



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze  
Direttore Prof. Cristina Stefani

TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
IN  
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E  
MINERALOGICA DI DEPOSITI VULCANICI  
ALTERATI SOGGETTI A FENOMENI DI  
SCIIVOLAMENTO NELL'AREA PEDEMONTANA  
DELLA PROVINCIA DI VICENZA**

*Relatore: Prof. Mario Floris*  
*Correlatore/i: Dott. Enrico Busnardo*  
*Correlatore/i: Dott. Michele Secco*

*Laureanda: Miriam Toaldo*

ANNO ACCADEMICO 2013 / 2014



# Indice

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUZIONE .....                                           | 5  |
| 1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....                             | 7  |
| 1.1. Movimenti di versante .....                             | 11 |
| 1.2. Inquadramento geologico di dettaglio .....              | 13 |
| 1.2.1. Monte di Malo .....                                   | 13 |
| 1.2.2. Carrè.....                                            | 17 |
| 2. PROVE DI LABORATORIO .....                                | 21 |
| 2.1. Prove geotecniche .....                                 | 21 |
| 2.1.1. Analisi granulometrica .....                          | 21 |
| 2.1.2. Analisi per sedimentazione .....                      | 23 |
| 2.1.3. Limiti di Atterberg .....                             | 26 |
| 3. ANALISI MINERALOGICHE .....                               | 29 |
| 3.1. Aspetti teorici.....                                    | 29 |
| 3.2. Preparazione del campione .....                         | 31 |
| 3.3. Analisi qualitativa .....                               | 33 |
| 3.4. Analisi quantitativa .....                              | 35 |
| 3.5. Trattamento con glicole etilenico .....                 | 38 |
| 3.5.1. Preparazione del campione .....                       | 38 |
| 4. RISULTATI .....                                           | 41 |
| 4.1. Risultati delle prove geotecniche di laboratorio.....   | 41 |
| 4.1.1. Analisi granulometrica .....                          | 41 |
| 4.1.2. Limiti di Atterberg .....                             | 49 |
| 4.2. Risultati delle analisi mineralogiche .....             | 53 |
| 4.2.1. Diffrazione a raggi X sulla frazione fine .....       | 56 |
| 4.3. Considerazioni riassuntive dei risultati ottenuti ..... | 61 |
| 5. MODELLAZIONE NUMERICA .....                               | 65 |
| 5.1. Modellazione con Flac 7 .....                           | 65 |
| 5.2. Modellazione della frana di Gamba.....                  | 70 |
| 5.2.1. Falda al piano campagna .....                         | 72 |
| 5.2.2. Falda a 0.5 metri dal piano campagna.....             | 74 |
| 5.2.3. Falda a 1 metro dal piano campagna.....               | 75 |

|        |                                          |    |
|--------|------------------------------------------|----|
| 5.2.4. | Falda a 2 metri dal piano campagna ..... | 75 |
| 5.2.5. | Assenza di falda .....                   | 76 |
| 5.3.   | Modellazione della frana di Carrè .....  | 77 |
| 5.3.1. | Falda al piano campagna .....            | 78 |
| 5.3.2. | Falda a 1 metro dal piano campagna ..... | 80 |
| 5.3.3. | Falda a 2 metri dal piano campagna ..... | 82 |
| 5.3.4. | Falda a 3 metri dal piano campagna ..... | 83 |
| 6.     | CONCLUSIONI .....                        | 85 |
|        | Allegati.....                            | 89 |

# INTRODUZIONE

La tesi consiste nella caratterizzazione dei depositi che costituiscono due frane che interessano la fascia pedemontana della provincia di Vicenza. I fenomeni hanno avuto luogo nel territorio comunale di Carrè e Monte di Malo ed entrambi i dissesti coinvolgono coltri argillose originatesi dall'alterazione di rocce vulcaniche.

La presente tesi si inserisce all'interno di un progetto di ricerca, il cui scopo consiste nella definizione di un modello geotecnico-mineralogico da utilizzare per riprodurre il cinematismo delle frane tramite modellazione numerica. Altri studi sono stati precedentemente condotti su movimenti franosi che interessano le litologie vulcaniche e le loro coperture nel territorio del Marosticano e dei Lessini (es: Fara Vicentino e Cornedo Vicentino). In particolare il presente studio si occupa di caratterizzare dal punto di vista sia geotecnico che mineralogico le frane di Monte di Malo e Carrè. Per entrambe le frane sopracitate sono state inizialmente effettuate delle prove geotecniche quali i limiti di Atterberg, grazie ai quali sono stati individuati i contenuti d'acqua critici ai quali avvengono le transizioni di comportamento del materiale, le analisi granulometriche e aerometriche utili al fine di elaborare una stima delle percentuali delle varie componenti (ghiaia, sabbia, limo e argilla) presenti. In un secondo tempo sono state effettuate le analisi mineralogiche mediante l'utilizzo del diffrattometro da polveri. La scelta è ricaduta su questa strumentazione perché molto efficace per lo studio di campioni multifase costituiti da particelle di dimensioni molto ridotte, non discriminabili al microscopio ottico. Per l'analisi qualitativa è stato utilizzato il software High Score Plus attraverso il quale è stato possibile individuare la tipologia di fasi contenute. L'analisi quantitativa effettuata con un altro software, CDiffrac Plus Topas, ha consentito invece la misurazione in termini numerici dell'abbondanza relativa delle differenti fasi mineralogiche e di una certa aliquota di amorfo ricorrente in ciascun campione. Dopo aver appurato dalle analisi quantitative la presenza di minerali delle argille, sono state predisposte ulteriori analisi diffrattometriche su campioni selezionati i quali sono stati sottoposti preventivamente a procedure di levigatura e di saturazione in atmosfera di glicole

etilenico, allo scopo di individuare le specie contenute. Al fine di capire quali siano le condizioni per cui si verifica il movimento franoso, sono state eseguite delle simulazioni lungo due sezioni rappresentative mediante l'utilizzo di modelli numerici con il software Flac 7 di Itasca. Prima di passare alla vera e propria modellazione è stato necessario definire un modello geotecnico, costruito a partire da dati ottenuti da prove in sito e tenendo conto delle variazioni dei profili mineralogici risultanti dalle analisi diffrattometriche. Conseguentemente all'inserimento dei parametri caratteristici del materiale come il modulo di elasticità e il rapporto di Poisson, il codice è in grado di calcolare le deformazioni dei vari materiali restituendo gli spostamenti associati e il fattore di sicurezza legato alla stabilità complessiva del versante. Essendo in possesso di dati piezometrici non affidabili e incompleti e in assenza di prove di permeabilità, è stata implementata un'analisi di tipo idrostatico, con una falda sub-parallela al piano campagna, collocata a diverse profondità. L'obiettivo finale consiste quindi nell'individuazione delle condizioni che generano maggiore instabilità nei due versanti. Si è scelto di simulare un'analisi con diverse profondità di falda poiché è noto come le coltri argillose di alterazione siano soggette a instabilità, quando, in occasione di eventi piovosi eccezionali, i vuoti naturali del terreno si saturano, consentendo una risalita della falda.

# 1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area di studio fa parte del Sudalpino, più precisamente della Piattaforma di Trento, regione a sedimentazione carbonatica di mare basso fino al periodo del Giurassico Inferiore in seguito al quale venne sommersa diventando un plateau di mare profondo.

Durante la fase orogenica alpina, la Piattaforma di Trento venne sbloccata a causa di movimenti tettonici, dando luogo ad alti e bassi strutturali. In questo modo le zone più rilevate costituirono il nucleo di formazione di piattaforme carbonatiche a bassa profondità che, progredendo verso sud, contribuirono alla realizzazione del Lessini Shelf (Bosellini, 2004) (Fig.1). Si tratta, quindi, di una regione a sedimentazione carbonatica di mare basso fino al Giurassico Inferiore, poiché in seguito venne sommersa diventando un plateau di mare profondo.

Durante l'era Cenozoica, in questa zona, si verificò una significativa attività vulcanica con effusione di magmi prevalentemente basici e ultrabasici, i quali costituiscono la Provincia Vulcanica Veneta (Bellieni, 2010).

I primi eventi si manifestarono a partire dal Paleocene superiore interessando un'area ristretta in corrispondenza dei Monti Lessini e solo successivamente il fenomeno ebbe una maggiore risonanza estendendosi verso ovest nel Veronese, poi più a nord nel Trentino Meridionale, infine a sud nei Colli Euganei e ad est nel dominio del Marosticano.

L'attività eruttiva si sviluppò in una dozzina di fasi relativamente brevi, distribuite tra il Paleocene e il Miocene, intervallate da periodi di stasi (Barbieri, 1982).

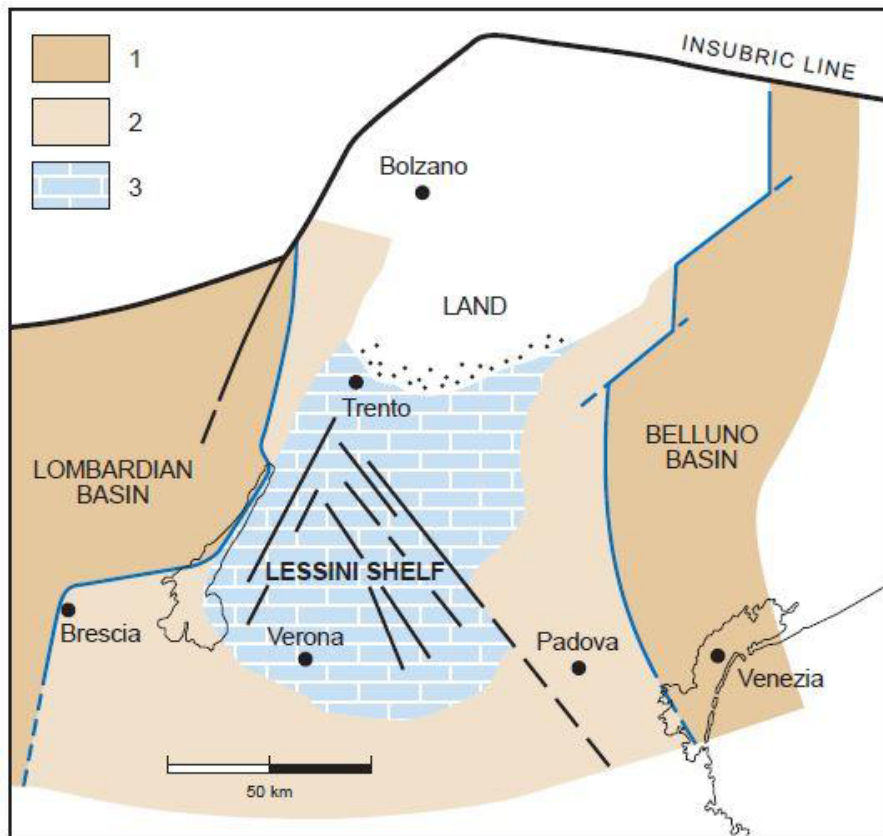


Fig.1- Lessini Shelf. 1) Sedimenti marini dei precedenti bacini giurassici (bacino Lombardo e bacino di Belluno); 2) Argilliti e marne pelagiche paleogeniche sovrastanti la piattaforma giurassica di Trento; 3) Calcarei di barriera paleogenici della Lessini Shelf. (tratto dal Bosellini, 2004)

La prima fase eruttiva è riconducibile a un'età paleocenica superiore, testimoniata nella Valle del Chiampo e nella media Valle dell'Agno.

La seconda fase eruttiva ebbe luogo tra il Paleocene superiore e la fine dell'Eocene e interessò in principio i Lessini orientali in modo costante per poi espandersi in aree diverse con periodi di stasi tra una fase eruttiva e l'altra. La maggior parte degli eventi ebbe luogo in ambiente marino, come testimonia l'abbondanza di ialoclastiti e fossili marini all'interno dei depositi vulcanici. Qualche eruzione è tuttavia riconducibile a un ambiente subaereo, attestato dalla presenza di resti di fauna e flora all'interno di tufi e dalla tessitura delle rocce (Piccoli, 1966).

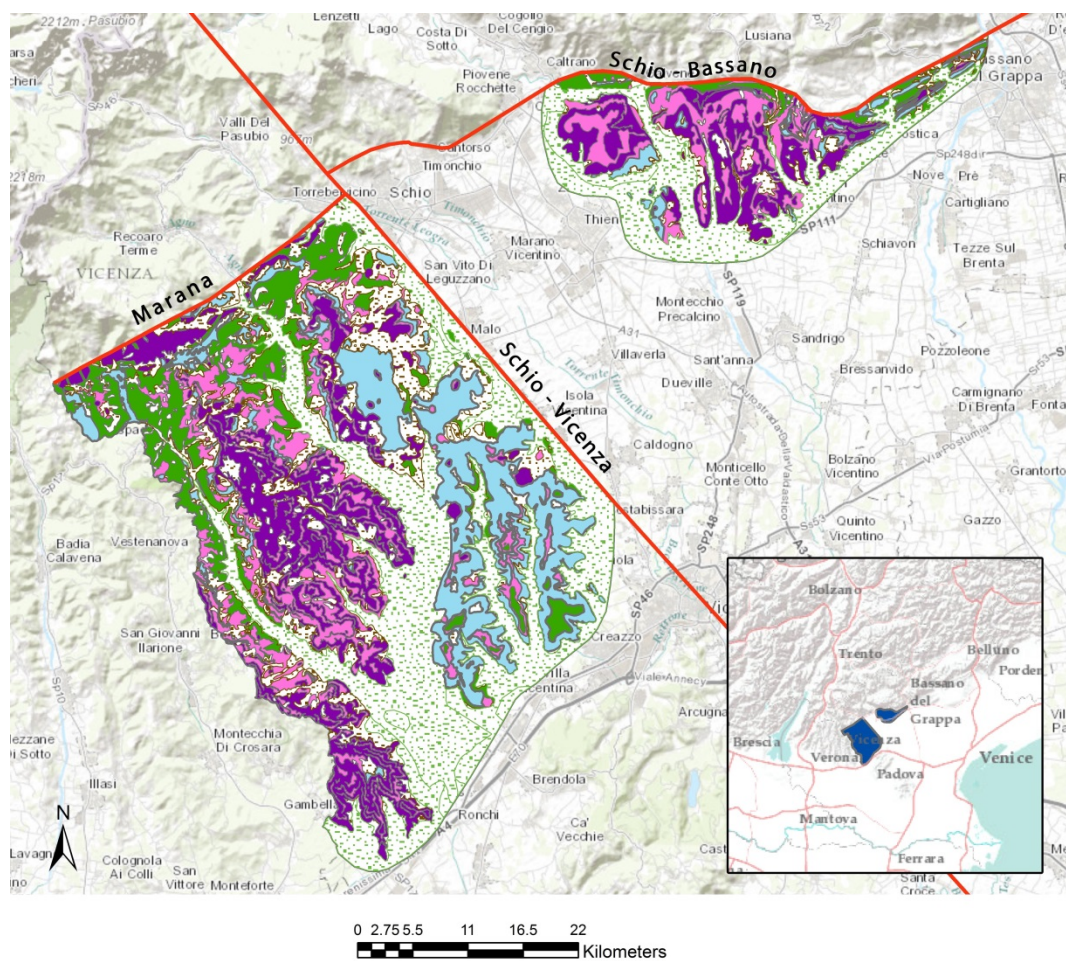
Durante l'Eocene inferiore, l'attività vulcanica si amplificò nei Monti Lessini con prodotti di natura alcalina e ultrabasica, estendendosi in seguito verso occidente

nel Veronese e verso NNW nel Roveretano. Solo nel corso dell'Eocene medio, il Trentino meridionale (in destra idrografica dell'Adige) venne interessato da attività vulcanica (Barbieri, 1982). L'Eocene superiore fu riconosciuto come un periodo vulcanico relativamente tranquillo ad eccezione dei Colli Euganei. Durante l'Oligocene, invece, le eruzioni furono ricorrenti in tutta l'area del Marosticano (De Vecchi, 1976).

In concomitanza all'attività vulcanica, l'attivazione di linee tettoniche a carattere distensivo risultano fondamentali al fine di comprendere pienamente la distribuzione degli eventi vulcanici. Innanzitutto i lineamenti tettonici che si vennero a creare durante l'era Terziaria hanno tipicamente una direzione NNW-SSE. Nonostante i centri eruttivi del Vicentino occidentale e del Veronese fossero in prossimità della Faglia di Castelvero, ad ovest di quest'ultima non è stata trovata traccia delle vulcaniti in questione. Il lineamento in questo caso costituì un ostacolo strutturale poiché permise l'abbassamento del settore orientale rispetto a quello occidentale. Verso oriente, invece, le vulcaniti paleocenico-eoceniche si estesero fino all'attuale comune di Schio, senza però raggiungere la zona del Marosticano. Infatti, secondo alcuni studiosi, durante l'Eocene inferiore e medio, il Marosticano occidentale subì un forte sollevamento fino all'emersione. Ne derivò quindi l'accumulo delle vulcaniti paleoceniche-eoceniche all'interno di un'area caratterizzata da una struttura tipo graben, confinata dalla Faglia di Castelvero a ovest e da una serie di faglie con medesima orientazione della faglia Schio-Vicenza ad est.

Nel corso dell'Oligocene invece, in corrispondenza del Marosticano, si accumularono le vulcaniti relative alla fase eruttiva successiva riconducibile ad un rigetto opposto rispetto alla faglia Schio-Vicenza con conseguente formazione di un graben delimitato a est da una faglia presumibilmente situata all'altezza di Bassano del Grappa (Barbieri, 1982).

La Fig.2 fornisce una collocazione spaziale dell'area studio dei Monti Lessini e del Marosticano con le rispettive litologie e lineamenti tettonici principali contrassegnati da campiture secondo quanto riportato dalla legenda nel settore inferiore dell'immagine.



## Legenda

— Tettonica principale

## Litologia

Depositi fluviali e fluvioglaciali (Quaternario)

Detrito (Quaternario)

Basalti di colata, filoni e camini di lava (Oligocene - Paleocene Sup.)

taloclastiti, tufi e breccie di esplosione (Oligocene - Paleocene Sup.)

Calcarei nummulitici, calcareniti, arenarie e marne (Oligocene Inf. - Eocene)

Calcarei, calcari argillosi selciferi e marne (Eocene Inf. - Cretaceo Sup.)

Fig.2: Inquadramento geo-litologico generale dell'area in studio (Monti Lessini a ovest e Marosticano a est del lineamento Schio – Vicenza)

## 1.1. Movimenti di versante

L'area in studio evidenziata in Fig.2 è interessata da un elevato numero di fenomeni franosi, dei quali i più frequenti risultano essere gli scivolamenti e le colate di terra, secondo la classificazione di Varnes (Varnes, 1978) (Fig.3). Gli orizzonti maggiormente coinvolti sono di natura eluvio-colluviale, originati dal processo di alterazione delle rocce vulcaniche, in particolare basalti e tufi.

| 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               |

Fig.3: Classificazione di Varnes (1978)

I casi di Carrè e Monte di Malo, che saranno presentati nel capitolo 1.2, sono due dissesti franosi caratterizzati da un cinematismo tipico di uno scivolamento rotazionale.

Per frana di scivolamento si intende un movimento di una massa di roccia, terra o detrito che, per azione della gravità, si sviluppa lungo una superficie di rottura (preesistente o di neoformazione) o in porzioni di versante in cui si concentra lo sforzo di taglio. Come tutti i fenomeni franosi, può essere inoltre influenzato da fattori geologici, condizioni climatiche-meteorologiche e agenti morfogenetici (es: antropici).

Nelle frane di scivolamento rotazionale, si ha una forma della superficie di rottura tendenzialmente curvilinea. La massa può subire anche poche deformazioni e la

forma della superficie di taglio dipende dall'omogeneità litologica o granulometrica.

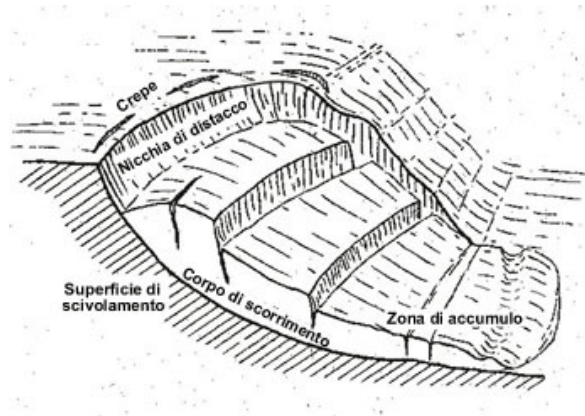


Fig.4: Riproduzione di una frana di scivolamento

In Fig.4 viene mostrato un esempio di frana di scivolamento.

Tendenzialmente la superficie topografica si presenta accidentata, presentando delle crepe radiali parallelamente alla nicchia di distacco. Il coronamento ha una superficie orizzontale o tiltata all'indietro e l'area al piede generalmente è caratterizzata dalla formazione di un lobo di accumulo. È un tipo di movimento franoso molto diffuso in versanti argillosi.

## 1.2. Inquadramento geologico di dettaglio

### 1.2.1. Monte di Malo

L'area in esame è situata nella zona centro-occidentale della provincia di Vicenza, nell'ambito del territorio comunale di Monte di Malo, più precisamente in località Gamba, nome col quale, nel seguito della tesi si riferirà al fenomeno franoso (Fig.5).

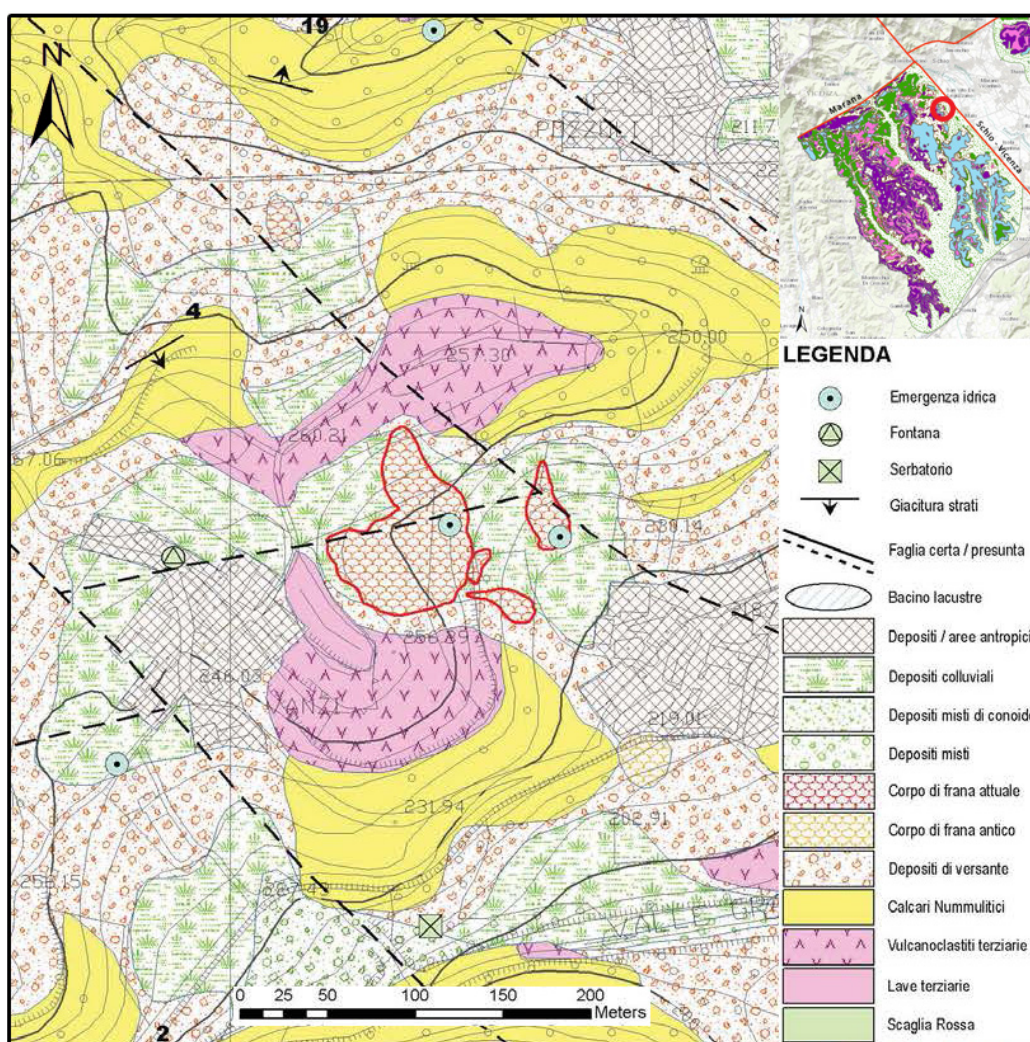


Fig.5: Carta geologica dell'area coinvolta dal dissesto

Il movimento franoso coinvolge un'area agricola destinata a vigneto, sviluppandosi in corrispondenza di un rilievo collinare, caratterizzato da pendii molto dolci e nei quali non vi sono evidenze significative di affioramenti (Fig.6). Il dissesto si è verificato nel novembre 2010 in seguito ad abbondanti precipitazioni che hanno interessato la provincia di Vicenza.



Fig.6: Immagine del vigneto coinvolto dal movimento franoso

Il territorio è caratterizzato da litologie vulcaniche risalenti all'era Terziaria, in particolare vulcanoclastiti e basalti di colata. Le vulcanoclastiti sono rocce facilmente alterabili legate alla formazione di spesse coltri argillose e la loro presenza è stata rilevata mediante un carotaggio continuo di 10 metri. A testimonianza dei depositi basaltici di colata vi è una cava dismessa di basalto ubicata a nord-est della contrada, presso la quale sono apprezzabili degli affioramenti come si può vedere in Fig.7.



Fig.7: Affioramento del basalto di colata nell'area di cava

#### DEPOSITI COLLUVIALI

Sono caratterizzati da materiale non eccessivamente classato, in cui prevale la matrice limoso-argillosa con rari clasti di natura vulcanica e in minor parte carbonatica. Tipicamente sono concentrati alla base del versante oppure in aree sub-pianeggianti e il loro accumulo è imputato all'attività antropica che coinvolge la movimentazione del terreno (dissodatura, spietramento) ad opera del settore agricolo.

#### DEPOSITI ELUVIALI

Alla base dei versanti in corrispondenza dei quali il substrato roccioso è costituito da rocce di natura ignea si rinviene un'abbondante matrice limoso-argillosa e i clasti eventualmente presenti sono principalmente costituiti da elementi basaltici di dimensioni da centimetriche a millimetriche. A causa del processo di argillificazione la roccia risulta molto alterata e presenta a tratti colori rossastri dovuti all'esposizione di agenti atmosferici e quindi alla conseguente ossidazione dei minerali ferrosi in essa contenuti.

Il valore di permeabilità di queste formazioni varia a seconda dell'entità della fratturazione e della degradazione della roccia, ma generalmente possono essere considerate pseudo-impermeabili con un coefficiente di conducibilità idraulica approssimativa di  $10^{-6}$  m/s.

Per l'esecuzione delle analisi mineralogiche e delle prove geotecniche sono stati utilizzati campioni prelevati da un sondaggio a carotaggio continuo effettuato nel 2011, conservati in due cassette catalogatrici. Il carotaggio copre un range di profondità da 0 a 10 metri. Il passo di campionamento è di 0.30 metri, da 0 a 1.5 metri dal piano campagna. Da 1.5 a 5.5 metri il passo è di 0.5 metri. Dalla profondità di 5.5 fino a 10 metri i campioni sono stati prelevati dalla cassetta con un passo di 1 metro.

In Fig.8 e Fig.9 sono state riportate le foto delle cassette catalogatrici, contenenti gli spezzoni di carota.



Fig.8: Carotaggio da 0 a 5 metri (dall'alto verso il basso). La mancanza di materiale nella prima cassetta catalogatrice è dovuto a prelievi da parte del geologo incaricato ai fini della redazione della relazione geologico-tecnica



Fig.9: Carotaggio da 5 a 10 metri (dall'alto verso il basso)

### 1.2.2. Carrè

L'area in esame è situata nella zona settentrionale della Provincia di Vicenza, nell'ambito del territorio prevalentemente collinare del Comune di Carrè (Fig.10).

Il movimento franoso interessa la pendice meridionale del Monte Grumo (Fig.11) e, in seguito a una riattivazione, ha coinvolto a Febbraio del 2014 la strada comunale (via Valdaro), collegamento tra i comuni di Carrè e Zugliano (Fig.12).

La presenza di rocce basaltiche e subordinatamente vulcanoclastiche nei rilievi collinari è testimonianza dell'intensa attività eruttiva che si è sviluppata durante l'Oligocene e in parte del Miocene. Nell'area del Marosticano le litologie vulcaniche sono di natura basica e le lave più caratteristiche sono quelle visibilmente ossidate, che presentano un colore rossastro o grigio-nerastro, talvolta vacuolari, facilmente interessate da fenomeni di alterazione.

