: campione levigato (colore nero), campione glicolato (colore blu), campione essiccato in forno a 550° (colore verde). Le linee di colore rosso sono associate alla montmorillonite; le linee rosse tratteggiate rappresentano gli spostamenti dei riflessi  $hkl$  della montmorillonite in seguito a trattamento con glicole etilenico e ad essiccazione in forno.

Dai risultati emerge che la componente argillosa presente nel campione è data da montmorillonite calcica pura, senza alcun tipo di interstratificazione con altre specie argillose, eccezion fatta per una ridottissima ed insignificante traccia di caolinite. Il dato è indicato dallo shift sistematico di tutti i piani basali, in seguito a glicolazione, dal valore di riferimento a quello tipico di intercalazione totale della molecola di glicole etilenico nell'interstrato del minerale. Si nota infatti uno spostamento della 001 da 15 Å a 17 Å, della 002 da 7.5 Å a 8.5 Å, della 003 da 5 Å a 5.67 Å e della 004 da 3.75 Å a 4.25 Å.

Si nota la presenza di piccole tracce di caolinite che, essendo non espansiva, risulta non avere uno shift dei piani basali, essendo la 001 ferma a 7.15 Å e la 002 ferma a 3.58 Å.

In seguito a riscaldamento in forno a 550° del campione glicolato, si può notare che la 001 subisce uno spostamento da 15 Å iniziali a 9.80 Å a causa della perdita

d'acqua di interstrato, con conseguente collasso della struttura attorno ai rimanenti cationi interstrato, e comparsa di un pattern di diffrazione simile a quello dell'illite. Inoltre, scompaiono totalmente i picchi basali della caolinite, non essendo stabile a questa temperatura. Infine, l'assenza di picchi residui tra 15 Å e 17 Å indica l'assenza di interstratificazioni della smectite con eventuali idrossidi di ferro/titanio.

### 3.3 Caratteristiche di resistenza

Dalle prove penetrometriche DPSH sono stati ricavati i valori di resistenza dinamica alla punta registrati per le varie profondità nei diversi punti di indagine (vedi Allegato 4), ed è stata inoltre desunta la superficie del basamento roccioso grazie alle profondità di rifiuto della prova stessa (Figura 43). Dall'analisi dei valori di resistenza dinamica alla punta è stato possibile suddividere il deposito in orizzonti differenti per ogni DPSH analizzata (Figura 44), consentendo quindi di capire lo spessore dei diversi orizzonti.

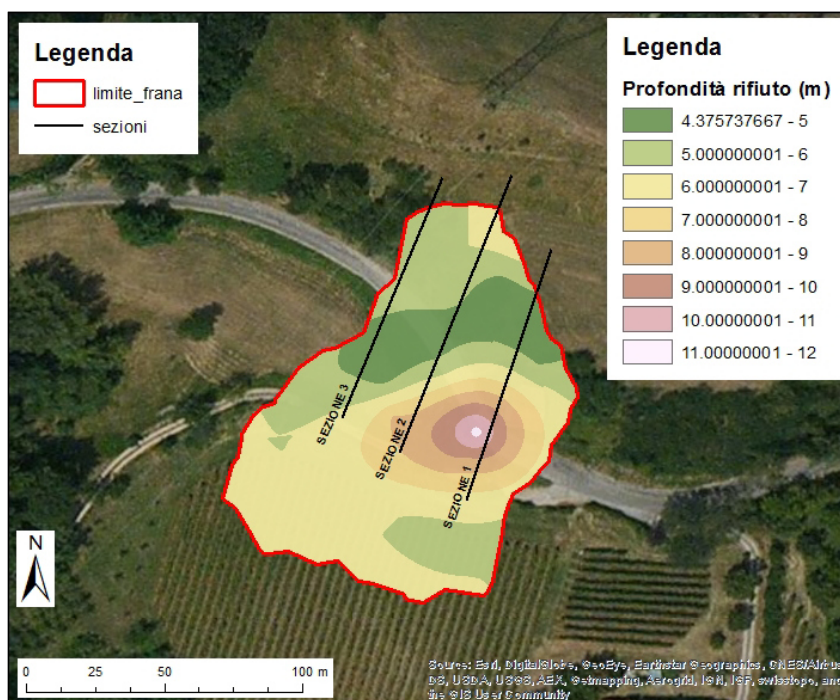


Figura 43: Interpolazione delle profondità di rifiuto delle prove penetrometriche DPSH (Metodo di interpolazione utilizzato: Kriging).

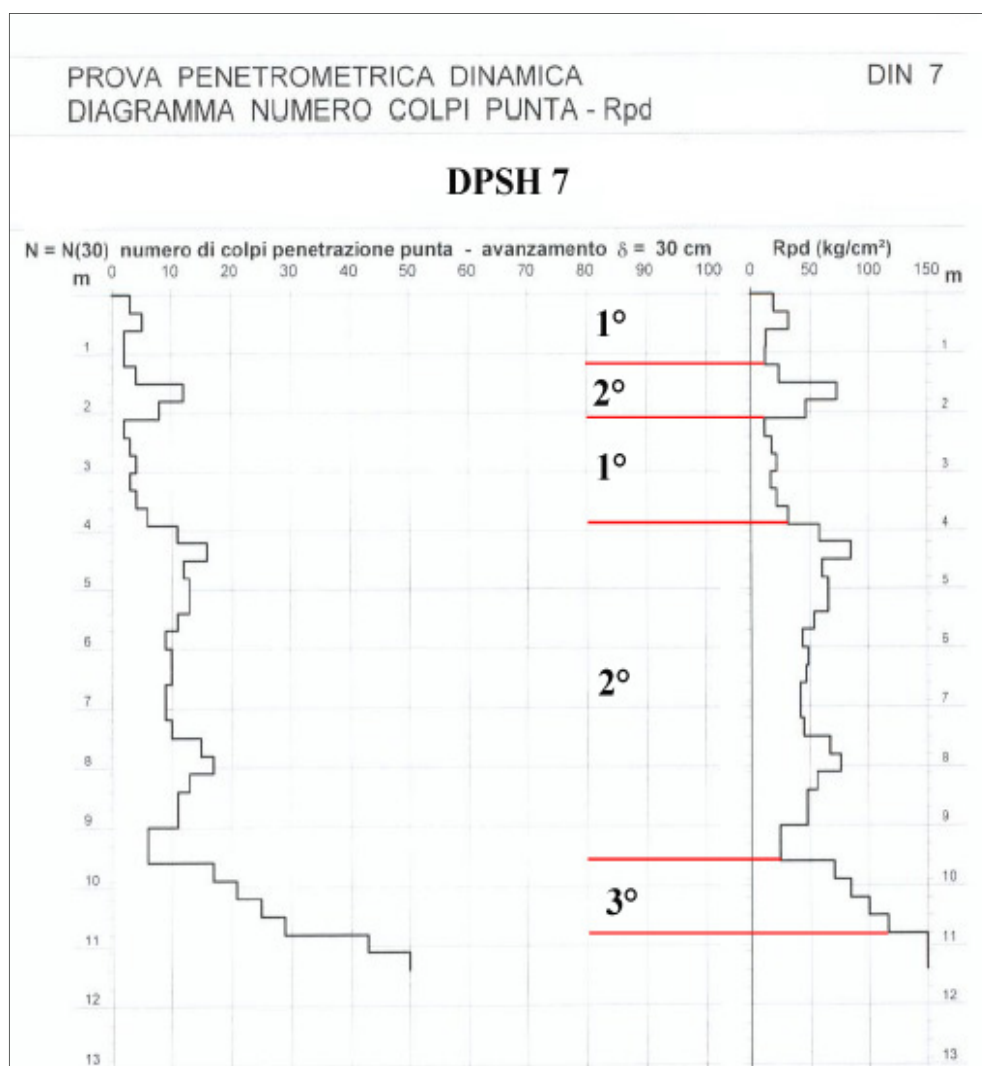


Figura 44: Interpretazione stratigrafica della DPSH 7 (per le altre interpretazioni delle DPSH analizzate, si rimanda all'Allegato 4). 1°: argilla con limo; 2°: limo argilloso debolmente sabbioso; 3°: limo con ghiaia debolmente argilloso.

### 3.4 Indagine sismica a rifrazione

Dall'analisi del modello tomografico di velocità delle onde di compressione ( $V_p$ ) si evidenziano i seguenti intervalli di  $V_p$  in profondità:

- si individua un primo strato, di potenza pari a circa 4 metri lungo il versante e fino a 6-7 metri in corrispondenza della cresta del rilievo caratterizzato da bassi valori di  $V_p$ , le quali risultano comprese tra 0 e 800 m/s (tonalità dall'azzurro al celeste) (Figura 45). Tale strato è

identificabile come la coltre detritica sciolta di copertura, le cui caratteristiche sono visibili anche in superficie, in particolare nei pressi della nicchia di frana;

- a profondità di circa 4-5 metri si individua con nettezza il rifratore principale dei raggi sismici, costituito dal tetto del substrato roccioso sottostante. Tra i 4 e i 6 metri le velocità  $V_p$  risultano essere comprese tra gli 800 e i 1400 m/s (roccia tenera e alterata, colori marrone scuro-marroncino), per poi crescere ulteriormente in profondità fino a 2200 m/s (roccia mediamente compatta, colori dall'ocra al giallino) (Naldi, 2014).

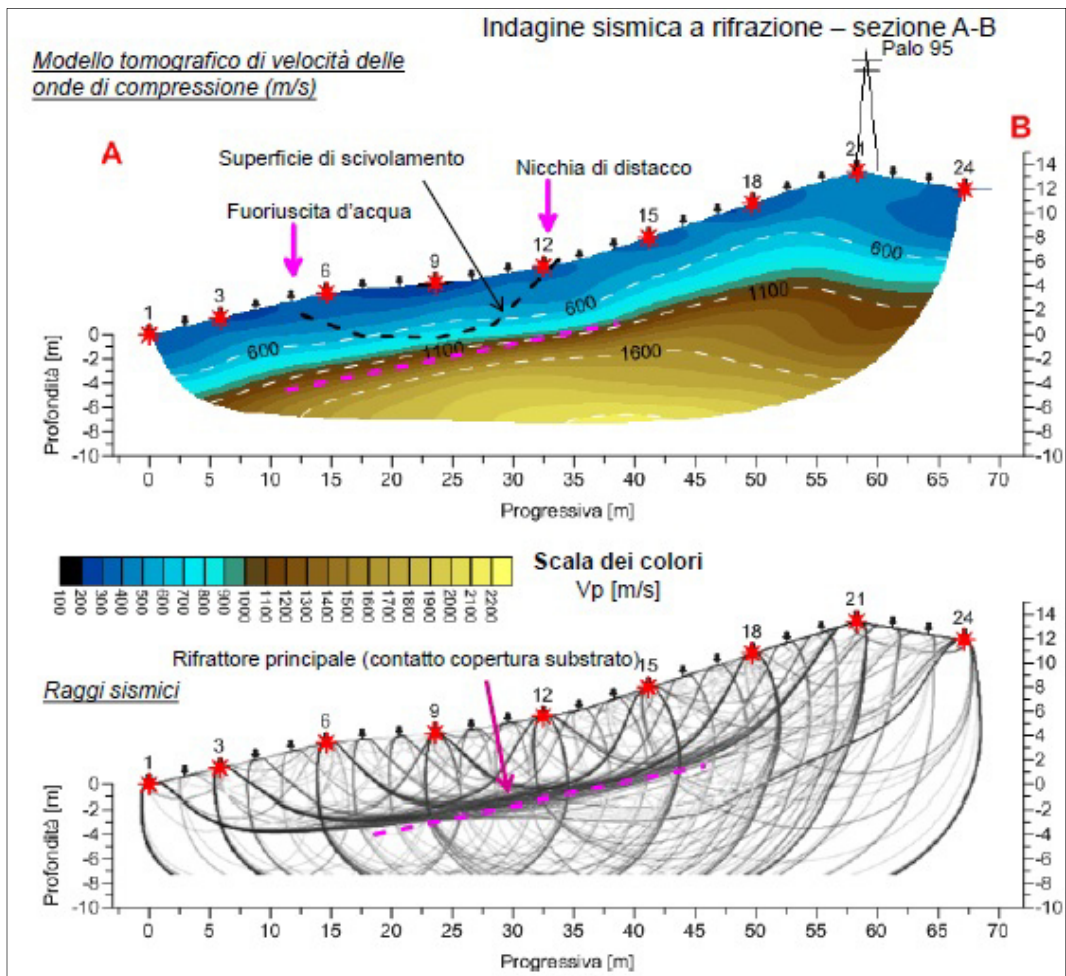


Figura 45: Profilo tomografico sismico (Fonte: Naldi, 2014).

### 3.5 Inclinatori

Dal monitoraggio dei due inclinometri installati nell'area oggetto di studio, sono emersi i risultati riportati in Figura 46 e Figura 47.

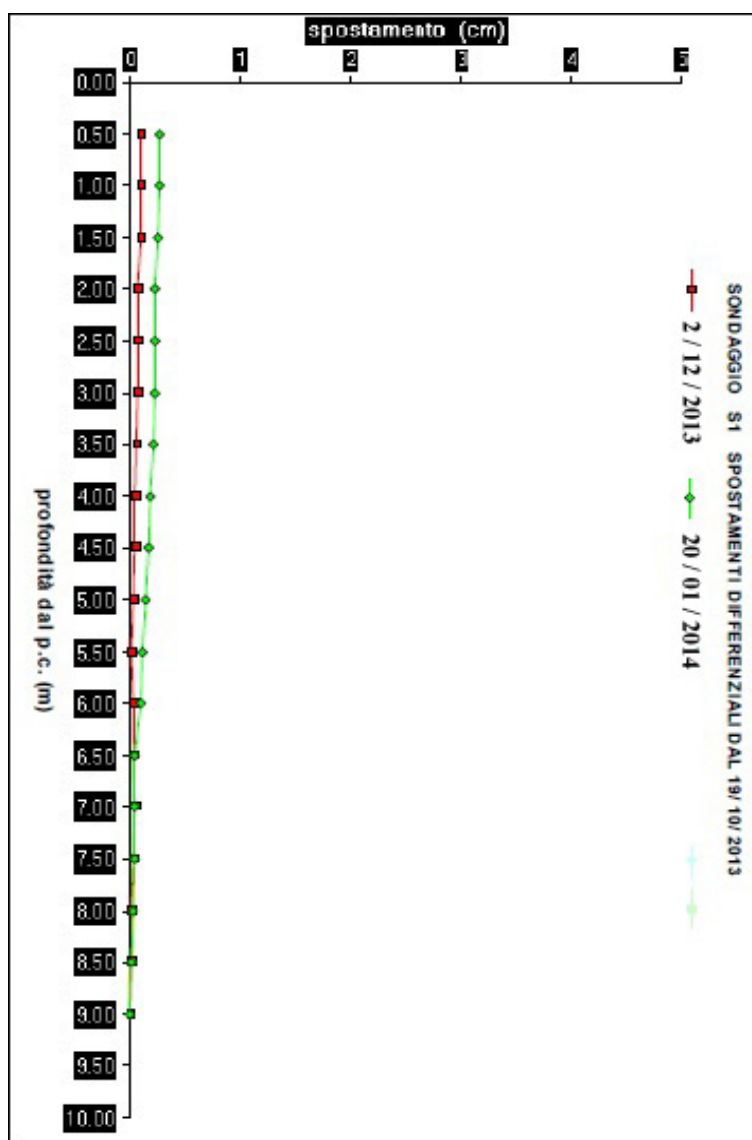


Figura 46: Spostamenti inclinometro n.1.



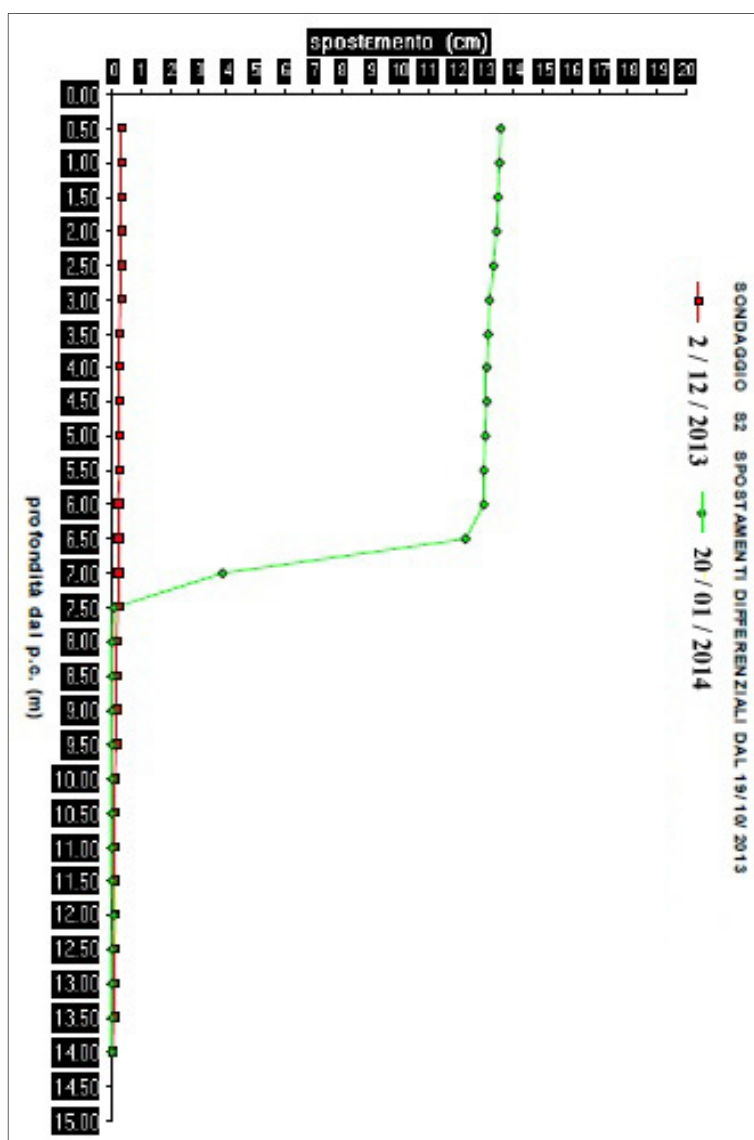


Figura 47: Spostamenti inclinometro n.2.

L'inclinometro n.1, situato a monte e al di fuori del perimetro della frana, mostra un movimento poco rilevante, con spostamenti di qualche decimo di centimetro nei primi 6 m di profondità. Invece, per quanto riguarda l'inclinometro n.2, situato nel corpo centrale di frana in corrispondenza del perimetro, si nota un importante spostamento dell'ordine di 13 cm fino alla profondità di 6.5 m, tendendo a stabilizzarsi alla profondità di circa 7.5 m.

### ***3.6 Modello geologico-tecnico***

Dall'analisi dei risultati ottenuti nelle varie prove eseguite sia in sito che in laboratorio, e dal confronto di queste con gli studi già esistenti riguardanti il fenomeno franoso, si è potuto caratterizzare il terreno dal punto di vista geologico-tecnico e mineralogico, permettendo quindi la costruzione di un modello che meglio approssima la realtà. Le analisi granulometriche hanno messo in evidenza la dominanza della componente argillosa nella parte più superficiale del terreno, registrando un valore massimo alla profondità di circa 3.5 metri, con una tendenza alla diminuzione con l'aumentare della profondità, associata ad un'altrettanta presenza di limo, che rimane relativamente costante per tutto lo spessore. Dai limiti di Atterberg è stato possibile classificare il terreno come altamente plastico, con percentuali del limite di liquido superiori al 50% per tutti i campioni, eccetto per uno situato ad una profondità più bassa di indagine. Ulteriore conferma si ha con la "Carta di plasticità di Casagrande", in cui tutti i campioni, eccetto uno, ricadono nel campo delle argille inorganiche ad elevata plasticità. Grazie alle analisi mineralogiche è stato possibile appurare la natura della componente argillosa presente nel terreno: dai risultati ottenuti è emerso che questa è costituita da montmorillonite calcica pura, senza alcun tipo di interstratificazione con altre specie argillose. Per poter rappresentare la stratigrafia presente nel sottosuolo, sono state scelte due sezioni di riferimento (Sezione 1 e Sezione 2) (vedi Figura 9), dalla quale sono stati analizzati i risultati delle prove penetrometriche DPSH presenti nelle vicinanze delle stesse (Figura 44) ed i risultati derivati dalle prove granulometriche (Tabella 3), permettendo così la suddivisione in diversi orizzonti al variare della profondità, come illustrato nella Figura 48 e nella Figura 49. I risultati ottenuti dalle prove penetrometriche DPSH mettono in evidenza alcuni aspetti sia dal punto di vista della resistenza a infissione, sia per quanto riguarda la morfologia del substrato roccioso. Infatti, è possibile notare un andamento non costante del basamento lungo tutto il pendio, mostrando la presenza di depressioni in prossimità della parte centrale del corpo di frana. A ridosso di queste depressioni, le coltri argillose presentano spessori

maggiori, con depositi che raggiungono profondità anche di 10 m circa. Osservando l'interpretazione stratigrafica della Sezione 1 (Figura 48) è possibile riscontrare, in corrispondenza della depressione, la presenza di una ipotetica lente (a cui sono state attribuite le caratteristiche appartenenti all'orizzonte definito come 2°) che molto probabilmente tende a diminuire il suo spessore lateralmente, in quanto dall'analisi della Sezione 2 (Figura 49) tale lente non è più rilevata. I valori di resistenza dinamica alla punta ottenute dalle prove penetrometriche rispecchiano i risultati ottenuti dalle prove granulometriche, con valori di resistenza che permettono una classificazione in 3 orizzonti differenti. L'indagine sismica a rifrazione ha messo in evidenza i rifrattori principali presenti nel sottosuolo, confermando le profondità del substrato roccioso dedotte dalle prove penetrometriche, essendo queste tra loro compatibili. Il monitoraggio dei due inclinometri ha permesso di fare delle ipotesi sulla profondità del piano di scivolamento. Nel primo inclinometro, quello situato all'esterno del perimetro di frana, non sono stati riscontrati spostamenti, mentre per il secondo inclinometro, posizionato nella parte centrale del corpo di frana in corrispondenza del perimetro, si sono accertati degli spostamenti significativi relativi ad una profondità di circa 6.5 m, essendo questo in prossimità della depressione corrispondente alla Sezione 1. Inoltre, dal confronto delle analisi mineralogiche con le interpretazioni stratigrafiche desunte, è possibile ipotizzare che la superficie di scivolamento si sia impostata al tetto dell'orizzonte 3°, ovvero dove è presente un orizzonte di debolezza dovuto alle caratteristiche mineralogiche. Questa ipotesi risulta essere compatibile anche con la profondità di spostamento rilevata dall'analisi dell'inclinometro n.2 citato in precedenza.

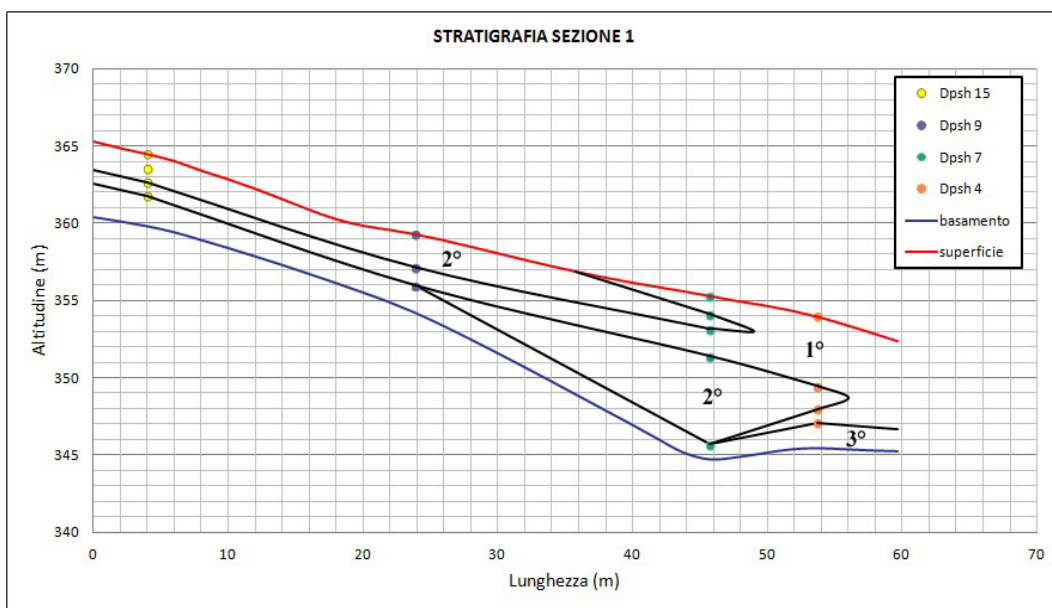


Figura 48: Sezione 1, rappresentazione stratigrafica desunta dalle DPSH e dalle analisi granulometriche. 1°: argilla con limo; 2°: limo argilloso debolmente sabbioso; 3°: limo con ghiaia debolmente argilloso.

