



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

**ANALISI DI STABILITÀ DI SCIVOLAMENTI CHE  
COINVOLGONO DEPOSITI VULCANICI  
ALTERATI  
DELLA PROVINCIA DI VICENZA**

Relatore: Prof. Mario Floris  
Correlatore: Dott. Enrico Busnardo

Laureanda: Gloria Olivotto

ANNO ACCADEMICO 2015/2016



# Indice

INTRODUZIONE .....	5
1.INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	7
1.1. Movimenti di versante .....	11
1.2. Inquadramento geologico di dettaglio.....	12
1.2.1.Gamba di Monte di Malo .....	13
1.2.2. Fara Vicentino .....	21
1.2.3. Carrè .....	29
2. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE E MINERALOGICHE .....	35
2.1. Laboratorio geotecnico .....	35
2.1.1. Gamba di Monte di Malo .....	37
2.1.2. Fara Vicentino .....	41
2.1.3. Carrè .....	46
2.2. Laboratorio mineralogico .....	49
2.2.1. Gamba di Monte di Malo .....	50
2.2.2. Fara Vicentino .....	53
2.2.3. Carrè .....	58
2.3. Relazioni tecniche .....	61
2.3.1. Gamba di Monte di Malo .....	61
2.3.2. Fara Vicentino .....	64
2.3.3. Carrè .....	67
2.4. Considerazioni riassuntive dei dati .....	69
3. ANALISI DI STABILITA' ALL'EQUILIBRIO LIMITE .....	73
3.1. Caratteri teorici .....	73
3.2. Modellazione con Geostudio 2007 .....	80
3.3. Modellazione della frana di Gamba di Monte di Malo .....	84
3.3.1. Zonazione mineralogica .....	85

3.3.2. Zonazione geotecnica.....	87
3.4. Modellazione della frana di Fara Vicentino.....	88
3.4.1. Zonazione mineralogica .....	89
3.4.2. Zonazione geotecnica.....	91
3.5. Modellazione della frana di Carrè .....	92
3.5.1. Zonazione mineralogica .....	93
3.5.2. Zonazione geotecnica.....	95
4. RISULTATI .....	97
4.1. Risultati dell'analisi di stabilità .....	97
4.1.1. Gamba di Monte di Malo .....	97
4.1.2. Fara Vicentino .....	99
4.1.3. Carrè .....	101
5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI .....	103
BIBLIOGRAFIA.....	106
ALLEGATI .....	108
Allegato 1 .....	109
Allegato 2 .....	124
Allegato 3 .....	142

## INTRODUZIONE

La presente tesi si inserisce all'interno di un progetto di ricerca, il cui scopo consiste nell'elaborazione di un modello di stabilità globale di tre frane che interessano in particolare i Monti Lessini e le colline del Marosticano. L'attenzione è stata posta su dissesti avvenuti a seguito delle intense precipitazioni che hanno colpito la provincia di Vicenza dalla notte del 31 Ottobre alla notte del 2 Novembre. I fenomeni franosi hanno avuto luogo nel territorio comunale di Gamba di Monte di Malo, Fara Vicentino e Carrè, coinvolgendo i terreni più superficiali costituiti da depositi eluviali e colluviali originati dall'alterazione di depositi vulcanici Terziari sottostanti.

La fase iniziale del seguente elaborato consiste nella raccolta e nell'integrazione dei dati esistenti al fine di definire le caratteristiche geotecniche e mineralogiche dei terreni di dissesto. All'interno del Capitolo 2 "Caratteristiche geotecniche e mineralogiche" sono presenti i risultati di analisi geotecniche e mineralogiche e dati di relazioni tecniche professionali utilizzati come punto di partenza per l'elaborazione dell'analisi di stabilità.

Ipotizzando un modello geotecnico-mineralogico per ciascuna frana, si è successivamente utilizzata l'applicazione SLOPE/W per l'analisi di stabilità dei versanti in terra e roccia, appartenente al software Geostudio 2007. Sono stati imposti l'inizio e la fine di ciascuna superficie di scivolamento. Inoltre, basandoci sui risultati delle prove mineralogiche e geotecniche, è stato identificato lo strato con le caratteristiche geotecniche più scadenti: questo corrisponde allo strato con la maggior variazione del contenuto in montmorillonite. Si è valutato che la superficie di scivolamento si sviluppi in corrispondenza di tale strato e si è quindi, imposto un punto all'interno di tale strato per cui la superficie critica debba passare. L'obiettivo finale dell'analisi è stimare i valori dei parametri geotecnici che possano creare le condizioni per le quali il fattore di sicurezza scenda sotto l'unità, quindi alla situazione di instabilità del versante. Per raggiungere tale obiettivo sono stati variati i valori di tali parametri, seguendo un preciso schema logico.



## 1.INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Le aree di studio sono situate nella porzione collinare di Vicenza, precisamente sui Lessini Orientali e sulle colline del Marosticano (Fig.1).