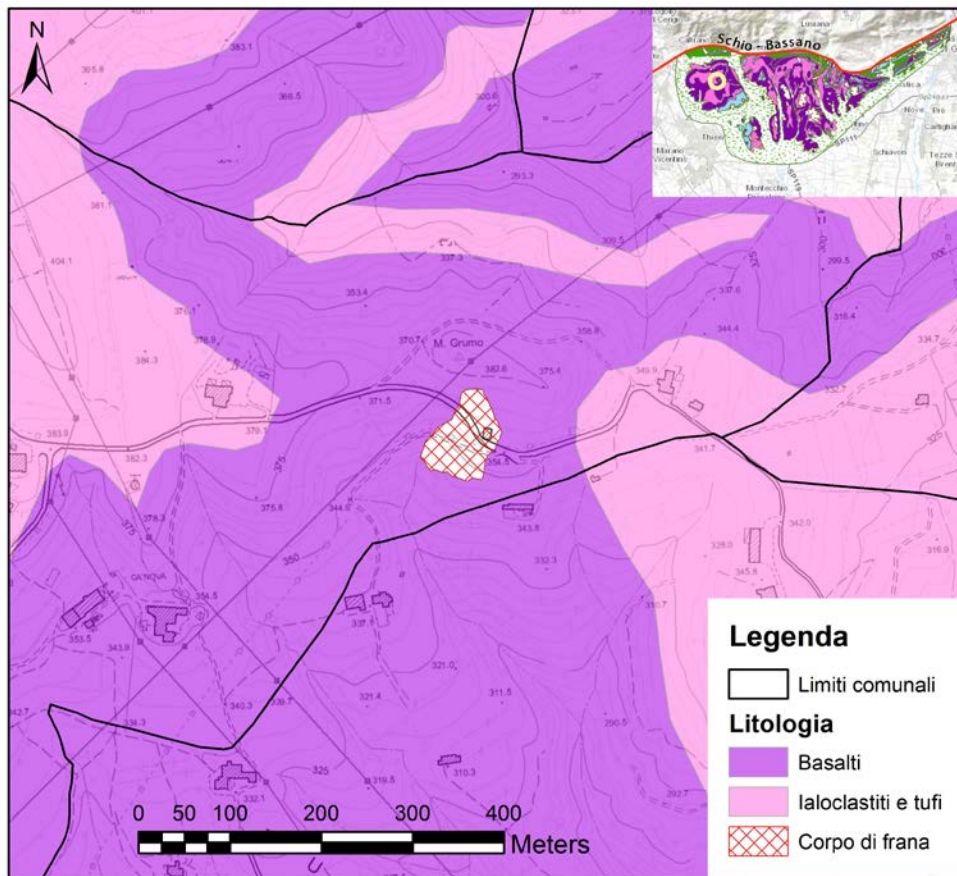


Fig.10: Carta geologica dell'area coinvolta dal dissesto



Fig.11: Pendice meridionale del Monte Grumo a monte della strada comunale

Dal punto di vista litologico-stratigrafico il sottosuolo dell'area indagata è caratterizzato dalla presenza di estese coperture detritiche con frazione limoso-argillosa dominante, con scadenti caratteristiche meccaniche, derivanti dalla degradazione ed alterazione delle formazioni vulcaniche di base. Da questo fattore predisponente ne deriva la difficoltà di drenaggio del terreno che, in corrispondenza di eventi meteorici molto intensi, è soggetto a forti incrementi delle pressioni interstiziali che presumibilmente provocano una diminuzione delle resistenze disponibili nella massa di terreno.

Tali coltri eluvio-colluviali, in condizioni di un elevato grado di saturazione per la presenza aggiuntiva di acque circolanti negli orizzonti più superficiali, possono dare luogo a fenomeni di instabilità anche su pendenze modeste. La zona dissestata presenta rigonfiamenti evidenti a valle della strada comunale e con almeno due nicchie di distacco a monte di quest'ultima. Il pendio meridionale del Monte Grumo presenta evidenti indizi di instabilità con dossi, depressioni e contropendenze.

Il substrato è caratterizzato da una porosità secondaria, mentre la coltre da una porosità di tipo primario. La coltre presenta una permeabilità comunque maggiore rispetto alla roccia, quindi tenderà a instaurarsi una circolazione idrica con falda presumibilmente parallela alla superficie del versante.

Sono stati riportati in relazioni geologiche inedite risultati di indagini sperimentali, le quali hanno evidenziato un'elevata saturazione dello spessore della copertura anche in periodi poco piovosi. Si considera quindi la possibilità che il battente idrico possa risalire quasi in corrispondenza della superficie topografica.

Poiché durante il campionamento erano in corso i lavori di sistemazione della frana, è stata fatta scavare una trincea di poco più di 4 metri di profondità e circa un metro di larghezza (Fig.13a). Con ausilio di una cordella metrica, è stato effettuato il campionamento a partire dal piano campagna fino a una profondità di 4.4 metri (Fig.13b). Il passo di campionamento è stato di 20 centimetri da 0 a 3.20 metri, mentre da 3.20 a 4.40 metri è stato di 40 centimetri. Ogni campione è stato prelevato con ausilio di martello e cazzuola da muratore, inserito e catalogato all'interno di sacchetti di nylon dotati di etichettatura.



Fig.12: Sede stradale dissestata (Foto: 5 marzo 2014)



Fig.13: a) Fase di rimozione del terreno con un ausilio di macchina escavatrice (a sinistra); b) Collocazione della cordella metrica lungo la parete della trincea (a destra)

## 2. PROVE DI LABORATORIO

### 2.1. Prove geotecniche

Presso il Dipartimento di Ingegneria in via Ognissanti a Padova sono state effettuate le prove geotecniche, più precisamente le analisi granulometriche e i limiti di Atterberg sulle frane di Monte di Malo e Carrè. Le analisi granulometriche e i limiti di Atterberg sono stati eseguiti sui 18 campioni di Monte di Malo da una profondità di 0.00 m a 10.00 m e sui 19 campioni di Carrè da una profondità di 0.00 m a 4.40 m.

#### 2.1.1. Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica è indispensabile per determinare le dimensioni delle particelle che compongono un terreno e per stabilire in che percentuali in peso sono presenti. Allo scopo di ottenere la curva di distribuzione granulometrica, si sfruttano due tecniche differenti. Si utilizza l'analisi per vagliatura per particelle con dimensioni superiori a 0.075 mm, mentre per dimensioni inferiori viene impiegata l'analisi per sedimentazione.



Fig.14: Macinazione con mortaio e pestello in ceramica

L'analisi per vagliatura consiste in un iniziale prelievo del terreno (circa 150 grammi) e successiva essiccazione in forno alla temperatura di 105° per 24 ore. Successivamente, come si può vedere nella pagina precedente in Fig.14, il terreno viene sottoposto a macinazione tramite mortaio e pestello in ceramica.

È importante in questa fase dell'analisi isolare circa 40 grammi di frazione fine che sarà necessaria all'analisi per sedimentazione. Come mostrato in Fig.14, per separare il materiale grossolano da quello fine si ricorre al vaglio 200 che, secondo lo standard ASTM, è caratterizzato da maglie di dimensione 0.075 mm. Dopo aver accumulato i 40 grammi di frazione fine passante, il materiale trattenuto dalle maglie viene pesato, sottoposto a lavaggio in modo da eliminare la frazione fine residua e posto in forno per altre 24 ore a 105°. Trascorso il periodo di essiccazione, il terreno è pronto per la vagliatura, che consiste nel passaggio del materiale attraverso una batteria di setacci, ossia di piatti impilati uno sull'altro il cui fondo è costituito da una rete metallica a maglie quadrate. Le dimensioni sono standardizzate secondo quanto dettato dalla normativa ASTM e all'interno della pila i piatti con dimensioni maggiori vengono disposti superiormente, progressivamente le dimensioni diminuiscono e inferiormente viene posto un fondello raccoglitore. Le maglie dei vagli superiori della batteria hanno lato 3" e le dimensioni diminuiscono progressivamente fino a 0.075 mm. Come mostrato in Fig.15, l'operazione avviene per scuotimento manuale e il trattenuto ad ogni setaccio viene quindi pesato e rapportato al peso iniziale del campione, ricavando così la percentuale in peso per ogni frazione. Ogni aliquota trattenuta al singolo setaccio è stata indicata con  $T_1, T_2, \dots, T_i$ , mentre il valore delle percentuali di trattenuto si ottengono dividendo  $T$  (con  $i=1, 2, \dots, n$ ) per il peso totale iniziale  $P_t$ . La percentuale di terreno passante, per il generico setaccio ( $P_i$ ), si ottiene dall'espressione:

$$P_i(\%) = \frac{P_t - (T_1 + T_2 + T_3 + \dots + T_i)}{P_t} * 100$$

In Fig.15 si può vedere il vaglio 200 con apertura 0.075 mm, munito di coperchio e fondello raccoglitore, mentre in Fig.16 si vede un passaggio del procedimento di analisi granulometrica per la frazione grossolana. Nel primo piano di questa foto si possono vedere 5 vagli capovolti, con i quali è già stato ricavato il passante in quel determinato step e nella zona retrostante l'operazione di scuotimento manuale effettuata.



Fig.15: Esempio di setacciatura con vaglio 200



Fig.16: Analisi granulometrica previa batteria di setacci ASTM

### 2.1.2. Analisi per sedimentazione

L'analisi per sedimentazione, come già accennato, viene impiegata per la frazione fine e attraverso la misura della variazione nel tempo della densità della soluzione terreno-fluido e l'impiego di formule empiriche si ottiene la percentuale in peso delle frazioni più fini.

I 40 grammi ottenuti tramite setacciatura al passante 200 vengono mescolati con circa 700 ml di acqua distillata tramite un miscelatore elettrico al fine di ottenere una soluzione omogenea. Il tutto viene versato all'interno di un cilindro graduato con 20 ml di antiflocculante e rabboccato con ulteriore acqua distillata fino al raggiungimento di 1 litro come mostrato in Fig.17. L'antiflocculante, a base di silicato di sodio liquido, viene utilizzato al fine di ridurre il più possibile la naturale tendenza delle particelle argillose ad aggregarsi elettrochimicamente. Dopo aver posizionato un tappo in corrispondenza dell'apertura del cilindro, si mescola manualmente finché il terreno non è visibilmente in sospensione. Quando

la soluzione si presenta omogenea, si pone il densimetro all'interno del liquido e si procede con le letture, che vengono effettuate a 10", 20", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1h, 2h, 4h, 8h, 24h e 48h dall'inizio della prova. È importante avere una misura della temperatura, possibilmente nei primi minuti della prova quando l'agitazione molecolare è massima, poiché è uno dei parametri della formula empirica che permette di ricavare la curva di distribuzione granulometrica.



Fig.17: Cilindri graduati contenenti terreno, acqua distillata e antiflocculante.  
Nel cilindro con acqua distillata è presente il densimetro o aerometro

In particolare la miscela acqua-terreno viene considerata omogenea nella fase iniziale della prova ed è caratterizzata da un peso di volume iniziale determinato attraverso la seguente espressione:

$$\gamma(0) = \gamma_a + \frac{G_s - 1}{G_s} * \frac{P_s}{V}$$

dove:

$\gamma(0)$  = peso di volume iniziale;

$\gamma_a$  = peso di volume dell'acqua;

$G_s$  = peso specifico dei granuli;

$P_s$  = peso secco del campione;

$V$  = volume.

Considerando la profondità relativa al centro del volume ( $C_{vol}$ ) del densimetro impiegato per la misura all'istante  $t$  dall'inizio del test, nel settore del cilindro graduato compreso tra il pelo libero della miscela e il piano orizzontale passante per  $C_{vol}$  non sono più presenti granuli in sospensione maggiori di un dato diametro  $d$  che è dato da:

$$d = \sqrt{\frac{H_R}{C_t}}$$

La velocità di sedimentazione è direttamente correlata alla dimensione della particella, infatti maggiore è la dimensione di quest'ultima, maggiore sarà la distanza percorsa per effetto della gravità.

La concentrazione percentuale di particelle aventi una dimensione inferiore a un diametro generico  $d$  è calcolabile mediante la seguente espressione:

$$P\% = \frac{100}{P_s} * \frac{G_s}{G_s - 1} (R + m)$$

con

$$R = V(r + c - \gamma_a)$$

dove

$r$  = misurazione effettuata con il densimetro;

$m$  = coefficiente di correzione per temperature di prova diverse dalla temperatura standard di 20°;

$c$  = coefficiente di correzione che tiene conto della lettura in corrispondenza del menisco rispetto al pelo libero della miscela acqua-terreno.

Per ricavare e rappresentare la curva di distribuzione granulometrica è stato utilizzato il software Grapher 8. La forma della curva è indicativa della distribuzione percentuale, così terre uniformi sono rappresentate da linee circa verticali, mentre terre con maggior grado di classazione occupano parecchi cicli della scala logaritmica.

### **2.1.3. Limiti di Atterberg**

I limiti indicano il valore critico del contenuto d'acqua per il quale si verifica una transizione dello stato fisico del terreno. In ordine crescente di contenuto d'acqua gli stati fisici del terreno sono solido, semisolido, plastico e liquido. La procedura consiste nella determinazione del limite liquido, ossia il contenuto d'acqua espresso in percentuale relativo al passaggio tra comportamento fluido e plastico. Il limite plastico è il contenuto d'acqua relativo alla transizione tra comportamento plastico e semisolido.

La determinazione dei limiti di Atterberg in laboratorio fornisce una stima preliminare della tipologia di terreno, infatti a partire dalla differenza tra il valore di limite liquido  $w_l$  e il valore di limite plastico  $w_p$  si ricava l'indice di plasticità  $I_p$ .

L'indice di plasticità definisce l'intervallo di variazione di contenuto d'acqua all'interno del quale il terreno mantiene un comportamento plastico (Lancellotta, 1987). Nel dettaglio questo parametro dipende generalmente dalla percentuale e dal tipo di argilla presente e dal tipo di cationi adsorbiti.

Il limite liquido si determina per mezzo della cucchiara di Casagrande ed è il contenuto d'acqua per il quale un solco alto un centimetro tracciato con apposita spatola sul terreno passante al vaglio 40 si richiude dopo 25 cadute.

Si preleva un certo quantitativo di terreno e si idrata con acqua fino ad ottenere una pasta omogenea. In seguito il campione viene passato al vaglio 40 (0.425 mm) e successivamente rinumidito e riomogeneizzato fino all'eliminazione di acqua libera. Con una spatolina a punta curva il materiale viene steso all'interno di una vaschetta in ottone, facendo attenzione alla presenza di eventuali bolle

d'aria che hanno la tendenza a formarsi ed evitando che il materiale non superi il centimetro di spessore. Successivamente viene tracciato un solco con l'impiego di un utensile metallico appuntito. La vaschetta è collegata a una manovella che viene fatta girare alla velocità di 2 giri al secondo e produce il movimento verticale della vaschetta stessa (Fig.18)



Fig.18: Cucchiaina di Casagrande utilizzata per il limite liquido

Mentre si aziona la manovella si tiene il conto del numero di colpi che sono necessari a chiudere il solco per la lunghezza di un centimetro. Infatti attraverso formule empiriche, è possibile determinare il contenuto d'acqua riferito al limite liquido anche se il numero di colpi non è pari a 25. Si è posto un range di tolleranza che va da un minimo di 15 a un massimo di 35 e al di fuori di questo intervallo la prova è stata ripetuta. Se i colpi necessari per chiudere di un centimetro il solco sono stati inferiori a 15, il campione era troppo umido e quindi occorre essiccare il materiale stendendolo sul piano di lavoro o, per una maggiore efficacia, al di sopra di una pietra porosa. Se i colpi sono superiori a 35, il

campione necessita invece di essere idratato. In corrispondenza del punto in cui il materiale si è chiuso, se ne preleva un piccolo quantitativo, che viene subito pesato e posto in forno per 24 ore a 105°. Il giorno successivo viene posto sulla bilancia e ripesato, il valore risultante è noto come peso secco. Calcolando la differenza tra il peso umido e peso secco si trova il contenuto d'acqua critico corrispondente al passaggio da comportamento fluido a plastico e viceversa.

Per ricavare il contenuto d'acqua relativo al limite plastico, è possibile utilizzare il materiale passante al vaglio 40 utilizzato per il limite liquido, dopo averlo steso sulla pietra porosa. È una prova più soggettiva, poiché dipende dalla sensibilità dell'operatore e per minimizzare l'errore si ripete la prova tre volte. Consiste nel formare per rotolamento dei piccoli cilindri allungati del diametro di circa 3,2 mm, spessore confrontato con un calibro. Il limite plastico è il contenuto d'acqua che corrisponde alla formazione delle prime screpolature (Fig.19).



Fig. 19: Piccoli cilindri di terreno sul vetrino dopo la stesura dello stesso sulla pietra porosa (a sinistra)

Come per il limite liquido, non appena si arriva a determinare il grado di umidità relativo al limite plastico, si pesa il campione, si mette in forno e si tiene per 24 ore a 105°. La differenza tra il peso iniziale e il peso secco permette di ricavare il contenuto d'acqua relativo alla transizione da comportamento plastico a semisolido e viceversa.

### 3. ANALISI MINERALOGICHE

Presso il Dipartimento di Geoscienze in Via Gradenigo 6 a Padova sono state eseguite le analisi mineralogiche mediante l'utilizzo di tecniche diffrattometriche. È stata utilizzata la diffrattometria per polveri, sia perché quando si tratta di campioni multifase costituisce la metodologia più efficace per quanto riguarda l'identificazione e l'analisi quantitativa, sia perché è lo strumento più potente per identificare minerali che hanno una granulometria troppo fine per essere individuati al microscopio ottico. Per ottenere un dato attendibile la polvere, o meglio il materiale policristallino, deve essere composto da un numero molto elevato di cristalliti distribuiti in modo totalmente casuale e la taglia cristallina ideale deve essere approssimativamente intorno ai 3-4  $\mu\text{m}$ . La varietà delle orientazioni dei cristalliti permette di misurare le diffrazioni di tutti i piani reticolari simultaneamente.

#### 3.1. *Aspetti teorici*

Quando un fascio di raggi X colpisce un cristallo, fa vibrare gli elettroni che incontra nel suo percorso con una frequenza uguale a quella della radiazione incidente. Gli elettroni assorbono quindi una parte dell'energia del fascio di raggi X e si comportano come una nuova sorgente puntiforme che emette a sua volta raggi X della stessa lunghezza d'onda. Solitamente le onde diffuse interferiscono distruttivamente, eccetto in alcune direzioni in cui interferiscono costruttivamente producendo un effetto cooperativo di diffusione chiamato diffrazione. Si ha però diffrazione da una famiglia di piani solo quando sussistono determinate condizioni. In particolare deve essere soddisfatta l'equazione di Bragg per cui:

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

con  $n$  numero intero,  $\lambda$  lunghezza d'onda utilizzata,  $d$  la distanza tra due piani successivi paralleli e  $\theta$  l'angolo di incidenza e “riflessione” del fascio di raggi X da un dato piano atomico. Ma per avere un effetto di diffrazione di intensità sufficiente da essere registrato, non si ha “riflessione” da un singolo piano, bensì

da un numero quasi infinito di piani, in cui ognuno contribuisce in piccola parte all'effetto complessivo (Klein, 2004).

Per generare la radiazione X viene impiegato un tubo a vuoto all'interno del quale un filamento di tungsteno, che costituisce il catodo, si surriscalda al passaggio di corrente elettrica e per effetto termoionico emette elettroni. L'elevata differenza di potenziale di circa 40kV applicata tra filamento ed anodo, costituito da un target metallico, fa collidere il fascio accelerato di elettroni su quest'ultimo producendo raggi X che fuoriescono da "finestre" di berillio. Ma la generazione vera e propria dei raggi X deriva dalla sostituzione di elettroni appartenenti ad orbitali interni degli atomi dell'elemento costituente l'anticatodo che, scalzati dal fascio elettronico prodotto dal tubo, permettono il salto elettronico di elettroni provenienti da orbitali più esterni. Questo fenomeno produce così energia sotto forma di raggi X, contestualmente a una reazione di tipo esotermico. La natura dei raggi X dipende dal voltaggio applicato e dal materiale utilizzato per l'anodo, ad esempio a parità di voltaggio, l'intensità relativa dipende dalla lunghezza d'onda emessa. In queste analisi è stato utilizzato un tubo con anodo di Cu, con lunghezza d'onda pari a 1.5418 Å. Per le analisi è stato utilizzato un diffrattometro a polveri con le specifiche tecniche riportate in Tab.1:

|                     |                                            |
|---------------------|--------------------------------------------|
| Diffrattometro      | 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°                                       |
| Slitte antiscatter  | 1/2°                                       |
| Slitte soller       | 0.04 radianti                              |
| Monocromatore       | Filtro al nickel                           |
| Rilevatore          | X' Celerator                               |
| Range angolare      | 3 - 80° 2 $\theta$                         |
| Step                | 0.017° 2 $\theta$                          |

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

### 3.2. Preparazione del campione

Per eseguire le analisi diffrattometriche è stato utilizzato il materiale derivato dai limiti di Atterberg, quindi passante al vaglio 40 (dimensione inferiore ai 0.425 mm). Poichè, come sopra detto, è importante che il materiale abbia una granulometria molto ridotta, è stato necessario micronizzare il materiale. Il processo di micronizzazione consiste in un'iniziale macinazione del campione di terreno (circa 2 grammi) con mortaio e pestello d'agata. Il campione viene successivamente versato con una paletta metallica all'interno di un cilindro di plastica, chiamato "giara", contenente dei cilindretti d'agata impilati verticalmente. Vengono poi aggiunti 20 ml di acqua distillata alla giara che a sua volta viene inserita all'interno di una macchina scuotitrice (McCrone Micronizing Mill) (Fig.20).

Per impedire eventuali contaminazioni tra i campioni prelevati a diverse profondità, si impiega la procedura di "avvinamento" per micronizzare. Tale procedura consiste nel versare inizialmente circa 20 ml di acqua distillata all'interno della giara che, dopo essere stata posizionata e fissata all'interno della macchina scuotitrice, viene azionata per 5 minuti. Si ripete la procedura in modo pressoché identico se non per l'aggiunta di un quantitativo di pochi decimi di grammo di terreno. Il terzo step, invece, costituisce la vera e propria micronizzazione, unendo circa 1 grammo di terreno ad ulteriori 20 ml di acqua distillata: la miscela viene trattata per 10 minuti, successivamente versata nell'apposito vetrino a orologio (Fig.21) e posta a essiccare in forno a 50° per 24h.



Fig.20: Macchina scuotitrice con giara inserita in funzione



Fig.21: Mortaio con pestello d'agata e vetrini orologio.

Non appena il campione viene estratto dal forno, con l'ausilio di una lametta si toglie il terreno dal vetrino a orologio. Per le misurazioni sono stati utilizzati dei portacampioni piatti con riduttore, all'interno dei quali è stata caricata un'aliquota di terreno essiccato di circa 600 milligrammi alla quale successivamente viene aggiunto un quantitativo di zincite (ossido di zinco), pari al 20% in peso del terreno. Le misure sono state effettuate con la massima accuratezza grazie all'utilizzo di una bilancia con una sensibilità di un decimillesimo di grammo. Dopo aver omogeneizzato il terreno con l'ossido di zinco all'interno di un mortaio d'agata, il materiale viene adagiato e pressato sul portacampione (Fig.22). Nonostante la migliore statistica di conteggio, il portacampione piatto è affetto da orientazione preferenziale, è stata quindi utilizzata la tecnica del retrocaricamento al fine di diminuire la tendenza dei cristalliti a disporsi secondo determinati piani.

È stato necessario l'utilizzo della zincite, fase standard ad alta cristallinità, poiché dalle prove geotecniche è emersa la presenza di una componente argillosa. Si usa uno standard a causa di contributi "invisibili" alla diffrazione, dovuto a fasi paracristalline come ad esempio i minerali delle argille del gruppo delle smectiti. Quando si esegue l'analisi quantitativa, infatti, l'intensità dei picchi di queste fasi pseudo-amorfe non è proporzionale alle percentuali contenute nel campione che va in diffrazione e questo è dovuto principalmente all'ordine cristallino dell'argilla. Essendo noto il corrispettivo in peso di zincite, sarà possibile quantificare il contenuto in fasi amorfe considerando la percentuale in peso che verrà restituita successivamente dalle analisi quantitative.



Fig.22: Portacampione piatto utilizzato per le analisi

### **3.3. Analisi qualitativa**

I grafici acquisiti dall'analisi con il diffrattometro a polveri sono detti diffrattogrammi, dove sono riportati in ascissa gli angoli di diffrazione di Bragg e in ordinata le intensità dei picchi di diffrazione. L'analisi qualitativa delle fasi è stata ottenuta con High Score Plus, software della Panalytical. Un esempio di diffrattogramma e pattern è presentato in Fig.23.

La prima fase dell'elaborazione consiste nell'ottimizzazione del pattern attraverso la correzione dello shift impiegando i picchi della zincite, la determinazione del background o fondo e l'identificazione dei picchi. Poiché talvolta il software non è accurato nel riconoscimento dei picchi, si analizza l'intero diffrattogramma per aggiungere o eliminare picchi in eccesso. Il comando "Search & Match" permette così di individuare le fasi cristalline presenti nel composto sfruttando database contenenti i pattern sperimentali di polveri. Tale database è l'Inorganic Crystal Structure Database (ICSD) e i file relativi ad ogni fase sono conosciuti con il nome di Powder Diffraction Files (PDF), costantemente aggiornati dall'International Centre of Diffraction Data (ICDD).

Successivamente, se sono noti gli elementi chimici all'interno delle fasi, si può optare una ricerca tramite l'inserimento di constraint chimici con l'opzione "edit restriction set". Con il comando Search, si avvia il primo ciclo di ricerca e al termine di questo sarà visualizzabile un elenco di PDF, la probabilità associata ("score") e il nome del minerale. Generalmente il PDF con maggiore probabilità è lo standard utilizzato ossia la zincite e facendo un "drag and drop" col mouse è possibile inserire le varie fasi all'interno della "pattern list". Bisogna inoltre prestare attenzione a possibili effetti di sdoppiamento del picco ad alti valori di angolo  $2\theta$ , legato ai contributi diffrattometrici prodotti dalla  $\lambda_{\alpha 2}$  del rame: tale fenomeno è legato al fatto che il fascio incidente, in origine policromatico in quanto prodotto per effetto termoionico, non viene perfettamente monocromatizzato nella strumentazione convenzionale da laboratorio.

È molto importante ragionare sulla composizione attesa. Tenendo conto che il terreno analizzato è il prodotto di alterazione di rocce ignee, si possono avere o minerali di alterazione o comunque residui della roccia madre. Per quanto

riguarda la roccia madre è possibile trovare pirosseni, feldspati (sia plagioclasti che feldspati potassici), mentre per quanto riguarda il materiale colluviale si possono trovare quarzo e miche, ad esempio biotite e muscovite. Possono esserci anche ossidi di ferro e/o di titanio come ematite e titanite/anatasio, ma anche idrossidi di ferro come goethite.

Per trovare i K-feldspati sono stati imposti dei constraint chimici: utilizzando la tavola periodica si esegue una ricerca mirata sulla base degli elementi chimici che generalmente sono contenuti in questo gruppo di tectosilicati, quindi potassio, silicio, ossigeno ed alluminio. I minerali delle argille, come ad esempio clorite, smectite e caolinite, generalmente presentano i picchi principali a basso angolo a causa della loro bassa simmetria.

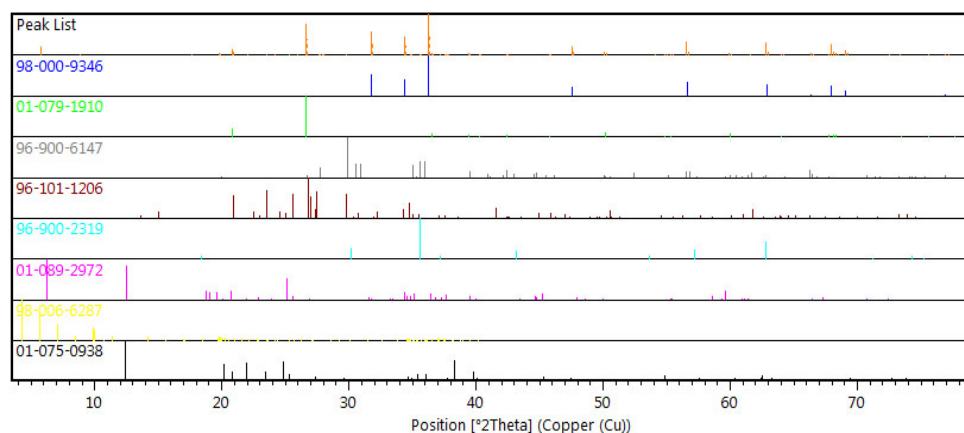


Fig.23: Diffrattogramma e pattern di Carrè12

I PDF utilizzati per l'analisi qualitativa sono riportati in Tabella 1.

| Fase cristallina | Sistema cristallino | PDF         | ICSD/COD | Anno | Riferimento        |
|------------------|---------------------|-------------|----------|------|--------------------|
| Albite           | Triclino            | 98-000-6226 | 9832     | 1976 | Papike et al.      |
| Anatasio         | Tetragonale         | 98-009-4633 | 154602   | 2006 | Tonejc et al.      |
| Augite           | Monoclino           | 96-900-9665 | 9009664  | 2000 | Gualtieri          |
| Caolinite        | Monoclino           | 01-075-0938 | 30285    | 1932 | Gruner et al.      |
| Clinocloro       | Monoclino           | 01-089-2972 | 43627    | 1961 | Steinfink          |
| Ematite          | Esagonale           | 98-001-7991 | 33643    | 2002 | Zachariasen et al. |
| Goethite         | Ortorombico         | 96-900-2160 | 9002159  | 1999 | Gualtieri          |
| Magnetite        | Cubico              | 96-900-2319 | 9002318  | 2000 | Haavik et al.      |
| Montmorillonite  | Triclino            | 98-000-6287 | 51636    | 2001 | Artioli            |
| Muscovite        | Monoclino           | 98-001-7244 | 34406    | 1998 | Rothbauer          |
| Ortoclasio       | Monoclino           | 96-101-1206 | 1011205  | 1940 | Chao et al.        |
| Quarzo           | Esagonale           | 01-079-1910 | 67121    | 1989 | Hazen et al.       |
| Zincite          | Esagonale           | 98-000-9346 | 26170    | 1969 | Bernstein et al.   |

Tab.2: Elenco delle fasi utilizzate per l'analisi qualitativa

### 3.4. *Analisi quantitativa*

La determinazione della percentuale in massa di una fase in un campione solido è possibile attraverso l'analisi del pattern di diffrazione da polveri del composto secondo il metodo Rietveld (Rietveld, 1969), eseguita nello specifico caso studio con il software commerciale Topas versione 4.1, prodotto da Bruker AXS.

Il metodo Rietveld consiste nell'elaborazione di un modello fisico matematico dell'intero pattern di diffrazione delle polveri, da confrontare con il dato sperimentale, al fine di operare un affinamento delle strutture cristalline e, in una miscela polifasica, una stima quantitativa delle percentuali in peso dei costituenti.

La bontà dei risultati ottenibili con il metodo Rietveld è direttamente collegata con la qualità dei dati di diffrazione da polveri (campione policristallino ben preparato, elevata statistica di conteggio, ridotte aberrazioni strumentali).