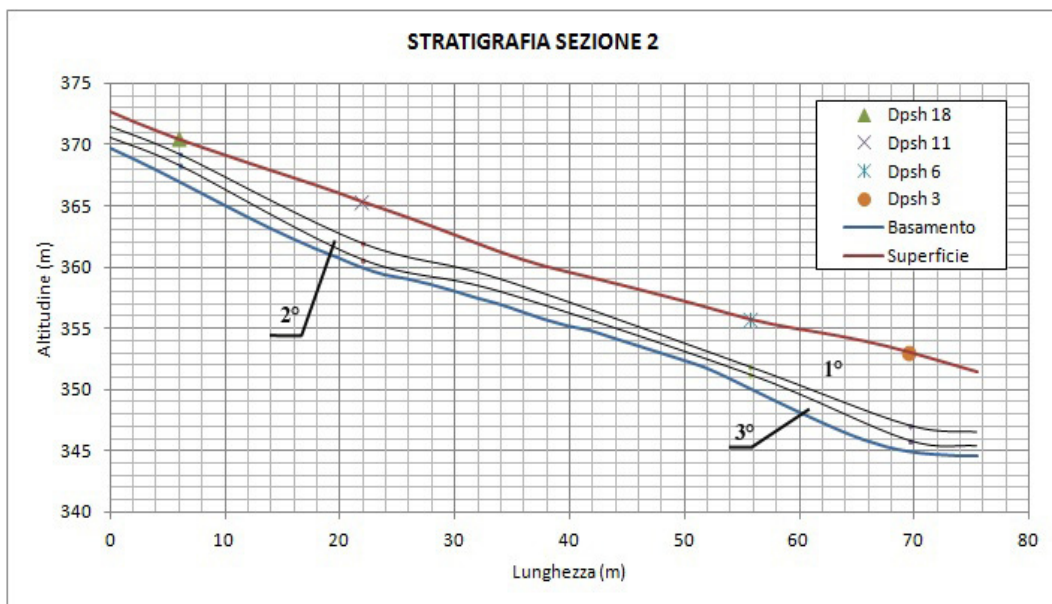


Figura 49: Sezione 2, rappresentazione stratigrafica desunta dalle DPSH e dalle analisi granulometriche. 1°: argilla con limo; 2°: limo argilloso debolmente sabbioso; 3°: limo con ghiaia debolmente argilloso.

Infine, dai valori di resistenza dinamica alla punta ricavati dalle prove DPSH sono stati estrapolati i parametri geotecnici dei vari orizzonti, come riportato nella Tabella 6 e nella Tabella 7.

VALORI MEDI PER OGNI ORIZZONTE	angolo di attrito ( $\phi$ ) [°]	peso di volume saturo ( $\gamma$ ) [t/m <sup>3</sup> ]	modulo di taglio (G) [kg/cm <sup>2</sup> ]	modulo di compressibilità (K) [kg/cm <sup>2</sup> ]	coesione (c) [kg/cm <sup>2</sup> ]
2° orizzonte (in alto)	25	1.90	15.00	32.49	
1° orizzonte	23	1.88	20.91	92.83	0.24
3° orizzonte	36	2.05	167.11	362.08	
2° orizzonte (in basso)	29	1.95	21.02	45.55	

Tabella 6: Valori medi dei parametri geotecnici riferiti alla Sezione 1.

VALORI MEDI PER OGNI ORIZZONTE	angolo di attrito ( $\phi$ ) [°]	peso di volume saturo ( $\gamma$ ) [t/m <sup>3</sup> ]	modulo di taglio (G) [kg/cm <sup>2</sup> ]	modulo di compressibilità (K) [kg/cm <sup>2</sup> ]	coesione (c) [kg/cm <sup>2</sup> ]
1° orizzonte	22	1.87	21.33	99.55	0.23
2° orizzonte	33	1.99	31.41	68.05	
3° orizzonte	42	2.14	252.65	547.40	

Tabella 7: Valori medi dei parametri geotecnici riferiti alla Sezione 2.

## 4 Modellazione numerica

### 4.1 Modellazione con FLAC 7.0

Un modello numerico è una simulazione matematica di un fenomeno fisico reale che permette di fare previsioni sull'evoluzione del fenomeno indagato. Sono spesso rappresentati da sistemi di equazioni differenziali che coinvolgono la funzione incognita e le sue derivate. I modelli numerici, rispetto a quelli analitici, trasformano le equazioni differenziali dalla forma continua a quella discreta ottenendo come risultato finale un sistema di equazioni algebriche aventi per incognite i valori delle grandezze di interesse in un numero finito di punti, detti nodi. I valori nei nodi vengono poi interpolati per fornire una soluzione ragionevolmente approssimata sull'intero dominio di indagine. Alla base dei modelli numerici vi è quindi il concetto di discretizzazione del continuo, ossia della sua trasformazione in un insieme di elementi di dimensione finita entro i quali le proprietà fisiche vengono mediate a valori costanti. L'approccio numerico consente di fornire soluzioni anche per geometrie e distribuzioni di parametri fisici complesse.

Il software FLAC di Itasca è un codice che permette la modellazione numerica alle differenze finite per l'analisi nel continuo del comportamento di rocce e suoli e delle strutture di supporto con essi integrati, ed ha lo scopo di trasformare un problema differenziale in un problema algebrico approssimato. Lo schema di calcolo di FLAC (che sta per **F**ast **L**agrangian **A**nalysis of **C**ontinua) si basa su una struttura *Lagrangiana* che permette di ottenere risultati molto accurati sia nelle simulazioni di collassi plastici sia nelle analisi di flusso, e consente un approccio di tipo sforzo-deformazione, consentendo di determinare le tensioni all'interno di un ammasso potenzialmente instabile come pure spostamenti e deformazioni.

I materiali sono rappresentati da elementi all'interno di una griglia, i quali, sottoposti a sollecitazioni, seguono una legge sforzi/deformazioni lineare o non lineare. La griglia viene deformata insieme al materiale che rappresenta.

L'approccio di calcolo "time-stepping" alla soluzione delle equazioni del moto ad ogni nodo della griglia permette di visualizzare lo sviluppo e lo stato finale della plasticizzazione. Il timestep è sufficientemente piccolo da impedire che l'informazione si propaghi agli elementi adiacenti durante un ciclo di calcolo. Essendo FLAC un metodo numerico di tipo continuo, è necessario introdurre delle leggi costitutive che regolano il rapporto sforzi/deformazioni.

Per poter eseguire un'analisi numerica è fondamentale avere già chiari quali siano gli obiettivi della simulazione, creando un modello concettuale che descriva il sistema con le relative caratteristiche.

La costruzione del modello prevede:

- scelta della tipologia di simulazione;
- definizione della geometria e della griglia di discretizzazione;
- attribuzione del modello costitutivo e delle proprietà dei materiali;
- applicazione delle condizioni iniziali e al contorno;
- inizializzazione;
- monitoraggio;
- soluzione;
- risultati ed interpretazione.

Il modello costitutivo utilizzato nella simulazione è Mohr-Coulomb, ed i parametri richiesti per la sua definizione sono:

- $\phi$  (angolo d'attrito);
- $c$  (coesione);
- $E$  (modulo di Young);
- $\nu$  (rapporto di Poisson);
- $\gamma$  (peso di volume).

Una volta inseriti i parametri, FLAC fornisce lo stato tensionale iniziale ad ogni singolo nodo e calcola le deformazioni associate secondo la legge costitutiva scelta, restituendo lo spostamento per ciascun nodo della griglia (x- e y-displacement), risolvendo le equazioni del moto. Ad ogni passaggio di calcolo, lo stato tensionale viene quindi modificato e ricalcolato nuovamente partendo da quello aggiornato. L'intero processo di calcolo viene definito *ciclo*, il quale viene



ripetuto fino a quando la differenza tra lo stato tensionale iniziale e quello finale risulta essere nullo, ovvero quando viene raggiunto uno stato di equilibrio tra le forze iniziali e quelle finali, equiparabile ad una situazione di stabilità del versante. L'utilizzo del software FLAC è stato scelto al fine di definire quali fossero le condizioni di instabilità del versante oggetto di studio.

L'obiettivo della modellazione numerica consiste nel riprodurre un modello che meglio approssimi la realtà partendo dai risultati delle prove effettuate sia in sito che in laboratorio, verificando quindi, nel caso in esame, la stabilità del versante. Sono state scelte due sezioni di riferimento (Figura 50), il cui modello geologico-tecnico è stato definito incrociando i risultati derivati dalle prove penetrometriche DPSH e dalle analisi granulometriche dei campioni ricavati dalla perforazione a carotaggio continuo.

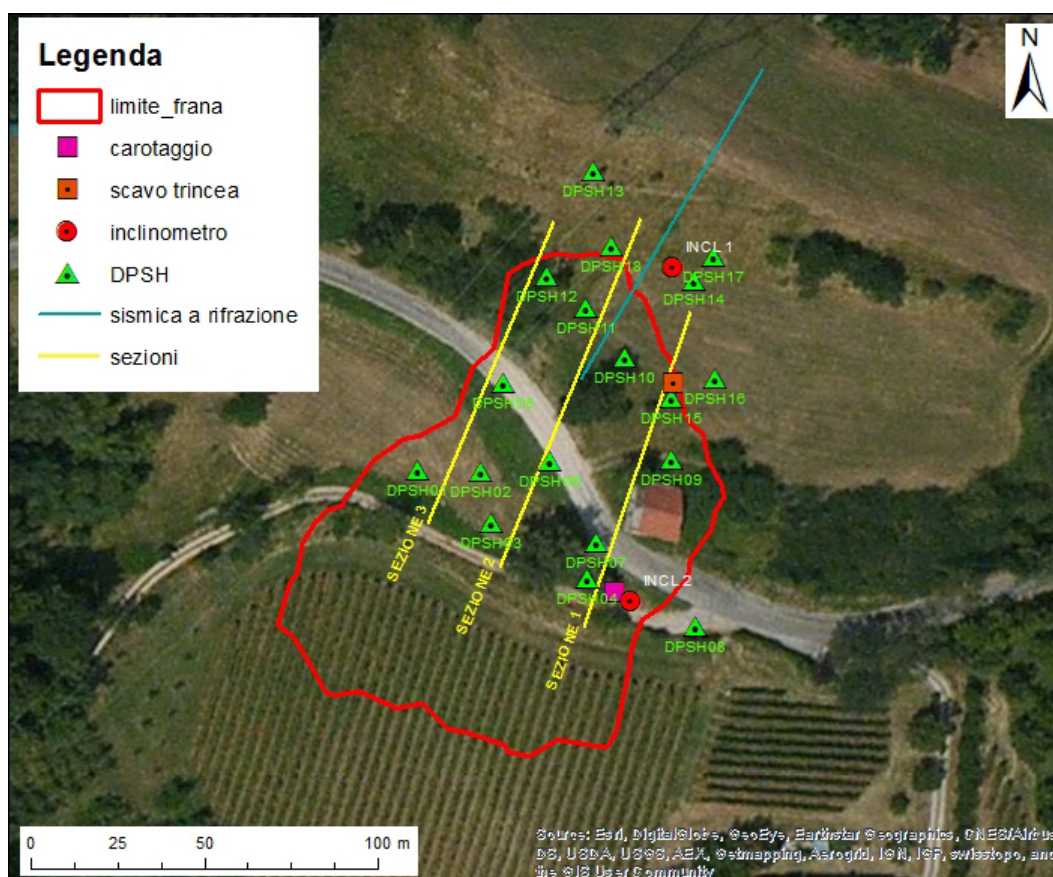


Figura 50: Ubicazione delle indagini e delle sezioni di riferimento.

La Sezione 1 è stata scelta sulla base del fatto che in quella determinata posizione sono presenti maggiori informazioni riguardanti il sottosuolo, in quanto in prossimità di tale sezione ricadono alcune prove penetrometriche DPSH ed anche la perforazione a carotaggio continuo. Successivamente si è deciso di analizzare anche la Sezione 2: questa risulta essere in una posizione più rappresentativa per lo studio di una frana, in quanto ricade nella parte centrale di essa, a discapito però della rappresentatività dei risultati della perforazione a carotaggio continuo, in quanto posizionata più lontano da essa. Per ricostruire la geometria del versante e del substrato roccioso è stato utilizzato il software ArcGIS 10.4.1, impiegando i dati relativi alla topografia dell'area e interpolando i risultati delle profondità di rifiuto delle prove penetrometriche DPSH. Successivamente alla costruzione del modello geologico-tecnico del terreno, sono state eseguite molteplici simulazioni corrispondenti a differenti livelli di falda, al fine di individuare il valore di altezza piezometrica in corrispondenza del quale il versante risulta essere instabile.

#### ***4.2 Modellazione Sezione 1***

Inizialmente è stato necessario discretizzare la griglia sulla quale verrà poi costruita la geometria del versante. Il numero delle griglie (grid) è 260 in direzione x e 120 in direzione y, considerando che dal punto di origine 0,0 sono state prese come riferimento un'altezza massima di 30 metri ed una lunghezza massima di 65 metri (Figura 51). La densità della griglia è stata scelta per poter rappresentare gli spessori ridotti dei vari orizzonti.

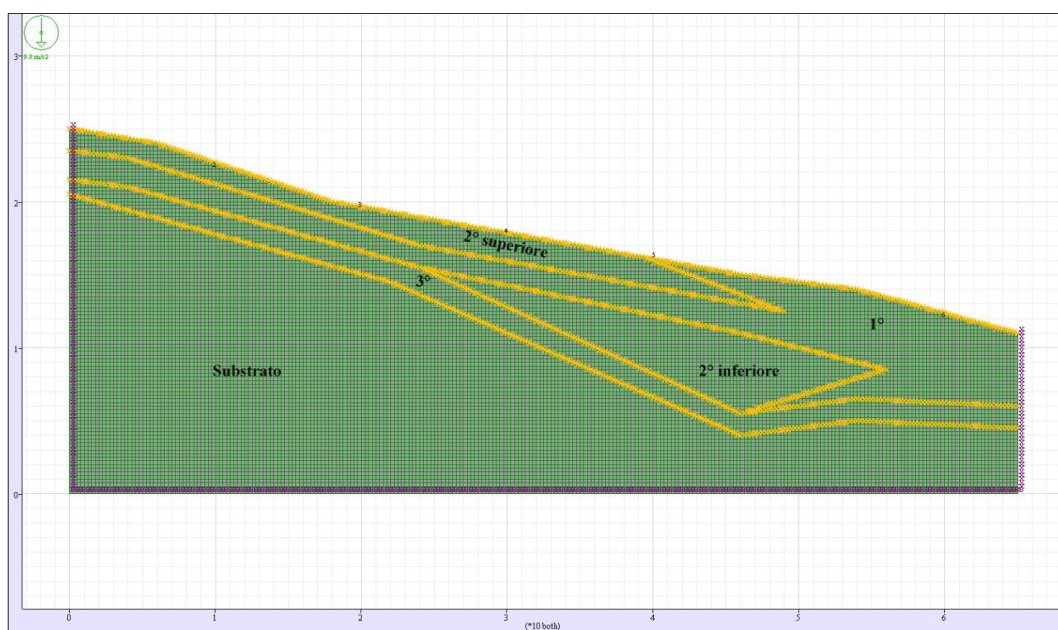


Figura 51: Rappresentazione della morfologia del versante e della geometria dei vari orizzonti.

È stato quindi generato un modello con una geometria che considera cinque orizzonti con differenti parametri (Figura 51):

- **1°**: argilla con limo;
- **2° superiore**: limo argilloso debolmente sabbioso;
- **2° inferiore**: limo argilloso debolmente sabbioso;
- **3°**: limo con ghiaia debolmente argilloso;
- **Substrato**: roccia vulcanica.

I parametri utilizzati per i vari orizzonti sono stati estrapolati dalle prove penetrometriche eseguite in sito, mediando i valori per ogni singolo parametro ricavato da ogni prova. Inizialmente si sono effettuate delle simulazioni con i valori medi, riscontrando però una sovrastima di tali parametri, in quanto il modello creato non raggiungeva la rottura. Si è scelto quindi di utilizzare i valori minimi per ogni parametro, come riportato nella Tabella 8.

ORIZZONTE	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (Pa)	$\phi$ (°)	G (Pa)	K (Pa)	t (Pa)
1°	1880	8000	24	1.00E+06	3.00E+05	10000
2° superiore	1900	5000	25	3.00E+06	8.00E+06	5000
2° inferiore	1950	500	18	5.00E+05	4.00E+06	4000
3°	2050	15000	34	3.00E+07	5.00E+07	15000
substrato	2400	200000	40	5.00E+07	1.00E+08	200000

Tabella 8: Valori dei parametri utilizzati per le simulazioni.

dove:

- $\gamma$ : peso di unità di volume saturo;
- c: coesione drenata;
- $\phi$ : angolo di attrito drenato;
- G: modulo di taglio;
- K: modulo di compressibilità volumetrica;
- t: resistenza a trazione.

Infine sono state eseguite le varie simulazioni con differenti livelli piezometrici, ottenendo dei risultati che hanno progressivamente portato all'instabilità del versante. L'andamento dei livelli piezometrici per ogni simulazione è stato scelto tenendo conto che in superficie sono presenti orizzonti a più bassa permeabilità, mentre in profondità sono presenti orizzonti a più alta permeabilità. Da questo è possibile dedurre che in caso l'acqua interessi solo gli orizzonti più permeabili, la falda può considerarsi libera, e quindi il livello statico risulta essere coincidente con il livello piezometrico; invece, nel caso in cui l'acqua intersechi gli orizzonti meno permeabili, la falda può considerarsi in pressione, e quindi il livello piezometrico risulta essere maggiore rispetto al livello statico. Nei paragrafi seguenti sono state riportate le simulazioni con i livelli piezometrici più rappresentativi.

#### **4.2.1 Falda bassa**

In questa simulazione il livello piezometrico è stato posto come mostrato in Figura 52.

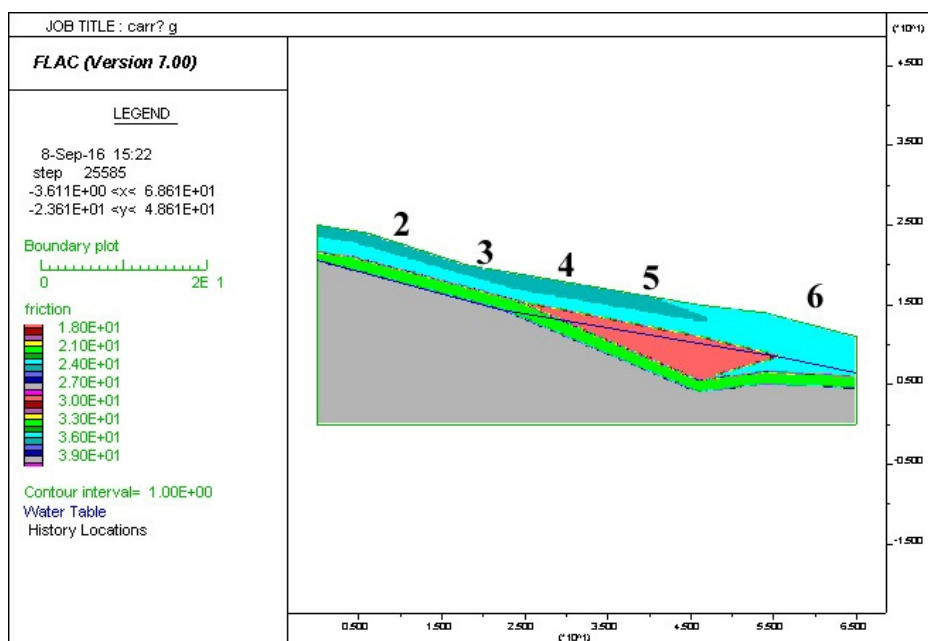


Figura 52: Rappresentazione del livello piezometrico (linea blu). Colorazione dei vari orizzonti in base al valore dell'angolo d'attrito. I numeri 2, 3, 4, 5 e 6 sono riferiti alle posizioni in cui vengono monitorati gli spostamenti in x (history).

In Figura 53 sono rappresentate le componenti orizzontali degli spostamenti (x-displacement).

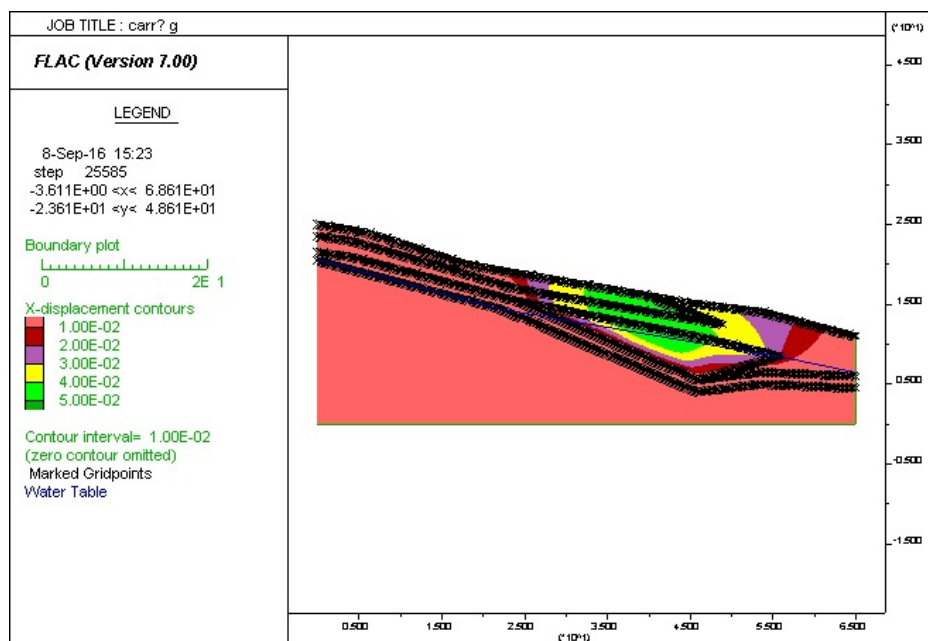


Figura 53: X-displacement della frana con il livello piezometrico basso (linea blu); indicati anche i limiti dei differenti materiali presenti.

Da questa figura si può notare che:

- 1) spostamenti significativi, dell'ordine di 5 cm, si hanno solo al di sopra dell'orizzonte 3°, in corrispondenza della pendenza più elevata del substrato;
- 2) gli spostamenti sono dovuti al fatto che la falda assume in questo tratto uno spessore elevato sul piano di scivolamento, determinando valori delle pressioni dell'acqua relativamente elevati;
- 3) gli spostamenti orizzontali sono non solo piccoli, ma anche stabilizzati, come mostrato dalla Figura 55.

Questo è confermato dalla Figura 54, dove sono rappresentate le distribuzioni delle zone plasticizzate.