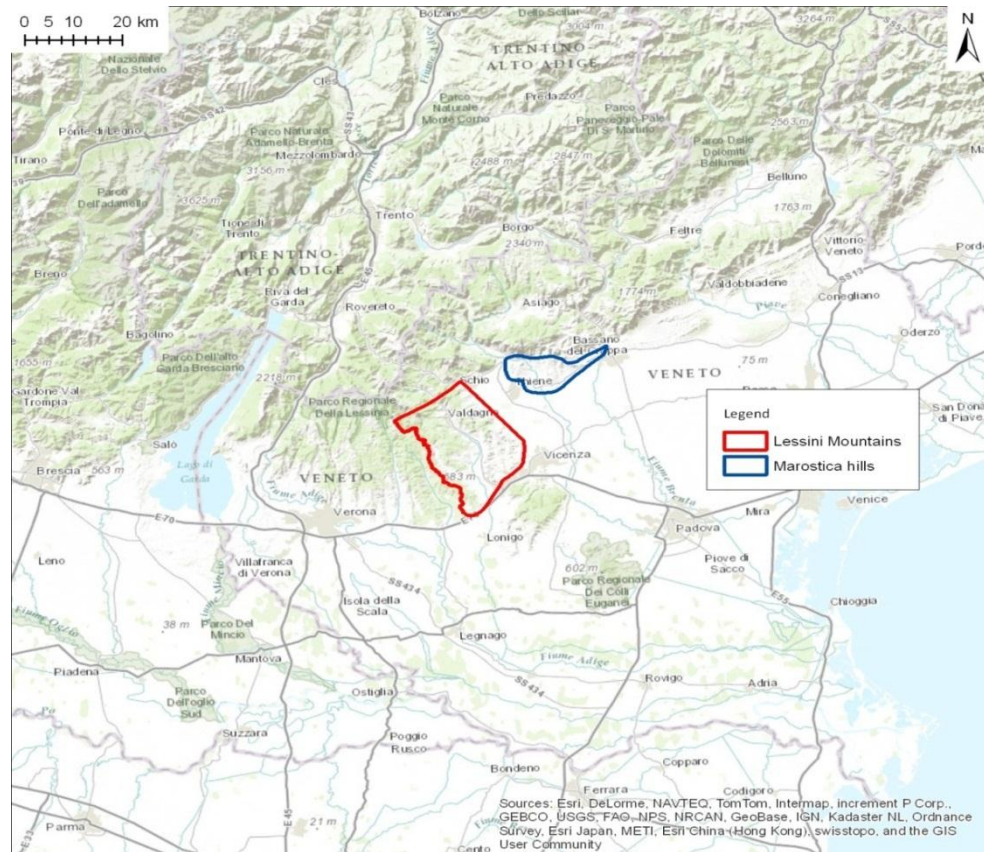


Fig.1: Inquadramento geografico delle aree di studio (fonte: Esri).

Entrambe le aree, dal punto di vista paleogeografico, fanno parte del Sudalpino e sono poste all'interno della Piattaforma carbonatica terziaria, nota come Lessini Shelf (Bosellini, 2004), posta tra il Veneto e il Trentino. Essa si è imposta su di un antico alto strutturale noto come Piattaforma Atesina di età giurassica-cretacica-paleocenica, che durante l'orogenesi alpina venne frammentata da una serie di faglie listriche in "alti" e "bassi" strutturali. Gli "alti" strutturali permisero la formazione di piattaforme carbonatiche a bassa profondità, che estendendosi lateralmente contribuirono alla

realizzazione dei Lessini Shelf (Fig.2). Si tratta quindi di una regione a sedimentazione carbonatica di mare basso fino al Giurassico inferiore, che venne poi sommersa diventando un plateau di mare profondo.

Durante il Cenozoico la zona venne coinvolta da un'intensa attività vulcanica con effusione di magmi prevalentemente basici e ultrabasici, che costituirono la Provincia Veneta Vulcanica (Bellieni, 2010).

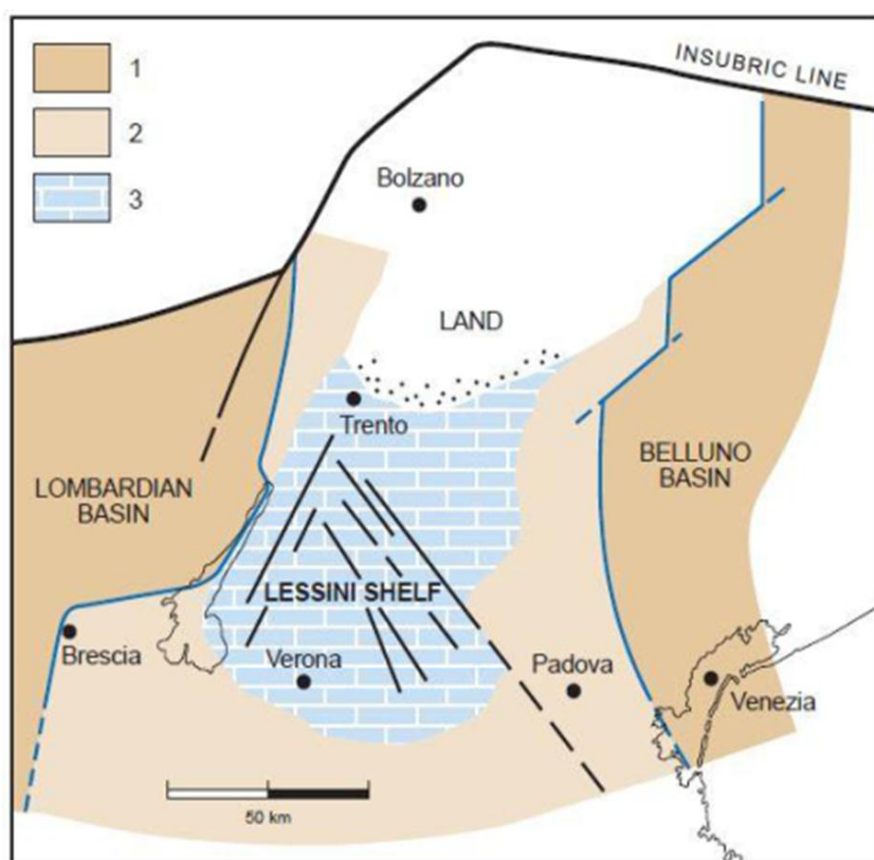


Fig.2 : Lessini Shelf. 1) Sedimenti marini dei precedenti bacini giurassici (bacino Lombardo e bacino di Belluno); 2) Argilliti e marne pelagiche paleogeniche sovrastanti la piattaforma giurassica di Trento; 3) Calcari di barriera paleogenici della Lessini Shelf. (tratto dal Bosellini, 2004).

Si verificarono i primi eventi a partire dal Paleocene superiore nella ristretta area in corrispondenza dei Monti Lessini per poi estendersi verso Ovest nel Veronese,



successivamente verso nord nel Trentino Meridionale, infine a est nel dominio del Marosticano e a sud nell'area dei Colli Euganei.

L'attività eruttiva comprende una dozzina di fasi principali di breve durata, distribuite tra il Paleocene e il Miocene, intervallate da periodi di stasi (Barbieri, 1982).

La prima fase vulcanica (Paleocene superiore-Eocene medio) , quasi tutta sottomarina, si attuò nella Valle del Chiampo e nella media Valle dell'Agno.

Il secondo ciclo ebbe luogo nell'Eocene medio interessando in principio i Monti Lessini per poi estendersi in aree diverse con periodi di stasi tra un fase eruttiva e l'altra. Iniziò in condizioni subacquee includendo la maggior parte degli eventi, come testimonia l'abbondanza di ialoclastiti e fossili marini nei depositi vulcanici e si concluse in ambiente subaereo, come dimostra la presenza di flora e fauna all'interno dei tufi e la tessitura delle rocce (Piccoli,1966).