Con il metodo Rietveld, ciascun punto del profilo di diffrazione viene calcolato con il modello proposto e confrontato con l'osservazione sperimentale. Usando minimizzazioni ai minimi quadrati, i parametri del modello vengono affinati fino a convergenza alle minime differenze:

$$Y_{ic} = Y_{ib} + \sum_{J=1}^n \sum_{k=k_1}^{k_2} G_{jk} I_{jk}$$

$Y_{ic}$  è l'intensità totale calcolata nel punto  $i$  del profilo,  $Y_{ib}$  è l'intensità dovuta al fondo (background),  $n$  è il numero di fasi,  $I_{jk}$  è l'intensità del picco  $k$  della fase  $J$ ,  $k_1$  e  $k_2$  sono i riflessi che contribuiscono a tale picco,  $G_{jk}$  è la funzione di profilo del picco.

Ciascuna fase è inoltre caratterizzata da un fattore di scala, che dipende, tra l'altro, dalla sua quantità. Attraverso un'analisi dei fattori di scala di tutte le fasi, si può determinare la presenza percentuale di ciascuna di esse.

Utilizzando il metodo della riduzione ai minimi quadrati, il raffinamento richiede parametri strumentali e strutturali di partenza che ragionevolmente approssimino il dato reale, da raffinarsi progressivamente durante il processo di fitting. Questi parametri comprendono:

- funzione analitica per la descrizione del fondo (nello specifico, funzione polinomiale di Chebychev di ordine 10);
- funzione che descrive la forma dei picchi;
- funzione che descrive gli effetti strumentali (effetti su forma, posizione e intensità dei picchi);
- parametri strutturali delle singole fasi quali dimensioni di cella, gruppo spaziale e coordinate atomiche in cella unitaria (nello specifico, le strutture cristallografiche sono state inserite all'interno del software di raffinamento a partire dai corrispondenti file .CIF convertiti dal programma High Score Plus dell'analisi qualitativa).

Requisito fondamentale per l'applicazione dell'analisi quantitativa con il metodo Rietveld è avere a disposizione dei modelli strutturali affidabili per tutte le fasi da quantificare, così che la sommatoria delle frazioni in massa delle varie fasi sia sempre uguale a 1. Tale assunzione non risulta corretta qualora sia presente all'interno della miscela analizzata un composto invisibile a tecniche diffrattometriche, ad esempio una fase amorfa o a basso ordine cristallino: in tal caso la percentuale delle fasi cristalline risulterebbe sovrastimata. Il problema è ovviabile con il metodo dello standard interno, il quale consiste nell'inserire

all'interno della miscela da analizzare una fase cristallina in quantità nota. Essendo il rapporto tra la frazione in peso reale dello standard e quella determinata tramite raffinamento Rietveld sempre minore di 1, risulta possibile rinormalizzare di conseguenza la frazione in peso delle fasi, e successivamente calcolare la frazione in massa dell'amorfo per differenza a 1 rispetto alla somma delle frazioni in massa corrette delle fasi cristalline.

Durante l'analisi, si sono sempre tenuti in modalità di raffinamento i parametri per la descrizione del “crystal size”, che regola la larghezza dei picchi per ogni singola fase, e il fattore di scala che regola l'area integrata dei picchi. Vengono inoltre sottoposti a raffinamento un numero variabile di parametri di cella, dipendenti dal sistema cristallino a cui ogni fase appartiene.

In alcune zone del diffrattogramma si può notare come il pattern calcolato (rosso) sia più basso del pattern sperimentale (blu). Questa incongruenza è dovuta alla tendenza di alcune fasi ad assumere un'orientazione preferenziale, per cui si opera un raffinamento “mirato” per correggere tale tendenza sul minerale interessato e la relativa hkl con algoritmo March-Dollase. Le fasi che principalmente danno orientazione preferenziale all'interno del diffrattogramma sono l'albite, il clinocloro e la muscovite.

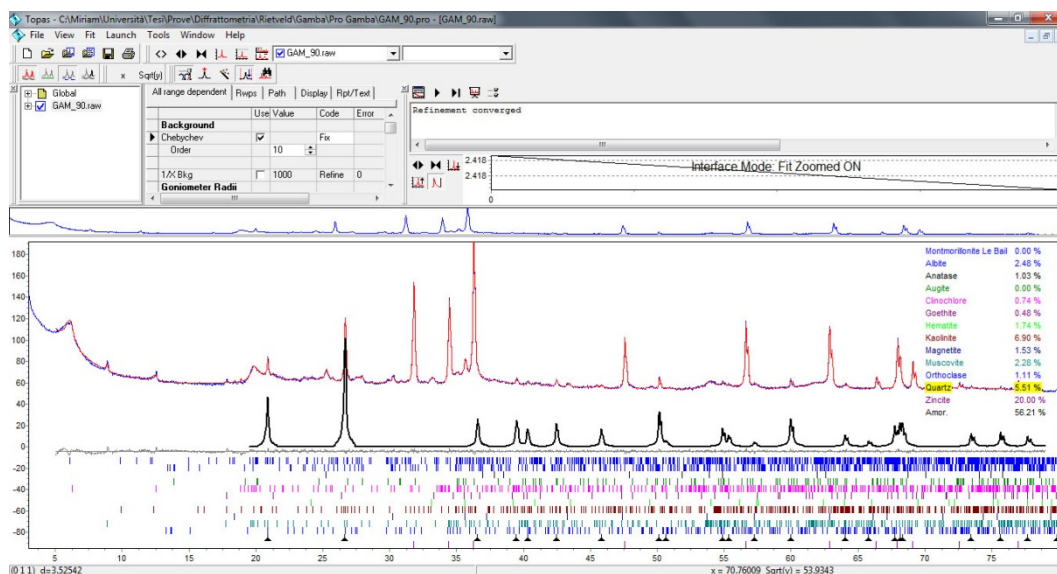


Fig.24: Diffrattogramma di Gam\_90 con Topas

Per la montmorillonite abbondantemente presente nei campioni si opera il raffinamento Le Bail inserendo solamente i parametri di cella senza l'informazione riguardante la posizione degli atomi, poiché non esiste in letteratura una valida struttura cristallina per questa fase.

Al termine del processo di analisi, ogni pattern raffinato è dotato di un indice relativo al profilo calcolato denominato Rwp. È necessario che questo valore sia il più simile possibile al R-value atteso in accordo con la qualità del pattern (=Rexp). Il pattern infatti è tanto accurato quanto più il GoF (Goodness of Fit) tende a 1. GoF non è altro che il rapporto tra Rwp e Rexp.

### **3.5. *Trattamento con glicole etilenico***

Il trattamento con glicole etilenico è necessario al fine del riconoscimento della tipologia di argilla presente nel terreno in esame. I campioni selezionati per questo tipo di trattamento sono Carrè10, Carrè13 e Carrè20.

#### **3.5.1. Preparazione del campione**

A partire dal materiale utilizzato per la determinazione dei limiti di Atterberg (passante al vaglio 40, quindi 0.425 mm) si disaggrega il campione e si pone all'interno di una provetta tipo "Falcon" di forma cilindrica con base conica. Si riempie la provetta di materiale fino alla base cilindrica, dove la tacchetta segna 7.5 ml. Si aggiunge acqua fino alla tacca di 50 ml e si agita in modo energico in modo da ottenere che tutto il materiale vada in sospensione. Successivamente i tre campioni vengono posti in una centrifuga per un periodo di 25 minuti alla velocità di 6000 rpm. Quando i campioni vengono prelevati dalle apposite postazioni del macchinario, si può notare che la parte solida si è depositata alla base della provetta e quindi è possibile separarla dall'acqua al fine di rimuovere gli ioni in soluzione derivanti dal terreno. Per una maggiore efficacia si ripete il procedimento di centrifugazione. Ad ogni passaggio, l'acqua contenente le particelle ioniche è meno torbida rispetto a quello precedente, e dopo essere stata svuotata dalla provetta quest'ultima viene rabboccata nuovamente con acqua deionizzata fino alla tacca di 50 ml e agitata con energia per un paio di minuti fino

a che tutto il materiale va in sospensione. Dopo l'omogeneizzazione, il terreno viene fatto decantare per 20 ore e, al termine di questo intervallo di tempo, viene prelevata l'acqua contenente la frazione fine del terreno al pelo della superficie con l'ausilio di una pipetta da laboratorio. Contemporaneamente al prelievo, l'acqua viene stillata su un dischetto circolare di alluminio e si attende che il campione essicchi naturalmente. L'evaporazione permette ai minerali delle argille di assumere delle orientazioni preferenziali in modo da aumentare al momento dell'analisi diffrattometrica l'intensità relativa ai picchi basali associati alle eventuali fasi presenti. Per questa analisi è stata ridotta la divergenza del fascio mediante lo spostamento delle slitte (da  $\frac{1}{2}$  a  $\frac{1}{4}$ ) e si è fatto ruotare lo strumento in modo da acquisire un diffrattogramma con range di  $2\theta$  che va da 0 a  $32^\circ$ , poiché picchi a maggiori angoli non sono diagnostici del tipo di argilla contenuta. Il dischetto di alluminio utilizzato per le analisi è a tutti gli effetti uno zero-background poiché i picchi caratteristici ricadono al di sopra del valore di  $2\theta$  di  $33^\circ$ . In seguito, gli stessi campioni sono stati posti in atmosfera satura di glicole etilenico per ventiquattro ore ed analizzati in diffrazione al fine di caratterizzare la componente espansiva delle argille; tale trattamento provoca un aumento della distanza interplanare (d-spacing) delle sezioni basali dei minerali argillosi con caratteristiche espansive, per incorporamento della molecola organica nell'interstrato delle fasi (Moore & Reynolds, 1997). Essendo tale variazione strettamente correlata alla tipologia di minerale, tale tecnica analitica permette una caratterizzazione più precisa del tipo di minerale argilloso presente nella miscela rispetto a tecniche diffrattometriche standard.



## 4. RISULTATI

### 4.1. Risultati delle prove geotecniche di laboratorio

#### 4.1.1. Analisi granulometrica

I risultati delle analisi granulometriche sono stati plottati in grafici semi-logaritmici, con la percentuale in peso di passante in ordinata e il diametro dei granuli in ascissa con scala logaritmica. I valori derivati dall'analisi per setacciatura e dalle misure aerometriche sono stati uniti con un'unica linea che andrà a costituire la curva granulometrica. In Fig.25 è stato riportato il campione Carrè13 a puro titolo di esempio.

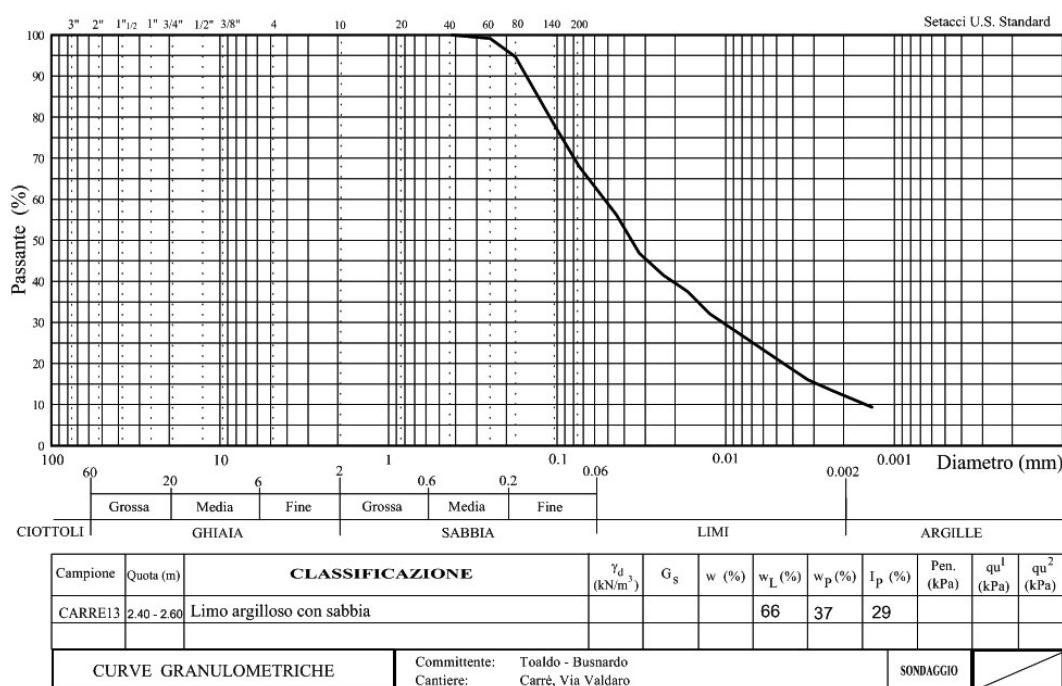


Fig.252: Curva granulometrica del campione Carrè13 prelevato a una profondità di 2.40 - 2.60 metri

L'analisi è stata condotta sia sui 18 campioni di Gamba che sui 19 di Carrè e al fine di semplificare la rappresentazione del dato, sono stati utilizzati dei diagrammi triangolari. Questi consentono la contemporanea visualizzazione delle componenti granulometriche di tutti i campioni esaminati, infatti ogni punto è associato ad un campione, le cui proiezioni sugli assi corrispondono alle percentuali delle frazioni (Fig.26-27).

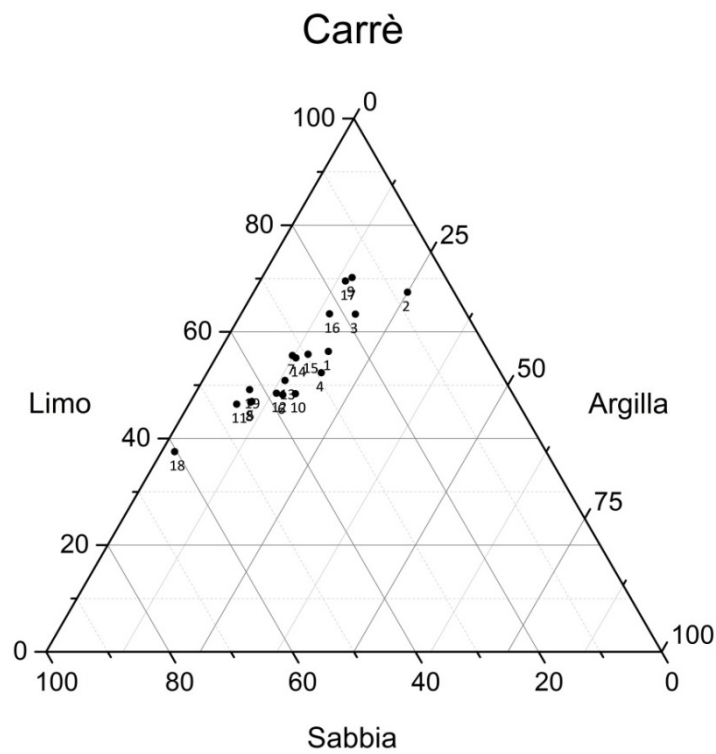


Fig.26: Diagramma triangolare rappresentante le componenti granulometriche per ogni campione di Carrè

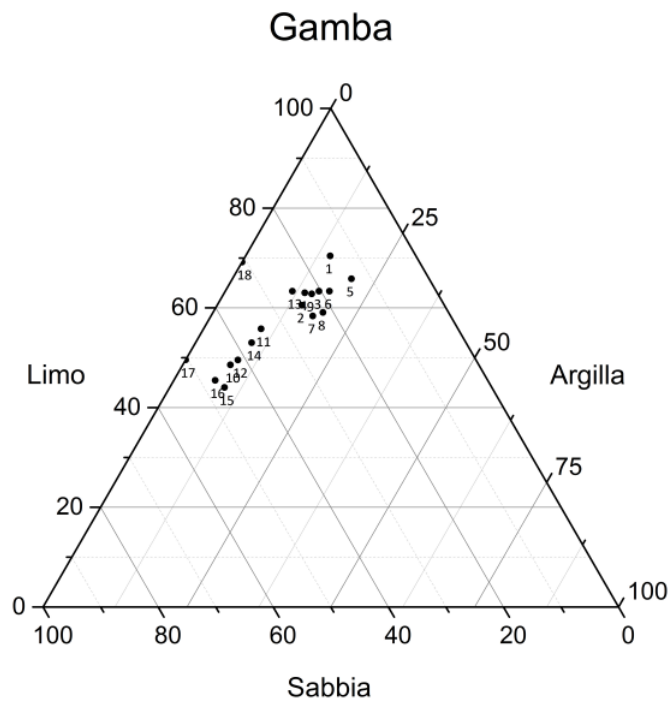


Fig. 273: Diagramma triangolare rappresentante le componenti granulometriche per ogni campione di Gamba

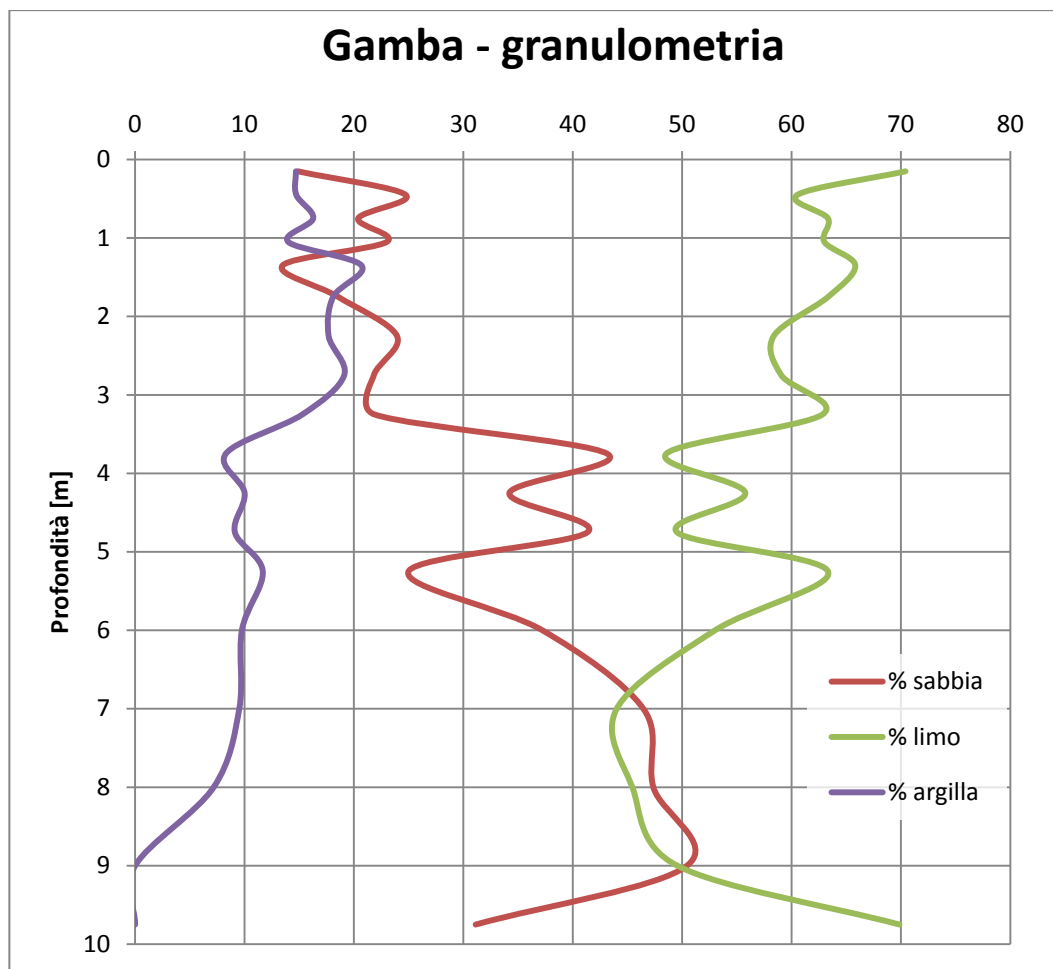


Fig.28: Grafico rappresentante il trend delle variazioni delle componenti granulometriche di Gamba

Si può vedere come l'andamento delle frazioni granulometriche sia molto oscillante, in particolare c'è una preponderanza di componente limosa, seguita da una componente sabbiosa nei campioni superficiali. La frazione argillosa si aggira intorno al 15-20% fino a una profondità di circa 3 metri.

A profondità maggiori si ha un aumento della componente sabbiosa da circa 20% a 40%, mentre il limo presenta una diminuzione "speculare" dal 65% al 45% come si può vedere in Fig. 28.

A circa 5.5 metri dal piano campagna si ha invece un nuovo incremento della frazione più grossolana e una simultanea riduzione del limo, accompagnati da un progressivo decremento dell'argilla fino alla totale scomparsa di quest'ultima.

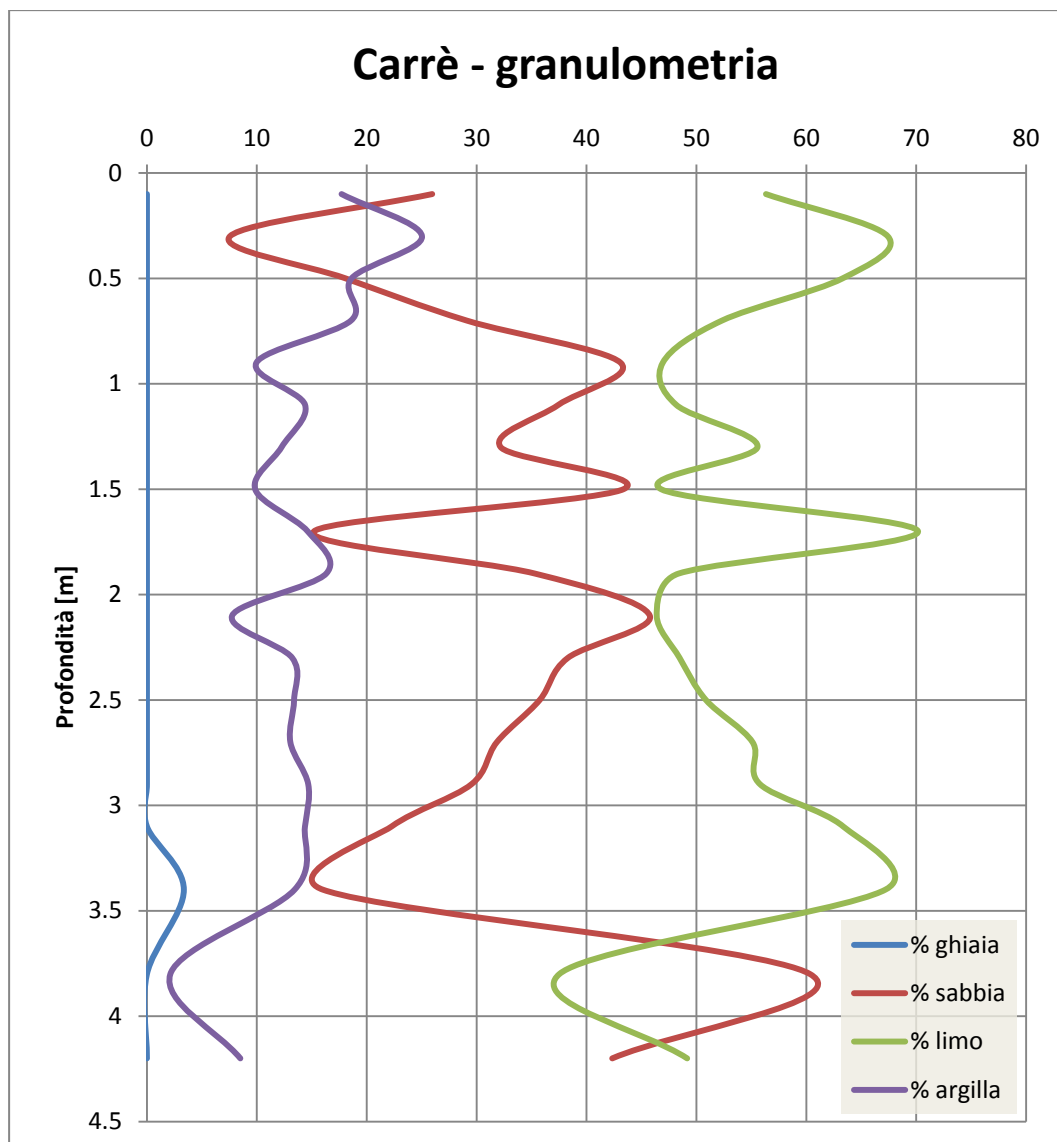


Fig.29: Grafico rappresentante il trend delle variazioni delle componenti granulometriche di Carrè

I campioni di Carrè, come mostrato in Fig.29, sono generalmente caratterizzati da una prevalenza di limo che è la frazione predominante fino a 3.7 m di profondità dal piano campagna. L'andamento è oscillatorio e, in particolare, nel primo metro assume valori che variano tra il 67% e il 46%. Dopo un brusco aumento a 1.70 m in cui tocca il 70% i valori continuano ad oscillare tra 37% e 67%. Anche in questo caso la componente sabbiosa presenta un trend speculare a quello del limo, quindi all'aumentare della sabbia, si ha una contemporanea diminuzione del limo e viceversa. L'argilla presenta un trend molto variabile come le altre due componenti, ma mostra una tendenza al decremento via via che la profondità

aumenta. Il valore massimo raggiunto è pari a 25% a una profondità di 0.3 metri, mentre il valore minimo corrisponde 2.13 a 3.8 metri dal piano campagna. La ghiaia è presente in un solo campione all'interno della colonna stratigrafica, più precisamente a 3.60 metri con un valore di circa 3%. I valori numerici riferiti alle analisi granulometriche sono riportati nell'Allegato 1-2.

A partire dalle curve granulometriche è stato poi desunto il d50 (Fig. 30). Il d50 corrisponde al valore di diametro dei grani che caratterizza il 50% del materiale passante.

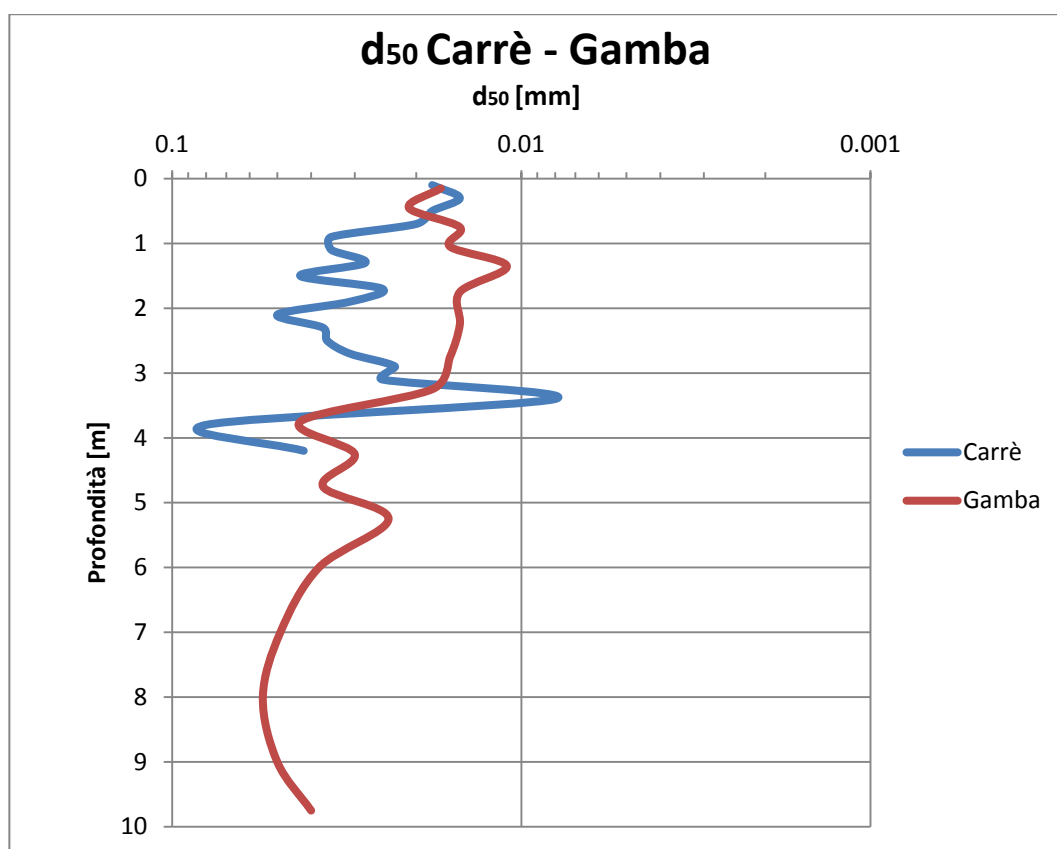


Fig.30: Grafico rappresentante il d50 di Carrè e Gamba

Il d50 presenta maggiori oscillazioni nei campioni di Carrè rispetto a quelli di Gamba. Infatti, in corrispondenza del campione più superficiale, assume un valore di 0.02, presenta un minimo di 0.008 mm a 3.20 metri e un massimo di 0.08 mm a 3.8 metri. Per quanto riguarda Gamba, si ha un trend più "lineare", si ha, infatti, una certa costanza del valore di d50 nell'intervallo di profondità che va da 0 a 3 metri e un rapido incremento a 0.04 mm a 3.75 m e su tale valore si stabilizza.

Un dato importante che si può ricavare dalla curva granulometrica è il coefficiente di uniformità  $C_u$ , i cui valori sono mostrati in Fig. 31-32.  $C_u$  è espresso dal rapporto tra il  $d_{60}$  e il  $d_{10}$ :

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

dove:

$d_{60}$  = è il diametro per cui si ha il 60% in peso di materiale passante;

$d_{10}$  = è il diametro per cui si ha il 10% in peso di materiale passante.

Il coefficiente di uniformità esprime il grado di classazione del terreno, tanto maggiore è il valore quanto più il campione presenta una granulometria eterogenea.