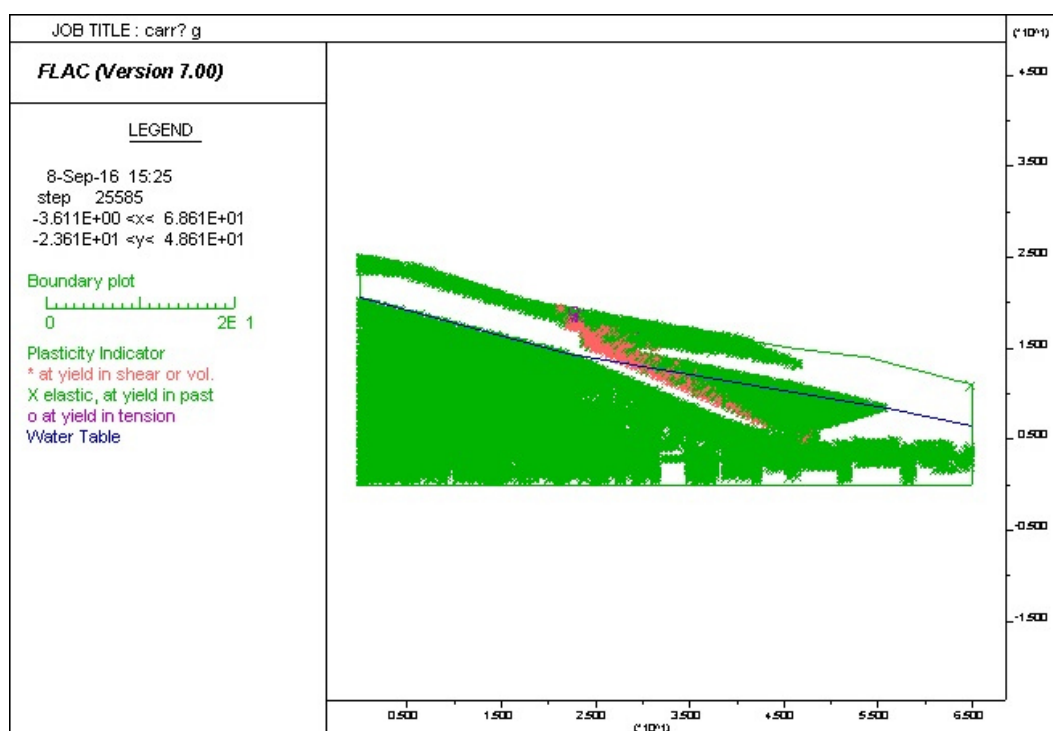


Figura 54: Distribuzione delle zone plasticizzate (in rosa) e delle zone in cui è avvenuta la rottura per trazione (in viola).

Si può vedere come al tetto dell'orizzonte 3° si hanno zone plasticizzate per taglio, ovvero zone in cui le resistenze al taglio massime sono state raggiunte, e che corrispondentemente esistono zone di rottura per trazione in superficie.



Questa condizione non comporta, tuttavia, la rottura generalizzata del versante, come indicato dall'andamento delle forze sbilanciate (Figura 56) che si annullano progressivamente con il tempo-macchina (numero dei cicli di calcolo).

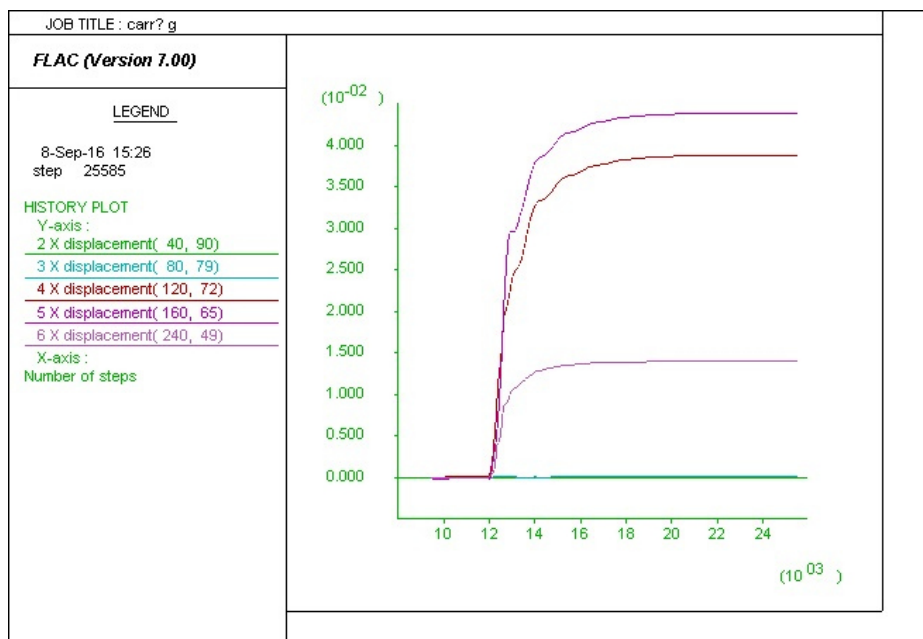


Figura 55: Spostamenti relativi alle history selezionate lungo il versante.

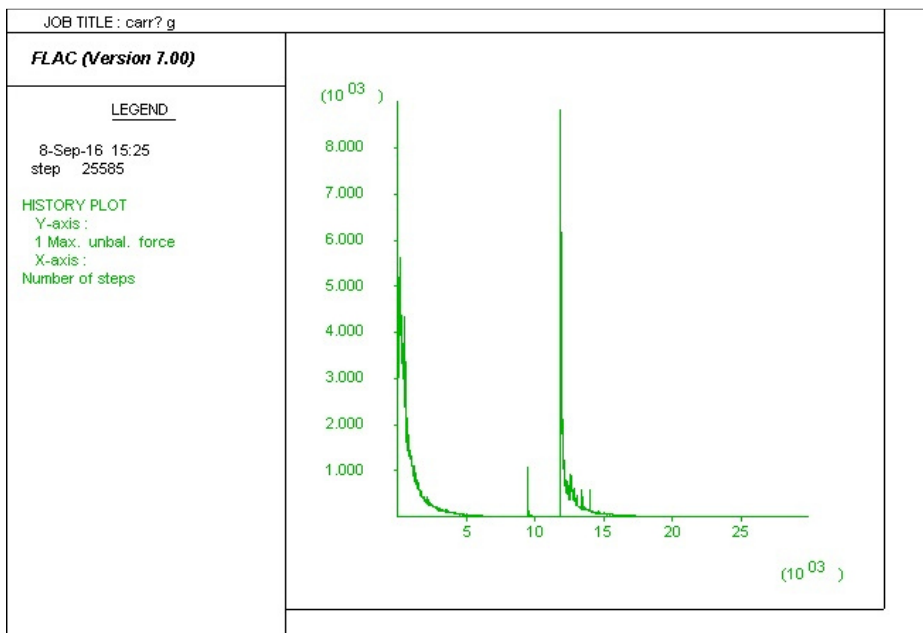


Figura 56: Riepilogo del bilanciamento delle forze in questa condizione.



## 4.2.2 Falda medio-alta

In Figura 57 è rappresentato il versante con il livello piezometrico posizionato a ridosso del piano campagna, mentre in Figura 58 sono rappresentate le componenti orizzontali degli spostamenti come ottenute dall'analisi.

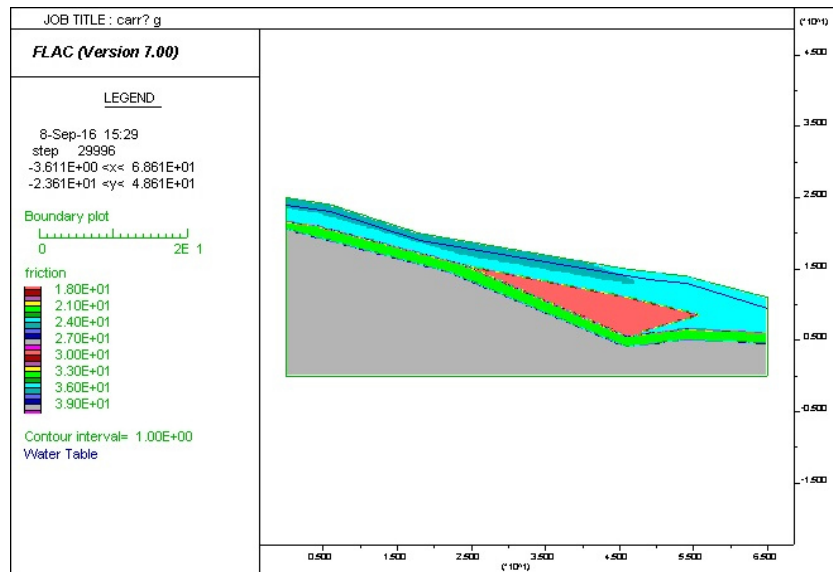


Figura 57: Rappresentazione del livello piezometrico (linea blu). Colorazione dei vari orizzonti in base al valore dell'angolo d'attrito.

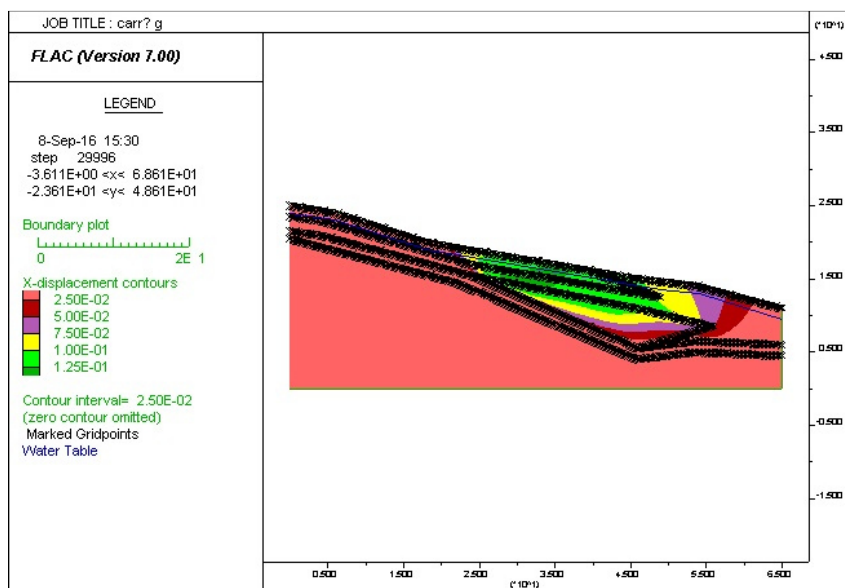


Figura 58: X-displacement della frana con il livello piezometrico medio-alto (tavola d'acqua contrassegnata con la linea blu).

Si può notare come l'entità degli spostamenti è aumentata, in quanto dell'ordine di 12.5 cm, interessando una zona più ampia del versante. Questo trova conferma nella Figura 59, dove è possibile vedere come l'estensione delle zone plasticizzate sia aumentata, mentre la zona di rottura per trazione sia sempre localizzata in superficie.

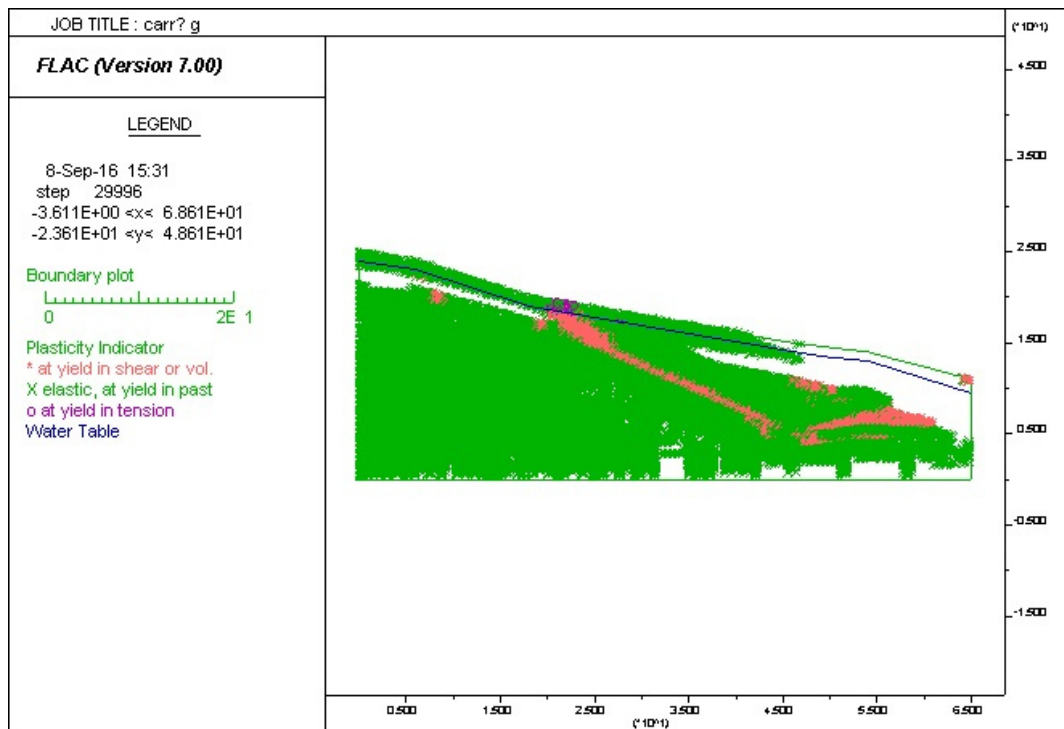


Figura 59: Distribuzione delle zone plasticizzate (in rosa) e delle zone in cui è avvenuta la rottura per trazione (in viola).

Analogamente al caso precedente, anche in questa condizione le forze si bilanciano, come mostrato dall'andamento con il tempo-macchina sia degli spostamenti orizzontali (Figura 60) che delle forze sbilanciate (Figura 61).

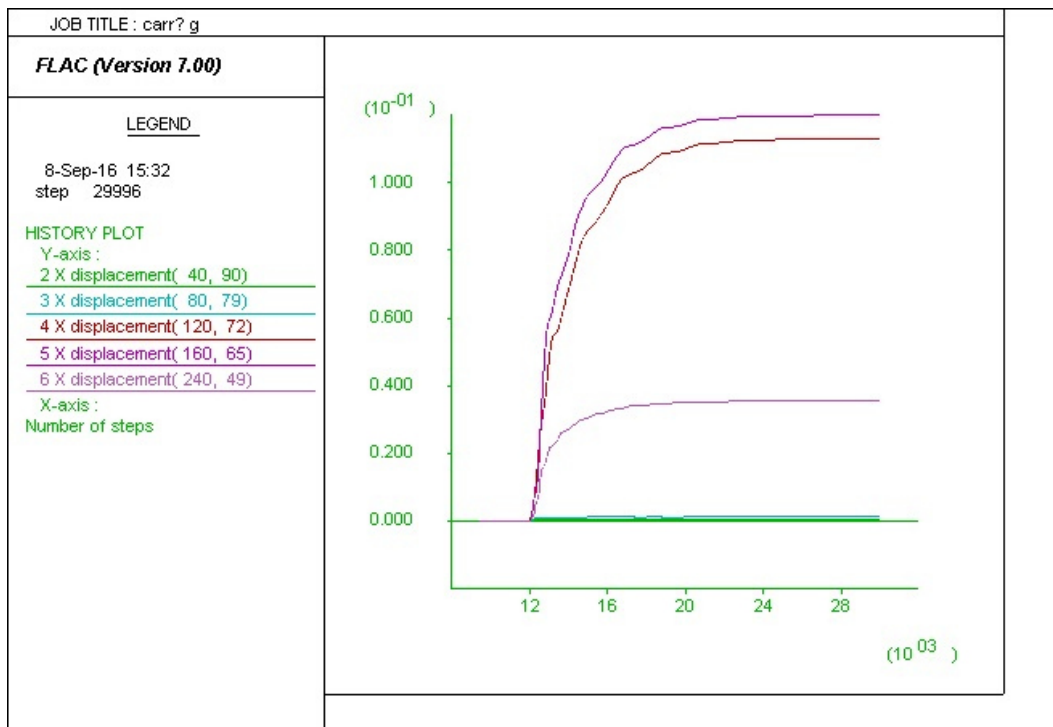


Figura 60: Spostamenti relativi alle history selezionate lungo il versante.

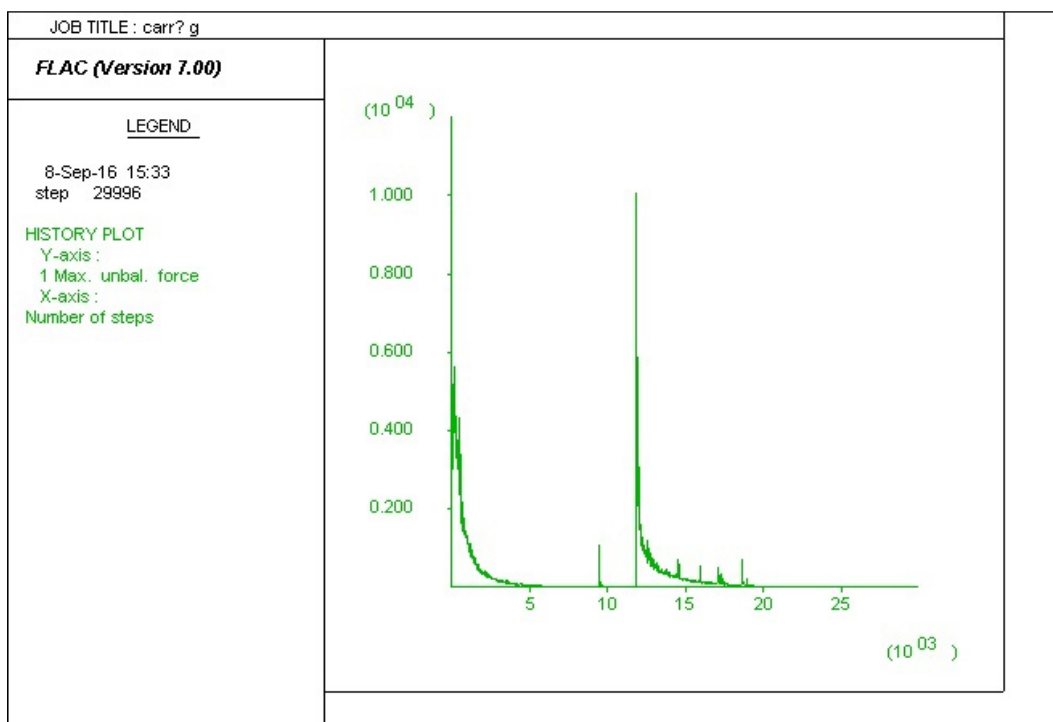


Figura 61: Riepilogo del bilanciamento delle forze in questa condizione.

### 4.2.3 Falda al piano campagna

In questa simulazione, il livello piezometrico è coincidente con la superficie del piano campagna (Figura 62), ottenendo spostamenti orizzontali maggiori (Figura 63).

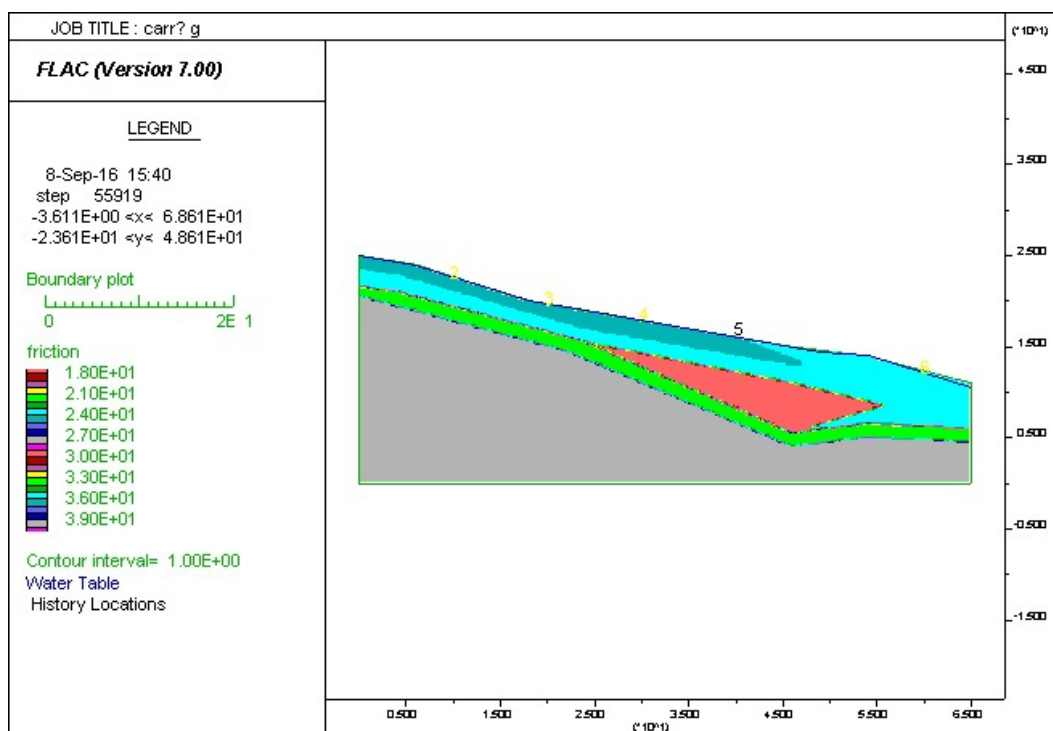


Figura 62: Rappresentazione del livello piezometrico (linea blu). Colorazione dei vari orizzonti in base al valore dell'angolo d'attrito. I numeri 2, 3, 4, 5 e 6 sono riferiti alle posizioni in cui vengono monitorati gli spostamenti in x (history).

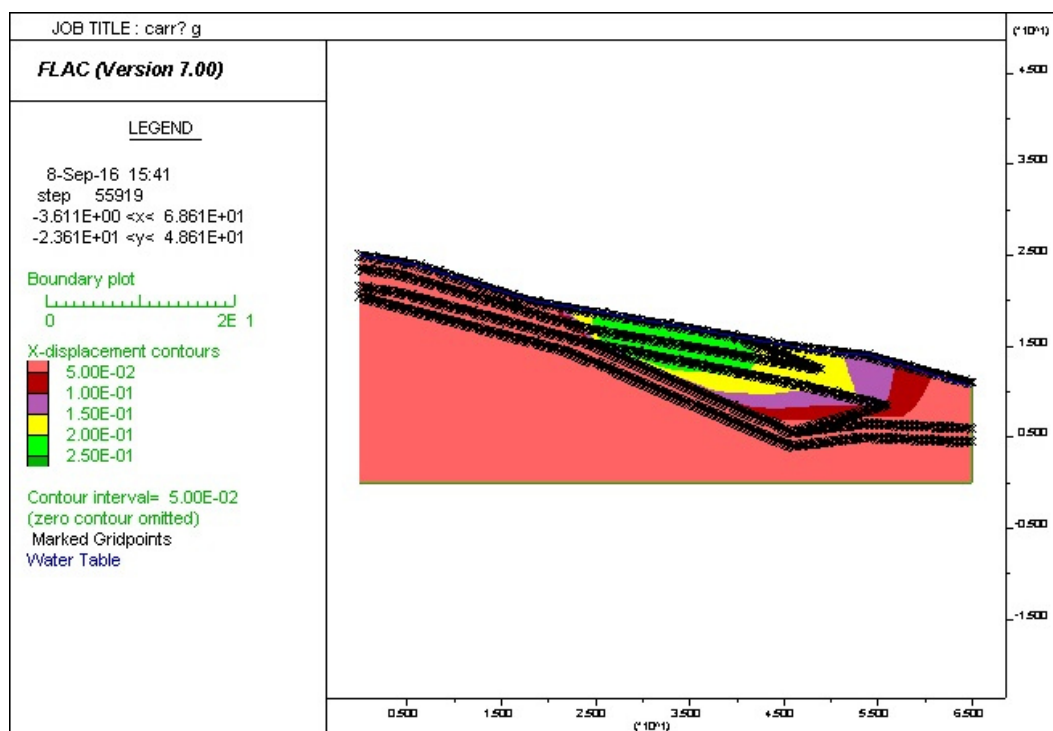


Figura 63: X-displacement della frana con il livello piezometrico al piano campagna (tavola d'acqua contrassegnata con la linea blu).