L'attività vulcanica durante l'Eocene inferiore, si espanse nei Monti Lessini con effusioni di tipo alcalino e ultrabasico, per poi estendersi verso ovest nel Veronese e verso NNW nel Roveretano; il Trentino meridionale venne interessato solo successivamente nell'Eocene medio (Barbieri, 1982). L'Eocene superiore, ad eccezione per i Colli Euganei, viene considerato un periodo relativamente tranquillo. Le eruzioni furono presenti in maniera costante nell'Oligocene in tutta l'area del Marosticano (De Vecchi, 1976).

Dal punto di vista tettonico, l'attività vulcanica presente nella provincia di Vicenza si impostò in un ambiente caratterizzato da linee tettoniche sviluppati nell'era Terziaria a carattere distensivo (Zampieri, 2000), con una direzione prevalente NW-SE (sistema della Faglia Schio-Vicenza) (Fig.3).

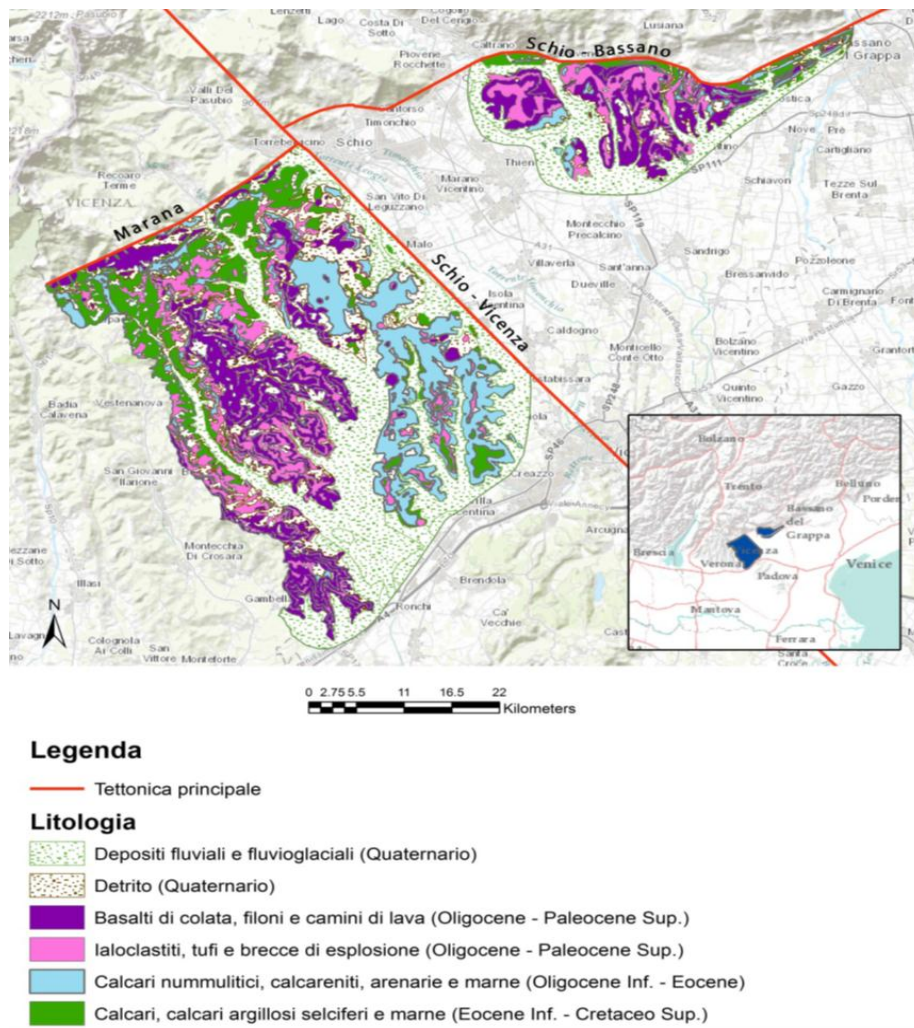


Fig.3 : Inquadramento geologico delle aree di studio (Monti Lessini a ovest e colline del Marosticano a est della faglia di Schio-Vicenza). (Dato vettoriale della Provincia di Vicenza).

La posizione dei centri eruttivi del Veronese e del Vicentino occidentale si collocarono in prossimità della Faglia di Castelvero e nonostante ciò a destra del suddetto lineamento tettonico non è stata trovata traccia delle vulcaniti in questione. Questo sta a significare che la faglia divenne un ostacolo strutturale permettendo l'abbassamento del settore orientale rispetto a quello occidentale. Nel settore a Oriente le vulcaniti si estesero fino l'area di Schio non raggiungendo il Marosticano che secondo alcuni studi durante l'Eocene inferiore e medio, subì un rilevante sollevamento fino a emergere.

Il risultato fu un accumulo di vulcaniti di età Paleocene-Eocene all'interno di un' area confinata dalla Faglia di Castelvero e da una serie di faglie parallele a quella di Schio-Vicenza ad est, caratterizzata da una struttura tipo graben.

Nell'area del Marosticano si verificò un accumulo di vulcaniti relative alla successiva fase eruttiva nel corso dell'Oligocene, causata da un rigetto opposto alla Faglia di Schio-Vicenza che ha portato alla formazione di un graben delimitato a est da una faglia presumibilmente posta all'altezza di Bassano del Grappa (Barbieri, 1982).

### 1.1. Movimenti di versante

L'area di studio presentata in Figura 1 è interessata da numerosi fenomeni franosi, dei quali i più frequenti risultano essere scivolamenti e colate di terra, classificati secondo le caratteristiche geometriche dalla classificazione di Varnes (Varnes, 1978) riportata in Figura 4.

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.4 : Classificazione di Varnes (1978).

Le tre frane di interesse di Gamba di Monte Malo, Fara Vicentino e Carrè sono definibili come *scivolamenti traslativi con una componente rotazionale*.

Sono coinvolti maggiormente orizzonti di natura eluvio-colluviale derivanti dal processo di alterazione di rocce vulcaniche, quali basalti e tufi.