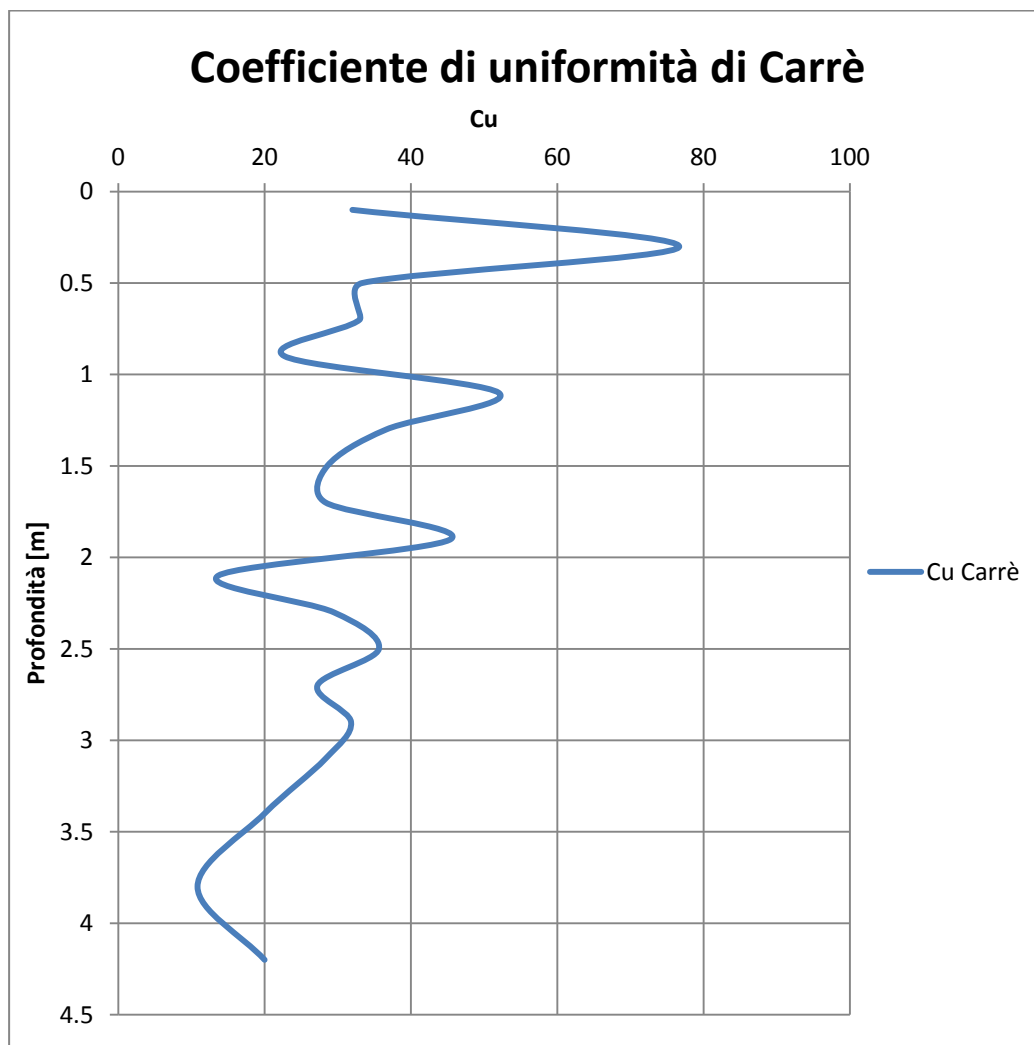


Fig.31: Grafico relativo alla variazione del  $C_u$  con la profondità

Il coefficiente di uniformità di Carrè presenta una grande variabilità con un intervallo di valori che va da 13.7 a 76 (Fig.31). In particolare il materiale presenta un'eterogeneità mediamente maggiore in superficie che in profondità.

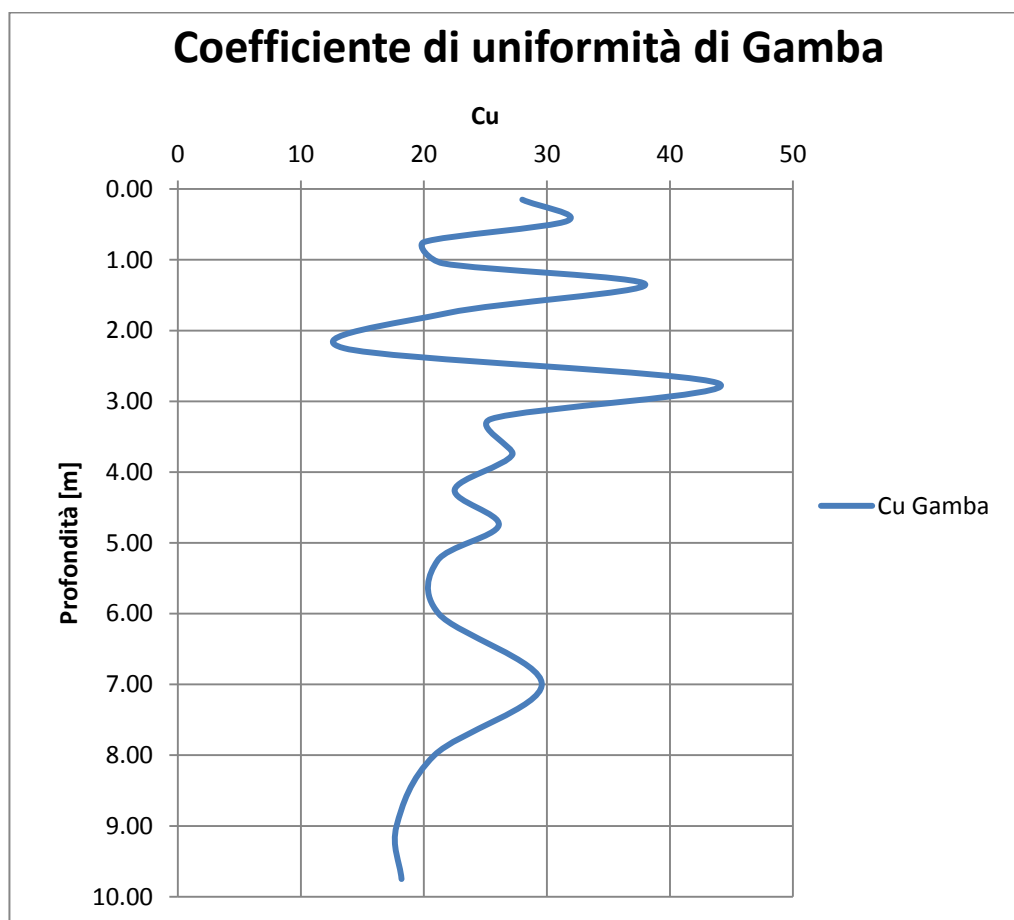


Fig.32: Grafico relativo alla variazione del Cu con la profondità

Il grafico in Fig. 32 mostra una minore variazione del Cu riferito ai campioni di Gamba rispetto ai campioni di Carrè, infatti i diversi coefficienti assumono un range di valori che va da un minimo di 13 a un massimo di 44. I campioni più superficiali, come del resto anche in Carrè, presentano una maggiore eterogeneità dal punto di vista granulometrico (Cu compreso tra 14 e 44) rispetto ai campioni più profondi (Cu tra 18 e 30). Cu e  $d_{50}$  sono tabellati nell'Allegato 5.

A seconda dell'abbondanza delle diverse componenti costituenti ciascun campione, è stato possibile individuare distinti orizzonti, come mostrato in Tab.3. Secondo la normativa AGI, in base alla percentuale approssimativa di ogni

frazione, a ciascun orizzonte viene associata 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*.

| <b>GAMBA</b>   |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| Profondità [m] | Orizzonte                            |
| 0.00 - 3.50    | Limo sabbioso argilloso              |
| 3.50 - 6.50    | Limo con sabbia debolmente argilloso |
| 6.50 - 8.50    | Sabbia con limo debolmente argillosa |
| 8.50 - 10.00   | Sabbia con limo                      |

| <b>CARRE</b>   |                           |
|----------------|---------------------------|
| Profondità [m] | Orizzonte                 |
| 0.00 - 1.60    | Limo argilloso con sabbia |
| 1.60 - 2.20    | Limo sabbioso argilloso   |
| 2.20 - 3.60    | Limo argilloso con sabbia |
| 3.60 - 4.40    | Sabbia limosa             |

Tab.2: Stratigrafia di Gamba e Carrè desunte dalle prove granulometriche

#### 4.1.2. Limiti di Atterberg

Come precedentemente spiegato nelle prove di laboratorio, l'indice di plasticità è ottenuto dalla differenza tra il contenuto d'acqua corrispondente al limite liquido e il contenuto d'acqua riferito al limite plastico:

$$I_p = w_l - w_p$$

Sono stati plottati in due differenti grafici i risultati delle prove di Carrè e di Gamba con il valore dei limiti di Atterberg in ascissa e i valori di profondità in ordinata (Fig.33).

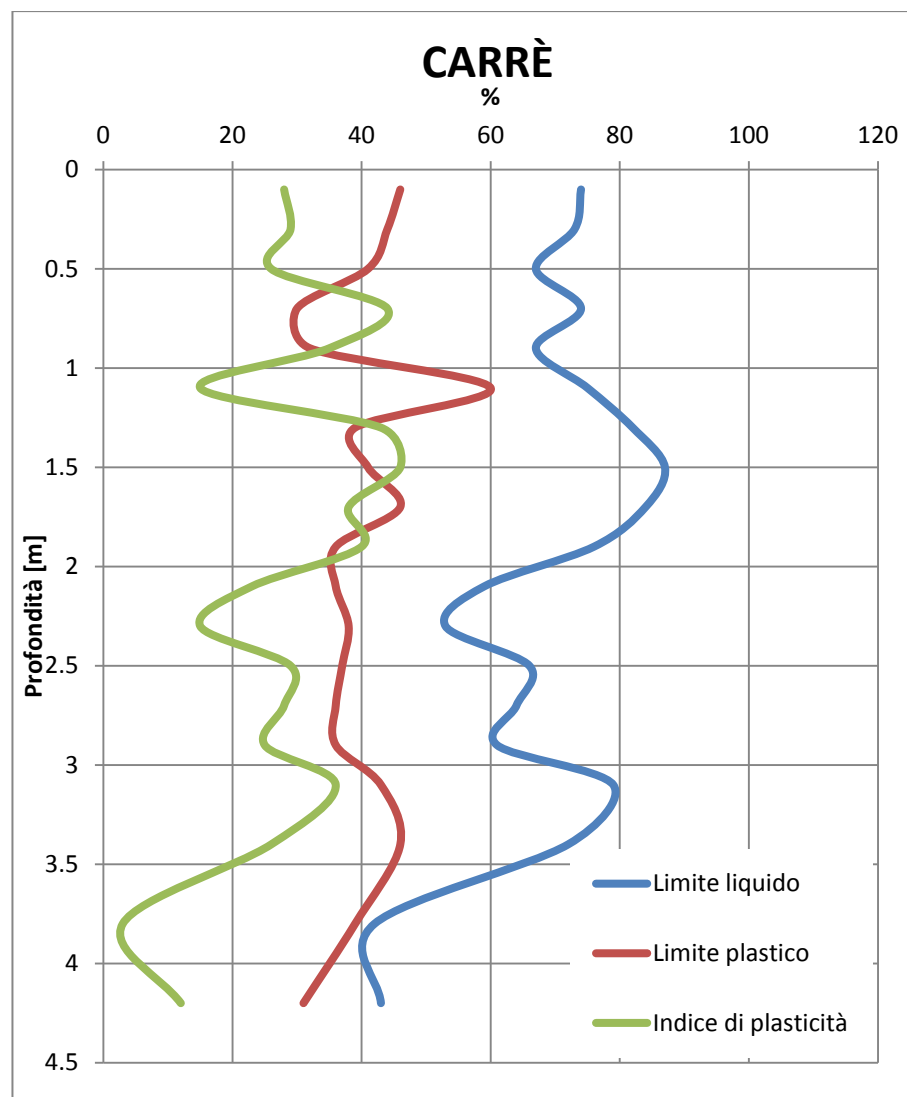


Fig.334: Variazione dei valori di limiti di Atterberg di Carrè all'aumentare della profondità

Si può vedere come nel dissesto di Carrè il limite liquido assuma un valore mediamente costante intorno al 70% nel primo metro. Tra 1 e 2 metri si ha un aumento del limite liquido fino a massimi che sfiorano il 90%. Tra 2 e 3 metri si ha un crollo dei valori del limite di liquidità che mediamente si attesta al 60%.

Il limite plastico si mantiene mediamente costante intorno a valori di 40% con massimi del 60% e minimi di 30%.

I massimi di indice di plasticità raggiungono la soglia del 45% a bassa profondità e si ha una brusca diminuzione a una profondità di poco più di tre metri, dovuta principalmente al decremento del limite liquido, visto il trend approssimativamente costante del limite plastico.

A pagina seguente, in Fig.34 sono stati plottati i valori dei limiti di Atterberg di Gamba. Il limite liquido presenta un'elevata variabilità per tutta la lunghezza del carotaggio, in particolare il valore minimo di circa 53% si ha intorno ai 5 metri, mentre il valore massimo di 92% si ha appena al di sopra della profondità di 2 metri. Il limite plastico assume valori pressoché simili fino a 4.5 metri, mediamente compresi tra 40 e 50%, mentre a profondità maggiore mostra un trend analogo a quello del limite liquido. L'andamento dell'indice di plasticità presenta anch'esso un trend del tutto equiparabile a quello del limite liquido se non per i valori inferiori di circa 40 unità percentuali.

I valori numerici su cui sono stati costruiti i grafici dei limiti di Atterberg sono tabellati negli Allegati 3-4.

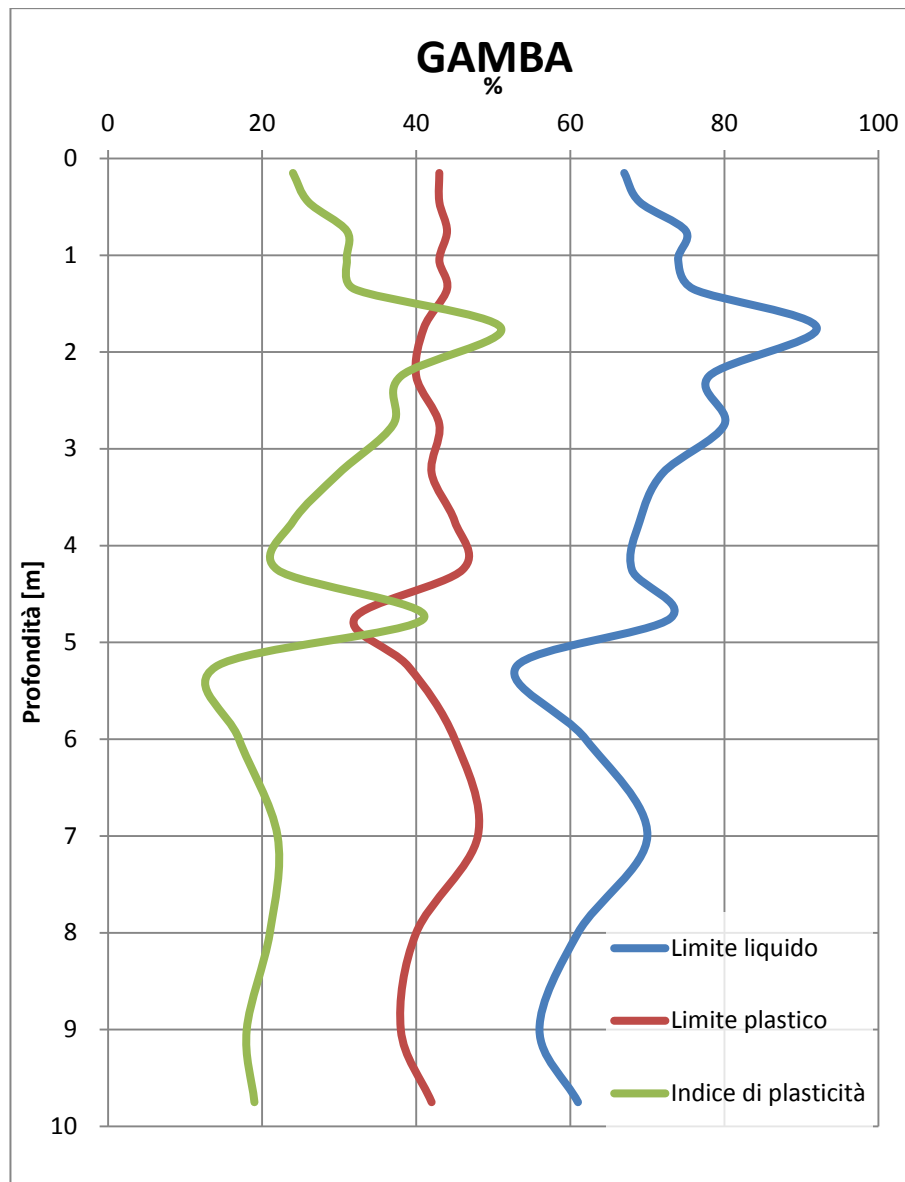


Fig.34: Variazione del valore dei limiti di Atterberg di Gamba all'aumentare della profondità

L'indice di plasticità ha un range complessivo che va da 15 a 50, eccetto per due campioni di Carrè caratterizzati da abbondante frazione sabbiosa. Generalmente quando l'indice di plasticità è superiore a 40, il terreno viene definito *molto plastico*, mentre quando è compreso tra 15 e 40 il terreno è *plastico*. Vista la preponderanza di campioni aventi indice di plasticità inferiore a 40, i terreni delle due frane sono considerati *plastici*.

Per classificare il tipo di terreno coinvolto dalle due frane, è stato utilizzato il sistema USCS (Unified Soil Classification System), elaborato da Casagrande nel

1948. Per classificare i terreni a grana fine (limi ed argille) generalmente si impiega la carta di plasticità nella quale viene collocato il terreno in una precisa zona determinata dai valori di indice di plasticità e di limite liquido. Sono stati quindi plottati i campioni sia di Carrè che di Gamba all'interno della Carta rappresentata in Fig.35. I terreni ricadono all'interno del campo MH e OH, ossia quello che comprende i limi inorganici di elevata compressibilità e argille organiche con plasticità da media ad alta.

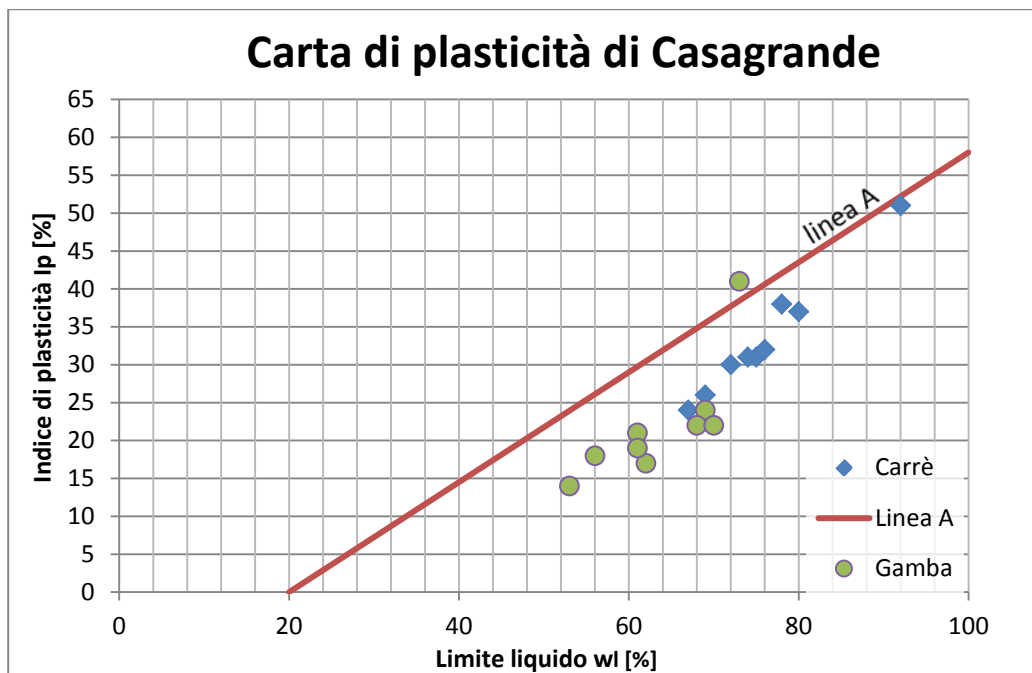


Fig.35: Campioni di terreno di Carrè e Gamba plottati all'interno della Carta di plasticità

## **4.2. Risultati delle analisi mineralogiche**

Dalle analisi diffrattometriche è emerso che i depositi costituenti la frana di Gamba e Carrè presentano una composizione mineralogica simile. Ciò deriva dal fatto che entrambi i terreni sono il prodotto dell'alterazione spinta di rocce vulcaniche come si evince considerando la presenza di una massiccia quantità di argilla smectitica in entrambe le località. I due dissesti franosi si distinguono invece dal punto di vista mineralogico per la presenza di clinocloro, albite e sanidino ritrovati all'interno dei soli campioni di Gamba e da andesina e ilmenite contenute solamente nei campioni di Carrè.

I minerali costituenti i campioni, ad eccezione della montmorillonite, sono stati suddivisi in 3 diversi raggruppamenti a seconda dell'ambiente di formazione (Fig.36-37).

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), sanidino (K-feldspato di alta temperatura), albite (plagioclasio sodico) e andesina (plagioclasio con componente anortitica compresa tra 30 e 50%). Per quanto riguarda Carrè, la componente residuale della roccia madre è costituita da una percentuale di quarzo, che oltre i due metri sfiora il 20%.

La smectite è il risultato dell'alterazione chimica di bassa temperatura di rocce vulcaniche, in particolare della componente vetrosa e degli alluminio-silicati a Na, K, Ca e Mg (feldspati, pirosseni e olivine) (Meunier, 2005).

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. Il clima eccezionalmente caldo dell'era Terziaria permise la formazione di profili di alterazione lateritica profonda fino a 50° di latitudine (Lombardi & Mattias, 1987). Dal punto di vista chimico, 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. Nello specifico nei terreni in esame sono stati

individuati ossidi di ferro (magnetite ed ematite), di titanio (anatasio), idrossido di ferro (goethite) e ossido di ferro e titanio (ilmenite). Anche la caolinite viene inserita all'interno di questo raggruppamento, poiché tende anch'essa a formarsi tipicamente per lisciviazione di minerali feldspatici ad opera di acque meteoriche contenenti anidride carbonica.

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. Si ritrovano muscovite (fillosilicato) e un'aliquota di quarzo a Carrè, mentre a Gamba sono presenti quarzo, muscovite e clinocloro (clorite).

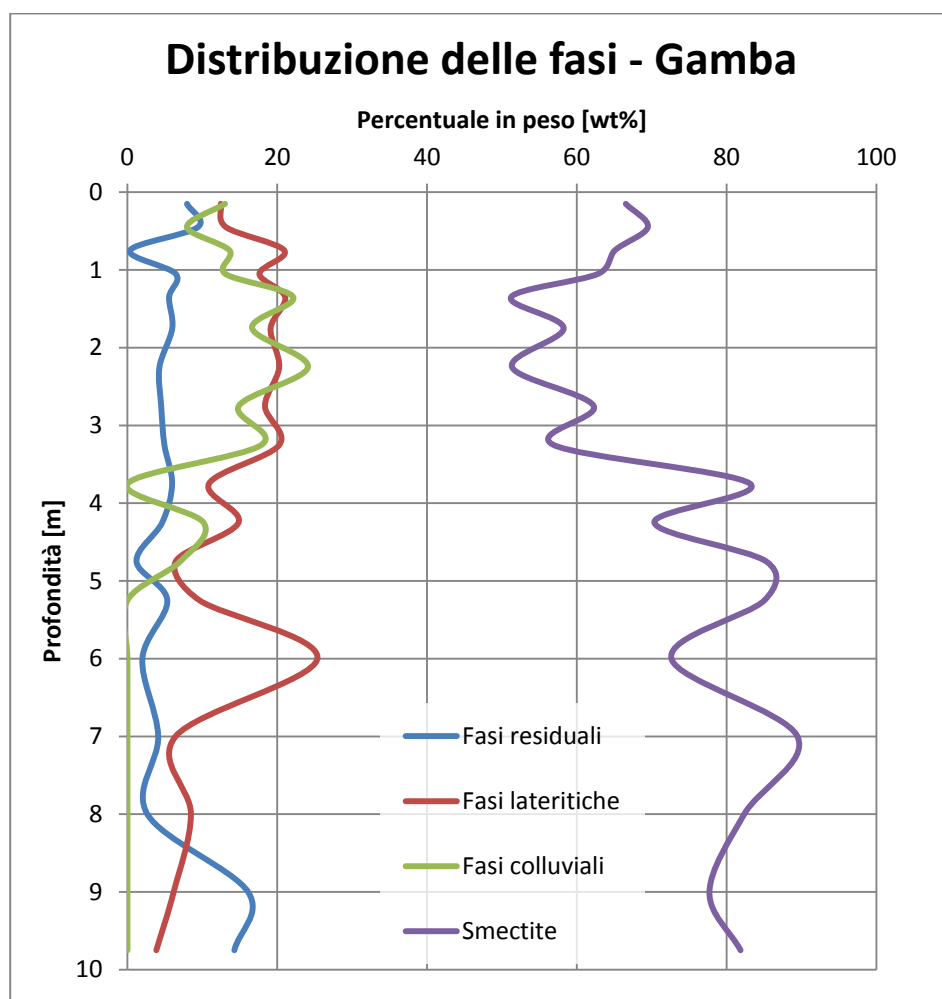


Fig.36: Distribuzione delle fasi di Gamba al variare della profondità

A Gamba si possono distinguere tre diversi orizzonti in base all'abbondanza delle fasi (Fig.36). L'unico raggruppamento che si mantiene costante per quasi tutto il profilo mineralogico è costituito dalle fasi residuali, di concentrazione inferiore al

10% fino a 8 metri di profondità. Nel primo metro si ha una discreta concentrazione di smectite, mediamente pari al 65%, le fasi lateritiche sono comprese tra il 15 e il 20%, mentre quelle colluviali sono circa il 10%. Da 1 a 3.5 metri si ha un aumento sia delle fasi lateritiche che delle fasi colluviali (entrambe del 20%) a scapito della smectite che diminuisce assumendo valori medi del 50%. A partire da circa 4 metri la smectite via via aumenta assumendo valori che sfiorano il 90% (a 7 metri), mentre le fasi lateritiche progressivamente presentano una diminuzione se non per un massimo a 6 metri di profondità con concentrazioni del 25%. Le fasi residuali, invece, aumentano con un picco massimo del 16% a 9 metri. Si può notare come a una profondità maggiore di 5 metri non vi sia più traccia delle fasi colluviali.

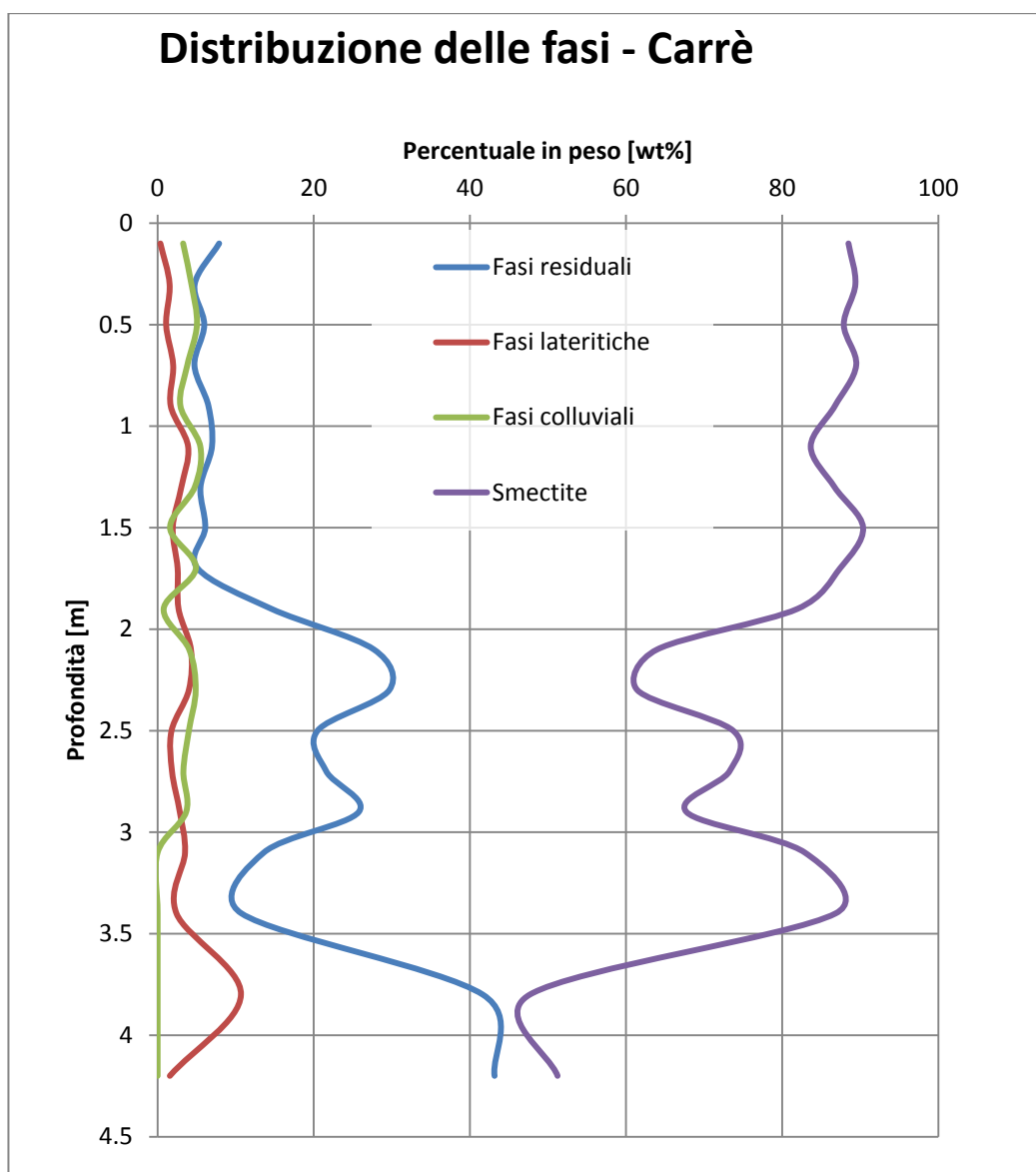


Fig.37: Distribuzione delle fasi di Carrè al variare della profondità

Il profilo mineralogico a Carrè, come a Gamba, è sempre suddivisibile in tre orizzonti (Fig.37). L'orizzonte più superficiale presenta una maggiore quantità di smectite rispetto alle altre fasi con valori medi del 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, individuabile tra 2 e 3.5 metri di profondità, è mediamente più povero in smectite rispetto all'orizzonte superiore, con valori medi del 70%, mentre le fasi lateritiche e colluviali si mantengono costanti e simili ai valori del primo orizzonte. Le fasi residuali, invece, presentano un notevole incremento raggiungendo concentrazioni dell'ordine del 20-30%. Nel terzo ed ultimo orizzonte, a partire dalla profondità di 3.8 metri, si può osservare un crollo del contenuto in smectite fino a valori del 50% e l'assenza di fasi colluviali. Si ha d'altro canto una maggiore concentrazione delle fasi lateritiche (10%) e un incremento delle fasi residuali superiore al 40%.