Si può notare come l'entità degli spostamenti è aumentata notevolmente, raggiungendo valori dell'ordine di 25 cm. Dall'analisi della Figura 64 è possibile vedere come le zone plasticizzate interessano volumi maggiori rispetto ai casi precedenti, anche in zone più a monte. Inoltre è possibile osservare come le zone di rottura a trazione sono presenti in più punti del pendio. Tutto ciò sta ad indicare una condizione critica generalizzata, come mostrato dall'andamento delle forze sbilanciate (Figura 66), che indicano praticamente come si sia in presenza di una condizione di equilibrio limite. Questa condizione critica è indicata anche dall'andamento degli spostamenti orizzontali (Figura 65) che indica una loro effettiva stabilizzazione.

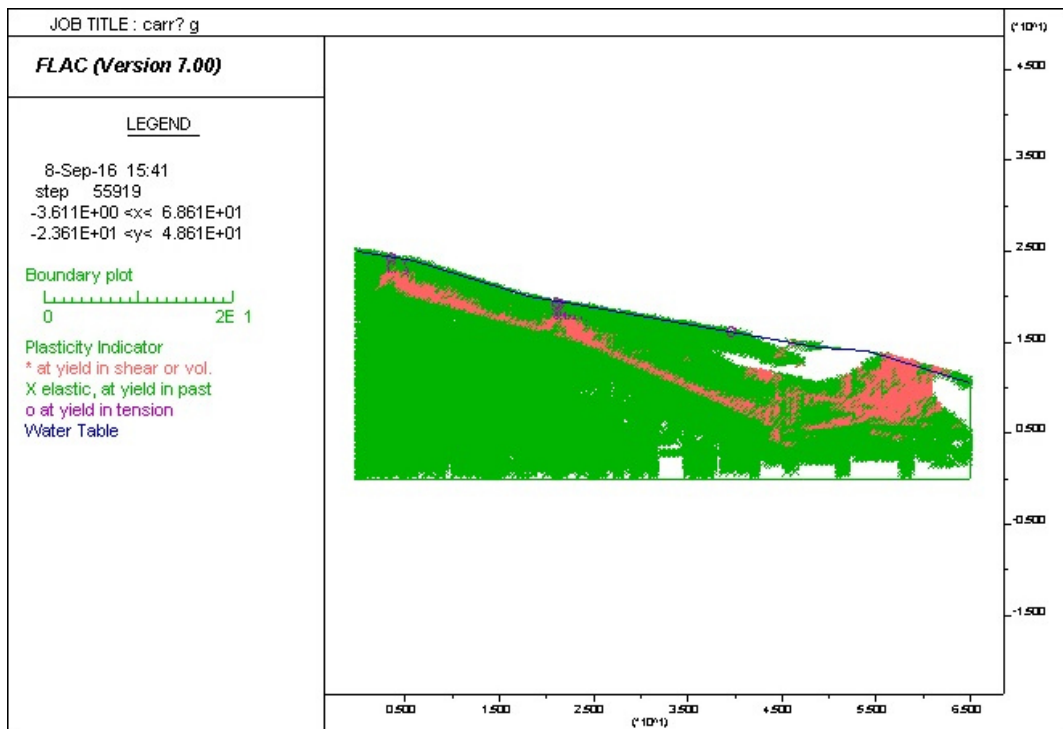


Figura 64: Distribuzione delle zone plasticizzate (in rosa) e delle zone in cui è avvenuta la rottura per trazione (in viola).

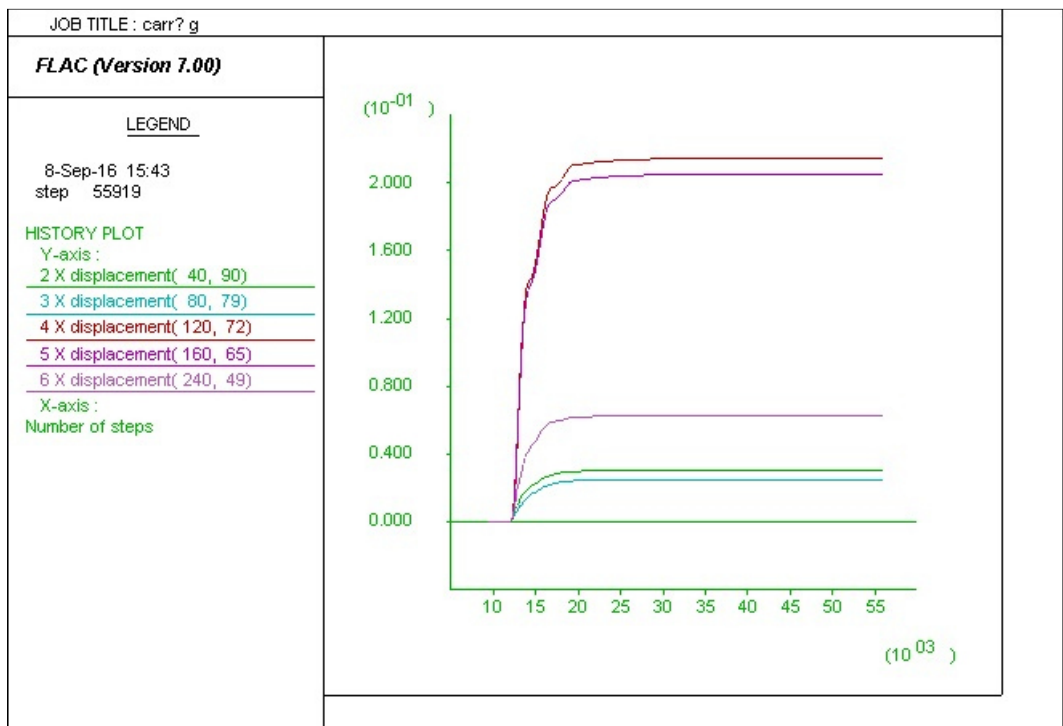


Figura 65: Spostamenti relativi alle history selezionate lungo il versante.

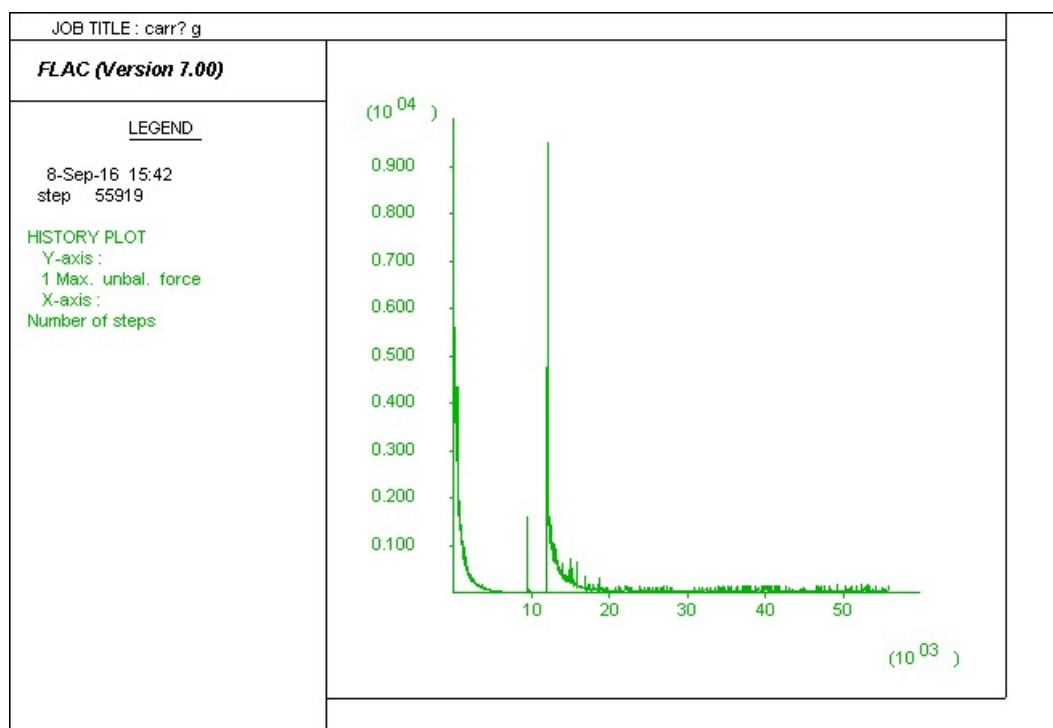


Figura 66: Riepilogo delle forze non bilanciate con il livello piezometrico al piano campagna.

Da queste simulazioni relative alla Sezione 1 si può dedurre che con l'innalzamento del livello piezometrico, le zone plasticizzate aumentano progressivamente interessando zone sempre più a monte. Per generare il collasso del versante è necessario che il livello piezometrico sia coincidente con il piano campagna.

### 4.3 Modellazione Sezione 2

Analogamente alla sezione precedentemente analizzata, è stato necessario costruire la griglia (320x160) sulla quale verrà poi inserita la geometria del versante che presenta un'altezza di 40 metri ed una lunghezza massima di 80 metri (Figura 67).



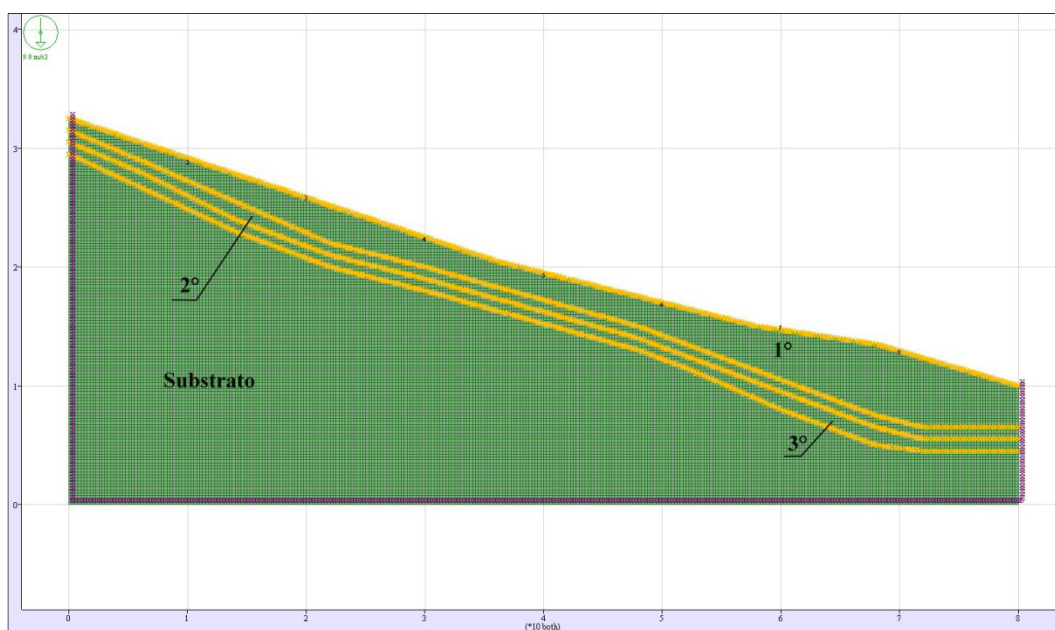


Figura 67: Rappresentazione della morfologia del versante e della geometria dei vari orizzonti.

È stato quindi generato un modello con una geometria che considera quattro orizzonti con differenti parametri (Figura 67):

- 1°: argilla con limo;
- 2°: limo argilloso debolmente sabbioso;
- 3°: limo con ghiaia debolmente argilloso;
- **Substrato**: roccia vulcanica.

Anche in questo caso, i valori utilizzati per i vari orizzonti sono quelli minimi per ogni parametro, in quanto il modello creato non raggiungeva la rottura utilizzando i valori medi, come riportato in Tabella 9.

ORIZZONTE	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (Pa)	$\phi$ (°)	G (Pa)	K (Pa)	t (Pa)
1°	1880	8000	24	1.00E+06	3.00E+05	10000
2°	1900	5000	25	3.00E+06	8.00E+06	5000
3°	2050	15000	34	3.00E+07	5.00E+07	15000
substrato	2400	200000	40	5.00E+07	1.00E+08	200000

Tabella 9: Valori dei parametri utilizzati per le simulazioni.

dove:

- $\gamma$ : peso di unità di volume saturo;
- $c$ : coesione drenata;
- $\varphi$ : angolo di attrito drenato;
- $G$ : modulo di taglio;
- $K$ : modulo di compressibilità volumetrica;
- $t$ : resistenza a trazione.

Infine, ugualmente al caso della Sezione 1, sono state eseguite le varie simulazioni con differenti livelli piezometrici, ottenendo dei risultati che hanno progressivamente portato all'instabilità del versante. Nei paragrafi seguenti sono state riportate le simulazioni con i livelli piezometrici più rappresentativi.

#### ***4.3.1 Falda bassa***

In questa simulazione il livello piezometrico è stato posto come mostrato in Figura 68.

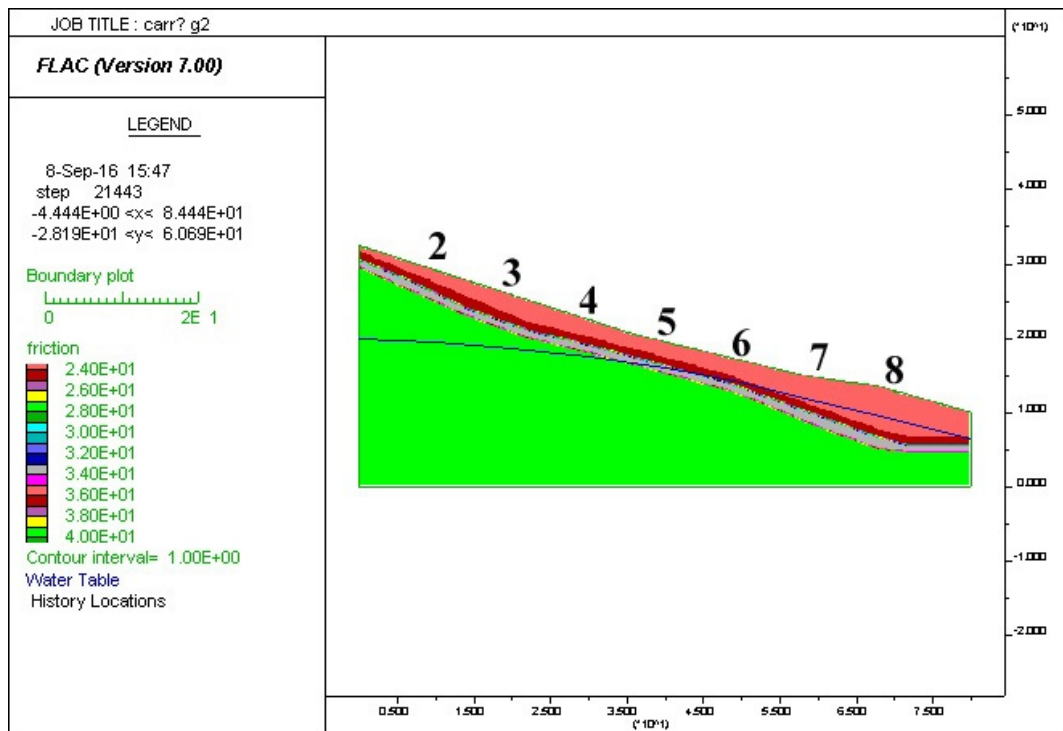


Figura 68: Rappresentazione del livello piezometrico (linea blu). Colorazione dei vari orizzonti in base al valore dell'angolo d'attrito. I numeri 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 8 sono riferiti alle posizioni in cui vengono monitorati gli spostamenti in x (history).

In Figura 69 sono rappresentate le componenti orizzontali degli spostamenti (x-displacement).

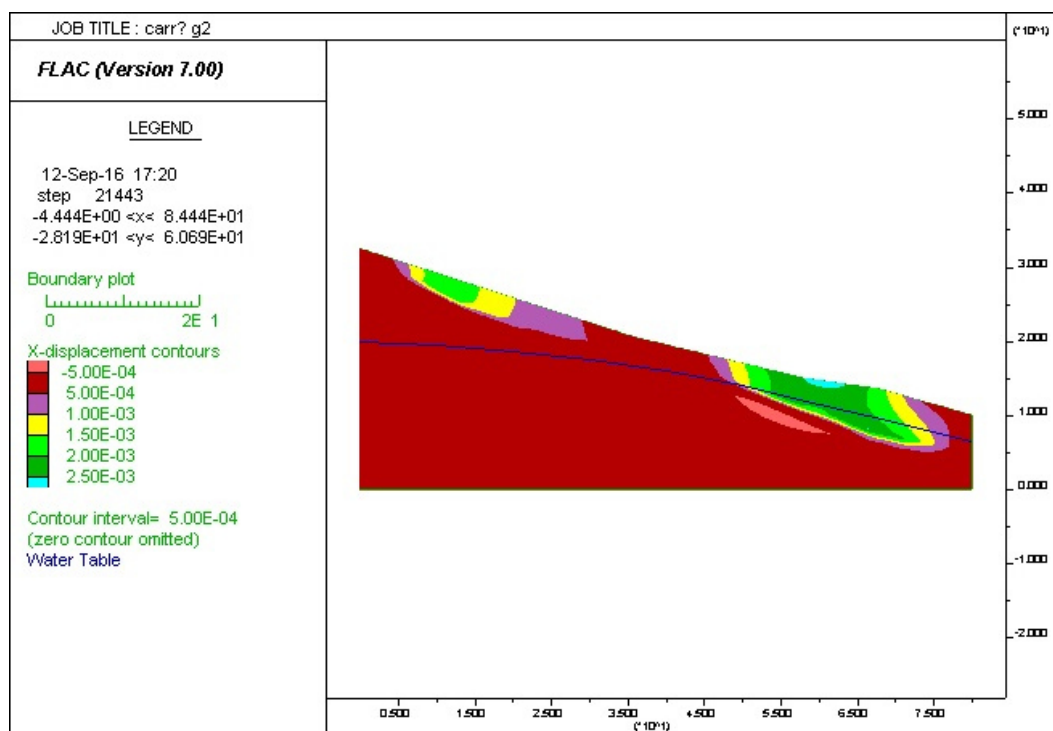


Figura 69: X-displacement della frana con il livello piezometrico basso ( linea blu).

Da questa figura si può notare che:

- 1) spostamenti significativi, dell'ordine di circa 2 mm, si hanno solo al di sopra dell'orizzonte 3°;
- 2) gli spostamenti maggiori si hanno nella zona più a valle e nella zona più a monte, interessando in misura maggiore la zona più a valle, in corrispondenza della quale la falda assume uno spessore elevato sul piano di scivolamento, determinando valori delle pressioni dell'acqua relativamente elevati;
- 3) gli spostamenti orizzontali sono piccoli e stabilizzati, come mostrato dalla Figura 71.

Questo è confermato dalla Figura 70, dove sono rappresentate le distribuzioni delle zone plasticizzate.

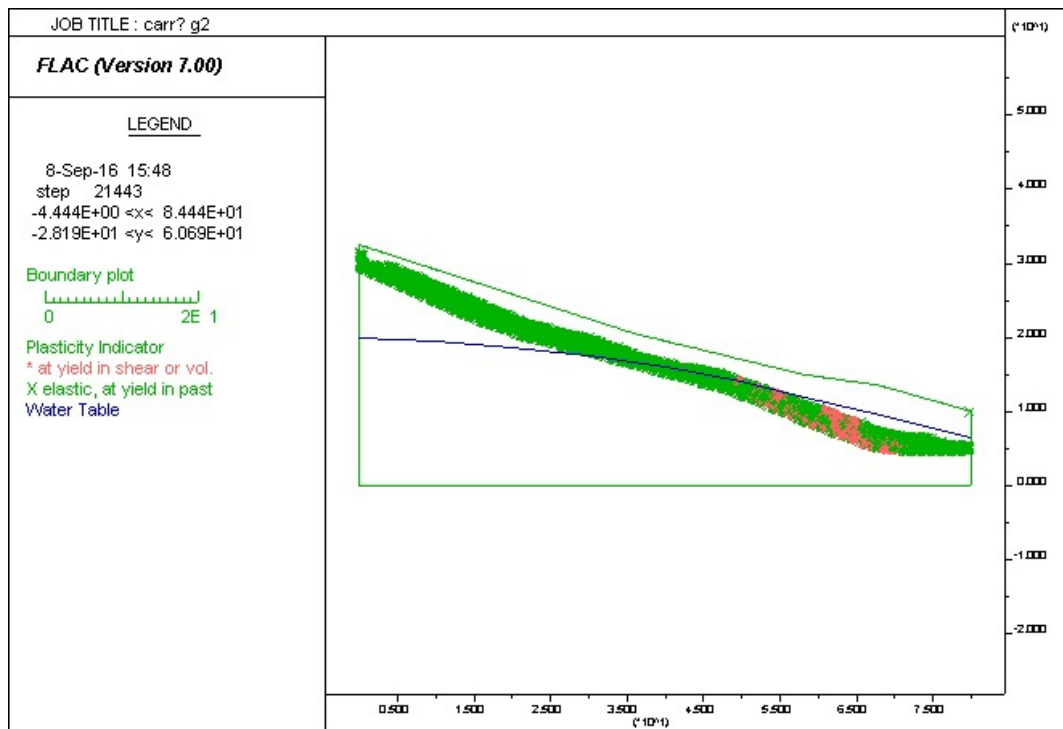


Figura 70: Distribuzione delle zone plasticizzate (in rosa).

Si può vedere come le zone plasticizzate sono presenti solo a valle del versante, in corrispondenza della zona che è inglobata dal livello di falda. Questa condizione non comporta la rottura generalizzata del versante, come indicato dall'andamento delle forze sbilanciate (Figura 72) che si annullano progressivamente con il tempo macchina (numero dei cicli di calcolo).

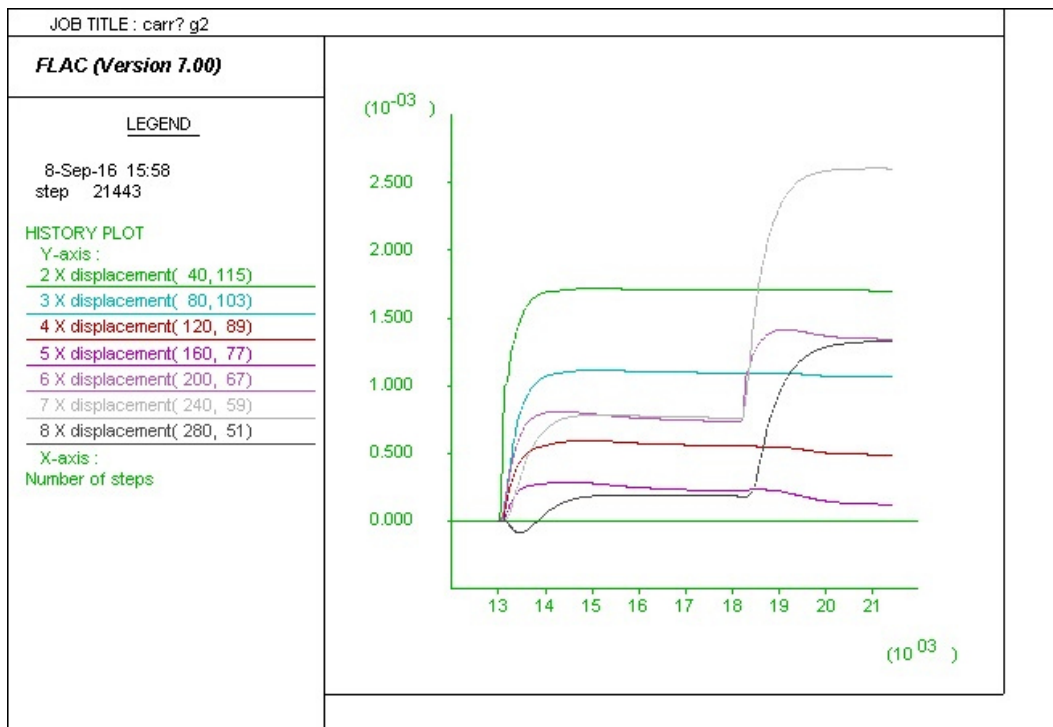


Figura 71: Spostamenti relativi alle history selezionate lungo il versante.