Per scivolamento traslativo si intende un movimento di masse rocciose o terreni, lungo una superficie di discontinuità poco scabrosa e preesistente disposta a franapoggio. La forma della superficie di rottura dipende dall'omogeneità e dall'isotropia del materiale all'interno.

Tale movimento franoso è molto diffuso in versanti argillosi.

La superficie topografica si presenta accidentata, caratterizzata da crepe radiali parallele alla nicchia di distacco e la zona al piede della frana è generalmente caratterizzata dalla formazione di un lobo di accumulo.

## **1.2. Inquadramento geologico di dettaglio**

Attraverso il rilevamento geologico eseguito in campo e con l'ausilio dei dati di relazioni professionali, è stato possibile produrre una carta degli affioramenti per ogni frana di interesse e evidenziare gli elementi geomorfologici principali presenti tramite l'utilizzo del programma Arcgis.

La geologia del settore in studio è stata dedotta prima attraverso la consultazione della Carta Geologica d'Italia e successivamente dalla verifica di tali litologie nel rilevamento di campagna.

In seguito saranno presentati i singoli casi più dettagliatamente.

### 1.2.1.Gamba di Monte di Malo

L'area in esame è situata nel settore centro-occidentale della provincia di Vicenza, nell'ambito del territorio del Comune di Monte di Malo, più precisamente presso la località Gamba posta nel settore nord-orientale del territorio di pertinenza. Il sito a carattere prevalentemente collinare, comprende quote altimetriche tra 241 e 261 metri.

Il dissesto in studio coinvolge un'area agricola destinata a vigneto, caratterizzato da deboli pendenze, dove non vi sono evidenti affioramenti di roccia (Fig.6).




Fig.6: Immagine dell'area coinvolta nella frana di Gamba di Monte di Malo.


La geologia generale del territorio (Fig.7) è stata dedotta dalla consultazione della Carta Geologica d'Italia 1:100.000 (Foglio n° 36 Schio e foglio n° 49 Verona) e verrà di seguito elencata dai termini più antichi a quelli più recenti:



Fig.7: Estratto della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio n.36 "Schio" (a nord) e Foglio n.49 "Verona" (a sud).

 CRETACICO SUPERIORE – Scaglia Rossa: calcari più o meno argillosi rosei o più spesso rossi, con frattura a scaglia, talora selciferi;

 OLIGOCENE-CRETACICO SUPERIORE – Tufi e ialoclastiti basaltici dei fronti di colata e degli accumuli esplosivi;

 MIOCENE INFERIORE-CRETACICO – Lave basaltiche; basalti vacuolari, basalti a pillow e pillow-brecce; filoni basici e ultrabasici e loro differenziati alcalini;

 LUTEZIANO-CUISIANO SUPERIORE – Calcareni grigio-chiare e brune, stratificate, con grandi nummuliti.

Da una ricerca più approfondita (Carta geologica del territorio di Monte di Malo alla scala 1:25.000), si evince che il sito in esame è collocato principalmente nell'ambito dei Calcari a Nummuliti dell'Eocene Medio-Inferiore (calcari organogeni e calcareniti

bioclastiche ricche di fossili) e delle Vulcanoclastiti terziarie(rocce facilmente alterabili legate alla formazione di spesse coltri argillose ).

Nell'area sono inoltre presenti:

- DEPOSITI COLLUVIALI – Costituiti prevalentemente da matrice limoso-argillosa con rari clasti eterometrici di natura basaltica. Sono concentrati tipicamente alla base dei versanti e in aree sub-pianeggianti e il loro accumulo è da imputarsi all'attività antropica legata alla movimentazione del terreno durante le varie fasi agricole che ha determinato la classazione del materiale ed agevolato l'alterazione.

- DEPOSITI ELUVIALI – Alla base dei versanti ove il substrato roccioso è costituito da rocce di natura ignea si rinvencono depositi con abbondante matrice limoso-argillosa e i clasti presenti sono costituiti principalmente da elementi basaltici di dimensioni da centimetriche a millimetriche.

In queste formazioni il valore di permeabilità varia a seconda del grado di fratturazione e della degradazione della roccia. Generalmente sono considerate pseudo-impermeabili con un valore di coefficiente di conducibilità idraulica di circa  $10^{-6}$ m/s.

Nella Figura 8, vengono mostrati gli affioramenti presenti nell'area di studio, con i principali elementi geomorfologici che caratterizzano la morfologia della zona.

Gli affioramenti di roccia dell'area sono limitati alle piccole pareti. La morfologia del territorio è il risultato di una modellazione operata dai corsi d'acqua superficiali impostati prevalentemente lungo direttrici a controllo tettonico e da processi gravitativi la cui attività è connessa con la natura del substrato roccioso e dei depositi d'alterazione superficiale.