#### **4.2.1. Diffrazione a raggi X sulla frazione fine**

La diffrazione da polveri dei campioni “levigati” ha permesso di caratterizzare la frazione fine dei materiali, determinando così le specie e le caratteristiche mineralogiche delle fasi argillose individuate precedentemente, ossia smectite, caolinite e clorite.

Il gruppo della smectite comprende una serie di minerali argillosi dotati di struttura T-O-T (T = strato tetraedrico; O = strato ottaedrico) con strati sia diottaedrici che triottaedrici, che hanno la proprietà di espandere e contrarre le loro strutture pur mantenendo un'integrità cristallografica (Moore & Reynolds, 1997) (Fig.38). La smectite più comune è la montmorillonite che ha formula:  $(Ca,Na)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10} \cdot nH_2O$  (Klein, 2004).

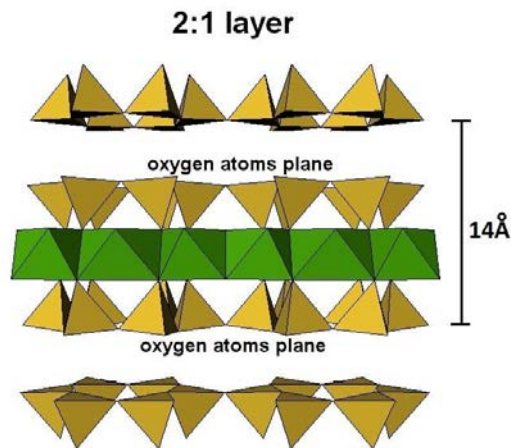


Fig.38: Struttura T-O-T della smectite (e clorite)

La caolinite, caratterizzata da una struttura T-O, ossia con un solo strato ottaedrico e uno tetraedrico, appartiene al gruppo serpentino-caolinite. La caolinite è dotata di strati diottaedrici, in quanto il catione al centro dell'ottaedro è trivalente e ha formula  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Le forze elettrostatiche esistenti tra i vari “pacchetti” impediscono l'ingresso di ioni e molecole, di conseguenza quando la caolinite entra in contatto con l'acqua, non ha comportamenti espansivi (Moore and Reynolds, 1997) (Fig.39).

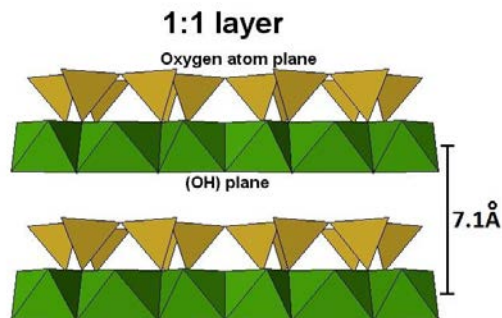


Fig.39: Struttura T-O della caolinite

La clorite ha una struttura triottaedrica T-O-T e uno strato brucitico O (T-O-T-O) (Fig.40). Lo strato brucitico O è composto essenzialmente da cationi che occupano l'interstrato, coordinati secondo una struttura ottaedrica. La clorite è essenzialmente un silicato di alluminio, magnesio e ferro con formula  $(\text{Mg,Fe,Al})_2(\text{Si,Al})_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  ed è caratterizzata da comportamenti non espansivi.

All'interno dei campioni di Gamba è stato identificato il clinocloro, varietà delle ortocloriti, gruppo di cloriti ricche in magnesio.

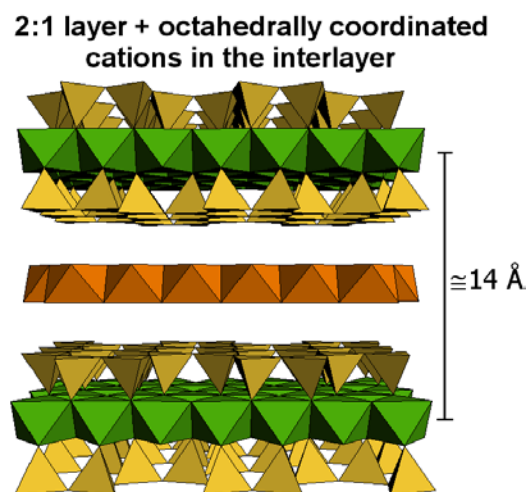


Fig. 40: Struttura T-O-T-O della clorite

La proprietà di rigonfiamento dipende dalla capacità dei cationi di trattenere la molecola polare (acqua, glicole) all'interno dell'interstrato. Questa proprietà non sussiste nel caso in cui la carica complessiva sia troppo alta (es: mica, clorite) oppure nulla (talco, pirofillite). Più semplicemente i minerali delle argille che rigonfiano sono principalmente le smectiti e le vermiculiti. Le molecole polari sono organizzate in "strati" il cui numero varia in modo inversamente proporzionale alla carica dell'interstrato. Per argille con strati aventi una data carica, il numero di strati di acqua adsorbita dipende da due fattori: la natura dei cationi interstrato e la pressione parziale dell'acqua ( $p/p_0$ ) (Meunier A, 2005).

I campioni selezionati per essere trattati con il metodo della levigatura sono stati per Carrè e Gamba rispettivamente Carrè11, Carrè20 e Gamba09, Gamba18.

Tutti i campioni sopracitati sono stati analizzati in diffrattometria sia prima che dopo essere stati sottoposti al trattamento con glicole etilenico. Questo trattamento evidenzia la non-espansività caratteristica della caolinite e della clorite, infatti non è apprezzabile nessuno shift dei picchi principali all'interno dei diffrattogrammi. I picchi relativi alla smectite subiscono invece uno shift, legato alla variazione del d-spacing delle hkl dei piani basali in seguito al trattamento con glicole etilenico. Si verifica infatti lo spostamento del riflesso della 001 da un  $2\theta$  di  $5.9^\circ$  a un  $2\theta$  di  $5.2^\circ$  corrispondente a una variazione della distanza tra i piani da  $15 \text{ \AA}$  a  $17 \text{ \AA}$  e lo

spostamento della 002 da un  $2\theta$  di  $11.80^\circ$  a un  $2\theta$  di  $10.2^\circ$  corrispondente a una variazione della distanza interplanare da  $7.5\text{\AA}$  a  $8.4\text{\AA}$  per inglobamento della molecola di glicole etilenico. Questa entità di spostamento ha permesso di riconoscere che la smectite osservata è una montmorillonite non interstratificata. Infatti le smectiti molto spesso tendono ad incorporare altri minerali delle argille all'interno della loro struttura, producendo una minore variazione del d-spacing.

In Fig.41 è mostrato il diffrattogramma di Carrè11, nel quale viene evidenziato il picco relativo alla 002 della muscovite con una linea di color magenta e i picchi relativi alle 00l della montmorillonite con linee di colore rosso. In Fig.42 è invece riportato il diffrattogramma di Carrè20, nel quale le linee magenta indicano i picchi relativi alle 00l della caolinite, che non sono caratterizzati da alcun spostamento. In Fig.43 è stato riportato il diffrattogramma del campione Gamba09, nel quale la linea di color magenta evidenzia il picco associato al riflesso 002 della muscovite, mentre le linee rosse indicano picchi relativi ai riflessi 00l della montmorillonite. La linea verde evidenzia invece il picco relativo al riflesso 002 della clorite. In Fig.44 viene mostrato il diffrattogramma relativo a Gamba18, nel quale i picchi relativi ai riflessi della 00l dell'argilla montmorillonitica e i loro spostamenti sono evidenziati da linee rosse.

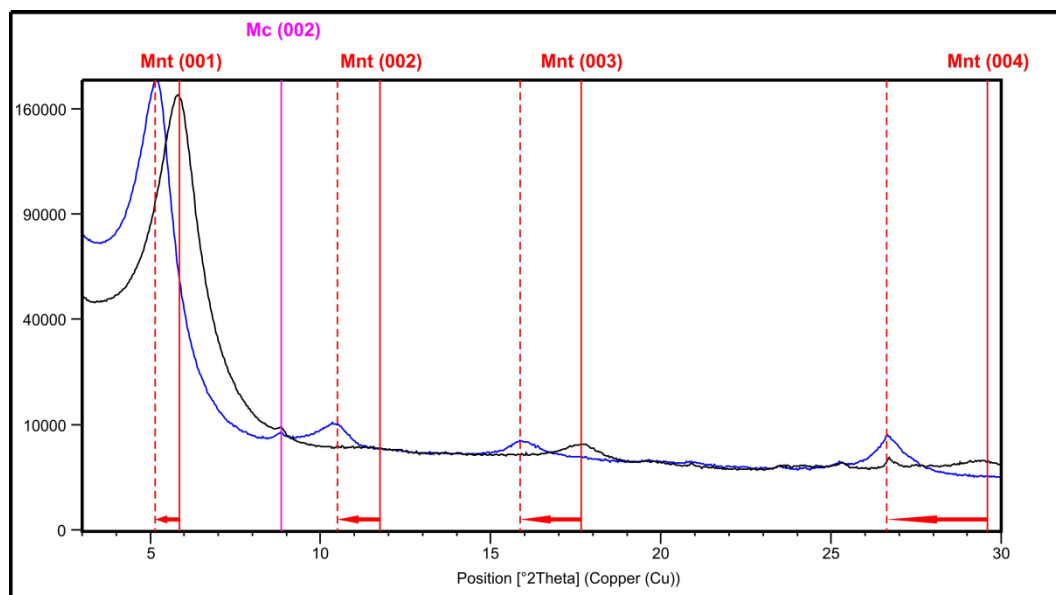


Fig.415: Diffrattogrammi del campione Carrè11: campione levigato (nero), campione glicolato (blu). La linea di color magenta rappresenta la posizione del riflesso 002 relativo alla muscovite, mentre le linee di color rosso sono associate alla montmorillonite; le linee rosse tratteggiate rappresentano gli spostamenti dei riflessi  $hkl$  della montmorillonite in seguito al trattamento con il glicole etilenico

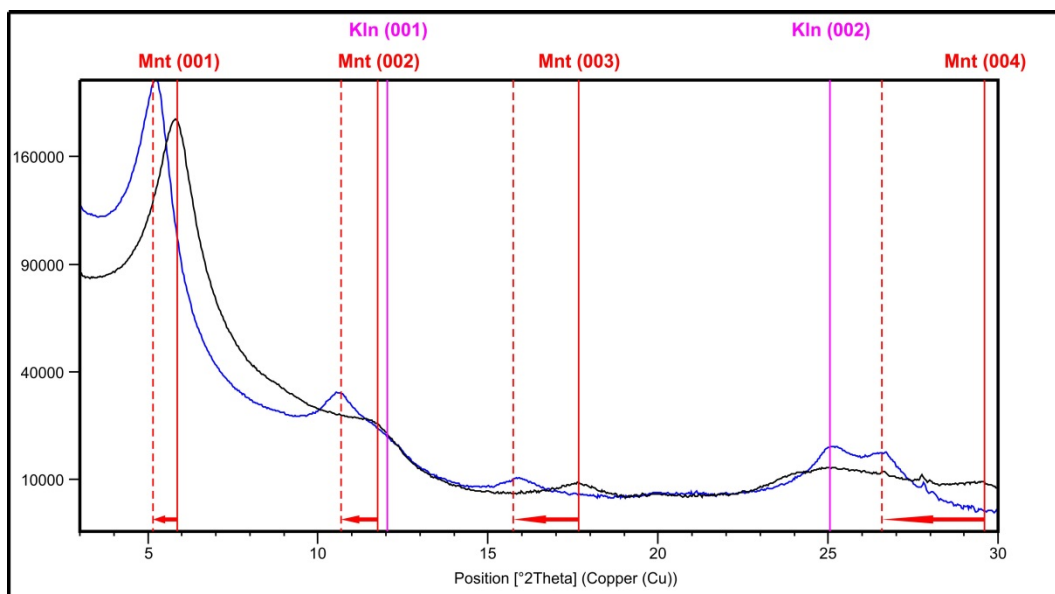


Fig.42: Diffratogrammi del campione Carrè20: campione levigato (nero), campione glicolato (blu). Le linee di color magenta rappresentano le posizioni dei riflessi  $hkl$  relativi alla caolinite, mentre le linee di color rosso sono associate alla montmorillonite; le linee rosse tratteggiate rappresentano gli spostamenti dei riflessi  $hkl$  della montmorillonite in seguito al trattamento con il glicole etilenico

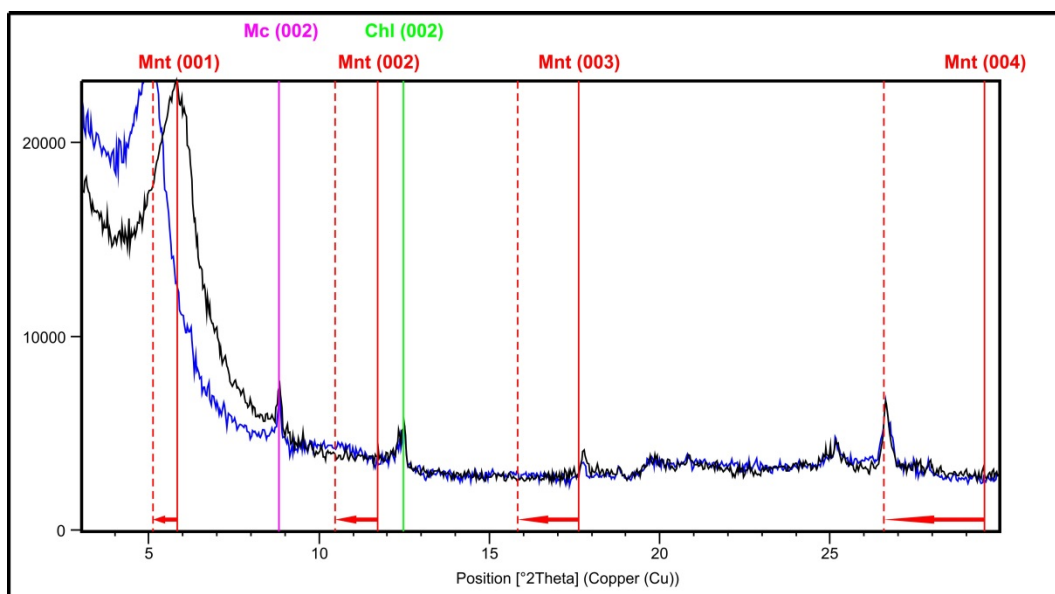


Fig.43: Diffratogrammi del campione Gamba09: campione levigato (nero), campione glicolato (blu). La linea di color magenta rappresenta la posizione del riflesso 002 relativo alla muscovite, la linea di color verde rappresenta la posizione del riflesso 002 relativo alla clorite, mentre le linee di color rosso sono associate alla montmorillonite; le linee rosse tratteggiate rappresentano gli spostamenti dei riflessi  $hkl$  della montmorillonite in seguito al trattamento con il glicole etilenico

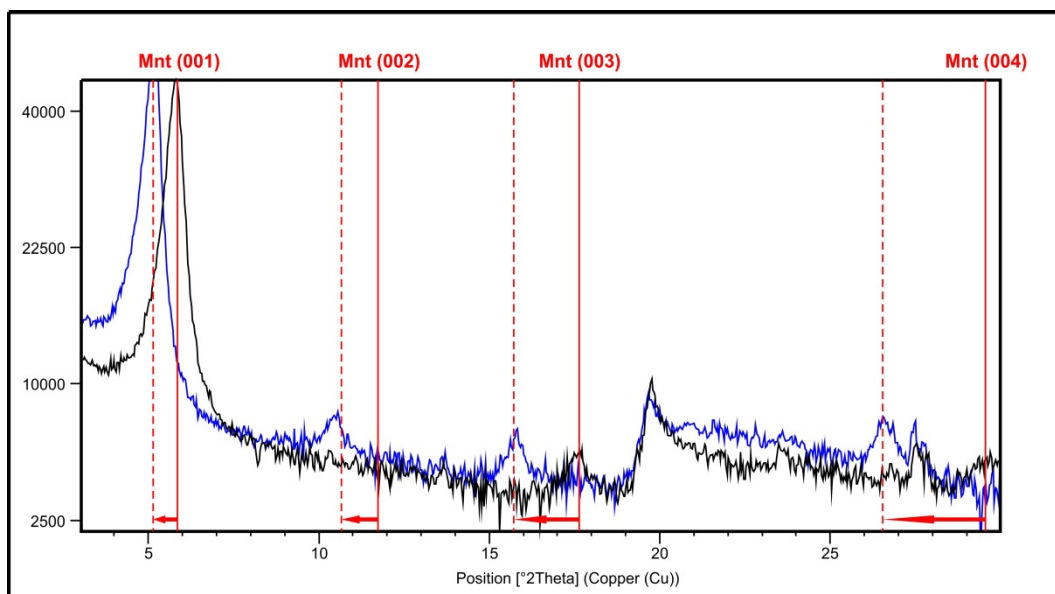


Fig.446: Diffattogrammi del campione Gamba18: campione levigato (nero), campione glicolato (blu). Le linee di color rosso sono associate alla montmorillonite; le linee rosse tratteggiate rappresentano gli spostamenti dei riflessi  $hkl$  della montmorillonite in seguito al trattamento con il glicole etilenico

### 4.3. Considerazioni riassuntive dei risultati ottenuti

Le prove di laboratorio sono state utili per comprendere le caratteristiche geotecniche dei terreni in esame, in particolare, dai limiti di Atterberg sono stati ottenuti valori medio-alti di indice di plasticità. Da questo dato è stato possibile classificare il comportamento di queste coltri come *plastico*. Tipicamente l'indice di plasticità assume valori elevati in presenza di minerali argillosi, in particolare il valore dipende dalla percentuale, tipologia di argilla e dai cationi adsorbiti (Lancellotta, 1987). Per appurare la consistenza del dato geotecnico, sono state predisposte analisi mineralogiche mediante la tecnica della diffrazione per polveri. Le analisi quantitative delle fasi, ottenute dall'elaborazione dei diffattogrammi, hanno evidenziato l'abbondanza di minerali a basso ordine cristallino che, attraverso la procedura di glicolazione, sono stati identificati in entrambe le frane, come montmorilloniti. In particolare, la montmorillonite è un tipo di argilla espansiva a causa dell'affinità chimica con le molecole d'acqua ed è ricorrente in tutti i campioni di terreno raccolti. La percentuale in peso minima si attesta intorno al 50%, valore comunque elevato, mentre i massimi valori sfiorano il 90%. Nonostante l'abbondanza di questa fase possa costituire un possibile fattore a livello mineralogico che concorre a ridurre la stabilità del versante, si ipotizza tuttavia che una maggiore responsabilità, per tale riduzione, sia dovuta

alla variazione rapida del contenuto di questa fase mineralogica all'interno della colonna di terreno. Probabilmente, laddove si verificano questi cambiamenti rapidi di percentuale di montmorillonite, si creano dei punti di debolezza, o di accumulo di stress, che si propagano formando dei piani, lungo i quali, presumibilmente, si imposta la superficie di scivolamento della frana. Questa corrispondenza è più evidente se consideriamo che la profondità del piano di scivolamento delle frane, desunta dalle relazioni tecniche professionali inedite, corrisponde con un buon grado di approssimazione alla profondità delle rapide variazioni nel contenuto in montmorillonite. Si può notare inoltre, plottando i valori di indice di plasticità e contenuto in montmorillonite in due grafici rispettivamente in Figg. 45-46, come sussistano delle correlazioni tra i due in entrambe le frane.

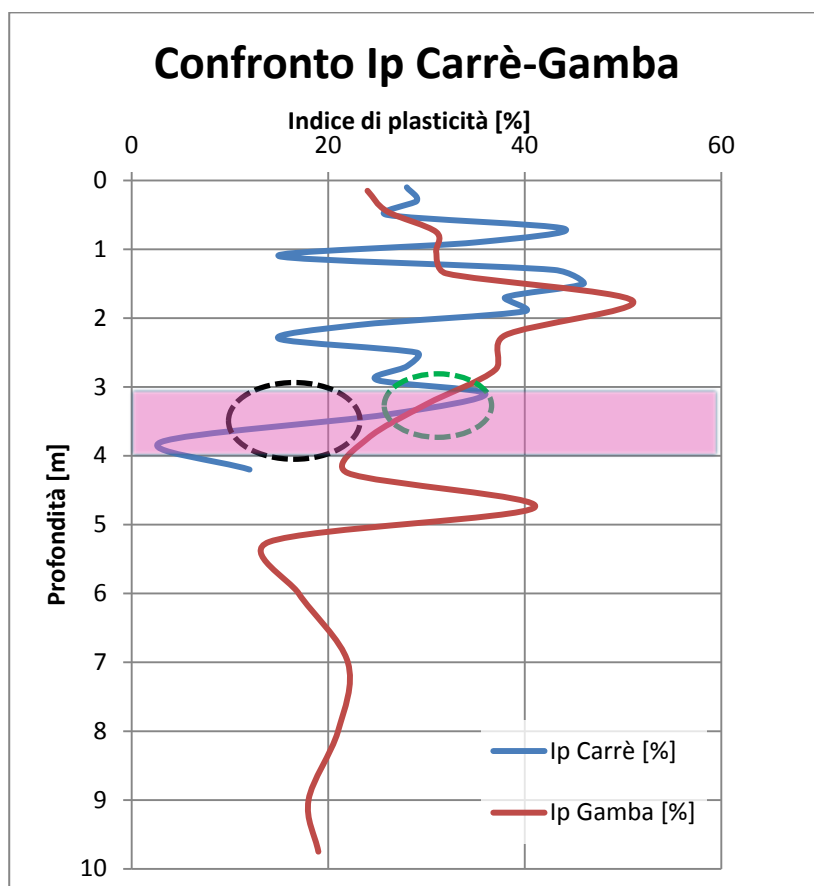


Fig.45: Grafico rappresentante i valori di indice di plasticità al variare della profondità; la linea tratteggiata di colore nero indica la profondità di massima variazione di indice di plasticità nei terreni di Carrè, mentre la linea tratteggiata di colore verde indica la profondità di massima variazione di indice di plasticità nei terreni di Gamba. La fascia di colore magenta indica la profondità del piano di scivolamento

Nei terreni di Gamba in un intervallo di 1.5 metri (2.75 - 4.25 metri) si ha una variazione di  $I_p$  da 37% a 22%, mentre nei terreni di Carrè nell'intervallo di 1 metro (3 - 4 metri) si ha addirittura una variazione di  $I_p$  da 36% a 4%. Anche in figura seguente le maggiori variazioni di contenuto in montmorillonite si osservano a una profondità di 3 – 4 metri per entrambi i terreni.

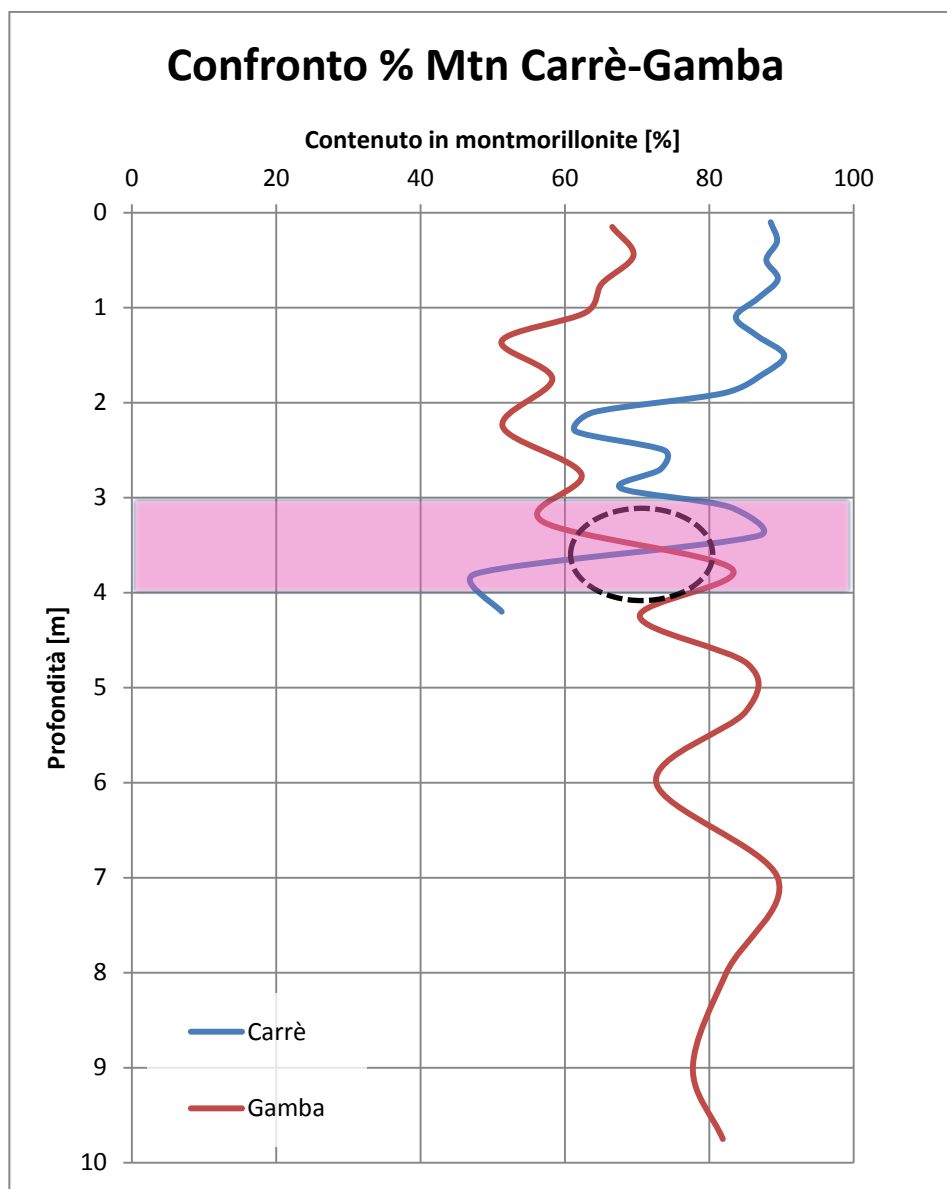


Fig.46: Grafico rappresentante i valori di contenuto in montmorillonite al variare della profondità; la linea tratteggiata nera indica la massima variazione di contenuto in montmorillonite, coincidente per i terreni di Carrè e Gamba. La fascia di colore magenta indica la profondità del piano di scivolamento

Si vede infatti come, sia le variazioni in termini di indice di plasticità che in montmorillonite, siano collocate alla stessa profondità compresa tra i 3 e i 4 metri. Preciso che la stessa profondità per entrambe le frane costituisce una pura coincidenza.



## 5. MODELLAZIONE NUMERICA

### 5.1. *Modellazione con Flac 7*

Il software FLAC di Itasca è un codice che permette la modellazione numerica alle differenze finite, atto a riprodurre il comportamento di mezzi geologici e strutture che fluiscono plasticamente una volta raggiunta la soglia di plasticizzazione. Anche se originariamente ideato per scopi geotecnici e minerari, il programma offre una vasta gamma di possibilità per risolvere problemi anche complessi concernenti la meccanica delle terre. Non a caso FLAC sta per Fast Lagrangian Analysis of Continua poiché lo schema di calcolo utilizzato è quello Lagrangiano, adatto a rappresentare grandi 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 non solo di visualizzare lo stato finale, ma anche lo sviluppo della plasticizzazione. Il timestep è sufficientemente piccolo da impedire che l'informazione si propaghi agli elementi adiacenti durante un ciclo di calcolo. FLAC è inoltre indicato per la risoluzione delle equazioni del moto anche per problemi quasi-statici.

Poiché FLAC è un metodo numerico di tipo continuo (adatto per instabilità che coinvolgono terreni), è necessario introdurre delle leggi costitutive che regolino il rapporto sforzi/deformazioni.

Prima di iniziare un'analisi numerica, è fondamentale definire gli obiettivi per cui si intraprende la simulazione e creare un modello concettuale che descriva il sistema con le relative caratteristiche. È necessario poi preparare una serie di modelli di simulazione per i diversi casi, eseguire i calcoli e interpretare i risultati.

La successione operativa consiste in:

- generazione della griglia;
- applicazione delle condizioni iniziali e al contorno;
- definizione dei modelli del terreno;
- scelta del modello costitutivo;
- inizializzazione;
- monitoraggio;
- soluzione;
- risultati ed interpretazione.

Il criterio di rottura utilizzato è Mohr-Coulomb e i parametri fondamentali per la descrizione del modello del suolo sono:

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

Dopo aver inserito i parametri, FLAC è in grado di fornire lo stato tensionale iniziale ad ogni singolo nodo e, operando delle iterazioni, calcola le deformazioni associate secondo la legge costitutiva. Il software restituisce quindi lo spostamento (x- e y-displacement) per ciascun nodo della griglia, risolvendo le equazioni del moto. A partire dalla “nuova” configurazione ricalcola nuovamente lo stato tensionale modificato. L'intera procedura rientra nella definizione di *ciclo*, il quale viene ripetuto tante volte quante sono necessarie affinché la differenza tra il valore dello stato tensionale finale e quello iniziale si annulli. Il verificarsi di questa condizione coincide con il raggiungimento di uno stato di equilibrio tra

forze iniziali e finali e quindi, se si considera il versante, con una situazione di stabilità. È stato scelto di utilizzare FLAC al fine di poter verificare quali fossero le condizioni di stabilità dei due versanti.