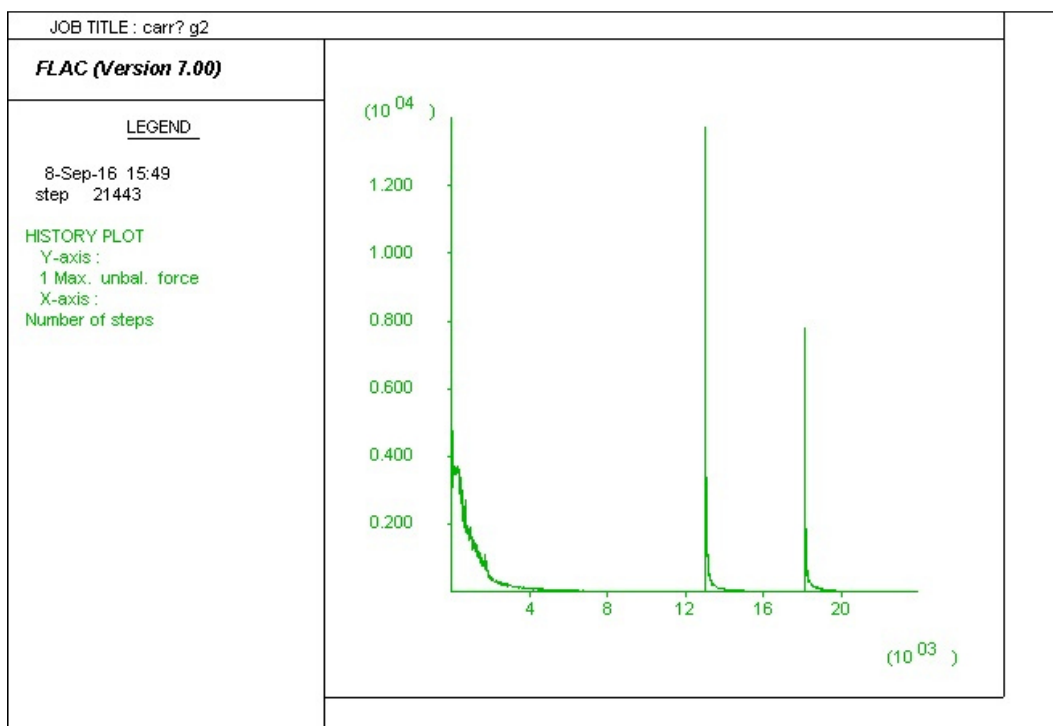


Figura 72: Riepilogo del bilanciamento delle forze in questa condizione.

### 4.3.2 Falda medio-alta

In Figura 73 è rappresentato il versante con il livello piezometrico posizionato a ridosso del piano campagna, mentre in Figura 74 sono rappresentate le componenti orizzontali degli spostamenti come ottenute dall'analisi.

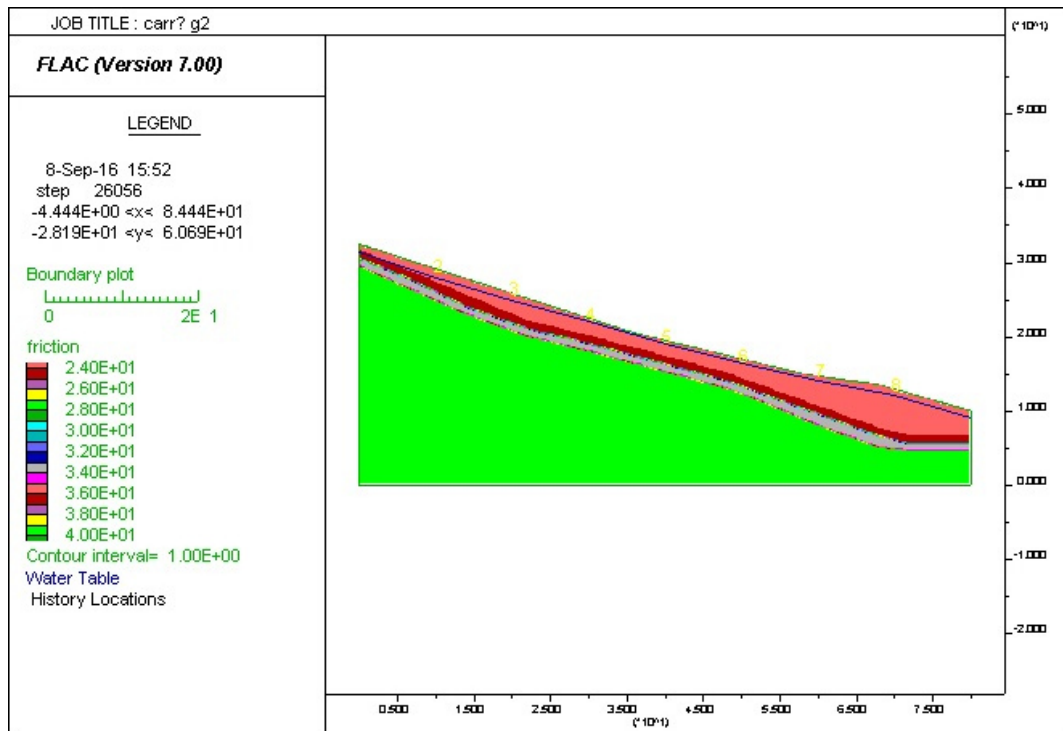


Figura 73: Rappresentazione del livello piezometrico (linea blu). Colorazione dei vari orizzonti in base al valore dell'angolo d'attrito.



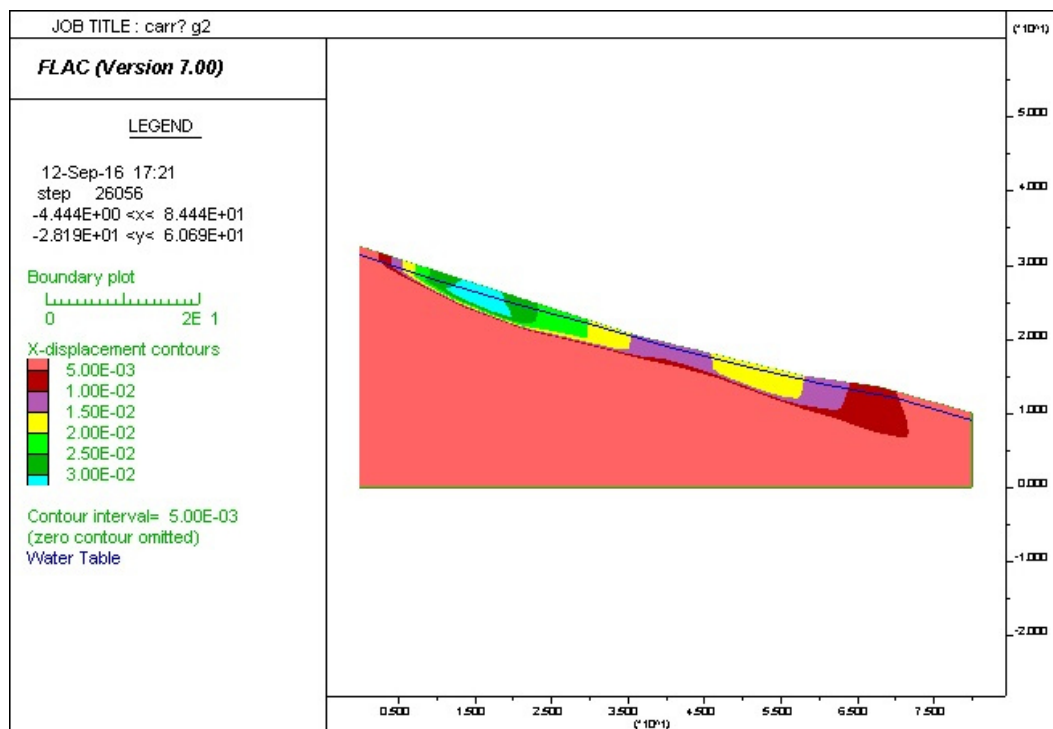


Figura 74: X-displacement della frana con il livello piezometrico medio-alto (linea blu).

Si può notare come l'entità degli spostamenti è aumentata, in quanto dell'ordine di 3 cm, interessando in maggior misura la parte più a monte del versante. Questo trova conferma nella Figura 75, dove è possibile vedere come l'estensione delle zone plasticizzate sia aumentata, coinvolgendo anche la zona più a monte del pendio.

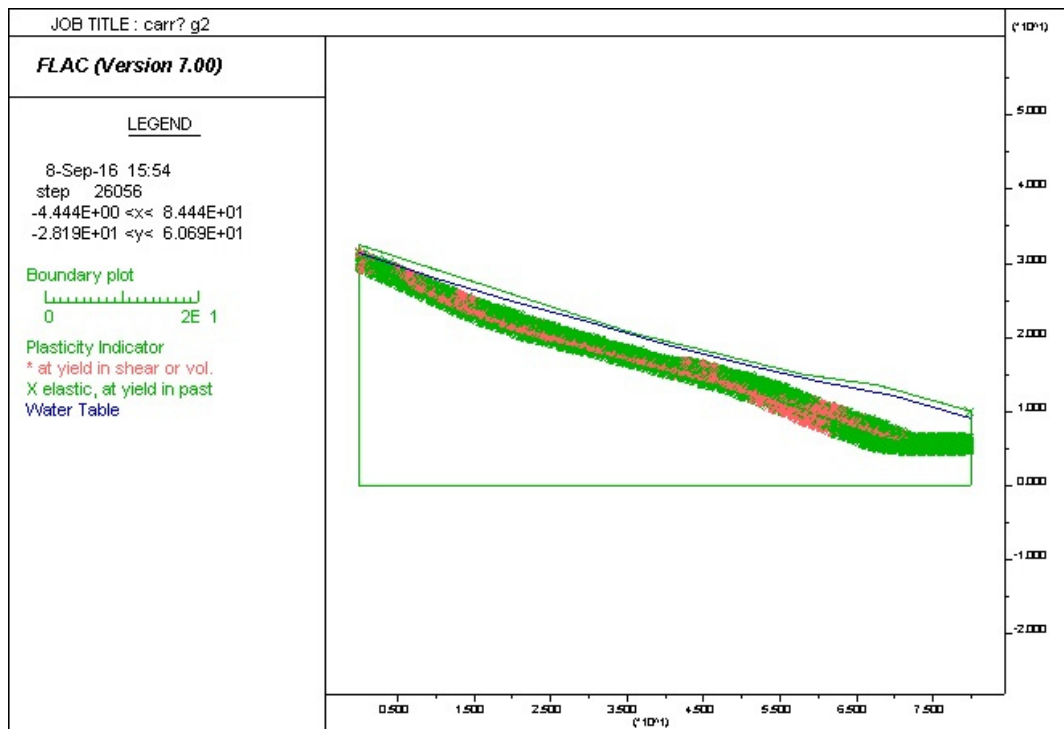


Figura 75: Distribuzione delle zone plasticizzate (in rosa).

Analogamente al caso precedente, anche in questa condizione le forze si bilanciano, come mostrato dall'andamento con il tempo-macchina sia degli spostamenti orizzontali (Figura 76) che delle forze sbilanciate (Figura 77).

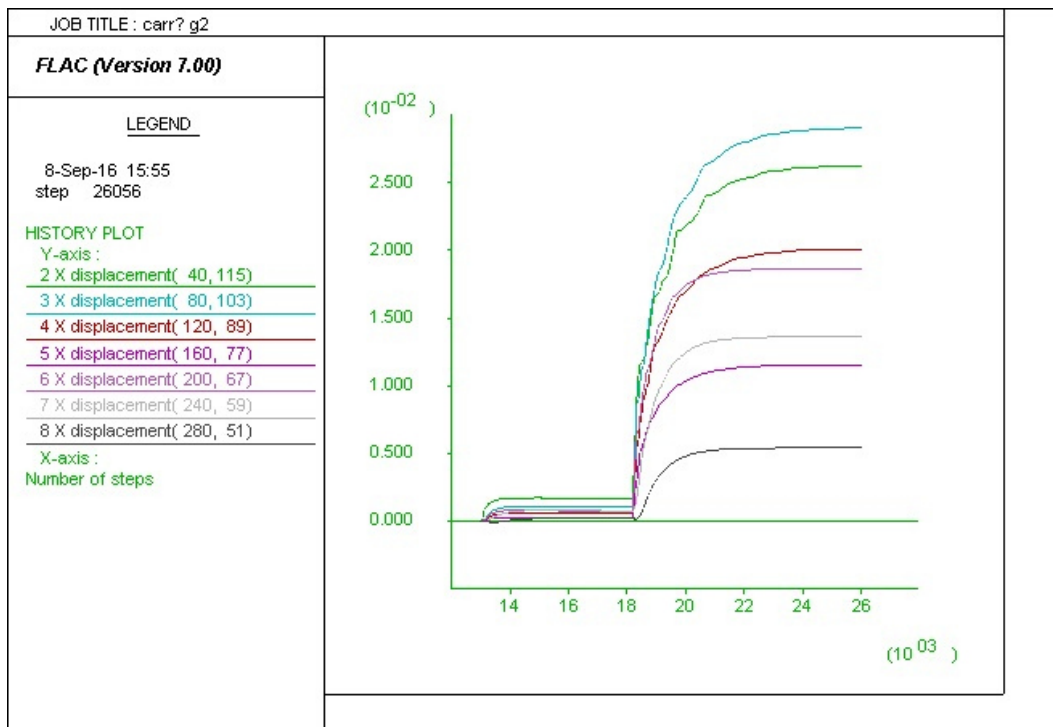


Figura 76: Spostamenti relativi alle history selezionate lungo il versante.

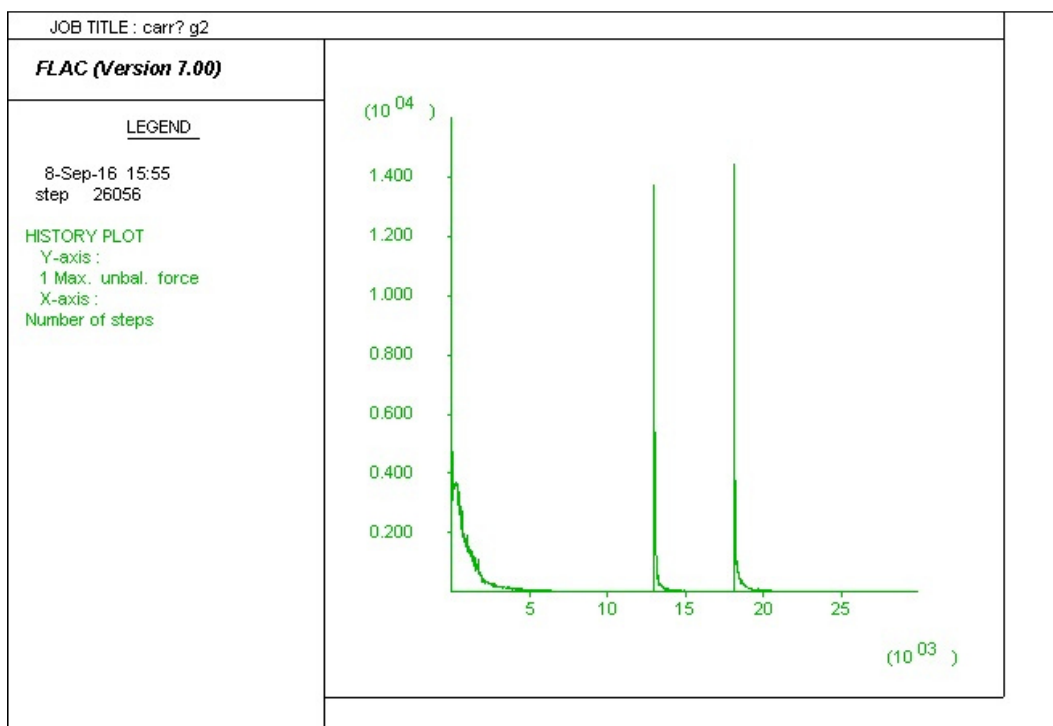


Figura 77: Riepilogo del bilanciamento delle forze in questa condizione.

### 4.3.3 Falda al piano campagna

In quest'ultima simulazione, il livello piezometrico è coincidente con la superficie del piano campagna (Figura 78), ottenendo spostamenti orizzontali maggiori (Figura 79).

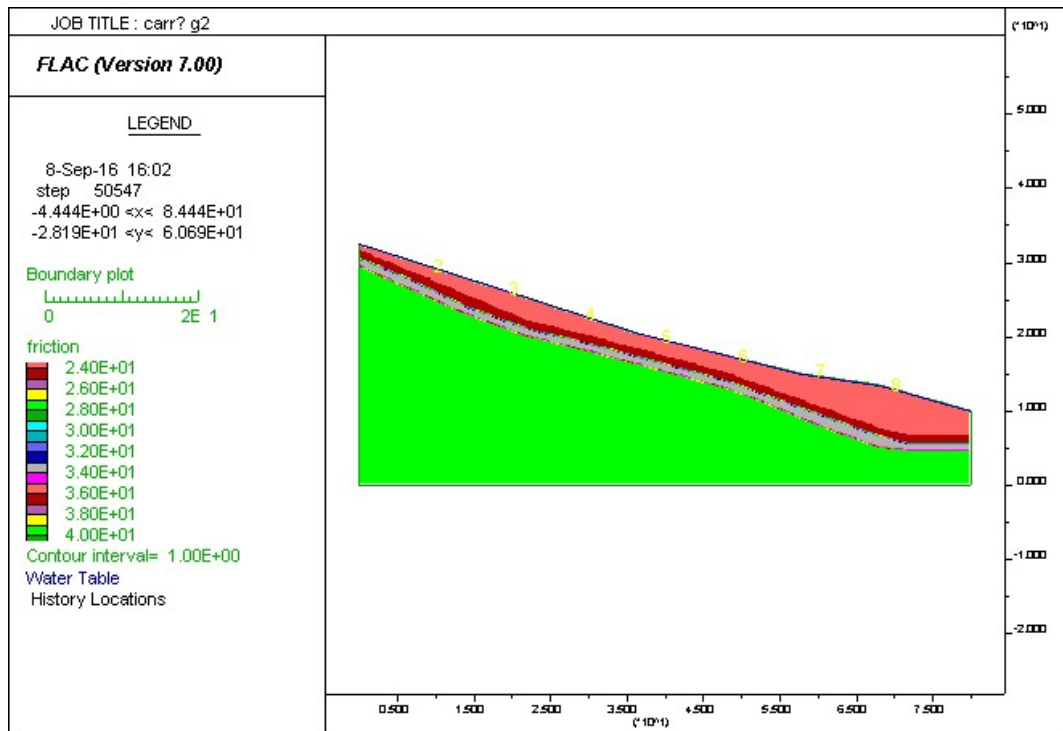


Figura 78: rappresentazione del livello piezometrico (linea blu). Colorazione dei vari orizzonti in base al valore dell'angolo d'attrito. I numeri 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 sono riferiti alle posizioni in cui vengono monitorati gli spostamenti in x (history).

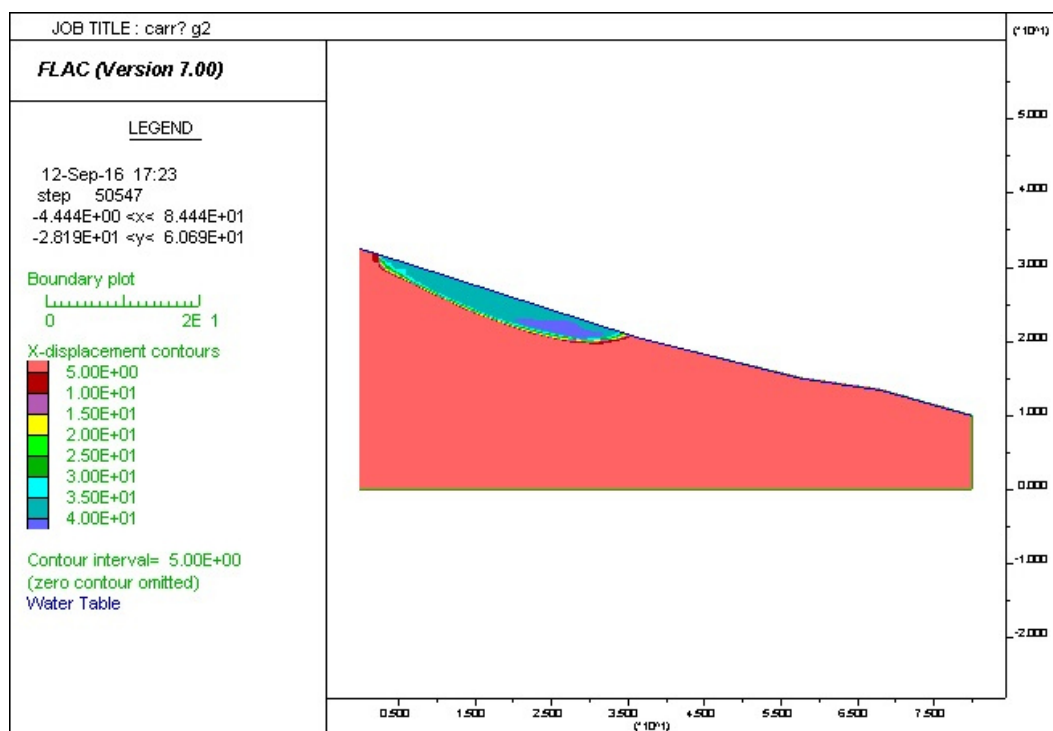


Figura 79: X-displacement della frana con il livello piezometrico al piano campagna (linea blu).

L'entità degli spostamenti è puramente indicativa in quanto, essendo il versante in condizioni di rottura, essa dipende solo dal numero di cicli di calcolo. I risultati dell'analisi indicano che la rottura inizia nella parte alta del versante (Figura 79) dove l'entità degli spostamenti è tale da nascondere gli spostamenti della parte inferiore del versante stesso, come indicato dall'andamento degli spostamenti registrati nei punti monitorati (Figura 81). Tale constatazione è confermata anche dalla distribuzione delle zone plasticizzate, concentrate nella parte alta del versante (Figura 80). In ogni caso, la condizione di collasso generalizzato del versante è chiaramente indicata dall'andamento delle forze sbilanciate (Figura 82).