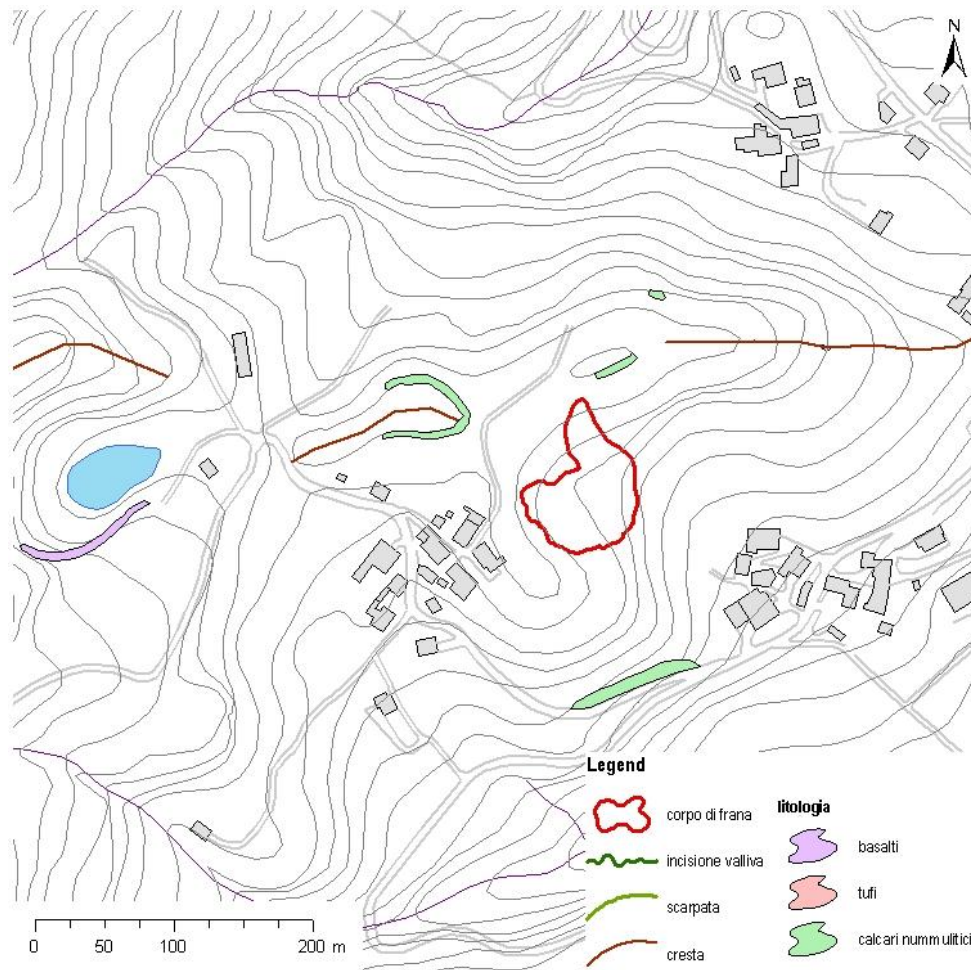


Fig.8: Carta degli affioramenti con gli elementi geomorfologici principali dell'area di dissesto di Gamba di Monte di Malo, realizzata con il programma Gis.

I Calcari a Nummuliti affiorano lungo la strada provinciale (Fig.9 e Fig.10), mentre si rivengono piccoli affioramenti a ovest e a nord rispetto l'area di frana (Fig.11). Sono costituiti da una successione di rocce carbonatiche di colore biancastro e grigiastro ad alto contenuto di fossili.

La giacitura rilevata nei Calcari a Nummuliti mostra una struttura generalmente semplice con una stratificazione sub-orizzontale (145/5 nell'affioramento a ovest della frana e 145/10 nell'affioramento lungo la strada provinciale).





Fig.9: Affioramento di Calcari Nummulitici lungo la strada provinciale.



Fig.10: Calcare a Nummuliti appartenente all'affioramento lungo la strada provinciale.



Fig.11: Calcare a Nummuliti appartenente all'affioramento a nord dell'area di dissesto con inclusioni basiche.

Nel settore occidentale, in prossimità di una cava dismessa di basalto, si rinvencono affioramenti di depositi basaltici (Fig.12, Fig.13 e Fig.14).



Fig.12: Affioramento di Basalto di colata in prossimità della cava dismessa.



Fig.13: Basalto a pillow all'interno dell'affioramento medesimo in prossimità della cava dismessa.



Fig.14: Basalto appartenente all'affioramento medesimo in prossimità della cava dismessa.

### 1.2.2. Fara Vicentino

L'area in esame è situata nel settore centro-occidentale della provincia di Vicenza, nell'ambito del territorio del Comune di Fara Vicentino, più precisamente lungo via Costa. Il sito a carattere prevalentemente collinare, comprende quote altimetriche tra 210 e 240 metri.

Il dissesto in studio (Fig.15) coinvolge un rilievo collinare, caratterizzato da deboli pendenze, dove gli affioramenti di roccia sono limitati alle poche incisioni fluviali e torrentizie diffusamente distribuite sul territorio.



Fig.15: Area di dissesto ubicata nella strada parallela a valle di via Costa a Fara Vicentino (Fonte: Dalla Costa, 2014).

La geologia generale del territorio (Fig.16 ) è stata dedotta dalla consultazione della Carta Geologica d'Italia 1:100.000 (Foglio n° 37 Bassano).

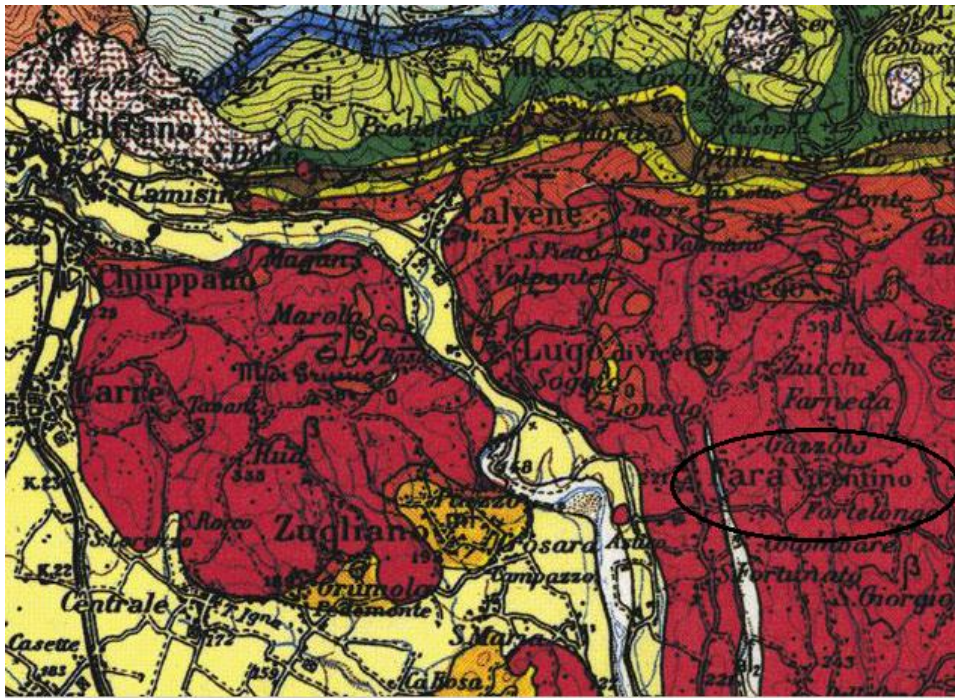


Fig.16: Estratto della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio n.37 "Bassano" raffigurante Fara Vicentino.

**β** OLIGOCENE – Basalti, tufi basaltici e breccie talora fossilifere, per lo più di età oligocenica. Dalla consultazione della Carta geologica del Marosticano occidentale (alla scala 1:20.000), si evince che il sito in studio è collocato nell'ambito delle "Lave massicce talora con alterazione argillosa".