L'obiettivo della modellazione numerica consiste nel testare ciò che è stato desunto dalle prove geotecniche e dalle analisi mineralogiche e, con l'ausilio delle prove in sito, verificare la stabilità dei versanti studiati. Sono state quindi selezionate due sezioni delle aree di studio di Carrè e Gamba, il cui modello geotecnico è stato definito a partire dall'elaborazione delle prove penetrometriche dinamiche superpesanti, la cui collocazione è riportata in Figg.47-48. Le due sezioni geotecniche sono costituite da tre differenti orizzonti e, grazie all'informazione relativa alla geometria degli strati, è stato possibile realizzare la simulazione. È stato quindi possibile ricostruire la morfologia del versante e successivamente implementare il modello al fine di stimare il FoS (Factor of Safety), simulando il posizionamento della falda a diverse quote a partire dal piano campagna. Individuare il valore di altezza piezometrica, in corrispondenza della quale il versante assume caratteri di instabilità, permette, ad esempio, di stabilire il tipo e la consistenza degli interventi di sistemazione da predisporre. Il fattore di sicurezza (FoS) è espresso dal seguente rapporto:

$$FoS = \frac{\text{resistenze disponibili}}{\text{resistenze mobilitate}} \quad (\text{Lancellotta, 1987})$$

Generalmente, tanto minore è la conoscenza dei dati riguardanti la geologia dell'area coinvolta e le caratteristiche litotecniche dei terreni, tanto maggiore dovrebbe essere il valore del fattore di sicurezza scelto. L'accettabilità del valore del fattore di sicurezza è totalmente a carico del geologo/ingegnere responsabile. Per questa analisi di stabilità è stato ritenuto accettabile un fattore di sicurezza pari a 1.3.

La schematizzazione strutturata secondo tre strati (orizzonti A, B, C) è validata dalle considerazioni derivate dalle analisi mineralogiche e dalle prove geotecniche esposte precedentemente. Si ritiene che, infatti, grandi variazioni di contenuto in smectite lungo la verticale di terreno possa creare un forte scompenso in termini di resistenza, dando luogo a una superficie di debolezza. Per poter rappresentare all'interno della modellazione numerica questo contrasto, è necessario conferire

allo strato intermedio caratteristiche di resistenza più scarse, poiché con Flac non è possibile assegnare diversi valori di parametri di resistenza all'interno di un singolo strato.

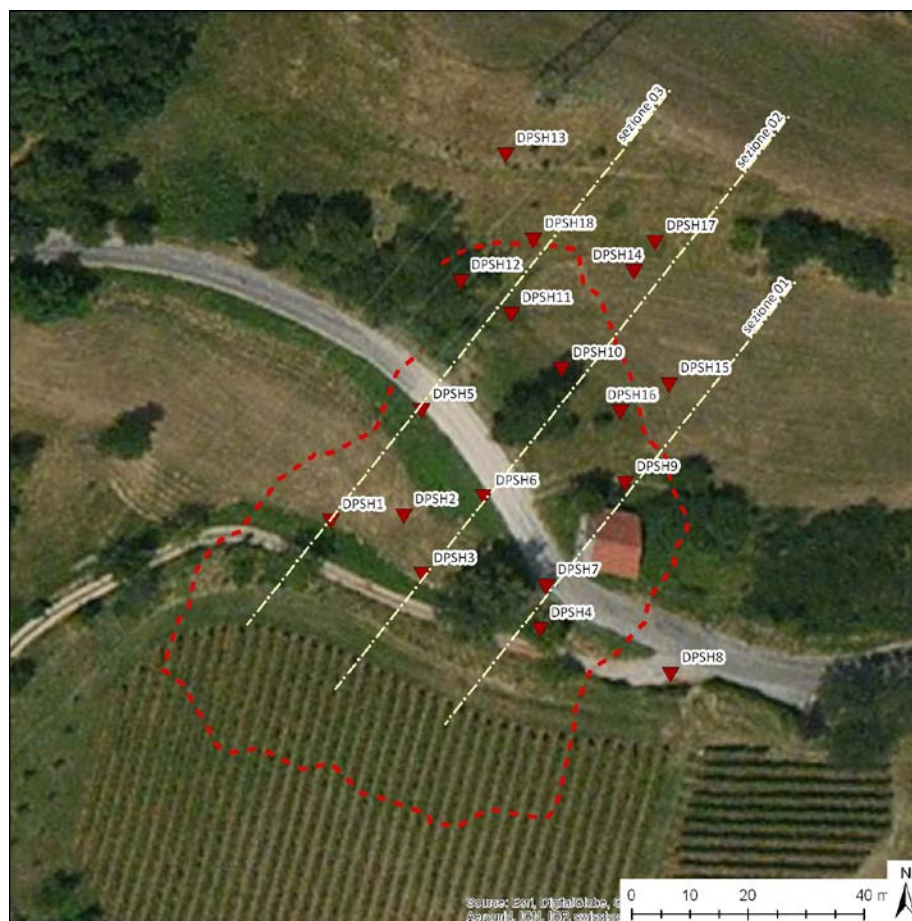


Fig.47: Posizione delle prove penetrometriche dinamiche effettuate a Carrè

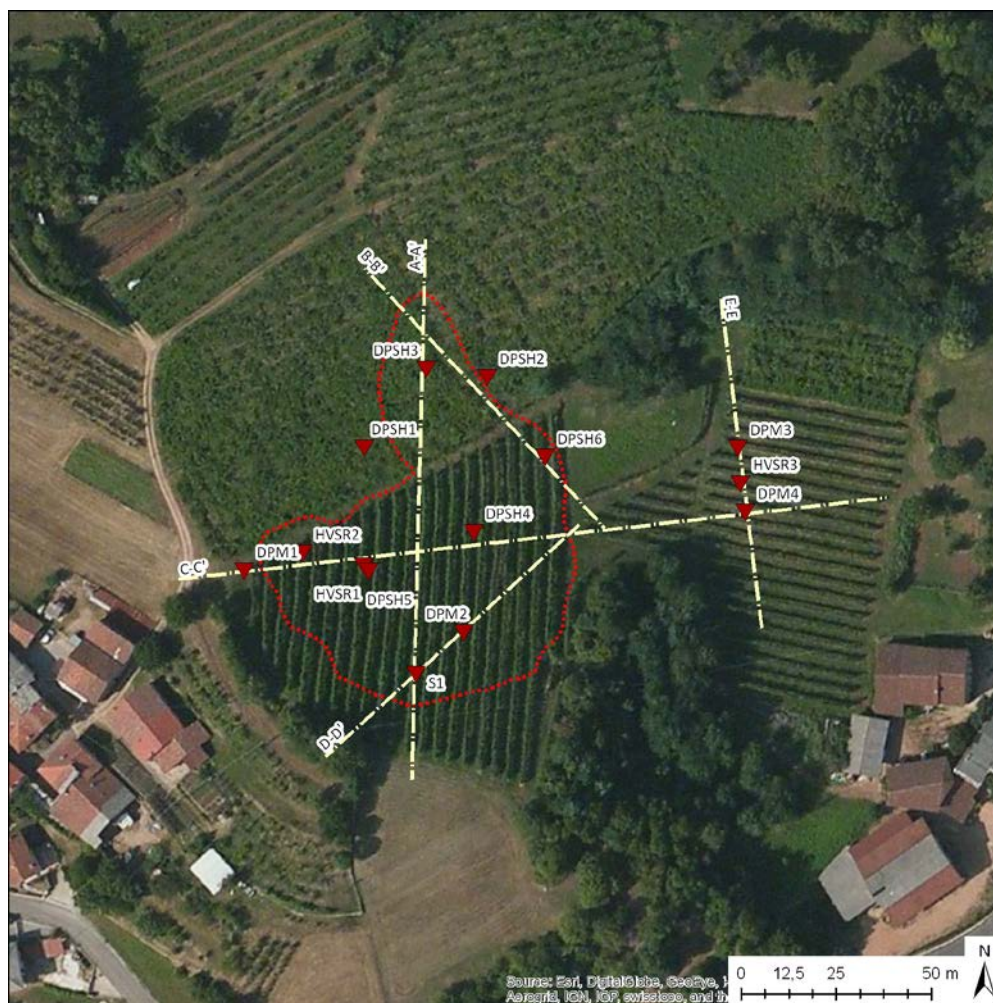


Fig.48: Posizione delle prove penetrometriche dinamiche a Gamba

Per Carrè è stato scelto di implementare la modellazione lungo la sezione 3 di Fig.49. Per Gamba è stata invece selezionata la sezione D-D' dalla Fig.50.

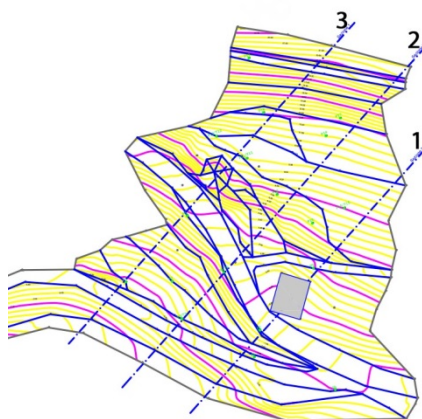


Fig.49: Pianta della frana di Carrè con la posizione delle sezioni numerate

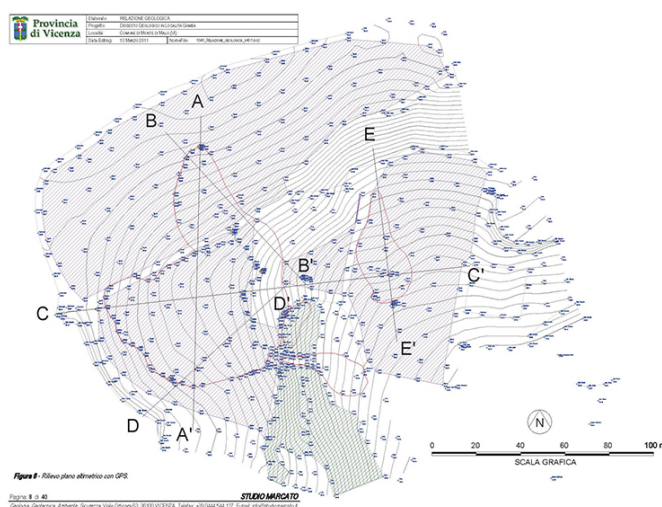


Fig.50: Pianta della frana di Gamba con la sezione D-D'

Dopo la discretizzazione della griglia, l'applicazione delle condizioni al contorno e l'assegnazione dei parametri ai diversi orizzonti, sono state rappresentate e calcolate diverse casistiche con la falda in differenti posizioni. Allo scopo di simulare un modello semplificato e in assenza di dati piezometrici affidabili e incompleti, la falda è stata posta approssimativamente parallela al versante in entrambe le implementazioni. Sono state riportate negli Allegati 6-7 le sequenze di comandi di due delle simulazioni effettuate.

Tutte le immagini nei sottocapitoli della modellazione, relative allo spostamento (X-displacement e Boundary plot), tratte da Flac 7, hanno in ascissa e ordinata un valore di  $x \cdot 10^1$  metri.

## 5.2. Modellazione della frana di Gamba

Inizialmente è stato necessario discretizzare la griglia sulla quale verrà poi costruita la geometria del versante, insieme alla scelta del criterio di rottura di Mohr-Coulomb. I valori della griglia (*grid*) sono rispettivamente 200 in direzione x e 100 in direzione y, tenendo conto che dal punto di origine 0,0 la sezione di Gamba considerata ha un'altezza massima 27 metri e una lunghezza massima di 77 metri. Sono state poi applicate le condizioni al contorno, fissando le coordinate

x e y del piano orizzontale inferiore del versante e le coordinate x per i piani verticali sul lato destro e sinistro del versante in riferimento a Fig.51.

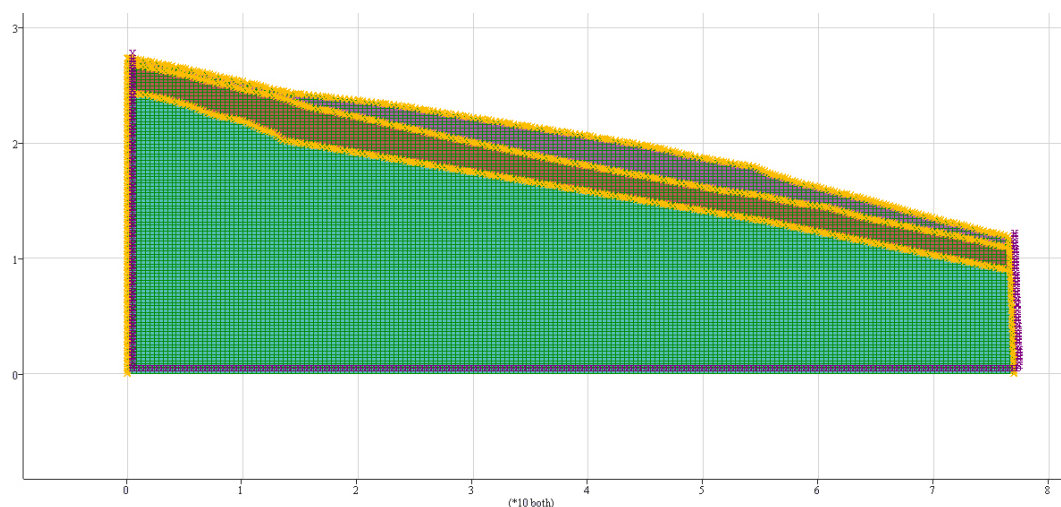


Fig.51: Schematizzazione della morfologia del versante e della geometria degli strati  
È stata quindi riprodotta una geometria che consta di tre strati, ognuno caratterizzato con differenti parametri (Tab.4):

- Orizzonte A: Limo sabbioso argilloso, con spessore variabile di 3-3.5 metri;
- Orizzonte B: Limo con sabbia debolmente argilloso, con spessore di circa 2 metri;
- Orizzonte C: Roccia vulcanica alterata.

Secondo le prove effettuate in sito e da studi precedenti l'orizzonte B rappresenta lo strato di terreno con caratteristiche peggiori, dove potrebbe essersi impostato il piano di scivolamento. Da notare, infatti, come i parametri assegnati presentino un valore inferiore sia in termini di angolo d'attrito che di coesione.

| Orizzonte | z       | $\rho$ | K        | G        | c        | $\phi$ | t        |
|-----------|---------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|
| A         | 0-3.5   | 1900   | 5.00E+06 | 2.00E+06 | 10000    | 23     | 10000    |
| B         | 3.5-5.5 | 1900   | 1.00E+06 | 5.00E+05 | 4000     | 14     | 4000     |
| C         | > 5.5   | 2700   | 3.32E+10 | 1.32E+10 | 6.27E+07 | 40     | 1.31E+07 |

Tab.4: Parametri assegnati agli strati costituenti il terreno di Gamba

dove:

- z è la profondità [m]

- $\rho$  è la densità [ $\text{t/m}^3$ ]
- $K$  è il modulo di compressibilità [Pa]
- $G$  è il modulo di taglio [Pa]
- $C$  è la coesione [Pa]
- $\Phi$  è l'angolo di attrito [ $^\circ$ ]
- $t$  è la tensione [Pa]

### 5.2.1. Falda al piano campagna

In Fig.52 è riportato il caso più sfavorevole ossia quando la falda coincide con il piano campagna, dove il massimo spostamento in direzione orizzontale è pari a 1.25 metri. È considerato il caso più sfavorevole se non vengono considerate eventuali sovrappressioni interstiziali o apporti d'acqua provenienti da monte.

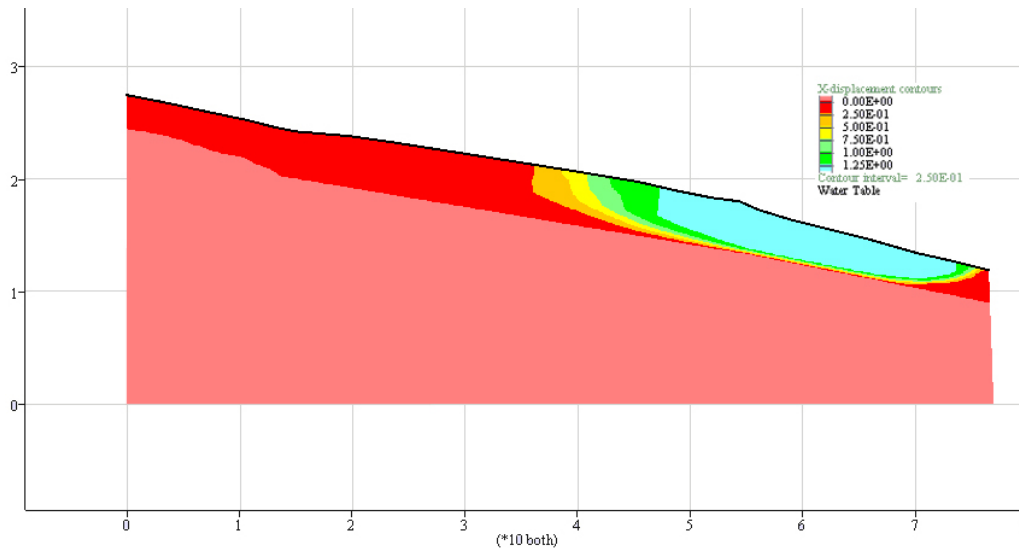


Fig.52: X-displacement della frana di Gamba con falda al piano campagna. La tavola è contrassegnata dalla linea nera

In Fig.53 sono stati invece mostrati gli indicatori di plasticizzazione che evidenziano le zone di rottura a trazione e le zone di sforzo a compressione.

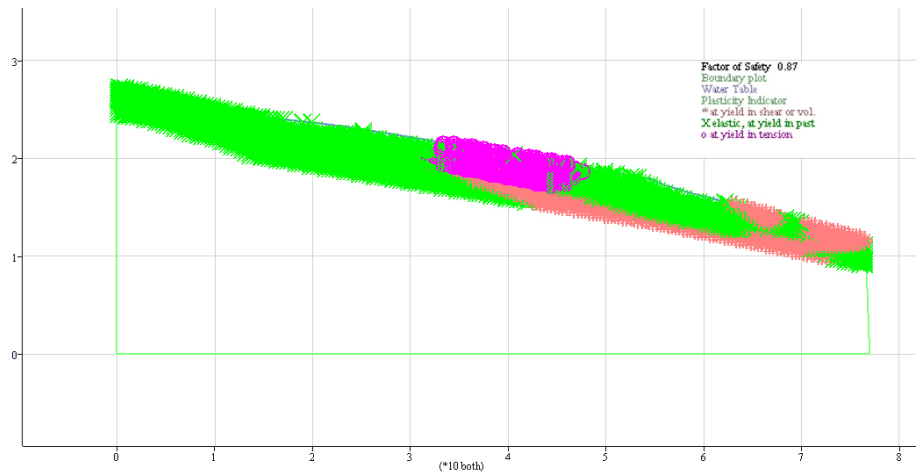


Fig.53: Le diverse campiture sottolineano il diverso tipo di deformazione che interessa il versante: le zone verdi sono state sottoposte a sforzi in passato, le zone in viola sono sotto sforzo a trazione, mentre quelle rosa sotto sforzo di compressione o taglio

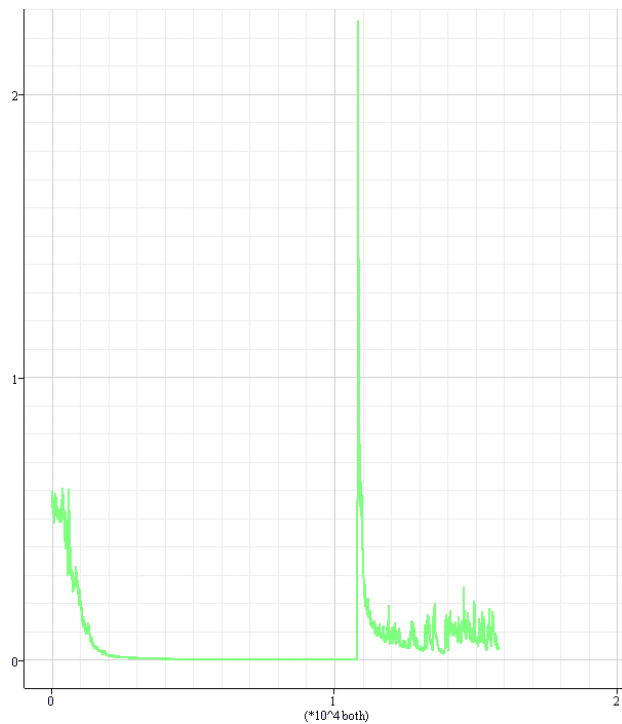


Fig.54: Riepilogo delle forze non bilanciate con falda al piano campagna

Si può vedere come, quando la tavola d'acqua raggiunge il piano campagna, le forze non bilanciate non si annullino, ma continuino ad oscillare (Fig.54). Si è reso perciò necessario bloccare l'iterazione a 17000 in corrispondenza dello spostamento visto in campagna. L'orientazione dei vettori velocità in Fig.55 sottolinea la direzione del movimento. Il FoS calcolato è pari a 0.87.

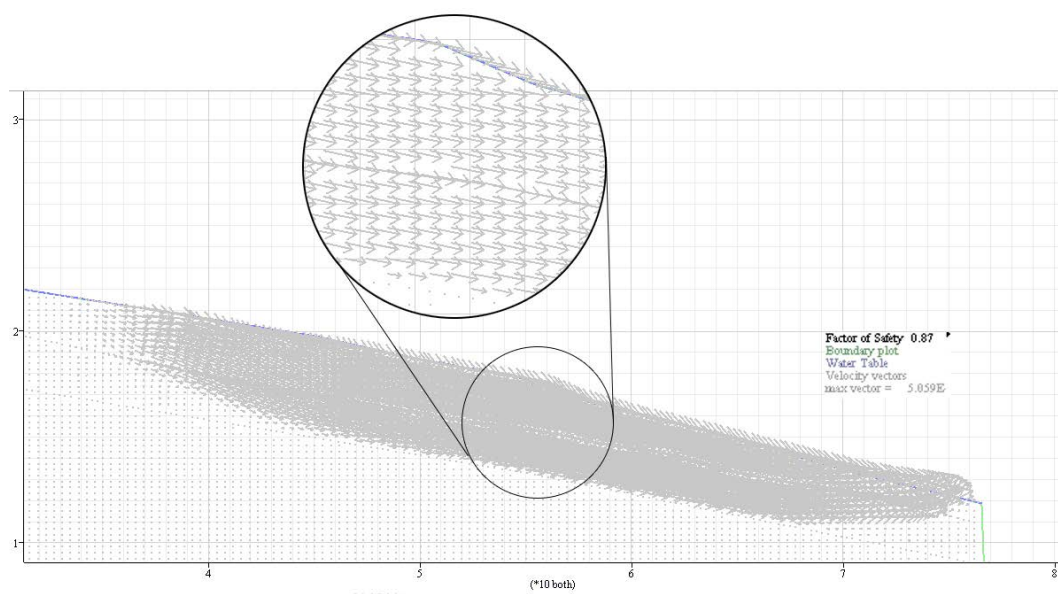


Fig.55: Rappresentazione dei vettori velocità

### 5.2.2. Falda a 0.5 metri dal piano campagna

Lo spostamento associato alla falda a 0.5 metri dal piano campagna è di 15 centimetri come è possibile notare in Fig.56. Il FoS calcolato è 0.97 ed è insufficiente per ritenere stabile il versante.

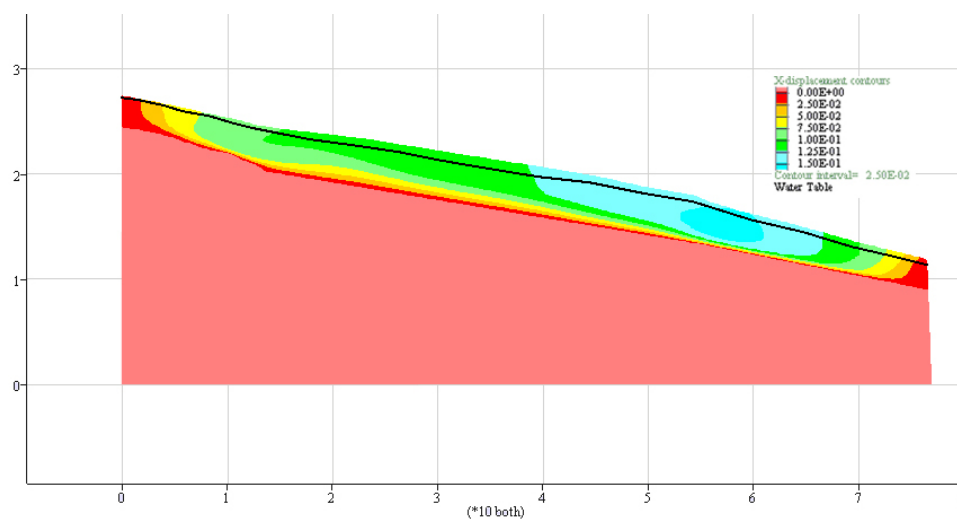


Fig.56: X-displacement della frana di Gamba con falda a 0.5 metri dal piano campagna.  
La tavola è contrassegnata dalla linea nera

### 5.2.3. Falda a 1 metro dal piano campagna

Quando la tavola si trova a 1 metro dal piano campagna, si hanno spostamenti massimi di 10 centimetri. Il FoS calcolato risulta pari a 1.04, valore non accettabile ai fini di stabilità (Fig.57).

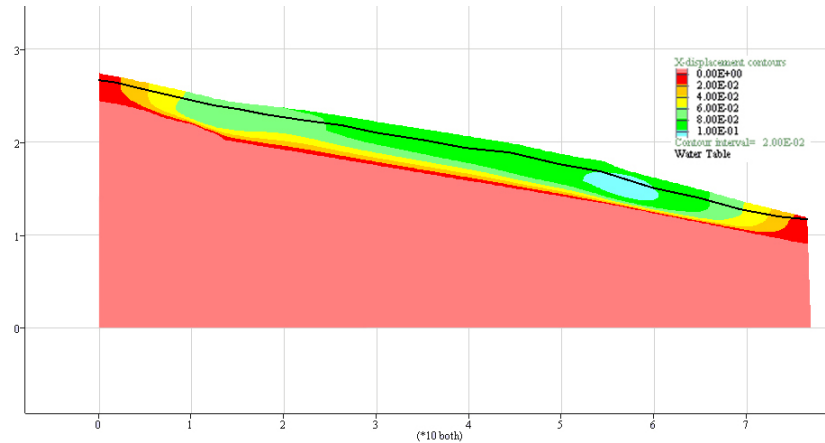


Fig.57: X-displacement della frana di Gamba con falda a 1 metro dal piano campagna. La tavola è contrassegnata dalla linea nera

### 5.2.4. Falda a 2 metri dal piano campagna

Come si può vedere in Fig.58, la frana ha spostamenti massimi di 6 centimetri quando la falda viene posta nella simulazione a circa 2 metri dal piano campagna.

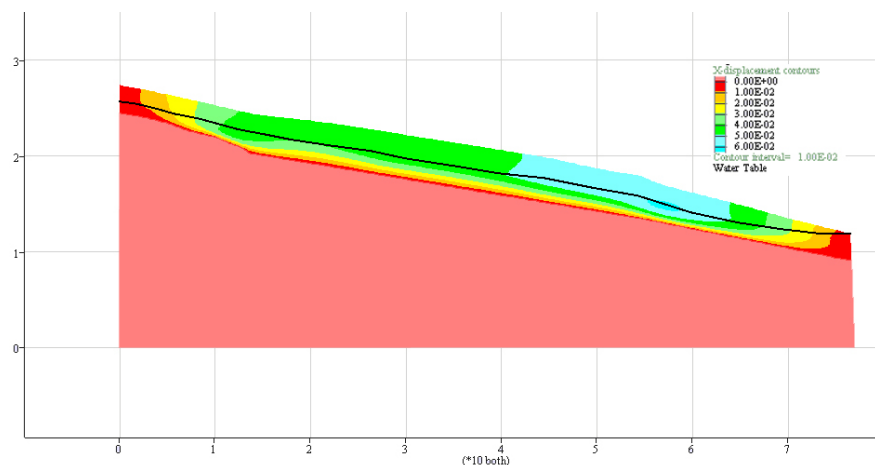


Fig.58: X-displacement della frana di Gamba con falda a 2 metri dal piano campagna. La tavola è contrassegnata dalla linea nera

Il fattore di sicurezza corrisponde a 1.28. Il versante viene quindi considerato sufficientemente stabile, nel caso in cui si riesca a mantenere la falda sotto ai due

metri dal piano campagna. In Fig.59 si può notare come le forze bilanciate si annullino e quindi si arrivi a una condizione di equilibrio a circa 17000 step.

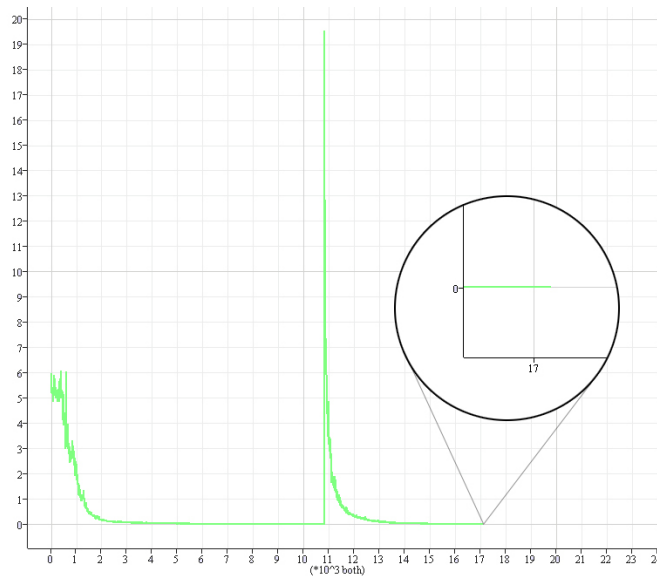


Fig.59: Riepilogo delle forze bilanciate con falda a 2 metri dal piano campagna

### 5.2.5. Assenza di falda

Per completezza è stato calcolato anche lo spostamento e il relativo FoS in assenza di falda (Fig.60). Non è indispensabile questa simulazione sia per la dubbia realistica sia perché il Fos calcolato per la falda a 3 metri arriva già a valori pseudo-accettabili (1.28). Lo spostamento è di circa 3 centimetri con un FoS di 1.55.