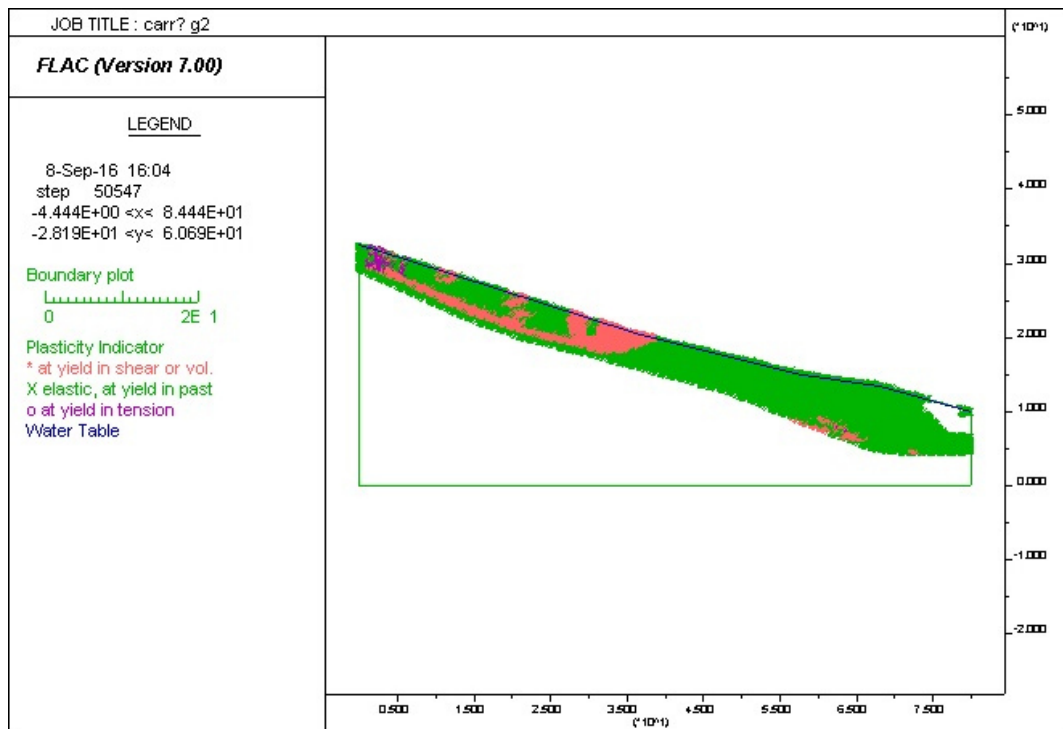


Figura 80: Distribuzione delle zone plasticizzate (in rosa) e delle zone in cui è avvenuta la rottura per trazione (in viola).

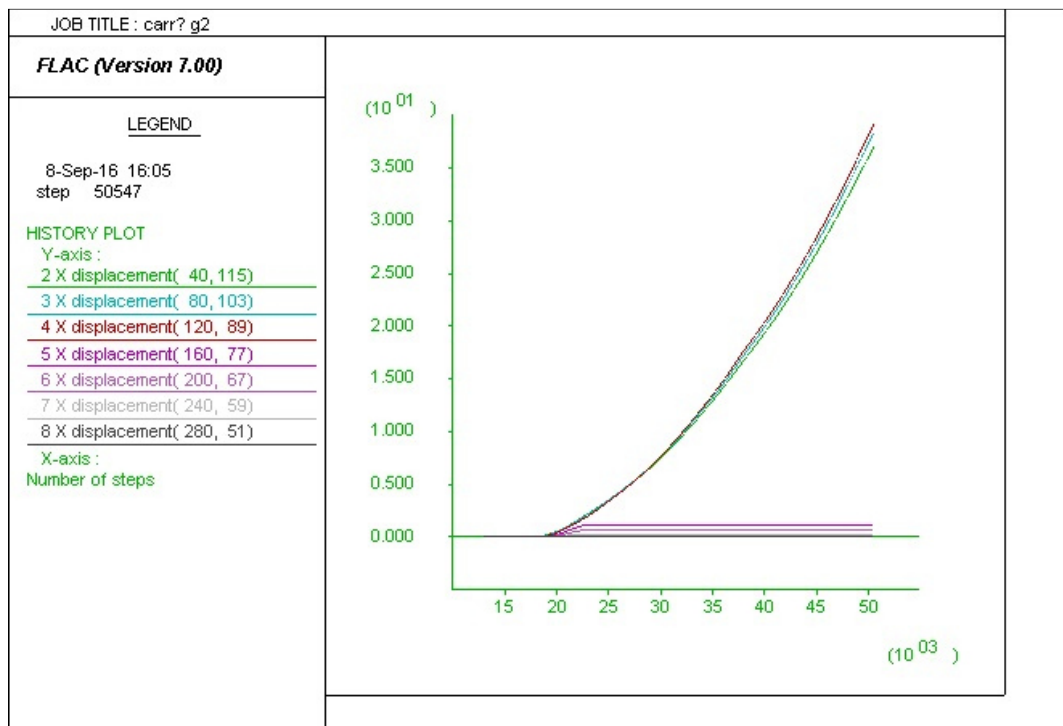


Figura 81: Spostamenti relativi alle history selezionate lungo il versante.

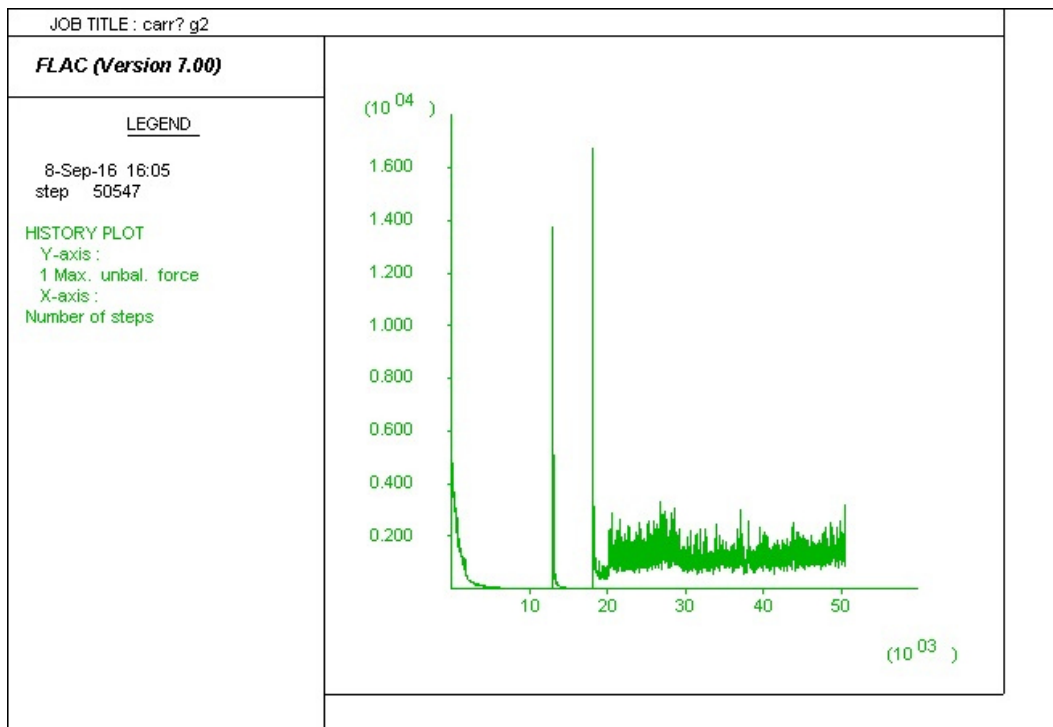


Figura 82: Riepilogo delle forze non bilanciate con falda al piano campagna.



## 5 Conclusioni

I fenomeni gravitativi superficiali che interessano le colline del Marosticano coinvolgono le coltri argillose prodotte dall'alterazione fisico-chimica delle rocce vulcaniche presenti, costituite principalmente da basalti e tufi.

La frana presa in considerazione in questo studio è stata classificata come uno *Scivolamento traslativo* con una componente rotazionale, tipologia molto frequente in queste aree collinari della Provincia di Vicenza.

Dal confronto dei risultati ottenuti dalle prove eseguite sia in sito che in laboratorio, con i dati degli studi già esistenti riguardanti il fenomeno in questione, è stato possibile valutare quali sono state le condizioni d'innescò che hanno portato al verificarsi dell'evento. Dalle analisi granulometriche è emersa una prima caratterizzazione del terreno: il deposito presenta elevati contenuti di limo ed argilla, con quest'ultima presente in modo maggiore nella parte più superficiale, in particolare raggiungendo valori massimi alla profondità di circa 3.5 metri, per poi diminuire progressivamente con l'aumentare della profondità. Dallo studio degli stati di consistenza di questi terreni a grana fine, è stato possibile ricavare i valori dei limiti di Atterberg, che hanno permesso di comprendere con che valore di contenuto d'acqua avviene il passaggio da uno stato di consistenza all'altro, e di conoscere, quindi, le loro caratteristiche. Il limite di liquidità assume valori elevati nella parte più superficiale del terreno, raggiungendo il valore massimo di 120% alla profondità di circa 3.5 metri, diminuendo poi progressivamente con la profondità. Tali risultati permettono di classificare il terreno a grana fine come *argille e limi di elevata plasticità*. Questo trova conferma anche dall'analisi dell'indice di plasticità, in quanto tutti i campioni, eccetto uno, ricadono nel campo delle *argille inorganiche di elevata plasticità*, rappresentato nella "Carta di plasticità di Casagrande".

Le analisi diffrattometriche a raggi X hanno consentito di individuare la fasi mineralogiche presenti nei campioni analizzati, in particolar modo hanno permesso di comprendere la tipologia di minerale argilloso presente e di quantificare il suo contenuto rispetto agli altri minerali presenti. I risultati hanno

permesso di constatare la ridotta presenza di fasi residuali (andesina ed augite), fasi lateritiche (anatasio, ilmenite, magnetite e goethite) e fasi colluviali (quarzo e muscovite), mentre è stata rilevata un'elevata presenza di montmorillonite (minerale argilloso appartenente al gruppo delle smectiti), la cui quantità supera l'80% nei primi 4 metri di deposito. Inoltre, l'analisi diffrattometrica eseguita sulla frazione fine ha permesso di classificare il minerale argilloso come *montmorillonite calcica pura*, senza alcun tipo di interstratificazione con altre specie mineralogiche.

Essendo la montmorillonite un minerale argilloso con un forte potere espansivo grazie alla capacità di assorbire acqua, al verificarsi di una precipitazione intensa, la pressione interstiziale tende ad aumentare in corrispondenza degli orizzonti in cui è presente maggiormente questa fase mineralogica, con una conseguente diminuzione delle pressioni efficaci e quindi della resistenza al taglio disponibile. Questa considerazione permette di ipotizzare quindi che molto probabilmente la superficie di scivolamento della frana in questione si sia impostata ad una profondità corrispondente ad una maggiore presenza di montmorillonite, ovvero in presenza di materiali con caratteristiche meccaniche scadenti.

Successivamente sono stati presi in considerazione anche studi precedenti effettuati sul medesimo fenomeno gravitativo, in modo tale da avere più dati possibili per la costruzione di un modello numerico che meglio rappresenti la realtà, utile questo per poter riprodurre il fenomeno studiato tramite modellazione numerica. Grazie al confronto dei risultati ottenuti con le prove penetrometriche DPSH e delle analisi granulometriche, è stato possibile definire gli orizzonti e la loro geometria presenti nel sottosuolo. In particolar modo sono state scelte due sezioni di riferimento, su cui sono stati definiti i modelli geologico-tecnici utilizzati poi per le simulazioni del fenomeno studiato. Sono state eseguite molteplici simulazioni con i due modelli creati, variando di volta in volta il livello di falda presente, fino ad arrivare alla condizione di falda coincidente con il piano campagna.

Dai risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate su due sezioni longitudinali al movimento, è stato possibile dedurre che il versante in esame si trova in

condizioni di rottura solamente quando la falda è posizionata al piano campagna: con livelli di falda minori, sono presenti solo piccoli spostamenti di porzioni di terreno, che non portano però ad una rottura generalizzata del versante.

Dall'analisi dei risultati riguardanti la Sezione 1, è possibile notare come le zone plasticizzate iniziano ad interessare zone in prossimità della depressione presente a valle di tale sezione, anche con bassi livelli di falda: tali zone plasticizzate si estendono poi verso monte con l'innalzamento della falda, provocando poi l'instabilità di tutto il pendio. L'instabilità interessa orizzonti ricchi in argilla. In questo caso risulta giocare un ruolo fondamentale la morfologia sepolta del versante studiato.

Dall'analisi della Sezione 2, le zone plasticizzate risultano interessare in ugual modo gli orizzonti ricchi in argilla, interessando zone sempre più ampie con l'innalzamento del livello di falda, portando all'instabilità dell'intero versante quando tale livello coincide con il piano campagna.

Le analisi sembrerebbero indicare che il fenomeno franoso abbia avuto inizio in prossimità della depressione morfologica del substrato roccioso presente a valle della Sezione 1, generando un'instabilità della parte inferiore del versante, e che successivamente questa abbia generato un collasso anche della zona adiacente, corrispondente alla Sezione 2.

In conclusione è possibile affermare che le condizioni d'innescio del fenomeno gravitato in questione siano dovute principalmente alla presenza di terreni con scarse caratteristiche di resistenza al taglio, quali terreni argillosi ricchi in montmorillonite calcica pura, e dalla presenza del livello di falda coincidente con il piano campagna, situazione questa che può verificarsi in casi eccezionali, come ad esempio con il verificarsi di fenomeni di intensa precipitazione. In presenza di queste condizioni, è possibile che si generi l'instabilità di un versante anche in presenza di modeste pendenze locali.



## Bibliografia

Barbieri G., De Zanche V., Medizza F. & Sedeà R. (1982) Considerazioni sul vulcanismo terziario del Veneto occidentale e del Trentino meridionale. *Rend. Soc. Geol. It.*, 267-270.

Bellieni G., Fioretti A. M., Marzoli A., Visonà D. (2010) Permo-Paleogene magmatism in the eastern Alps. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 21 (Suppl 1), S51-S71.

Berardi R. (2013) *Fondamenti di Geotecnica*. Seconda edizione, De Agostini Scuola, Novara.

Bosellini A. (2004) The western passive margin of Adria and its carbonate platforms. Special Volume of the Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004, 79-92.

Busnardo E. (2016) Studio dei fattori geotecnici e mineralogici che inducono fenomeni di instabilità nelle coltri di alterazione dei depositi vulcanici terziari nel settore pre-alpino della Provincia di Vicenza. Tesi di Dottorato, Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra, Università degli Studi di Padova.

Itasca Consulting Group (2012) *FLAC Manual*. Fast Lagrangian Analysis of Continua. Minneapolis (USA).

Klein C. (2004) *Mineralogia*. Zanichelli, Bologna.

Massagrande A. (2012) Indagini geognostiche finalizzate alla caratterizzazione litologico-stratigrafica e fisico-meccanica dei terreni. Relazione professionale, Comune di Carrè.

Meunier A. (2005) *Clays*. Springer, Berlin.

Naldi M. (2014) Indagini geofisiche e valutazioni idrogeologiche finalizzate alla verifica del movimento franoso verificatosi a valle del sostegno P95. Relazione professionale, Comune di Carrè.

Piccoli G. (1969) Studio geologico del vulcanismo Paleogenico veneto. Mem. Istituti Geol. e Mineral. Univ. Padova, 26 (1967-1968), pp. 1-98, figg. 16, tavv.5.

Salbego G., Floris M., Busnardo E., Toaldo M., Genevois R. (2015) Detailed and large scale cost/benefit analyses of landslide prevention vs post-event actions. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 2461-2472.

Tanzini M. (2011) L'indagine geotecnica. Caratterizzazione geotecnica delle terre e delle rocce attraverso prove in sito e di laboratorio. Dario Flaccovio Editore, Palermo.

Toaldo M. (2014) Caratterizzazione geotecnica e mineralogica di depositi vulcanici alterati soggetti a fenomeni di scivolamento nell'area pedemontana della Provincia di Vicenza. Tesi di laurea magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Università degli Studi di Padova.

Zoggia N. (2014) Monitoraggio inclinometrico in località Via Valdaro del Comune di Carrè (VI). Relazione professionale, Comune di Carrè.

# Allegati

## *Allegato 1*

Risultati delle prove geotecniche di laboratorio relative ai campioni derivati dalla perforazione a carotaggio continuo.

Campione	Profondità (m)	Granulometria (%)				Limiti di Atterberg (H <sub>2</sub> O)			Limiti di Atterberg (NaPO <sub>3</sub> )		
		Ciott.fini	Sabbia	Limo	Argilla	WL	WP	IP	WL	WP	IP
2	1,00 – 1,33	1	5	36	58	115.91	26.58	89.33	115.57	28.69	86.88
3	1,70 – 2,00	0	2	56	42	90.99	29.46	61.53	98.07	29.23	68.84
4	2,20 – 2,50	10	1	42	47	113.57	27.58	85.99	120.74	29.58	91.16
5	3,00 – 3,40	1	2	40	57	120.93	26.06	94.87	120.35	25.77	94.58
6	3,90 – 4,15	3	3	54	40	80.5	23.52	56.98	80.26	24.41	55.85
7	4,50 – 4,75	19	7	50	24						
8	5,45 – 5,70	5	7	67	21	46.65	24.24	22.41	47.11	23.31	23.8
9	6,25 – 6,40	38	4	44	14						
10	7,60 – 7,70	43	5	43	9						



## *Allegato 2*

Risultati delle prove geotecniche di laboratorio relative ai campioni derivati dallo scavo di trincea.

<b>Campione</b>	<b>Profondità</b>	<b>Wl [%]</b>	<b>Wp [%]</b>	<b>Ip [%]</b>	<b>%ghiaia</b>	<b>%sabbia</b>	<b>%limo</b>	<b>%argilla</b>
<b>CARRE01</b>	0.1	74	46	28	0	25.96	56.33	17.71
<b>CARRE02</b>	0.3	73	44	29	0	7.56	67.41	25.03
<b>CARRE03</b>	0.5	67	41	26	0	18.08	63.30	18.62
<b>CARRE04</b>	0.7	74	30	44	0	29.10	52.33	18.57
<b>CARRE05</b>	0.9	67	32	35	0	43.10	46.94	9.96
<b>CARRE06</b>	1.1	75	60	15	0	37.44	48.17	14.39
<b>CARRE07</b>	1.3	82	39	43	0	32.18	55.56	12.26
<b>CARRE08</b>	1.5	87	41	46	0	43.36	46.79	9.85
<b>CARRE09</b>	1.7	84	46	38	0	15.20	70.17	14.63
<b>CARRE10</b>	1.9	76	36	40	0	35.29	48.39	16.32
<b>CARRE11</b>	2.1	59	36	23	0	45.76	46.39	7.75
<b>CARRE12</b>	2.3	53	38	15	0	38.31	48.47	13.22
<b>CARRE13</b>	2.5	66	37	29	0	35.74	50.87	13.39
<b>CARRE14</b>	2.7	64	36	28	0	31.84	55.11	13.05
<b>CARRE15</b>	2.9	61	36	25	0	29.52	55.80	14.68
<b>CARRE16</b>	3.1	79	43	36	0	22.26	63.36	14.38
<b>CARRE17</b>	3.4	72	46	26	3.36	16.03	67.18	13.43
<b>CARRE18</b>	3.8	42	39	3	0	60.34	37.53	2.13
<b>CARRE19</b>	4.2	43	31	12	0	42.34	49.16	8.5

### *Allegato 3*

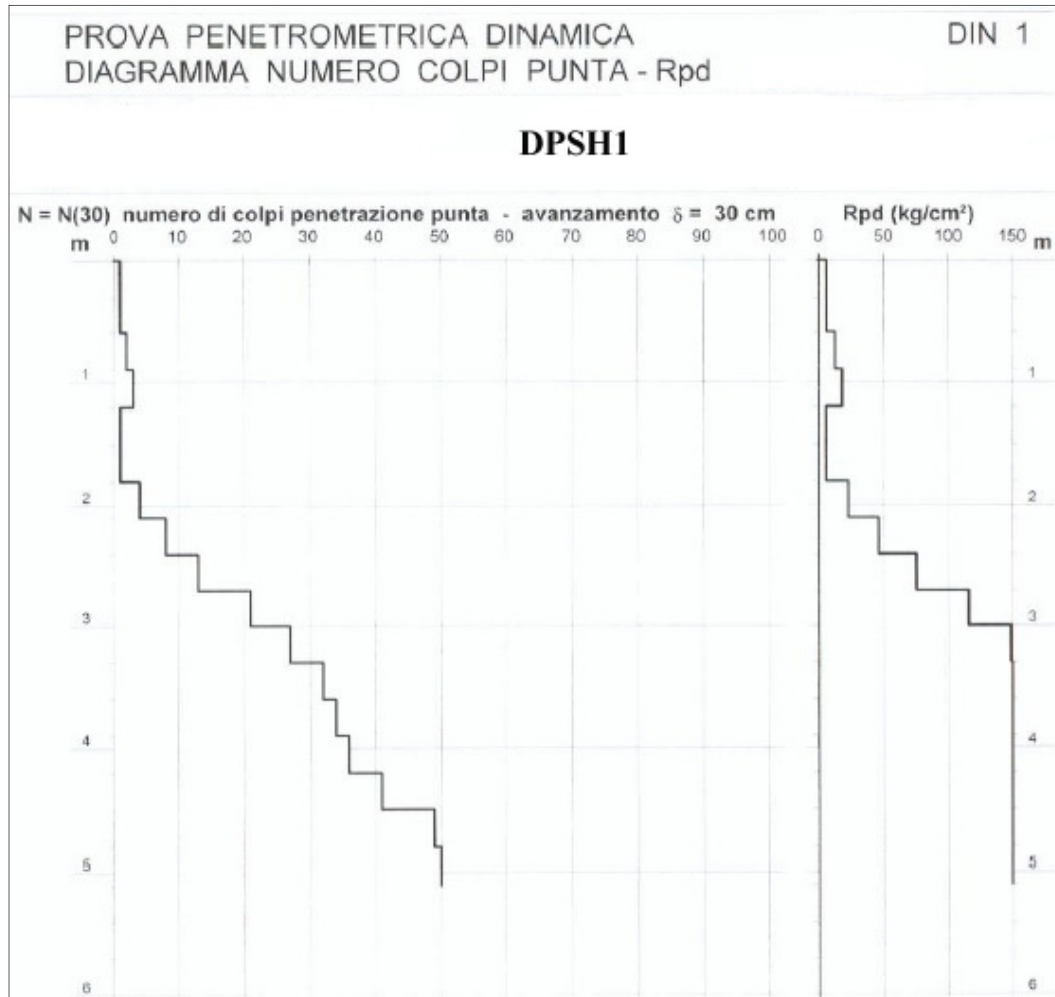
Risultati delle analisi mineralogiche relative ai campioni derivati dallo scavo di trincea.