L'area di dissesto interessa in maniera più o meno profonda DEPOSITI ELUVIO-COLLUVIALI. Questa è caratterizzata 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. A causa dei processi di argillificazione, la roccia risulta molto alterata presentando a tratti colori rossastri dovuti all'esposizione di agenti atmosferici e quindi alla conseguente ossidazione dei minerali ferrosi in essa presenti.(Fig.17).



Fig.17: Dettaglio del deposito eluvio-colluviale coinvolto nel dissesto a Fara Vicentino.

Come detto precedentemente gli affioramenti di roccia dell'area sono limitati alle incisioni fluviali e torrentizie diffusamente distribuite sul territorio che ne caratterizza la morfologia.

Nella Carta degli affioramenti seguente sono mostrati gli affioramenti di Basalti. Gli elementi geomorfologici principali presenti sono le varie incisioni fluviali e le numerose scarpate. (Fig.18)



Fig.18: Carta degli affioranti con elementi geomorfologici dell'area di dissesto di Fara Vicentino realizzata con il programma Gis.

I principali affioramenti di colate laviche si osservano lungo le incisioni lineari che si sviluppano nel settore inferiore del pendio ove è presente l'area di frana. Un altro affioramento è visibile a monte della nicchia di distacco del dissesto in esame nel lato nord.

L'evento di dissesto impostato su un substrato roccioso costituito da vulcanoclastiti e colate laviche, ha provocato il crollo di un'abitazione (Fig.19 e Fig.22) ubicata nella strada parallela a valle di via Costa.





Fig.19: Crollo sul lato est dell'abitazione coinvolta nel dissesto di Fara Vicentino.

Il dissesto è evidenziato dalla presenza di fessure nel terreno (Fig.20) sia nel settore apicale che in quello mediano e inferiore con la formazione di evidenti scarpate (Fig.21); la disposizione di queste spaccature e dei relativi gradini di frana indicano che l'attività di mobilitazione del deposito colluviale di frana è concorde con la direzione di massima pendenza topografica.



Fig.20: Cedimento dell'abitazione nel lato sud con presenza di fessure nel terreno.



Fig.21: Scarpata secondaria di frana posta a sud-est rispetto l'abitazione.



Fig.22: Rottura del muro di recinzione di proprietà dell'abitazione coinvolta.

La superficie del corpo di rottura è ben definibile in tutto il margine superiore e in gran parte dei margini laterali. In particolare nel settore superiore, a nord dell'abitazione, il terreno mostra ancora segni di instabilità, come è visibile in Figura 23.



Fig.23: Dettaglio del margine superiore dell'area di dissesto ancora instabile a Fara Vicentino.

### 1.2.3. Carrè

L'area in esame è situata nel settore settentrionale della provincia di Vicenza, nell'ambito del territorio prevalentemente collinare del Comune di Carrè.

Il dissesto in studio (Fig.24) coinvolge la pendice meridionale del Monte Grumo (383 metri). A seguito di una riattivazione nel 2014, la frana ha coinvolto la strada comunale di via Valdaro che collega i comuni di Carrè e Zugliano (Fig.25).



Fig.24: Area di dissesto che coinvolge la pendice meridionale del Monte Grumo a Carrè.



Fig.25: Strada comunale di Carrè coinvolta nell'area di dissesto (anno 2014), (Fonte: Toaldo,2014).

La geologia generale del territorio (Fig.26) è stata dedotta dalla consultazione della Carta Geologica d'Italia 1:100.000 (Foglio n° 37 Bassano).



Fig.26: Estratto della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000, Foglio n.37 "Bassano" raffigurante Carrè.

Come per il caso precedente di Fara Vicentino, le litologie presenti sono:

**B** OLIGOCENE – Basalti, tufi basaltici e breccie talora fossilifere, per lo più di età oligocenica. Dalla consultazione della Carta geologica del Marosticano occidentale (alla scala 1:20.000), si evince che il sito in studio è collocato nell'ambito delle "Lave massicce talora con alterazione argillosa".

- DEPOSITI ELUVIO-COLLUVIALI - Presentano scarse caratteristiche meccaniche derivanti da processi di degradazione e alterazione delle formazioni vulcaniche presenti. La matrice limoso-argillosa prevalente porta a una difficoltà di drenaggio durante le piogge intense e quindi a un aumento delle pressioni interstiziali che provoca una diminuzione delle resistenze disponibili nel terreno.

Questi depositi in condizioni di un elevato grado di saturazione, possono dare luogo a fenomeni di instabilità. La zona dissestata in Fig.24 in corrispondenza del pendio

meridionale del Monte Grumo, presenta dossi, rigonfiamenti, depressioni, tutti possibili indizi di instabilità.

La coltre presenta una permeabilità maggiore rispetto al substrato roccioso, quindi presumibilmente la falda tenderà a instaurarsi con un andamento parallelo alla superficie del versante.

Gli affioramenti presenti nell'area sono riassunti nella Carta degli affioramenti seguente. (Fig.27)