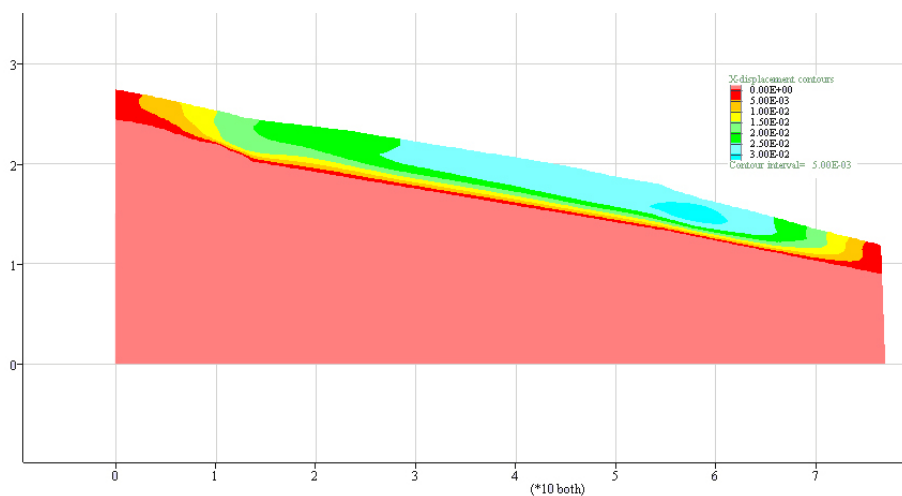


Fig.60: X-displacement della frana di Gamba simulando l'assenza di falda

### 5.3. Modellazione della frana di Carrè

Il criterio di rottura rimane quello di Mohr-Coulomb e, come precedentemente utilizzata per la modellazione di Gamba, la griglia 200,100 risulta accettabile anche per Carrè; la sezione è di dimensioni maggiori, in particolare a partire dall'origine degli assi 0,0 ha lunghezza di circa 105 metri e un'altezza massima di 35 metri come è possibile vedere in Fig.61.

Dopo aver definito la morfologia del versante e la geometria degli strati sono state applicate le condizioni al contorno con il medesimo criterio utilizzato in Gamba.

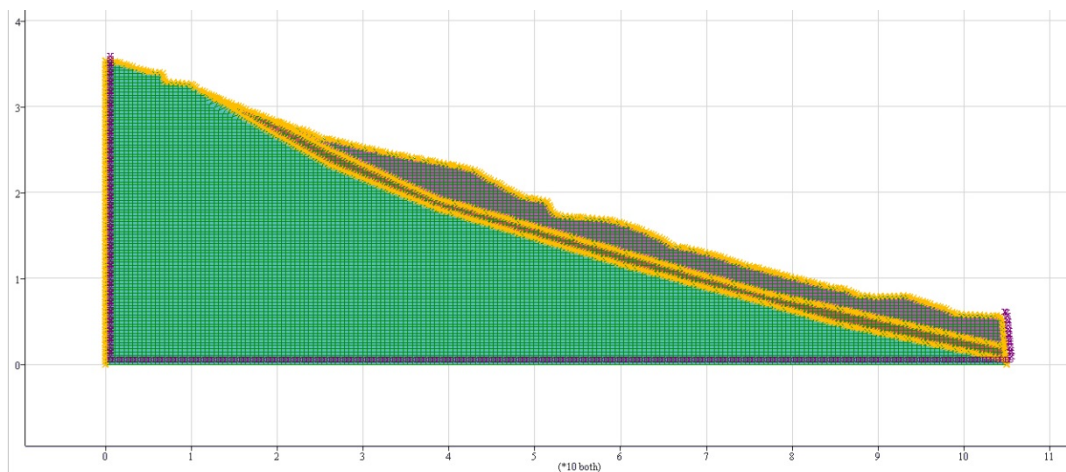


Fig.61: Schematizzazione della morfologia del versante e della geometria degli strati

Sono stati individuati tre orizzonti e, in base ai risultati delle analisi, sono stati così suddivisi:

- Orizzonte A: Limo argilloso, con spessore molto variabile di 2-4 metri;
- Orizzonte B: Sabbia limosa, con spessore di 1 metro circa;
- Orizzonte C: Roccia vulcanica alterata.

Poiché la frana di Carrè è per molti aspetti simile a Gamba, in assenza di dati consistenti per quanto riguarda il dissesto in questione e la minore profondità di

indagine, sono state assegnate all'orizzonte B delle caratteristiche ugualmente scadenti (come in Gamba) con lievi variazioni per la coesione.

| Orizzonte | z       | $\rho$ | K        | G        | c        | $\phi$ | t        |
|-----------|---------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|
| A         | 0-3.5   | 1900   | 5.00E+06 | 2.00E+06 | 10000    | 23     | 10000    |
| B         | 3.5-4.5 | 1900   | 1.00E+06 | 5.00E+05 | 5000     | 15     | 5000     |
| C         | > 4.5   | 2700   | 3.32E+10 | 1.32E+10 | 6.27E+07 | 40     | 1.31E+07 |

Tab. 5: Parametri assegnati agli strati costituenti il terreno di Gamba

dove:

- z è la profondità [m]
- $\rho$  è la densità [t/m<sup>3</sup>]
- K è il modulo di compressibilità [Pa]
- G è il modulo di taglio [Pa]
- C è la coesione [Pa]
- $\Phi$  è l'angolo di attrito [°]
- t è la tensione [Pa]

Sono state effettuate anche per la sezione della frana di Carrè varie simulazioni a diverse profondità della falda.

### 5.3.1. Falda al piano campagna

In Fig.62 è rappresentato il caso più sfavorevole, per cui la posizione della falda coincide con il piano campagna, se non si considerano eventuali sovrappressioni interstiziali o apporti d'acqua provenienti da monte. Il maggiore X-displacement è registrato in prossimità della strada e assume valori compresi tra 1.00 m e 1.20 m. La Fig.63 presenta il numero di step in ascissa e la forza risultante in Newton in ordinata, mostrando l'oscillazione data dal bilanciamento delle forze. L'instabilità è quindi confermata dal fatto che le forze non si annullano ed è quindi necessario

imporre un numero di cicli al fine di impedire deformazioni molto maggiori rispetto a quelle verificatesi in campagna.

Al fine di fornire una maggiore comprensibilità alla rappresentazione è stata indicata la posizione di Via Valdaro rispetto al dissesto.

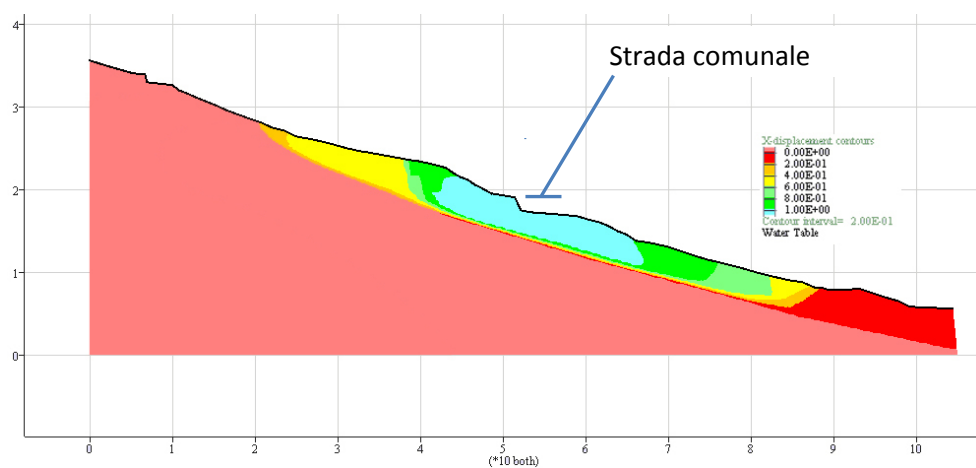


Fig.62: X-displacement della frana di Carrè con falda al piano campagna. La tavola è contrassegnata dalla linea nera

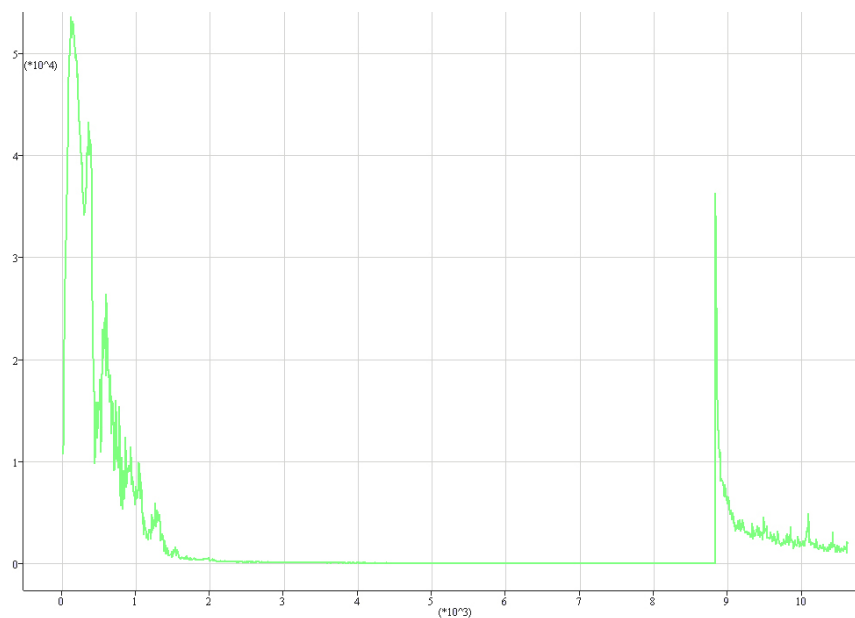


Fig.63: Riepilogo delle forze non bilanciate con falda al piano campagna

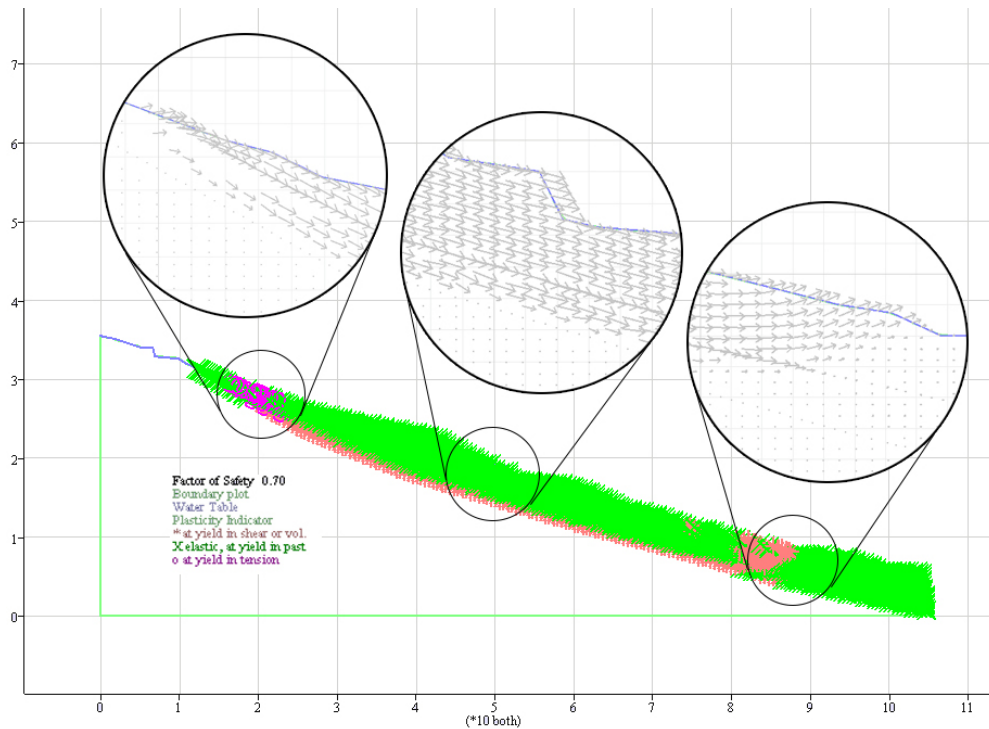


Fig.64: Sezione di Carrè in cui all'interno delle circonferenze sono evidenziate le direzioni dei vettori velocità (in grigio), mentre le campiture rappresentano gli indicatori di plasticizzazione (viola: sforzo in trazione; verde: sforzo subito in passato; rosa: sforzo di taglio o compressione)

In Fig.64 viene riportato il FoS calcolato corrispondente a 0.70, quindi il versante risulta instabile quando la superficie della falda coincide col piano campagna. Le campiture colorate rappresentano gli indicatori di plasticizzazione, in particolare le zone evidenziate in verde testimoniano le porzioni di terreno che hanno superato la soglia di snervamento, la zona evidenziata in viola è una porzione di terreno in condizione di trazione, mentre gli indicatori rosati si riferiscono a porzioni di terreno sottoposte a sforzi di compressione o taglio.

### 5.3.2. Falda a 1 metro dal piano campagna

In Fig.65 è rappresentato il versante con la falda a circa un metro approssimativamente dal piano campagna, a cui sono associati spostamenti massimi lungo la direzione x di circa 40 centimetri.

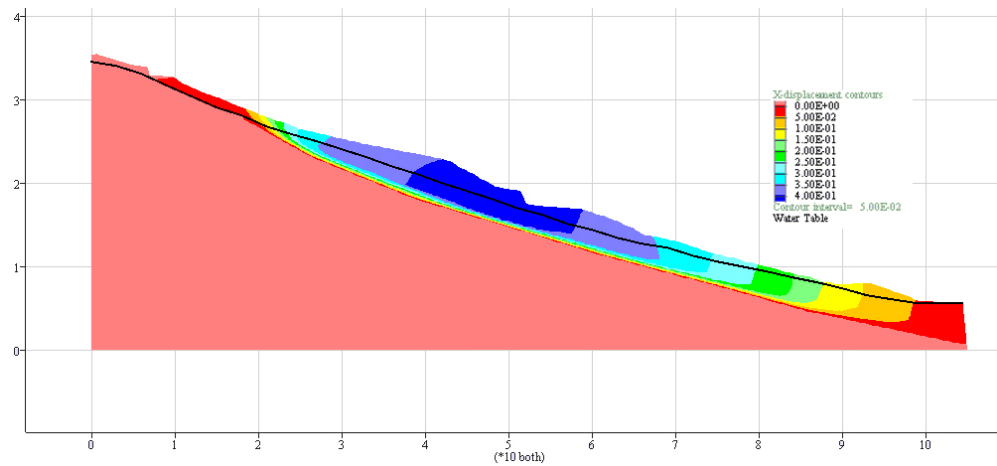


Fig.65: X-displacement della frana di Carrè con falda a 1 m di profondità dal piano campagna. La tavola d'acqua è contrassegnata dalla linea nera

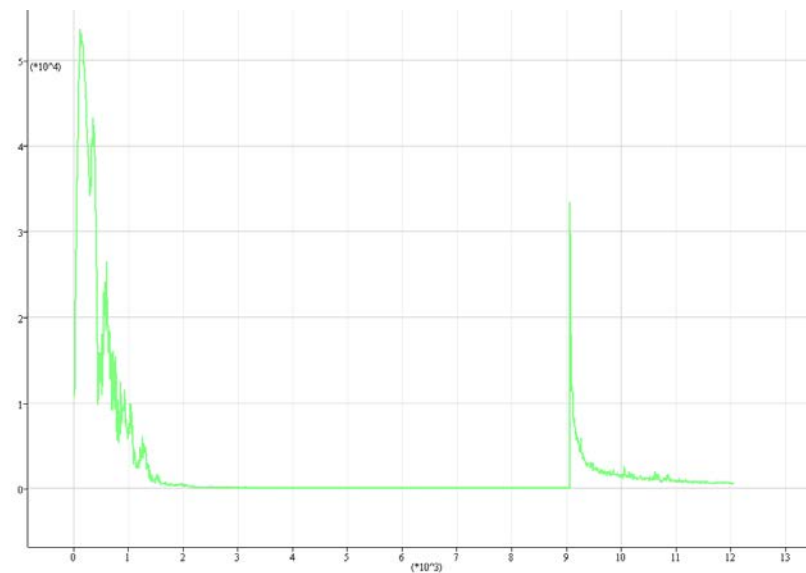


Fig.66: Riepilogo delle forze non bilanciate con falda a 1 metro dal piano campagna

Analogamente al caso precedente, le forze non si bilanciano, sintomo di un'instabilità che persiste anche quando la falda è al di sotto di un metro rispetto al piano campagna (Fig.66).

A conferma dell'instabilità il fattore di sicurezza risultante assume valori di 0.93. In Fig.67 sono inoltre riportati i vettori velocità e gli indicatori di plasticizzazione.

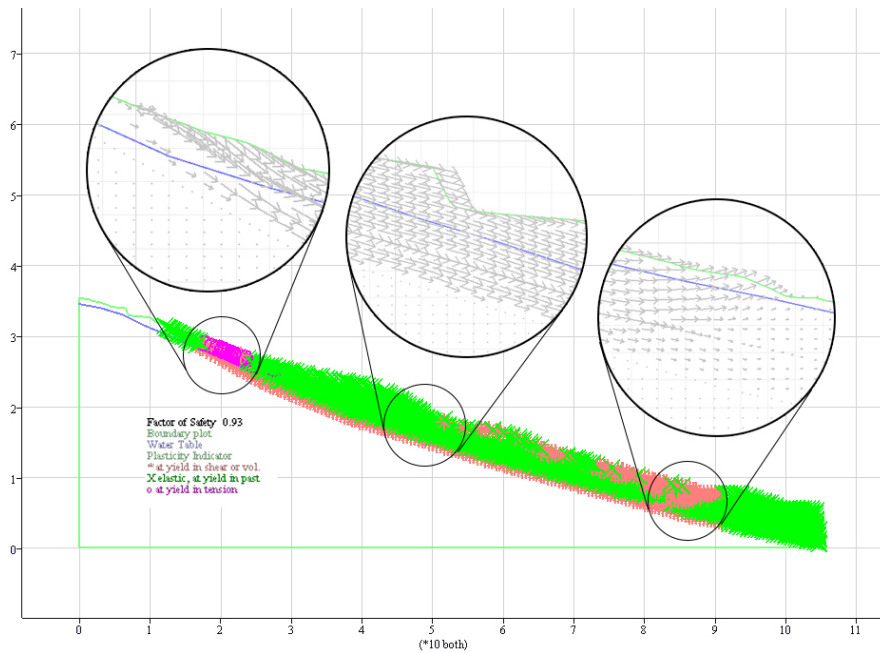


Fig.67: Sezione di Carrè in cui all'interno delle circonferenze sono evidenziate le direzioni dei vettori velocità (in grigio), mentre le campiture rappresentano gli indicatori di plasticizzazione (viola: sforzo in trazione; verde: sforzo subito in passato; rosa: sforzo di taglio o compressione)

### 5.3.3. Falda a 2 metri dal piano campagna

In Fig.68 lo spostamento lungo la direzione x, associato alla profondità della falda di 2 metri dal piano campagna, corrisponde a 22 centimetri.

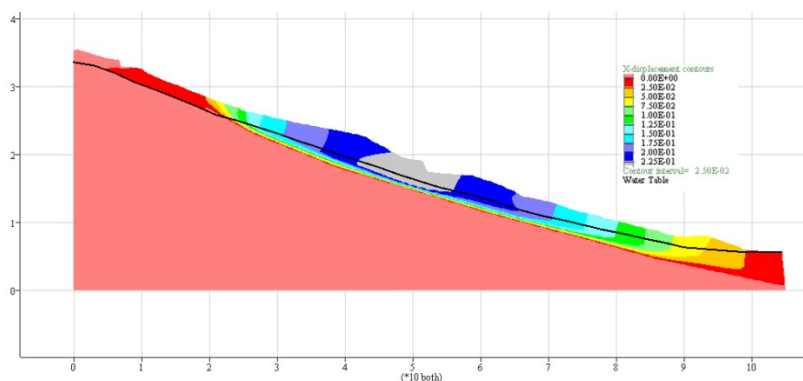


Fig.68: X-displacement della frana di Carrè con falda a 2 m di profondità dal piano campagna. La tavola d'acqua è contrassegnata da una linea nera

Diversamente dalle altre configurazioni, quando la falda si trova a una profondità di 2 metri dal piano campagna, le forze si bilanciano, poiché dopo circa 27000

step, la differenza tra lo stato tensionale finale e quello iniziale si annulla. Il FoS calcolato, infatti, restituisce un valore di 1.07 (Fig.69). Nonostante il valore sia maggiore di 1, è comunque non accettabile perché inferiore a 1.3.

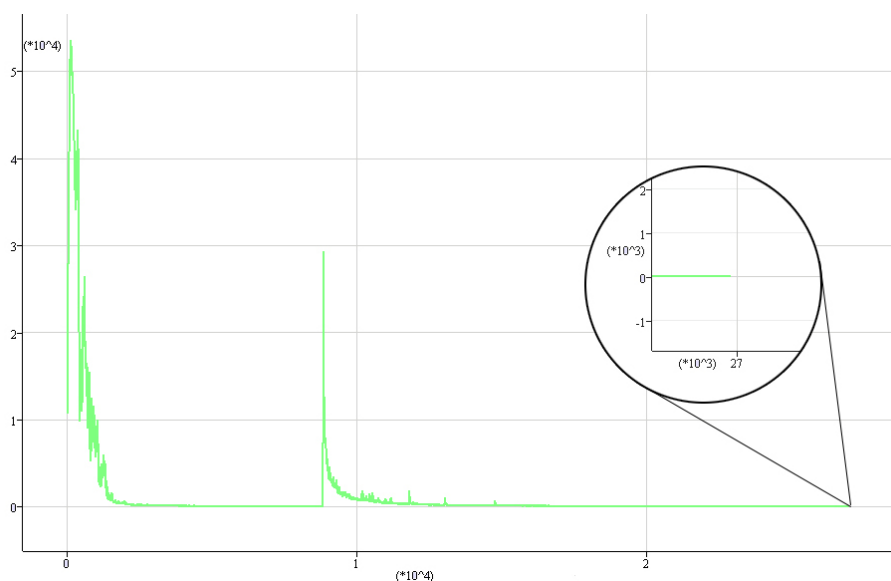


Fig.697: Riepilogo del bilanciamento delle forze con falda a 2 metri dal piano campagna

### 5.3.4. Falda a 3 metri dal piano campagna

In Fig.70 lo spostamento massimo è pari a 10 centimetri e il fattore di sicurezza calcolato restituisce un valore di 1.18.

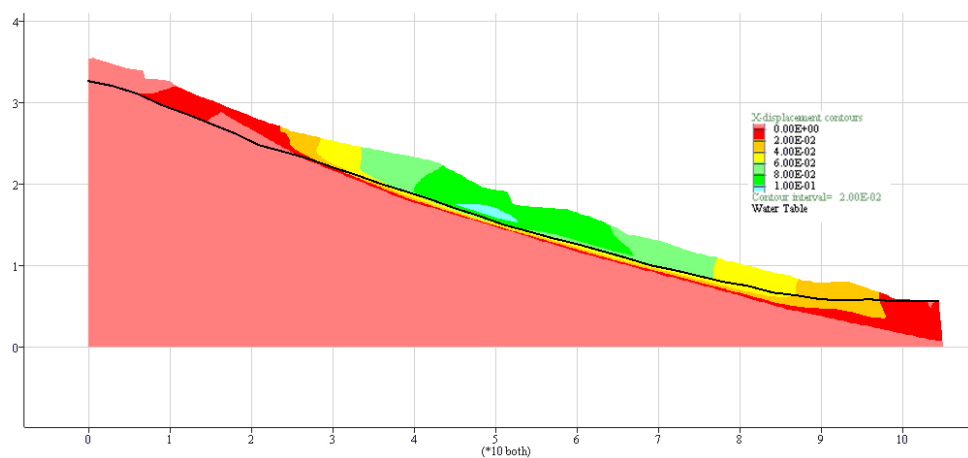


Fig.70: X-displacement della frana di Carrè con falda a 3 m di profondità dal piano campagna. La tavola d'acqua è contrassegnata da una linea nera

Nonostante il fattore di sicurezza relativo all'ultima casistica simulata sia superiore all'unità, in cui, quindi, le resistenze disponibili sono superiori a quelle mobilizzate, è stato deciso di verificare cosa avviene in assenza di falda, allo scopo di valutare quale sia il valore assunto dal fattore sicurezza senza l'influenza dell'acqua.

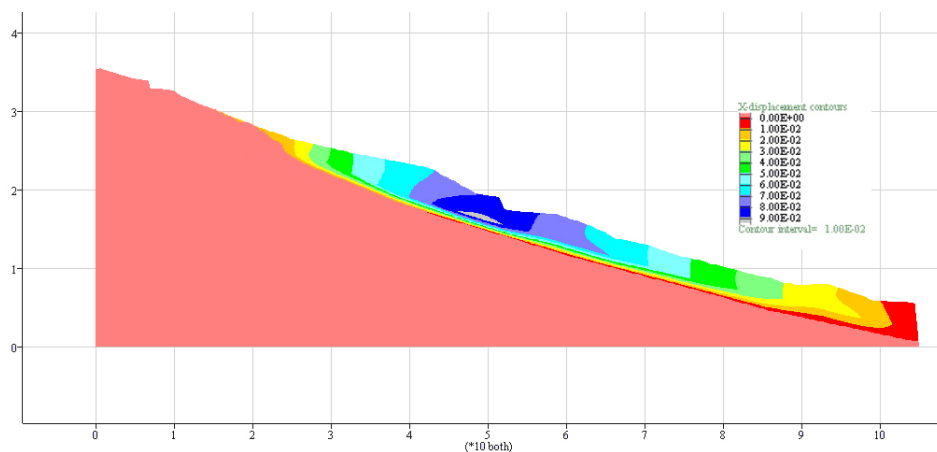


Fig.71: X-displacement della frana di Carrè in assenza di falda

Lo spostamento che ne deriva è pari a 9 centimetri, quindi sussiste una minima differenza tra il caso della falda a 3 metri e la condizione in assenza di falda (Fig.71). Il FoS che ne risulta, infatti, corrisponde a 1.24.

Considerando i risultati ottenuti dall'analisi di stabilità, simulando la falda a varie profondità, il terreno di Carrè risulta essere più instabile rispetto a quello di Gamba.

## 6. CONCLUSIONI

I fenomeni gravitativi presi in considerazione in questa tesi ricalcano le dinamiche di versante che molto frequentemente coinvolgono sia le colline del Marosticano che i Monti Lessini. In seguito all'alterazione e all'assorbimento dell'acqua, le caratteristiche della roccia madre vengono gradualmente perdendo origine a una coltre argillosa che molto spesso viene coinvolta nei movimenti di massa. Nel territorio vicentino le suddette coltri sono generalmente prodotte dell'alterazione delle rocce vulcaniche, costituite principalmente da basalti e tufi.

Il confronto dei risultati ottenuti dalle prove geotecniche di laboratorio e dalle analisi diffrattometriche ha consentito l'individuazione di tre orizzonti con diverse caratteristiche geotecniche e mineralogiche.. Dall'analisi granulometrica emerge che i due tipi di terreno in questione sono ad ogni modo molto simili: il deposito della frana di Carrè è classificato come un *limo argilloso con sabbia*, mentre il deposito della frana di Gamba è classificabile come *limo sabbioso argilloso*. Il coefficiente di uniformità per entrambi i terreni diminuisce progressivamente all'aumentare della profondità, acquisendo quindi una maggiore omogeneità ( $C_u = 20$ ). L'esecuzione dei limiti di Atterberg sui terreni di Carrè ha evidenziato una variazione dei valori di limite liquido a 2 metri e 3.5 metri dal piano campagna. I valori più elevati di indice di plasticità sono complessivamente compresi tra 30% e 40%. Mentre, per quanto riguarda Gamba, la maggiore variazione dei valori di limite liquido ha luogo a una profondità di circa 2 metri e 4.5 metri. L'indice di plasticità assume valori compresi tra 40% e 50%. Si nota come gli indici di plasticità assumano quindi valori medio-alti in entrambe le frane, ossia come il terreno abbia un comportamento sostanzialmente *plastico* per un ampio range in termini di contenuto d'acqua. Tipicamente l'indice di plasticità assume valori elevati in presenza di minerali argillosi, in particolare il valore dipende dalla percentuale e dalla tipologia di argilla e dai cationi adsorbiti (Lancellotta, 1987).

I risultati delle prove geotecniche trovano quindi riscontro nelle analisi mineralogiche. Le fasi presenti nei due depositi sono pressoché le stesse, poiché la roccia madre è di natura vulcanica effusiva basica: nonostante da entrambe le parti

siano presenti plagioclasti (albite e andesina), k-feldspati e clinopirosseni nelle fasi residuali, l'elemento preponderante è senza dubbio la montmorillonite, particolare tipologia di argilla nota come smectite, la cui quantità varia complessivamente dal 51% all'89% nella frana di Gamba e dal 47% al 90% in quella di Carrè.

Considerando che la montmorillonite ha un forte potere espansivo in presenza di acqua, al verificarsi di un'intensa precipitazione, la pressione interstiziale generalmente tende ad aumentare soprattutto negli orizzonti in cui questa fase risulta essere più abbondante, con una conseguente diminuzione delle pressioni efficaci e quindi della resistenza al taglio disponibile. Ne deriva la presenza di strati con caratteristiche più scadenti in corrispondenza dei quali è possibile ipotizzare si sia impostata la superficie di scivolamento della frana.