Campione	Prof	Mtn	Ana	Hem	Gth	Mgn	Ms	Qtz	And	Aug	Ilm	Kaol
CARRE01	0.1	88.49	0.00	0.00	0.00	0.26	0.00	3.27	7.37	0.52	0.10	0.00
CARRE02	0.3	89.38	1.15	0.00	0.00	0.39	0.00	4.33	4.51	0.25	0.00	0.00
CARRE03	0.5	87.89	0.39	0.00	0.00	0.70	0.00	5.04	5.41	0.57	0.00	0.00
CARRE04	0.7	89.48	1.32	0.00	0.00	0.68	0.00	3.80	4.49	0.23	0.00	0.00
CARRE05	0.9	86.76	0.87	0.00	0.00	0.81	0.00	2.92	5.13	1.38	0.00	0.00
CARRE06	1.1	83.66	1.04	0.00	1.87	1.00	0.00	5.47	6.64	0.32	0.00	0.00
CARRE07	1.3	86.71	0.96	0.00	1.35	0.73	0.00	4.76	5.04	0.45	0.00	0.00
CARRE08	1.5	90.37	1.18	0.00	0.00	0.76	0.00	1.60	5.23	0.87	0.00	0.00
CARRE09	1.7	87.42	0.66	0.00	0.97	0.94	0.00	4.90	5.03	0.09	0.00	0.00
CARRE10	1.9	81.95	1.12	0.37	0.00	1.19	0.78	7.65	6.81	0.13	0.00	0.00
CARRE11	2.1	63.98	1.04	0.43	2.05	0.76	4.05	20.57	7.14	0.00	0.00	0.00
CARRE12	2.3	61.45	1.18	0.52	1.58	0.72	4.88	20.67	9.01	0.00	0.00	0.00
CARRE13	2.5	73.73	0.40	0.59	0.00	0.79	4.00	13.31	7.18	0.00	0.00	0.00
CARRE14	2.7	73.25	0.39	0.59	0.21	0.66	3.30	14.78	6.82	0.00	0.00	0.00
CARRE15	2.9	67.73	0.94	0.49	1.06	0.36	3.66	18.76	7.01	0.00	0.00	0.00
CARRE16	3.1	82.90	1.36	0.00	1.35	0.80	0.00	7.72	5.66	0.23	0.00	0.00
CARRE17	3.4	86.84	0.75	0.90	0.12	0.43	0.00	3.34	5.44	1.96	0.23	0.00
CARRE18	3.8	47.67	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35	38.68	2.63	1.15	9.32
CARRE19	4.2	51.23	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	38.10	4.39	1.29	0.00

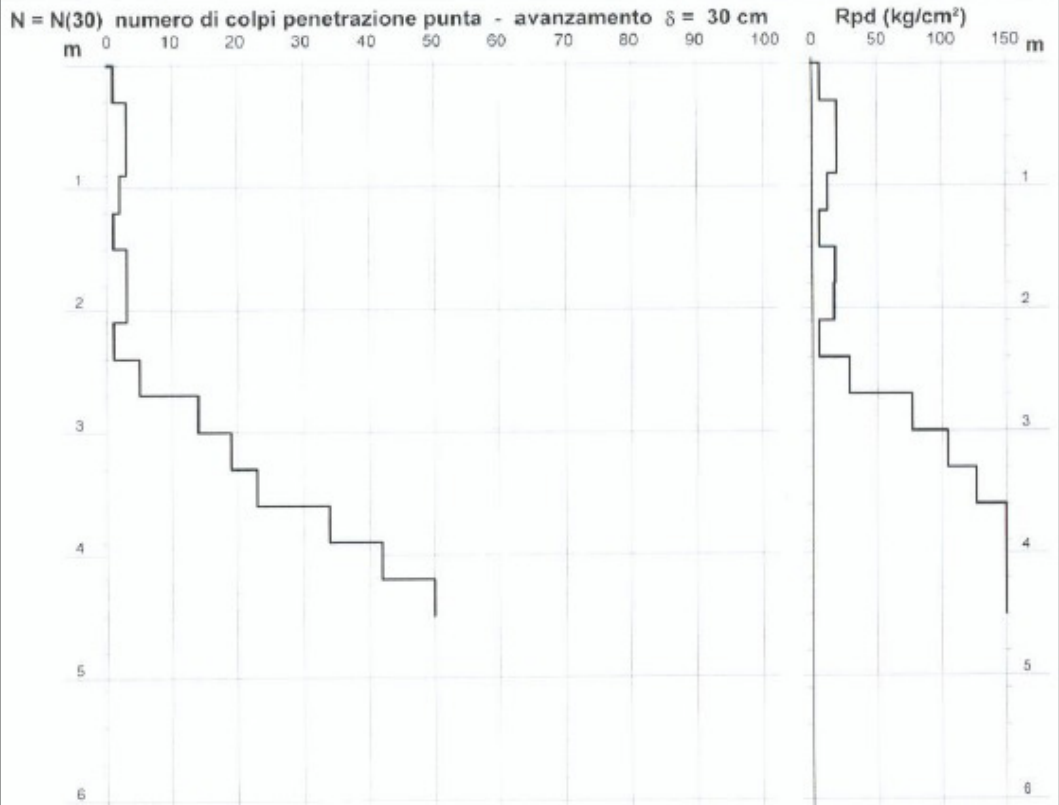
Mtn = Montmorillonite, Ana = Anatasio, Hem =Ematite, Gth = Goethite,  
Mgn = Magnetite, Ms = Muscovite, Qtz = Quarzo, And = Andesina, Aug = Augite,  
Ilm = Ilmenite, Kaol = Caolinite

## Allegato 4

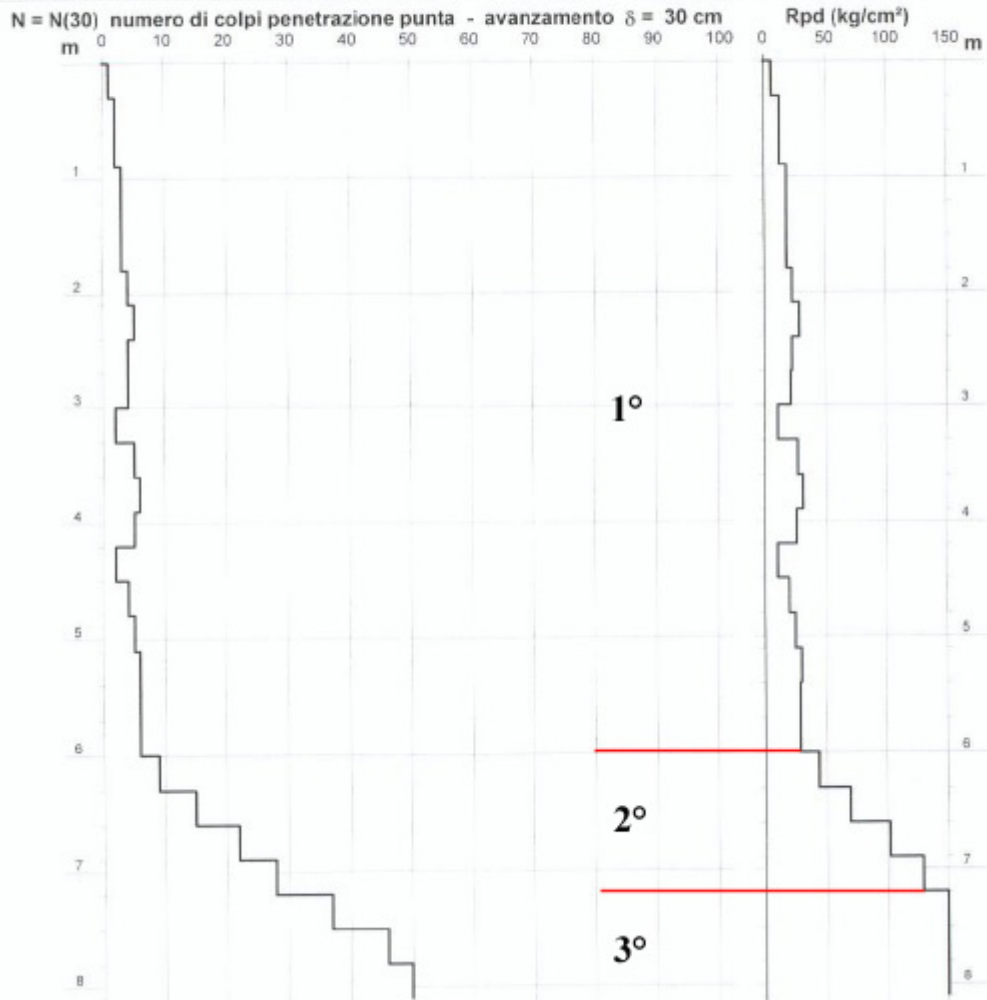
Risultati delle prove penetrometriche DPSH.