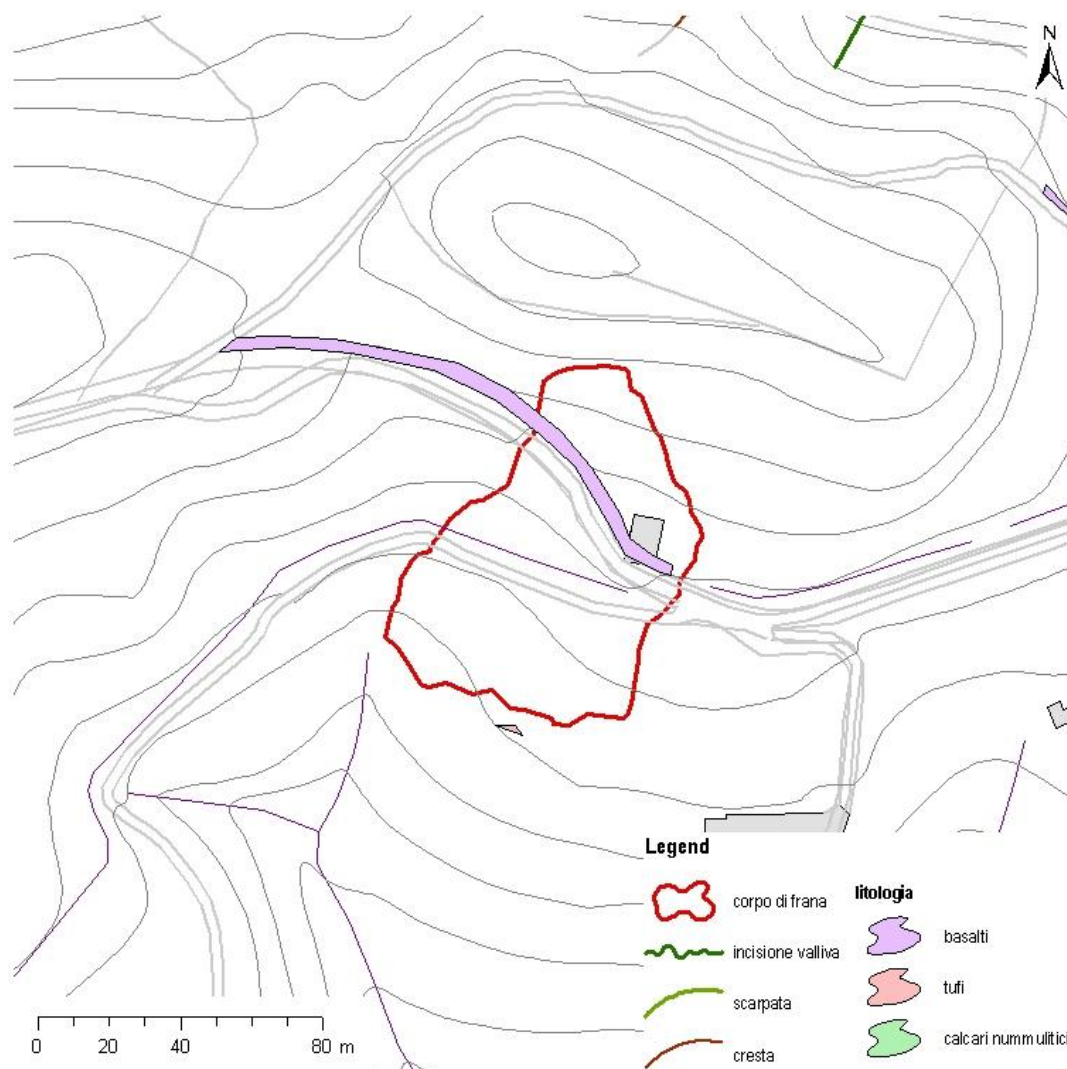


Fig.27: Carta degli affioramenti con elementi geomorfologici dell'area di dissesto di Carrè realizzata con il programma Gis.



Il principale affioramento di Basalto si osserva lungo la strada comunale nel pendio meridionale di Monte Grumo (Fig.28). Altri affioramenti minori sono visibili lungo il sentiero che attraversa il pendio settentrionale del monte, caratterizzato da incisioni e scarpate.



Fig.28: Affioramento di Basalto lungo la strada comunale di Carrè in stato di alterazione.



## **2. CARATTERISTICHE GEOTECNICHE E MINERALOGICHE**

Sono state presi in considerazione i dati delle prove di laboratorio geotecnico e delle analisi mineralogiche ottenute all'interno del medesimo progetto di ricerca e delle relazioni tecniche eseguite da professionisti per ciascuna area di dissesto.

La raccolta dei seguenti risultati sono serviti a elaborare i modelli di stabilità globale per ciascuna delle tre frane, descritti nel capitolo successivo.

### **2.1. Laboratorio geotecnico**

Le analisi granulometriche e i limiti di Atterberg sono stati eseguiti su diversi campioni prelevati durante il campionamento effettuato in campagna.

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

Per l'analisi per vagliatura viene sottoposto a macinazione tramite mortaio e pestello in ceramica, un quantitativo di terreno pari a circa 150 grammi sottoposto precedentemente a essiccazione in forno alla temperatura di 105° per 24 ore. Una volta trascorso il periodo di essiccazione si procede alla vagliatura, ossia nel passaggio del materiale attraverso una batteria di setacci, il cui fondo è costituito da una rete metallica a maglie quadrate. Le maglie hanno dimensioni standardizzate secondo quanto dettato dalla normativa ASTM e diminuiscono progressivamente fino al vaglio 200 di dimensione 0.075 mm. L'operazione avviene per scuotimento manuale e il trattenuto ad ogni setaccio viene pesato e rapportato al peso iniziale del campione, ricavando così la percentuale in peso per ogni frazione.

Per l'analisi per sedimentazione vengono impiegati 40 grammi di terreno ottenuti tramite la setacciatura al passante 200 e mescolati con un quantitativo di acqua distillata di circa 700ml 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 allo scopo di ridurre la naturale aggregazione delle particelle argillose e aggiunta altra acqua distillata fino al raggiungimento di 1 litro di soluzione. Si mescola finché il terreno non è visibilmente in sospensione e quando la soluzione risulta omogenea si pone il densimetro all'interno e si effettuano le letture a 10'', 20'', 30'', 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1h, 2h, 4h, 8h, 24h, 48h dall'inizio della prova. Si determina quindi la concentrazione percentuale di particelle aventi un diametro generico attraverso espressioni empiriche.

I limiti di Atterberg indicano il valore critico di contenuto d'acqua per il quale si verifica una transizione dello stato fisico del terreno. In ordine crescente di contenuto d'acqua il terreno passa da uno stato solido a semisolido, plastico e infine liquido. La procedura consiste nel determinare:

- il limite liquido, ossia il contenuto di acqua espresso in percentuale, relativo al passaggio tra comportamento fluido e plastico. Viene determinato 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 colpi. In corrispondenza del punto in cui il materiale si è chiuso, se ne preleva un piccolo quantitativo che viene pesato prima di essere posto in forno a 105° per 24 ore e poi ripesato. La differenza tra peso umido e peso secco è il contenuto d'acqua che corrisponde al limite liquido.

- il limite plastico, ossia il contenuto d'acqua relativo alla transizione tra comportamento plastico e semisolido. Utilizzando sempre materiale passante al vaglio 40, si forma per rotolamento dei piccoli cilindri allungati del diametro di circa 3 mm. Il limite plastico è il contenuto d'acqua che corrisponde alla formazione delle prime crepe. Essendo una prova soggettiva la si ripete tre volte per minimizzare l'errore. Il contenuto d'acqua

relativo al limite corrisponde alla differenza tra peso iniziale e peso secco, come per la determinazione del limite liquido.