Per quanto riguarda la possibilità di simulare la distribuzione ed eventuale variazione dello stato tenso-deformativo nei pendii, il passo fondamentale consiste nella definizione del modello geotecnico, tenendo in considerazione tutti gli studi già realizzati e i progetti di sistemazione, validati dai risultati delle prove eseguite in questa tesi. A supporto di ciò che è stato precedentemente affermato, si può dedurre che i piani di scivolamento di entrambe le frane possano collocarsi a una profondità compresa tra i 3 e i 4 metri, intervallo in cui si è individuato un'elevata variazione dell'indice di plasticità e di contenuto in smectite. La definizione di tale modello ha consentito di compiere un passo molto importante per l'intero processo di analisi che prevede la realizzazione delle analisi di stabilità per entrambi i versanti. Quest'ultime sono state quindi predisposte simulando varie casistiche con presenza di una falda approssimativamente parallela al versante a differenti profondità al fine di poter comprendere quali siano le condizioni limite per la stabilità del versante. Non a caso è stata scelta un'analisi che coinvolga l'acqua, poiché gli eventi meteorici eccezionali, che frequentemente colpiscono queste zone, rappresentano i principali responsabili dell'innescare del movimento franoso.

La modellazione numerica prevede un modello concettuale a tre strati e il cui movimento viene simulato in corrispondenza dell'orizzonte B, al quale sono state assegnate caratteristiche di resistenza scadenti. I parametri di resistenza ( $c$ ,  $\phi$ ) sono stati desunti da precedenti studi e da relazioni geologiche, tenendo conto che i valori scelti fossero conformi con i dati presenti in letteratura. La scelta di

assegnare al modello geotecnico caratteristiche simili ai due terreni è dovuta principalmente ai molti punti in comune tra le due frane, in particolare dal punto di vista geotecnico il comportamento plastico delle coltri argillose, dal punto di vista mineralogico l'abbondanza di smectite e dal punto di vista petrografico la litologia vulcanica di natura basica della roccia madre. Inoltre sussistono analogie anche dal punto di vista geomorfologico, poiché i due versanti sono caratterizzati da pendenze del tutto confrontabili. Mediante il calcolo del fattore di sicurezza, è stato possibile determinare la profondità della falda alla quale il versante è considerato instabile. Il valore del fattore di sicurezza discriminante le condizioni di stabilità da quelle di instabilità è considerato pari a 1.3, tenendo conto che generalmente la scelta del valore è a discrezione del tecnico competente. Per quanto riguarda Gamba, solo quando la falda si trova a una profondità maggiore di 2 metri dal piano campagna, il fattore di sicurezza risulta accettabile, restituendo un valore di 1.28. Sarà quindi necessario mantenere la falda al di sotto di questa quota per garantire il margine di sicurezza prefissato di 1.3. Per Carrè invece, è stata simulata la presenza di una falda a circa 3 metri dal piano campagna e il fattore di sicurezza che ne risulta è pari a 1.18. Al fine di ottenere un valore maggiore del fattore di sicurezza (coerentemente al caso precedente), occorre quindi non solo intervenire ai fini di abbattimento della falda al di sotto dei 3 metri dal piano campagna, ma anche di operare direttamente sulla morfologia del versante, ricorrendo ad esempio alla rimodellazione dello stesso o considerando eventualmente altre tipologie di opere di stabilizzazione.



# Allegati

## Allegato 1

Risultati delle prove geotecniche di laboratorio relative ai campioni di Gamba

| Campione | Profondità | Wl [%] | Wp [%] | Ip [%] | % ghiaia | %sabbia | %limo | %argilla |
|----------|------------|--------|--------|--------|----------|---------|-------|----------|
| GAMBA01  | 0.00-0.30  | 67     | 43     | 24     | 0.00     | 14.88   | 70.42 | 14.70    |
| GAMBA02  | 0.30-0.60  | 69     | 43     | 26     | 0.00     | 24.73   | 60.54 | 14.73    |
| GAMBA03  | 0.60-0.90  | 75     | 44     | 31     | 0.00     | 20.39   | 63.33 | 16.28    |
| GAMBA04  | 0.90-1.20  | 74     | 43     | 31     | 0.00     | 23.00   | 63.00 | 14.00    |
| GAMBA05  | 1.20-1.50  | 76     | 44     | 32     | 0.00     | 13.48   | 65.83 | 20.69    |
| GAMBA06  | 1.50-2.00  | 92     | 41     | 51     | 0.00     | 18.55   | 63.35 | 18.10    |
| GAMBA07  | 2.00-2.50  | 78     | 40     | 38     | 0.00     | 23.94   | 58.37 | 17.69    |
| GAMBA08  | 2.50-3.00  | 80     | 43     | 37     | 0.00     | 21.82   | 59.07 | 19.11    |
| GAMBA09  | 3.00-3.50  | 72     | 42     | 30     | 0.00     | 21.9    | 62.82 | 15.28    |
| GAMBA10  | 3.50-4.00  | 69     | 45     | 24     | 0.00     | 43.16   | 48.55 | 8.29     |
| GAMBA11  | 4.00-4.50  | 68     | 46     | 22     | 0.00     | 34.21   | 55.78 | 10.01    |
| GAMBA12  | 4.50-5.00  | 73     | 32     | 41     | 0.00     | 41.35   | 49.53 | 9.12     |
| GAMBA13  | 5.00-5.50  | 53     | 39     | 14     | 0.00     | 24.99   | 63.34 | 11.67    |
| GAMBA14  | 5.50-6.50  | 62     | 45     | 17     | 0.00     | 37.23   | 53.01 | 9.76     |
| GAMBA15  | 6.50-7.50  | 70     | 48     | 22     | 0.00     | 46.46   | 44.02 | 9.52     |
| GAMBA16  | 7.50-8.50  | 61     | 40     | 21     | 0.00     | 47.37   | 45.45 | 7.18     |
| GAMBA17  | 8.50-9.50  | 56     | 38     | 18     | 0.00     | 50.44   | 49.56 | 0.00     |
| GAMBA18  | 9.50-10.00 | 61     | 42     | 19     | 0.00     | 31.13   | 69.87 | 0.00     |

## Allegato 2

Risultati delle prove geotecniche di laboratorio relative ai campioni di Carrè

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

## Allegato 3

Risultati della analisi mineralogiche relative ai campioni di Gamba

| Campione | Prof | Mtn   | Ab    | Ana  | Aug  | Cln  | Gth  | Hem  | Kaol  | Mgn  | Ms    | Qtz   | Snd  |
|----------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|------|
| GAMBA01  | 0.15 | 66.55 | 6.85  | 0.06 | 0.00 | 1.65 | 5.51 | 0.78 | 5.42  | 0.69 | 6.70  | 4.69  | 1.11 |
| GAMBA02  | 0.45 | 69.49 | 8.19  | 0.48 | 1.21 | 0.42 | 0.22 | 2.09 | 9.55  | 0.82 | 4.35  | 3.19  | 0.00 |
| GAMBA03  | 0.75 | 65.07 | 0.34  | 1.93 | 0.00 | 0.97 | 5.09 | 1.76 | 10.51 | 1.65 | 5.22  | 7.45  | 0.00 |
| GAMBA04  | 1.05 | 62.86 | 6.45  | 1.36 | 0.00 | 1.87 | 2.77 | 2.43 | 9.34  | 1.73 | 4.31  | 6.89  | 0.00 |
| GAMBA05  | 1.35 | 51.23 | 5.56  | 1.66 | 0.00 | 4.12 | 5.60 | 2.00 | 10.23 | 1.59 | 8.51  | 9.51  | 0.00 |
| GAMBA06  | 1.75 | 58.25 | 5.98  | 2.16 | 0.00 | 1.55 | 5.99 | 1.39 | 8.73  | 0.85 | 5.93  | 9.16  | 0.00 |
| GAMBA07  | 2.25 | 51.36 | 4.28  | 0.92 | 0.00 | 3.41 | 5.76 | 0.86 | 12.35 | 0.37 | 10.26 | 10.43 | 0.00 |
| GAMBA08  | 2.75 | 62.27 | 4.51  | 1.28 | 0.00 | 0.80 | 5.78 | 0.67 | 10.57 | 0.08 | 6.52  | 7.54  | 0.00 |
| GAMBA09  | 3.25 | 56.88 | 4.93  | 1.17 | 0.00 | 1.53 | 4.87 | 0.69 | 13.28 | 0.29 | 7.35  | 9.03  | 0.00 |
| GAMBA10  | 3.75 | 83.15 | 5.97  | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.17 | 1.02 | 5.46  | 0.24 | 0.00  | 0.00  | 0.00 |
| GAMBA11  | 4.25 | 70.36 | 4.64  | 0.58 | 0.00 | 0.36 | 2.97 | 1.20 | 9.86  | 0.23 | 5.04  | 4.77  | 0.00 |
| GAMBA12  | 4.75 | 85.31 | 1.21  | 2.81 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.03 | 0.00  | 0.60 | 7.04  | 0.00  | 0.00 |
| GAMBA13  | 5.25 | 85.05 | 2.10  | 1.02 | 3.23 | 0.00 | 6.71 | 1.58 | 0.00  | 0.33 | 0.00  | 0.00  | 0.00 |
| GAMBA14  | 6.00 | 72.64 | 2.00  | 2.51 | 0.00 | 0.00 | 4.57 | 2.91 | 15.18 | 0.20 | 0.00  | 0.00  | 0.00 |
| GAMBA15  | 7.00 | 89.46 | 4.11  | 0.30 | 0.00 | 0.00 | 4.48 | 1.26 | 0.00  | 0.39 | 0.00  | 0.00  | 0.00 |
| GAMBA16  | 8.00 | 82.36 | 2.66  | 0.96 | 0.00 | 0.00 | 5.98 | 1.20 | 0.00  | 0.35 | 0.00  | 0.00  | 0.00 |
| GAMBA17  | 9.00 | 77.71 | 13.11 | 0.00 | 0.78 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 5.92  | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 2.22 |
| GAMBA18  | 9.75 | 81.87 | 8.20  | 0.00 | 1.88 | 0.00 | 2.87 | 0.99 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | 0.00  | 4.20 |

Mtn = Montmorillonite, Ab = Albite , Ana = Anatasio, Aug = Augite, Cln = Clinocloro,  
 Gth = Goethite, Hem =Ematite, Kaol = Caolinite, Mgn = Magnetite, Ms = Muscovite,  
 Qtz = Quarzo, Snd = Sanidino

## Allegato 4

Risultati delle analisi mineralogiche relative ai campioni di Carrè

| 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 5

Risultati relativi all'indice di attività A, d50 e Cu

| <b>Campione</b> | <b>d50 [mm]</b> | <b>Cu [-]</b> | <b>A [-]</b> | <b>Campione</b> | <b>d50 [mm]</b> | <b>Cu [-]</b> | <b>A [-]</b> |
|-----------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|--------------|
| <b>CARRE01</b>  | 0.018           | 32.00         | 1.58         | <b>GAMBA01</b>  | 0.017           | 28.00         | 1.06         |
| <b>CARRE02</b>  | 0.015           | 76.67         | 1.16         | <b>GAMBA02</b>  | 0.021           | 31.67         | 0.71         |
| <b>CARRE03</b>  | 0.018           | 33.33         | 1.40         | <b>GAMBA03</b>  | 0.015           | 20.00         | 1.20         |
| <b>CARRE04</b>  | 0.02            | 33.00         | 2.37         | <b>GAMBA04</b>  | 0.016           | 21.54         | 1.25         |
| <b>CARRE05</b>  | 0.035           | 22.73         | 3.51         | <b>GAMBA05</b>  | 0.011           | 38.00         | 3.18         |
| <b>CARRE06</b>  | 0.035           | 52.00         | 1.04         | <b>GAMBA06</b>  | 0.015           | 22.00         | 2.33         |
| <b>CARRE07</b>  | 0.028           | 36.67         | 3.51         | <b>GAMBA07</b>  | 0.015           | 13.53         | 1.87         |
| <b>CARRE08</b>  | 0.043           | 28.57         | 4.67         | <b>GAMBA08</b>  | 0.016           | 44.00         | 2.69         |
| <b>CARRE09</b>  | 0.025           | 28.33         | 2.60         | <b>GAMBA09</b>  | 0.018           | 25.45         | 1.39         |
| <b>CARRE10</b>  | 0.031           | 45.45         | 2.45         | <b>GAMBA10</b>  | 0.043           | 27.20         | 0.72         |
| <b>CARRE11</b>  | 0.05            | 13.66         | 2.97         | <b>GAMBA11</b>  | 0.03            | 22.50         | 1.67         |
| <b>CARRE12</b>  | 0.037           | 29.44         | 1.13         | <b>GAMBA12</b>  | 0.037           | 26.09         | 1.00         |
| <b>CARRE13</b>  | 0.036           | 35.63         | 2.17         | <b>GAMBA13</b>  | 0.024           | 21.11         | 1.50         |
| <b>CARRE14</b>  | 0.031           | 27.22         | 2.15         | <b>GAMBA14</b>  | 0.038           | 21.20         | 0.82         |
| <b>CARRE15</b>  | 0.023           | 31.82         | 1.70         | <b>GAMBA15</b>  | 0.049           | 29.58         | 0.47         |
| <b>CARRE16</b>  | 0.025           | 28.33         | 2.50         | <b>GAMBA16</b>  | 0.055           | 20.86         | 0.45         |
| <b>CARRE17</b>  | 0.008           | 20.00         | 1.94         | <b>GAMBA17</b>  | 0.05            | 17.78         | 0.00         |
| <b>CARRE18</b>  | 0.08            | 10.83         | 1.41         | <b>GAMBA18</b>  | 0.04            | 18.18         | 0.00         |
| <b>CARRE19</b>  | 0.042           | 20.00         | 1.41         |                 |                 |               |              |

## Allegato 6: Gamba

```
config
grid 200,100
m m
set gravity=9.81
;-----
;GEOMETRIA PENDIO
;-----
gen 0,0 0,28 77,28 77,0
table 1 0,0 0,27.35 2.76,26.87 4.77,26.45 6.73,26.02
8.79,25.55 10.75,25.12 12.81,24.59 14.87,24.22 19.74,23.70
23.50,23.22 31.65,21.90 39.11,20.73 45.46,19.67 48.74,18.93
51.97,18.30 54.40,17.93 56.15,17.19 58.90,16.39 62.76,15.44
65.73,14.65 70.28,13.38 73.56,12.58 76.58,11.84 77,0
gen table 1
table 2 0,26.86 2.14,26.47 4.12,26.07 6.03,25.59 8.33,25.04
10.71,24.48 13.33,23.93 15.79,23.05 18.09,22.66 23.34,21.49
30.99,19.81 37.37,18.50 42.48,17.53 47.30,16.66 51.81,15.82
54.95,15.44 58.07,14.78 60.74,14.42 63.95,13.49 66.56,13.00
70.07,12.26 71.89,11.96 74.31,11.39 76.54,10.88
gen table 2
table 3 0,24.36 2.12,24.03 3.90,23.64 5.62,23.11 6.88,22.64
8.47,22.18 10.19,21.85 11.57,21.19 12.77,20.79 13.56,20.20
55.16,13.25 76.53,8.95
gen table 3
ini x 9.644887 y 25.04669 i 26 j 91
ini x 9.742516 y 25.35178 i 27 j 92
ini x 11.890348 y 24.521936 i 32 j 89
ini x 12.061199 y 24.790415 i 33 j 90
ini x 4.6658187 y 26.23044 i 13 j 95
ini x 4.812262 y 26.450104 i 14 j 96
ini x 3.421052 y 26.511122 i 10 j 96
ini x 3.604106 y 26.70638 i 11 j 97
ini x 2.2495065 y 26.681973 i 7 j 97
ini x 1.9932308 y 26.791805 i 6 j 97
ini x 2.0664525 y 26.999266 i 7 j 98
ini x 2.3593388 y 26.938248 i 8 j 98
ini x -0.008159637 y 27.365376 i 1 j 98
ini x 0.6996491 y 27.023674 i 3 j 98
ini x 0.38235545 y 27.03588 i 2 j 98
ini x 0.3579483 y 27.304358 i 2 j 99
ini x 0.18709803 y 27.328764 i 1 j 99
ini x 0.7118528 y 27.255543 i 3 j 99
ini x 0.9315175 y 27.170118 i 4 j 99
unmark i 13 j 95
unmark i 10 j 96
unmark i 7 j 97
unmark i 6 j 97
unmark i 3 j 98
unmark i 2 j 98
unmark i 26 j 91
unmark i 32 j 89
mark i 14 j 96
mark i 8 j 98
mark i 7 j 98
```

```

mark i 4 j 99
mark i 3 j 99
mark i 2 j 99
mark i 1 j 99
mark i 11 j 97
mark i 27 j 92
mark i 33 j 90
model null region 183 78
group 'null' region 183 78
group delete 'null'
fix x y j 1
fix x i 1 j 1 98
fix x i 201 j 1 19
fix x i 200 j 20 43
group 'ini:elastic' region 127 23
model elastic group 'ini:elastic'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 group 'ini:elastic'
group 'ini:mohr-coulomb' region 122 55
model mohr group 'ini:mohr-coulomb'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12
friction=40.0 dilation=0.0 tension=1000000.0 group
'ini:mohr-coulomb'
group 'ini:mohr-coulomb' region 123 65
model mohr group 'ini:mohr-coulomb'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12
friction=40.0 dilation=0.0 tension=1000000.0 group
'ini:mohr-coulomb'
history 999 unbalanced
solve elastic
ini xdisp=0
ini ydisp=0
group 'def:vulcanoclastiti' region 154 33
model mohr group 'def:vulcanoclastiti'
prop density=2700.0 bulk=3.32E10 shear=1.32E10
cohesion=6.27E7 friction=40.0 dilation=0.0 tension=1.31E7
group 'def:vulcanoclastiti'
group 'def:eluvium' region 152 51
model mohr group 'def:eluvium'
prop density=1900.0 bulk=1E6 shear=5E5 cohesion=4000.0
friction=14.0 dilation=0.0 tension=4000.0 group
'def:eluvium'
group 'def:colluvium' region 144 62
model mohr group 'def:colluvium'
prop density=1900.0 bulk=5E6 shear=2E6 cohesion=10000.0
friction=23.0 dilation=0.0 tension=10000.0 group
'def:colluvium'
table 4 0,27.35 2.76,26.87 4.77,26.45 6.73,26.02 8.79,25.55
10.75,25.12 12.81,24.59 14.87,24.22 19.74,23.70 23.50,23.22
31.65,21.90 39.11,20.73 45.46,19.67 48.74,18.93 51.97,18.30
54.40,17.93 56.15,17.19 58.90,16.39 62.76,15.44 65.73,14.65
70.28,13.38 73.56,12.58 76.58,11.84
water density=1000
water table 4
history 999 unbalanced
cycle 5000

```

## Allegato 7: Carrè

```
config
grid 200 100
m m
set gravity=9.81
;-----
;GEOMETRIA PENDIO
;-----
gen 0,0 0,36 105,36 105,0
table 1 0,0 0,35.52 1.92,35 3.53,34.5 5.29,34 6.626,33.89
6.95,32.87 9.96,32.62 10.76,32 11.9,31.5 13.01,31 14.13,30.5
15.35,30.08 16.68,29.5 18.01,29 19.34,28.5 20.67,28
22.01,27.5 23.43,27.13 24.92,26.39 26.91,26 28.97,25.5
31.04,25 32.63,24.63 33.46,24.5 36.08,24 38.69,23.5
39.59,23.35 41.29,23 43.08,22.58 43.91,22 44.77,21.5
45.67,21.15 46.58,20.5 47.51,20.11 48.57,19.46 51.44,19
52.17,17.5 53.25,17.25 56.33,17 58.95,16.78 60.16,16.38
61.5,16 62.71,15.5 63.85,15 64.99,14.5 66.13,13.76
67.72,13.5 69.87,13 71.63,12.5 73.1,12 74.69,11.5
76.61,11.07 78.58,10.5 80.55,10 82.51,9.5 84.47,9 86.21,8.73
87.8,8 88.73,8 89.43,7.81 93.23,7.95 94.6,7.5 96.12,7
97.71,6.5 99.11,5.82 104.45,5.56 105,0
gen table 1
table 2 19.34,28.5 26.23,24.93 38.57,19.32 61.03,12.84
77.18,8.20 85.67,6.41 105,2
gen table 2
table 3 11.9,31.5 17.71,27.91 26.23,23.13 38.57,18.12
61.03,11.34 77.18,7.01 85.67,4.61 105,0.5
gen table 3
;-----
; CORREZIONI GEOM STRATI
;-----
ini x 17.40848 y 28.535555 i 34 j 80
ini x 16.812855 y 28.932638 i 33 j 81
ini x 17.056776 y 28.319994 i 33 j 79
ini x 15.978978 y 29.324049 i 31 j 82
ini x 16.517878 y 28.643333 i 32 j 80
ini x 15.366338 y 29.687092 i 30 j 83
ini x 14.731004 y 30.08985 i 29 j 84
ini x 15.116743 y 29.516914 i 29 j 82
ini x 14.57217 y 29.851599 i 28 j 83
ini x 13.324194 y 30.719511 i 26 j 86
ini x 13.806367 y 30.48126 i 27 j 85
ini x 12.467628 y 31.196012 i 24 j 87
ini x 12.711552 y 30.991793 i 24 j 86
ini x 12.9677 y 30.833696 i 25 j 86
ini x 13.231165 y 30.678717 i 25 j 85
ini x 12.359406 y 31.20952 i 24 j 87
ini x 12.068821 y 31.39162 i 24 j 88
ini x 12.07657 y 31.39162 i 24 j 88
ini x 14.344623 y 30.168228 i 28 j 84
ini x 14.24664 y 30.04962 i 27 j 83
ini x 13.731697 y 30.373718 i 26 j 84
ini x 15.703501 y 29.150702 i 30 j 81
ini x 24.264723 y 26.306215 i 47 j 74
```

```

ini x 23.933094 y 26.125326 i 46 j 73
ini x 23.189438 y 26.848883 i 45 j 75
ini x 22.506079 y 27.130266 i 44 j 76
ini x 23.018599 y 26.597649 i 44 j 74
ini x 22.35534 y 26.949377 i 43 j 75
ini x 21.601633 y 27.461897 i 42 j 77
ini x 21.521238 y 27.381502 i 41 j 76
ini x 20.86 y 27.711803 i 40 j 77
ini x 20.07432 y 28.095507 i 39 j 78
ini x 20.101728 y 28.104643 i 39 j 78
unmark i 34 j 80
unmark i 33 j 81
unmark i 31 j 82
unmark i 30 j 83
unmark i 29 j 84
unmark i 28 j 84
unmark i 27 j 85
unmark i 26 j 86
mark i 33 j 79
mark i 32 j 80
mark i 30 j 81
mark i 29 j 82
mark i 28 j 83
mark i 27 j 83
mark i 26 j 84
mark i 25 j 85
mark i 24 j 86
unmark i 47 j 74
unmark i 45 j 75
unmark i 44 j 76
unmark i 42 j 77
mark i 44 j 74
mark i 43 j 75
mark i 41 j 76
mark i 40 j 77
mark i 39 j 78
ini x 19.620335 y 28.263977 i 38 j 79
ini x 20.096836 y 27.861221 i 39 j 78
ini x 19.972038 y 28.099472 i 39 j 79
ini x 20.045782 y 28.133507 i 39 j 79
ini x 20.108181 y 28.156197 i 39 j 79
ini x 20.232979 y 28.037073 i 39 j 78
ini x 19.97771 y 28.07678 i 38 j 78
ini x 20.0004 y 28.088125 i 38 j 78
ini x 19.983383 y 28.468191 i 39 j 80
ini x 19.750805 y 28.360413 i 38 j 79
ini x 19.733788 y 28.360413 i 38 j 79
ini x 19.728115 y 28.326376 i 38 j 79
ini x 19.71677 y 28.309359 i 38 j 79
ini x 20.04011 y 28.133507 i 38 j 78
ini x 19.903965 y 28.286669 i 39 j 80
ini x 20.164907 y 28.18456 i 40 j 80
unmark i 39 j 79
mark i 40 j 80
mark i 38 j 78
ini x 24.69472 y 26.116776 i 48 j 73

```

```

ini x 24.507523 y 25.823502 i 47 j 72
ini x 22.19253 y 27.246191 i 43 j 76
ini x 22.049011 y 27.090195 i 42 j 75
unmark i 43 j 76
unmark i 48 j 73
mark i 47 j 72
mark i 46 j 73
mark i 42 j 75
ini x 21.274296 y 27.622627 i 41 j 77
ini x 21.19861 y 27.532387 i 40 j 76
ini x 20.645302 y 27.898777 i 40 j 78
ini x 20.560213 y 27.876087 i 39 j 77
ini x 20.74741 y 26.996832 i 40 j 75
ini x 20.219854 y 26.503313 i 39 j 74
ini x 20.33898 y 27.206718 i 39 j 76
ini x 19.851135 y 27.700235 i 38 j 77
unmark i 41 j 77
unmark i 40 j 78
mark i 40 j 76
mark i 39 j 77
mark i 39 j 74
unmark i 40 j 75
ini x 104.45759 y 2.4774923 i 200 j 8
ini x 104.739426 y 2.6575594 i 201 j 9
unmark i 200 j 8
mark i 201 j 9
ini x 12.791166 y 31.005337 i 25 j 87
ini x 12.440886 y 31.204727 i 25 j 88
ini x 12.376218 y 31.296339 i 25 j 89
ini x 12.893556 y 31.048449 i 26 j 88
ini x 12.613332 y 31.177782 i 26 j 89
unmark i 25 j 87
unmark i 25 j 88
mark i 26 j 88
mark i 26 j 89
mark i 25 j 89
model null region 151 67
group 'null' region 151 67
group delete 'null'
;-----
;CONDIZIONI AL CONTORNO
;-----
fix x i 1 j 1 99
fix x i 201 j 1 8
fix x i 200 j 9 16
fix x i 201 j 9
fix x i 199 j 16
fix x y j 1
;-----
; MATERIALI PER INIZIALIZZAZIONE
;-----
group 'ini:elastic' region 97 5
model elastic group 'ini:elastic'
prop density=2600.0 bulk=1E6 shear=1E6 group 'ini:elastic'
group 'ini:mohr-coulomb' region 54 64
model mohr group 'ini:mohr-coulomb'

```

```

prop density=2600 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12
friction=40.0 dilation=0.0 tension=1000000.0 group
'ini:mohr-coulomb'
group 'ini:mohr-coulomb' region 64 65
model mohr group 'ini:mohr-coulomb'
prop density=2600 bulk=1E6 shear=1E6 cohesion=1.0E12
friction=40.0 dilation=0.0 tension=1000000.0 group
'ini:mohr-coulomb'
history 999 unbalanced
solve elastic
;-----
;MATERIALI DEF
;-----
ini xdisp=0
ini ydisp=0
group 'def:basalto' region 91 8
model mohr group 'def:basalto'
prop density=2700.0 bulk=3.32E10 shear=1.32E10
cohesion=6.27E7 friction=40.0 dilation=0.0 tension=1.31E7
group 'def:basalto'
group 'def:eluvium' region 117 33
model mohr group 'def:eluvium'
prop density=1900.0 bulk=1E6 shear=5E5 cohesion=5000.0
friction=15.0 dilation=0.0 tension=5000.0 group
'def:eluvium'
group 'def:colluvium' region 131 35
model mohr group 'def:colluvium'
prop density=1900.0 bulk=5E6 shear=2E6 cohesion=10000.0
friction=23.0 dilation=0.0 tension=10000.0 group
'def:colluvium'
history 999 unbalanced
solve

```

## 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. Lincei 21 (Suppl 1): S51-S71

Bruschi A., Crippa F. A. (2012) Prove geotecniche di laboratorio Ed. Dario Flaccovio, Palermo

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.

Colombo P. & Colleselli F. (2000) Elementi di geotecnica. Ed. Zanichelli, Bologna

De Vecchi G. (1976) Tertiary volcanism in the Veneto: Magmatology, petrogenesis and geodynamic implications. Geologische Rundschau, Volume 65: pp. 701-710

Gonzalez de Vallejo Luis I. (2005) Geoingegneria Ed. Pearson, Milano

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

Lancellotta R. (1987) Geotecnica Ed. Zanichelli, Bologna:2-18

Lombardi G. & Mattias P. (1987) The kaolin deposit of Italy. L'industria Mineraria, 38/6:1-34

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

Moore D.M. & Reynolds R.C. Jr. (1997) X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals, 2nd ed. Oxford, New York: 378 pp.

Nestola F. Dispense di Metodologie Analitiche (2012-2013)

Piccoli G. (1966) Subaqueous and Subaerial Basic Volcanic Eruptions in the Paleogene of Lessinian Alps (Southern Alps, N-E Italy)

Rietveld H. M. (1969) A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal of Applied Crystallography*, 2: 65-71.

Varnes D.J. (1978) Slope movements, type and process. Schuster R.L., Krizek R.J., eds., *Landslides analysis and control*. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., Special Report 76: 11-33.



# RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare il Prof. Mario Floris per l'interessante lavoro proposto e per i suggerimenti utili per la realizzazione della tesi.

Ringrazio il Dott. Geol. Enrico Busnardo per l'aiuto fornito durante l'attività di campagna e per le chiacchierate geologiche.

Ringrazio Michele Secco per le spiegazioni approfondite riguardanti la diffrazione, la parte di elaborazione e le piacevoli discussioni mineralogiche.

Ringrazio Federico Zorzi per le esaurienti spiegazioni riguardo la componentistica del diffrattometro da polveri e la tecnica diffrattometrica.

Ringrazio la Prof.ssa Cola per la disponibilità per aver permesso l'utilizzo del Laboratorio di Geotecnica e un sentito ringraziamento per Paolo e Mattia per i consigli riguardanti l'esecuzione delle prove.

Ringrazio Micol Schepis, Laura Volpato e Riccardo Zoggia per i mesi passati insieme durante le prove di laboratorio.

Ringrazio il Prof. Rinaldo Genevois per le delucidazioni riguardo il software Flac.

Ringrazio tutti i miei amici per il supporto morale e per essermi stati vicini in questi mesi.

Ringrazio la mia famiglia, per avermi accompagnato e sostenuto in questi mesi di intenso lavoro.

Un sentito ringraziamento va a Giorgio, perché sei la persona con cui ho passato più tempo in quest'ultimo anno, perché ci sei stato nei momenti di debolezza aiutandomi ad essere più ottimista; hai contribuito ad aumentare la fiducia in me stessa e nelle mie potenzialità e ti ringrazio per avermi ascoltata quando avevo più bisogno.

Il grazie più grande va alla mia mamma, il cui pensiero mi ha sempre accompagnato e motivato a pretendere il massimo da me stessa.