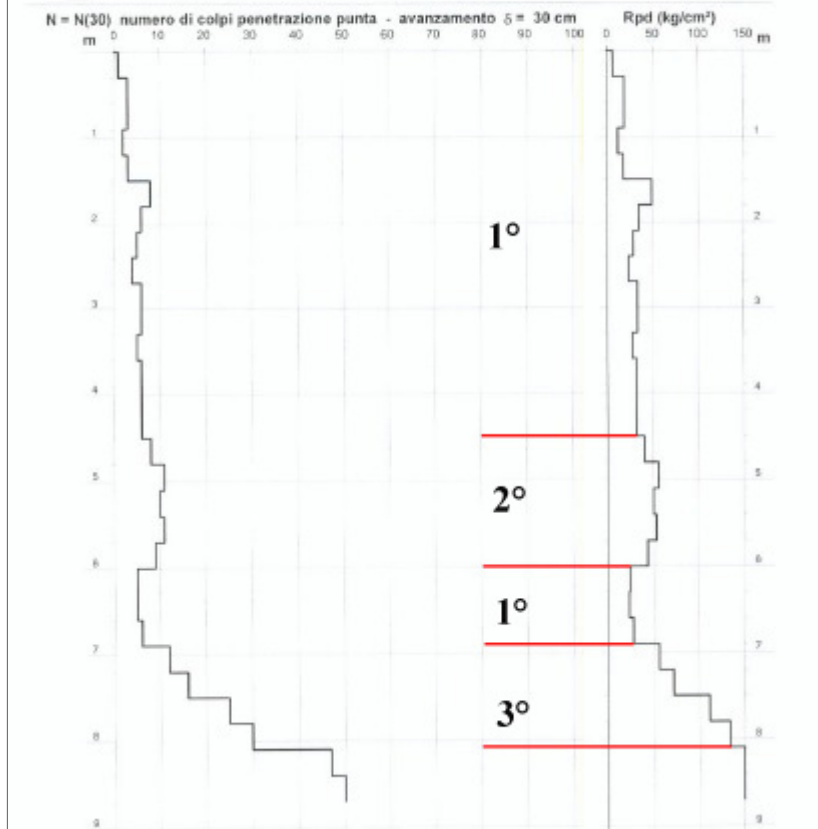
**DPSH2**



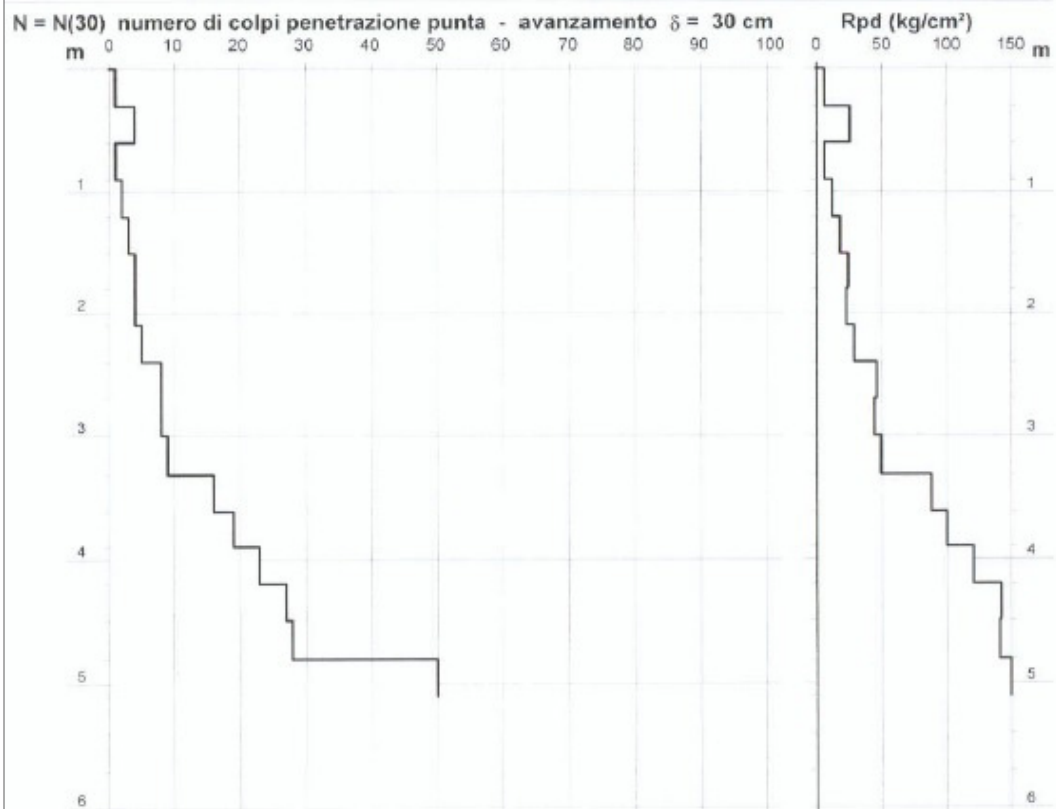
**DPSH3**



### DPSH4

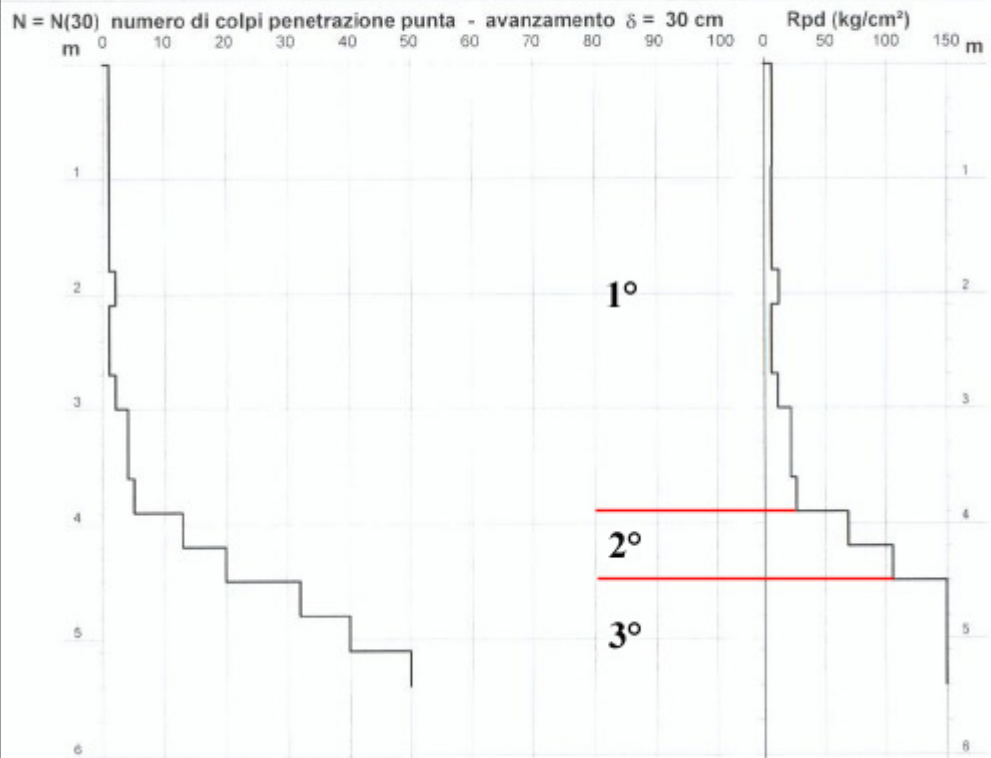


**DPSH5**

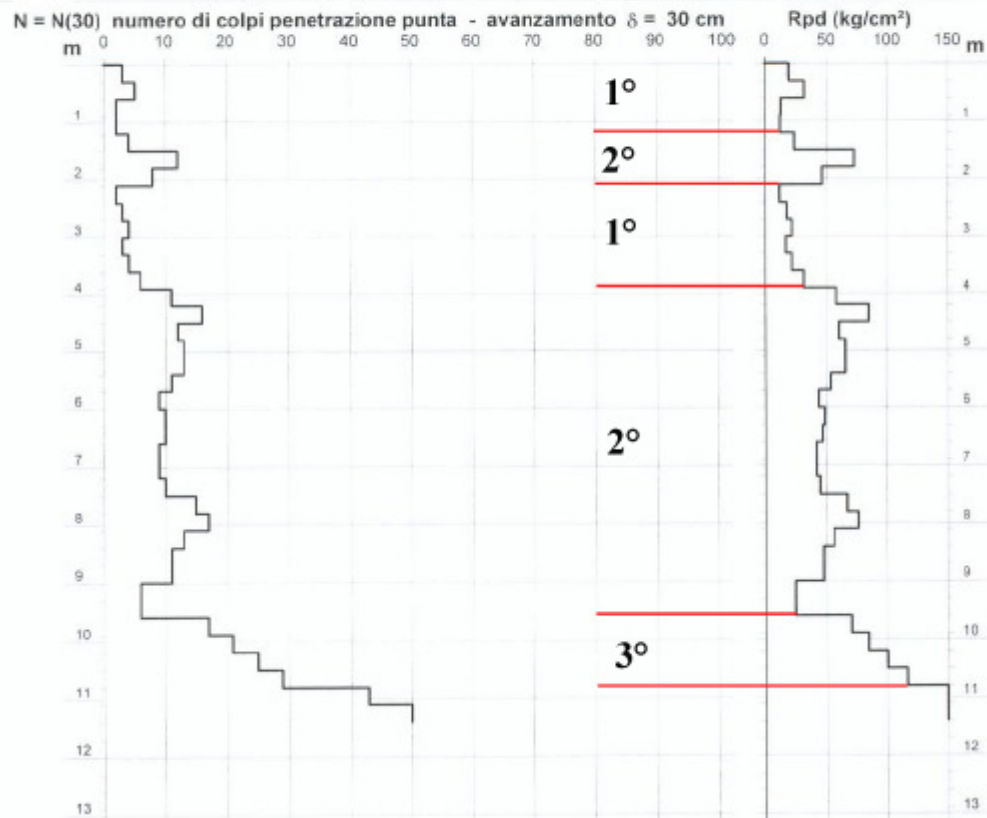




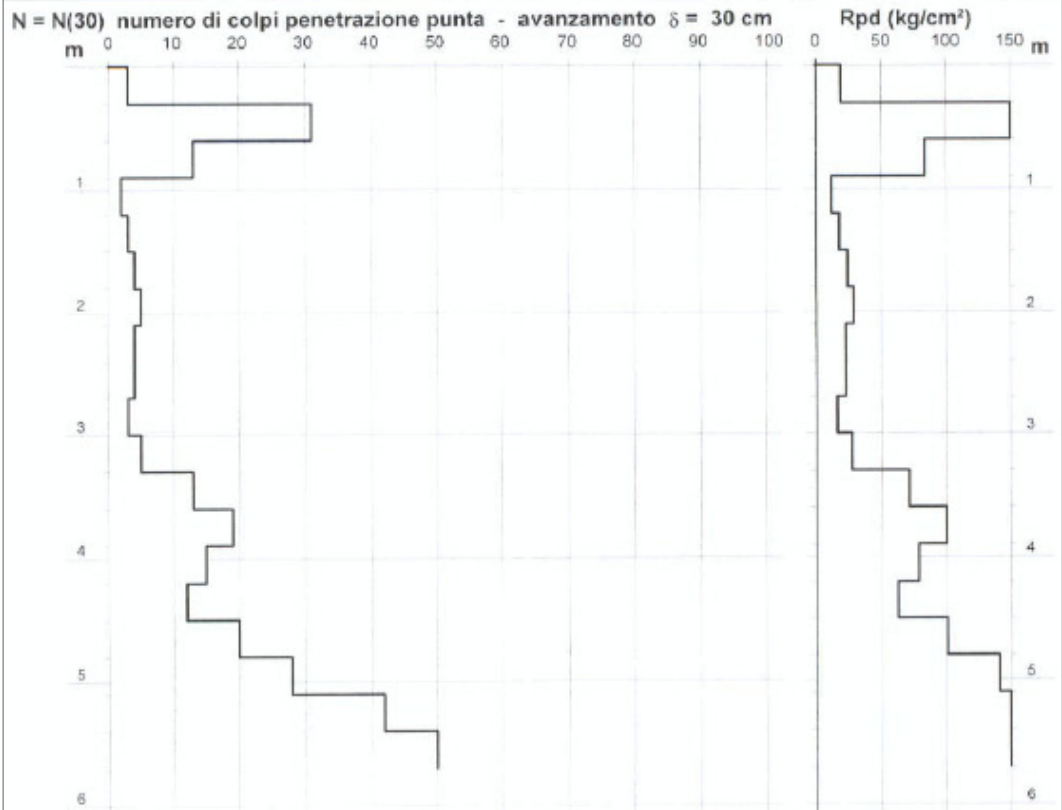
**DPSH6**



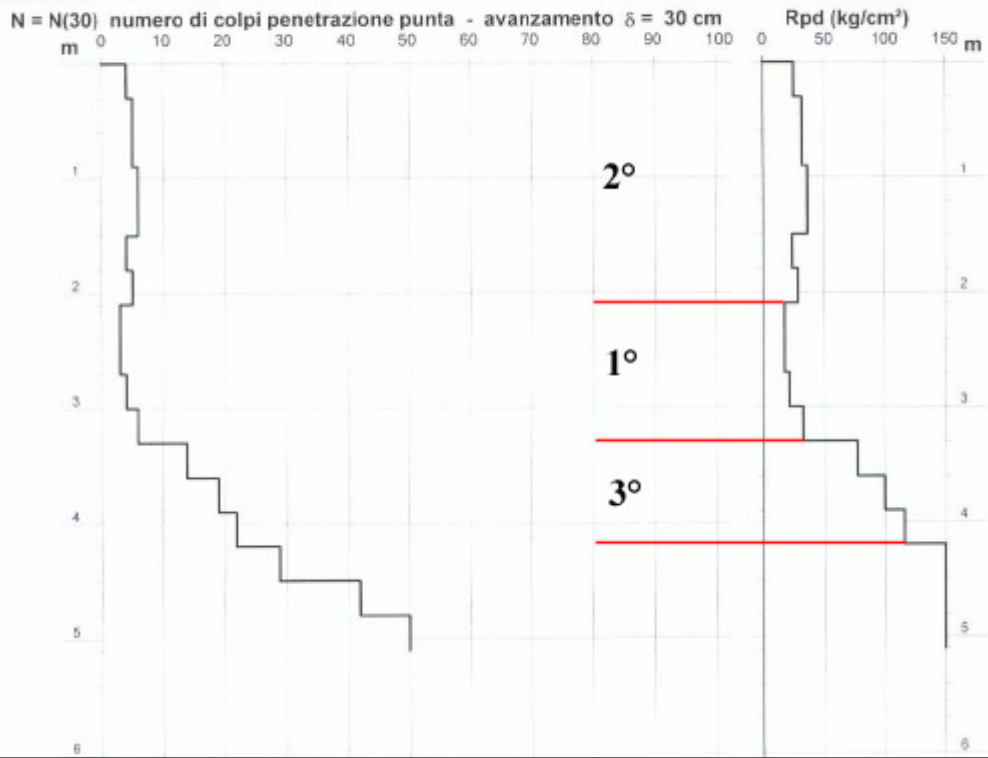
### DPSH 7



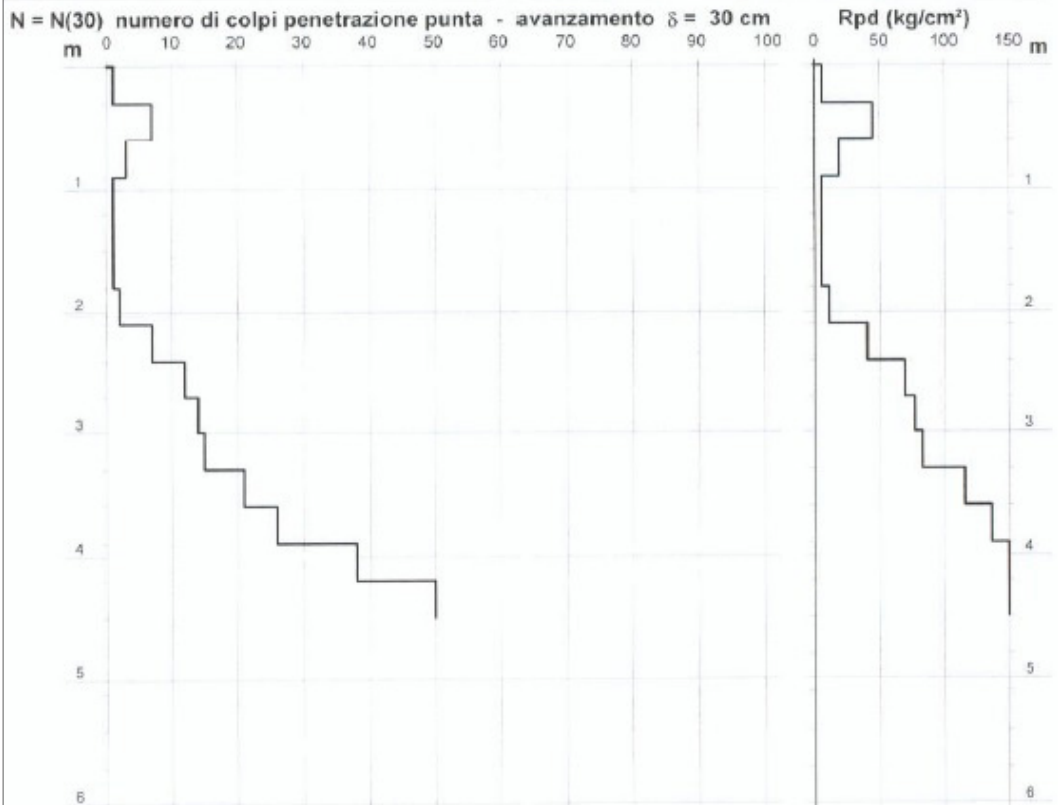
**DPSH8**



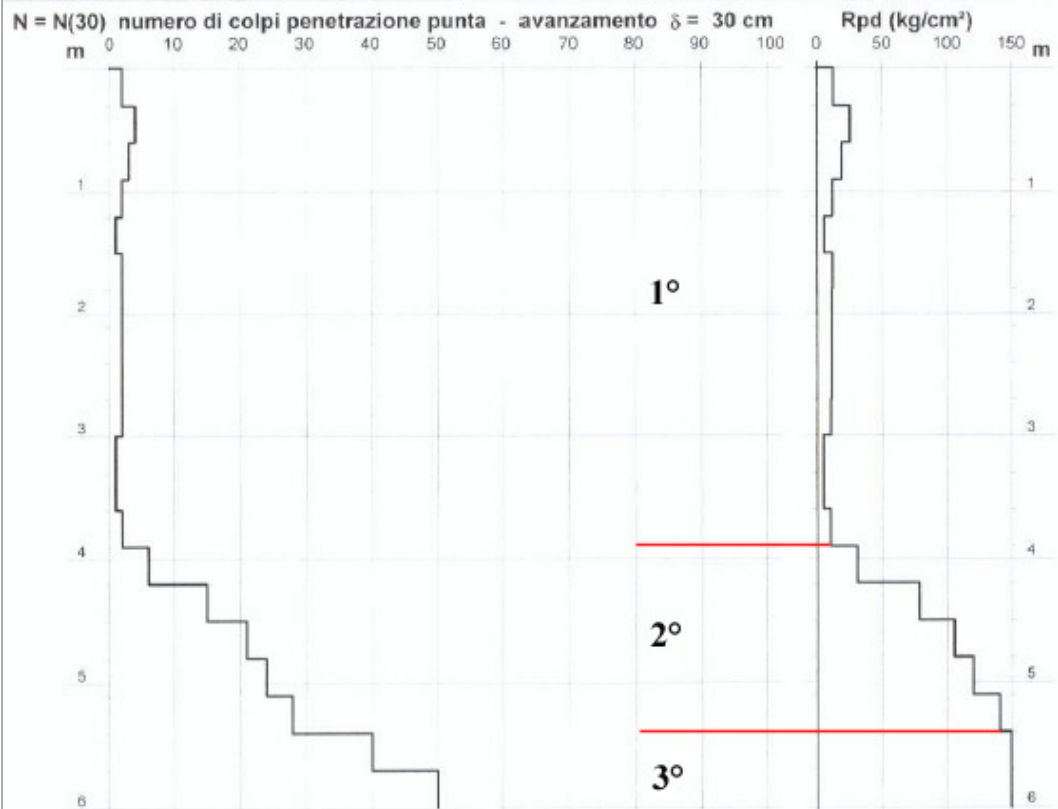
**DPSH9**



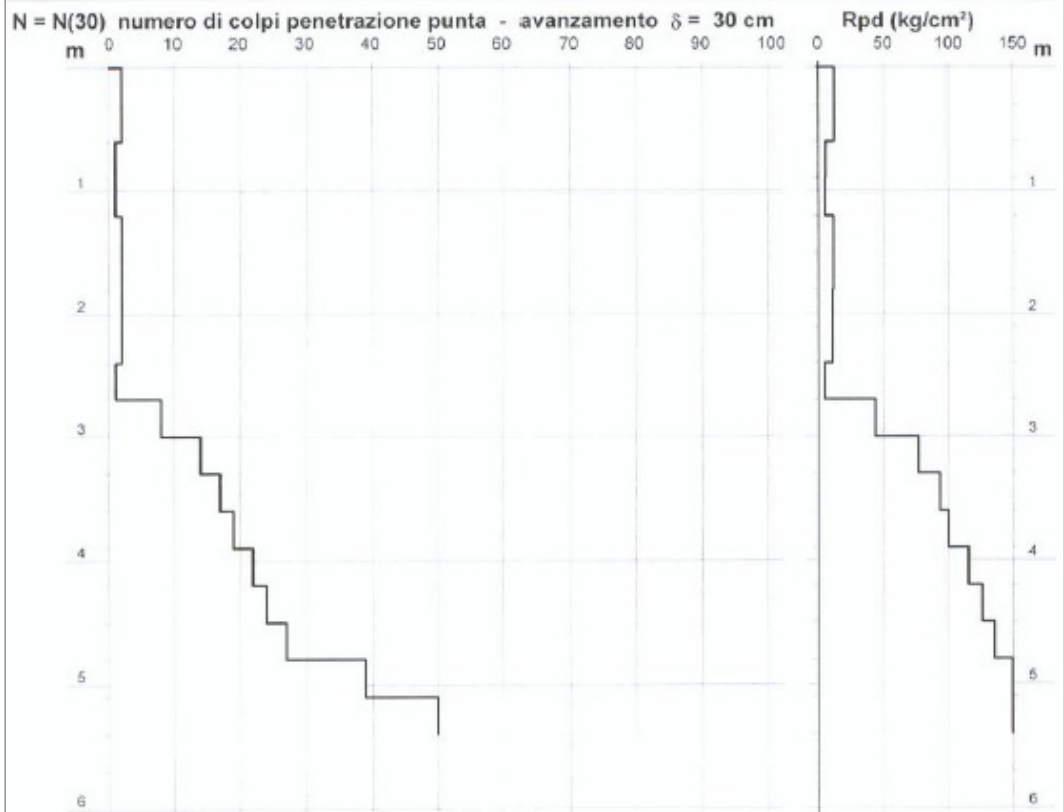
**DPSH10**



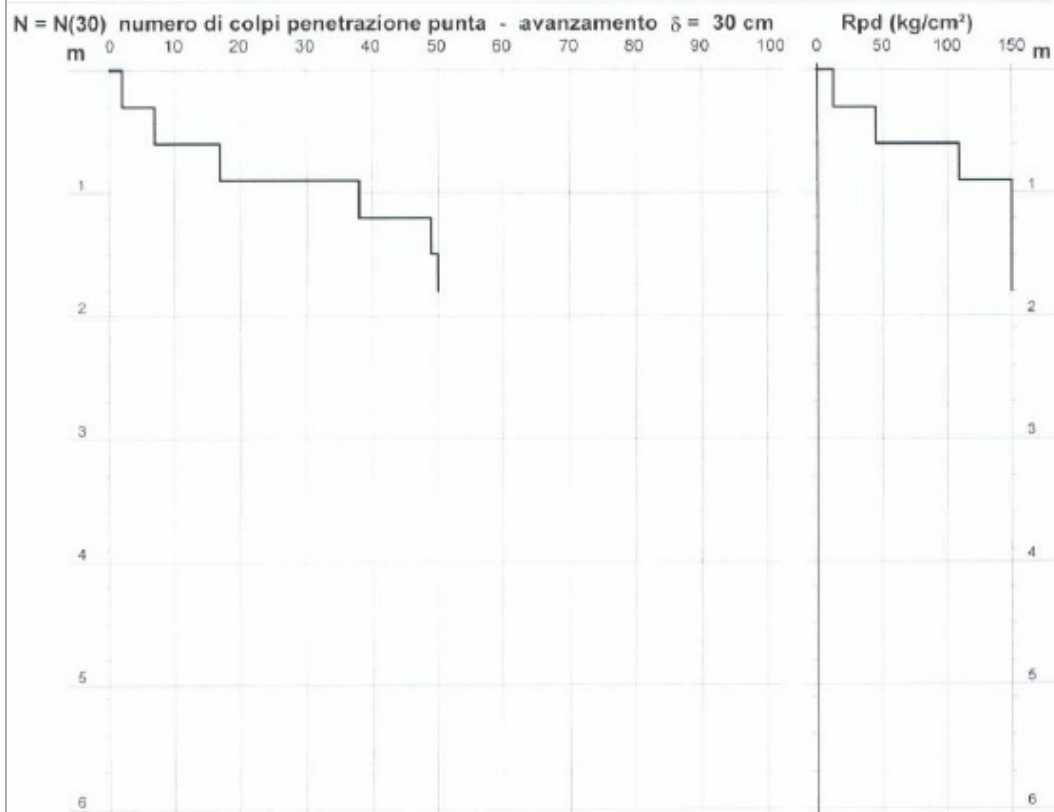
**DPSH11**



**DPSH12**

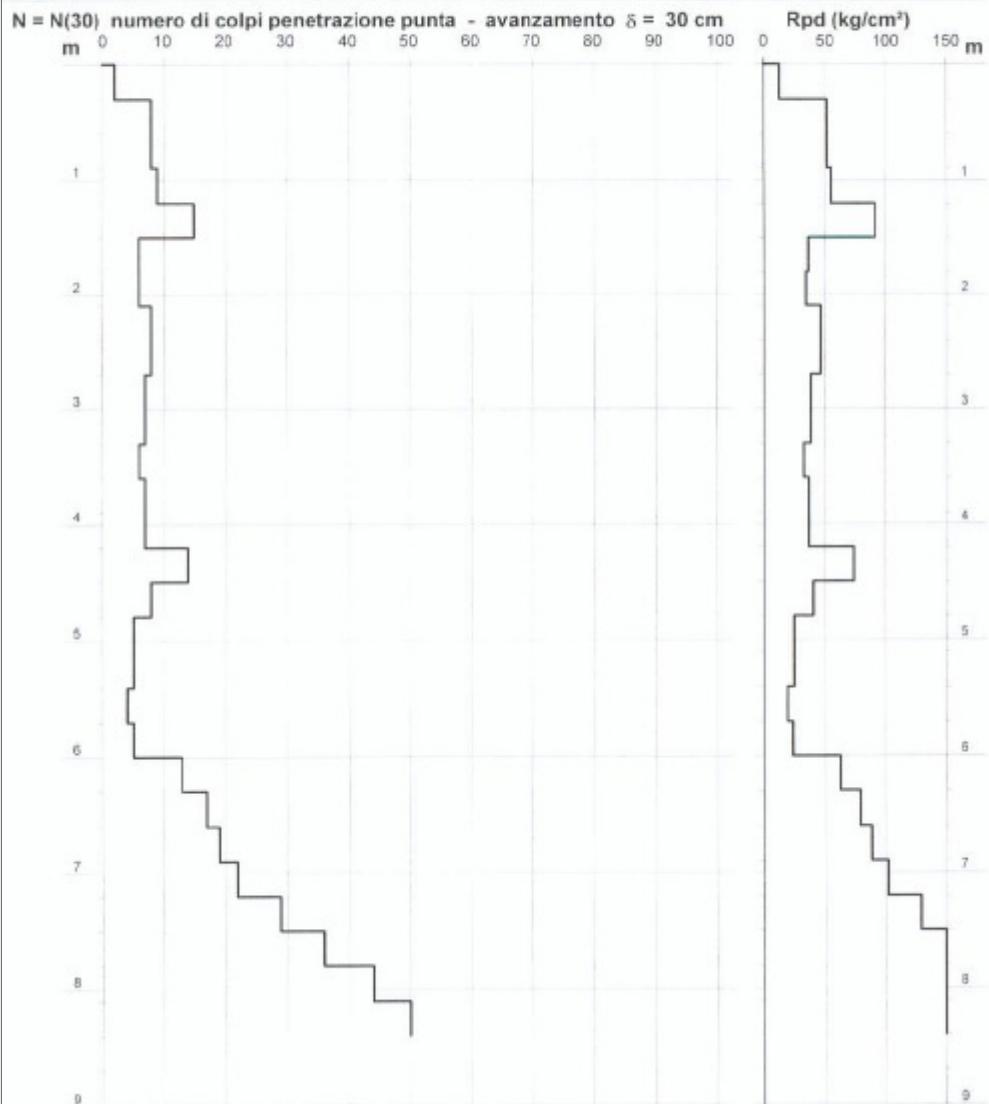


**DPSH13**

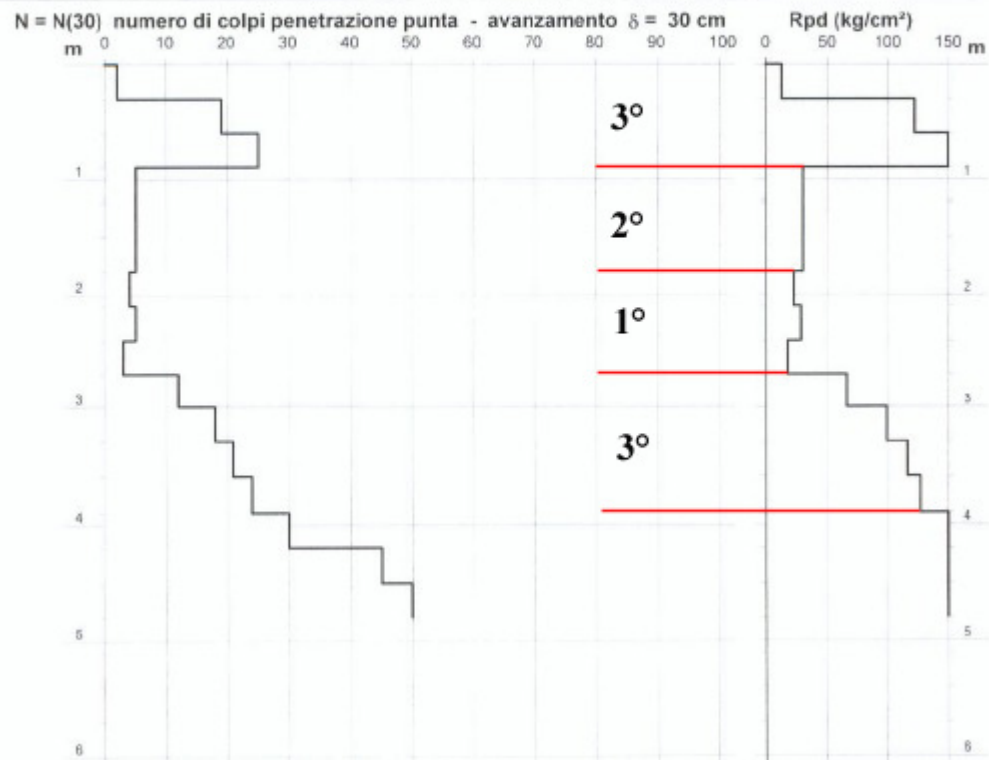




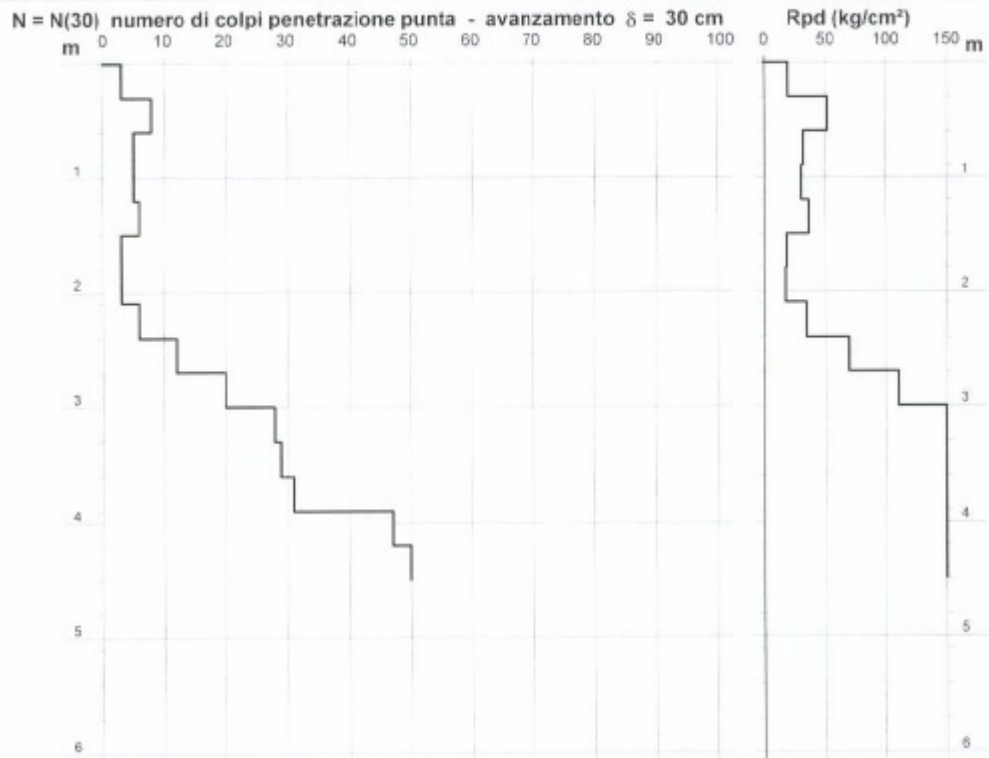
**DPSH14**



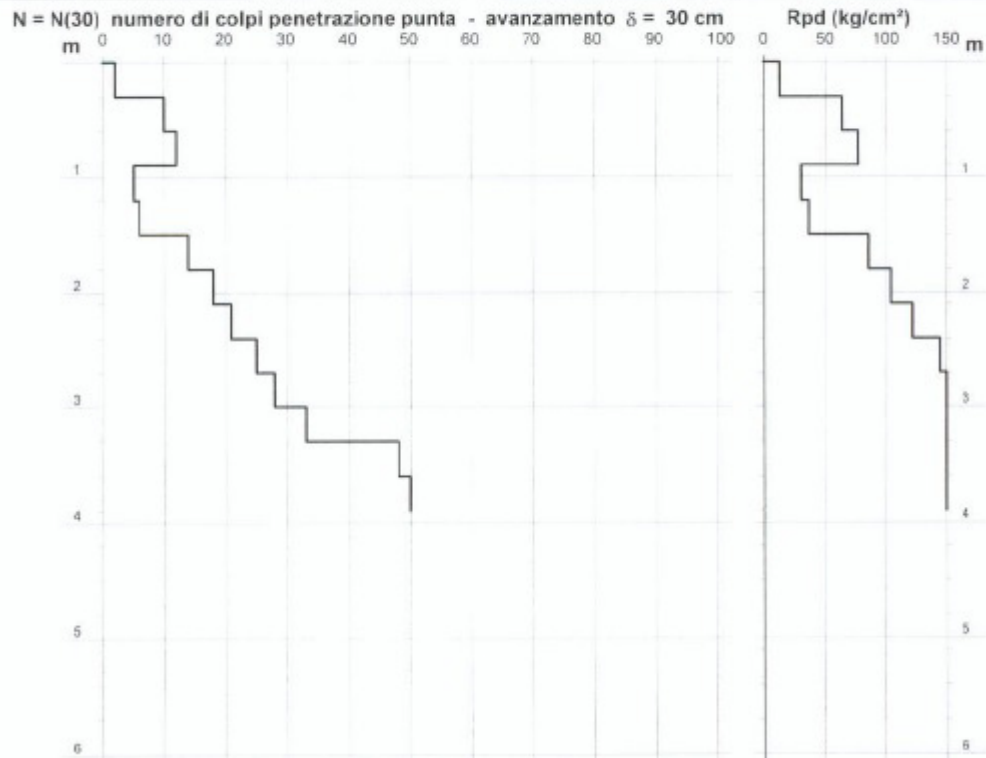
**DPSH15**



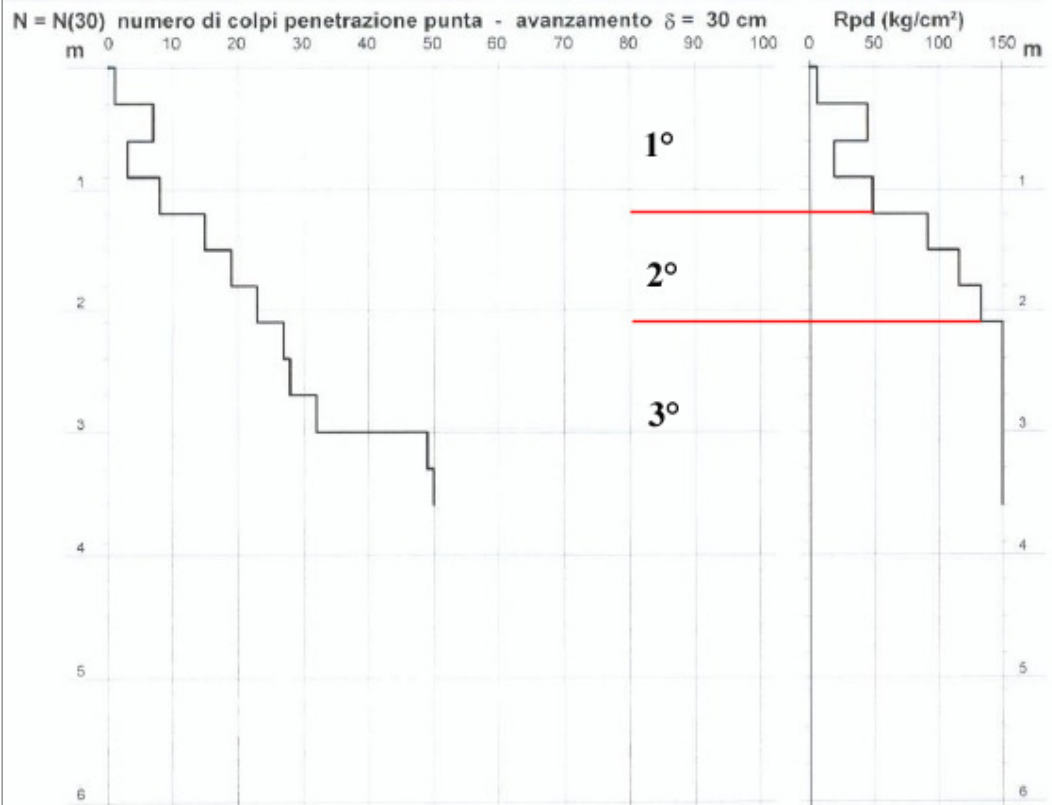
**DPSH16**



**DPSH17**



**DPSH18**





## Ringraziamenti

Ringrazio sentitamente il Prof. Mario Floris per avermi proposto questo interessante lavoro di tesi e per aver ascoltato le mie idee ed i miei ragionamenti, mettendomi nella condizione ideale per lo svolgimento di questo studio.

Ringrazio il Prof. Rinaldo Genevois per i consigli utilissimi sull'utilizzo del software FLAC ed anche per avermi fatto comprendere moltissimi concetti riguardo la Geologia Applicata. I suoi ragionamenti sono stati veramente esaustivi.

Ringrazio la Prof.ssa Claudia Meisina per le varie prove eseguite nel Dipartimento di Pavia e per essere sempre stata disponibile in caso di chiarimenti.

Ringrazio Michele Secco per avermi insegnato i vari procedimenti per lo svolgimento delle analisi mineralogiche eseguite e per avermi dedicato molto del suo tempo per le spiegazioni a riguardo.

Ringrazio tutti i miei amici e conoscenti che in questi anni mi hanno sostenuto psicologicamente in questo difficile percorso. Anche il più piccolo pensiero avuto nei miei confronti ha generato in me, di volta in volta, nuovi stimoli.

Un ringraziamento speciale va alla mia fidanzata, che mi ha sopportato in questo lunghissimo percorso universitario, assecondandomi in ogni modo e cercando sempre di mettermi nella giusta condizione di tranquillità. La sua presenza è risultata essere fondamentale per il raggiungimento di questo obiettivo.

Infine, un ringraziamento veramente sentito va alla mia famiglia, che mi ha appoggiato e sostenuto in questi anni di durissimo lavoro. Sono consapevole di aver fatto delle scelte abbastanza rischiose, ma nonostante questo mi avete ascoltato e, soprattutto, avete creduto in me. GRAZIE