-l'indice di plasticità è un parametro che si ricava dalla differenza tra il valore di limite liquido e il valore di limite plastico e definisce l'intervallo di variazione di contenuto d'acqua all'interno del quale il terreno mantiene un comportamento plastico.

### **2.1.1. Gamba di Monte di Malo**

I dati riportati di seguito relativi ai risultati delle analisi di laboratorio geotecnico per la frana di Gamba di Monte di Malo sono derivati dalla consultazione della tesi magistrale “Caratterizzazione geotecnica e mineralogica di depositi vulcanici alterati soggetti a fenomeni di scivolamento nell'area pedemontana della Provincia di Vicenza” (Toaldo M., 2014).

L'analisi è stata condotta su 18 campioni di Gamba di Monte di Malo da una profondità di 0.00 metri a 10.00 metri.

Dal diagramma triangolare si può visualizzare contemporaneamente le componenti granulometriche di tutti i campioni esaminati, dove ogni punto corrisponde a un campione, le cui proiezioni sugli assi corrispondono alle percentuali delle frazioni (Fig.29).

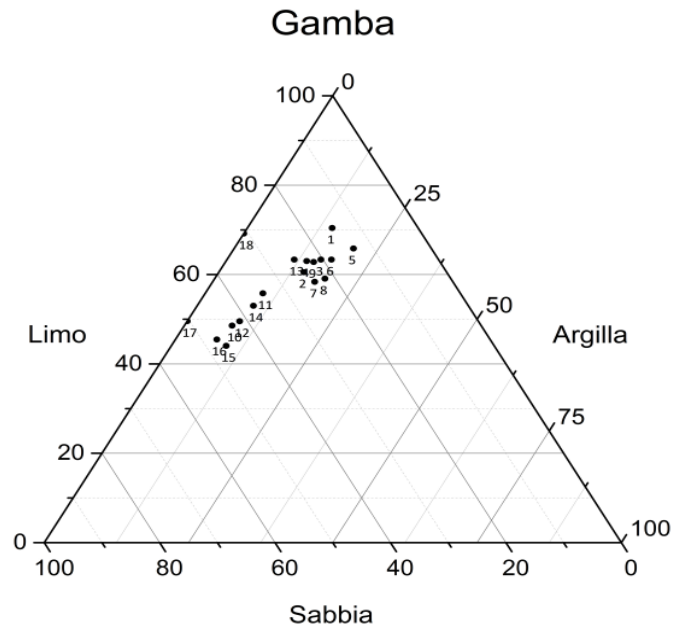


Fig.29: Diagramma triangolare rappresentante le componenti granulometriche per ogni campione di Gamba (Fonte: Toaldo, 2014).

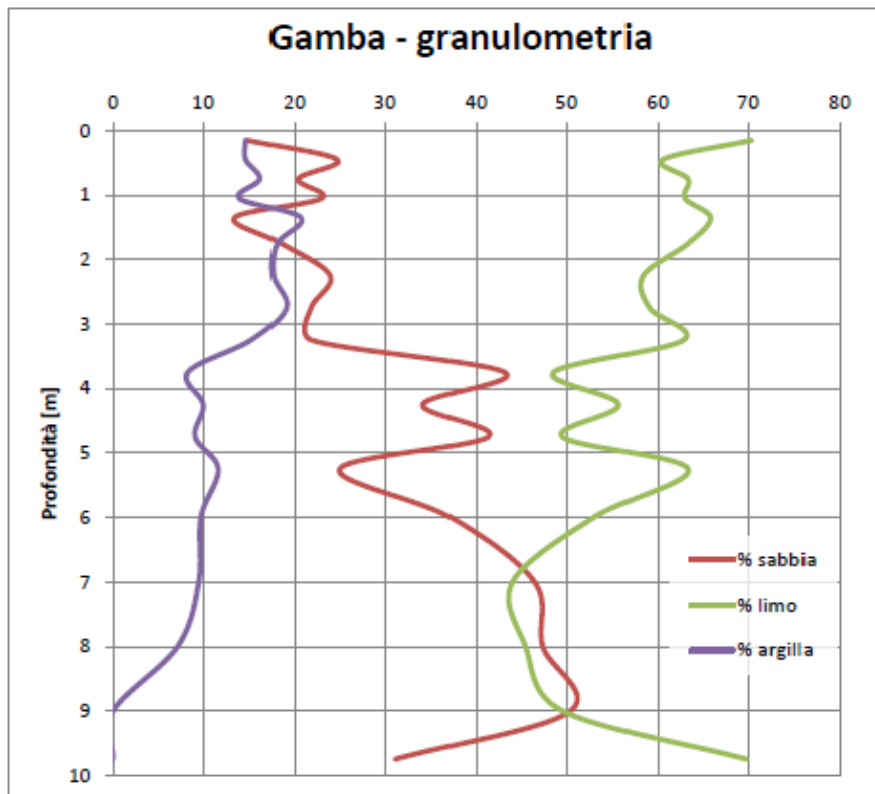


Fig.30: Grafico rappresentante il trend delle variazioni delle componenti granulometriche di Gamba di Monte di Malo (Fonte: Toaldo, 2014).

Come si può vedere in Figura 30, nelle frazioni granulometriche 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 20 % a circa 40%, mentre il limo diminuisce dal 65% al 45%.

A una profondità di circa 5.5 metri si ha un nuovo incremento della frazione più grossolana e simultaneamente una diminuzione del limo, accompagnati da una progressiva diminuzione dell'argilla fino alla sua totale scomparsa.

La frazione ghiaiosa è totalmente assente.

A seconda dell'abbondanza delle diverse componenti costituenti ciascun campione è stato possibile individuare distinti orizzonti (Toaldo, 2014), come mostrato in Tabella 1:

<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

Tab.1: Stratigrafia di Gamba di Monte di Malo desunta dalle prove granulometriche (Fonte: Toaldo, 2014).

Sono stati successivamente plottati i risultati delle prove di Gamba di Monte di Malo con il valore dei limiti di Atterberg in ascissa e i valori di profondità in ordinata (Fig.31).

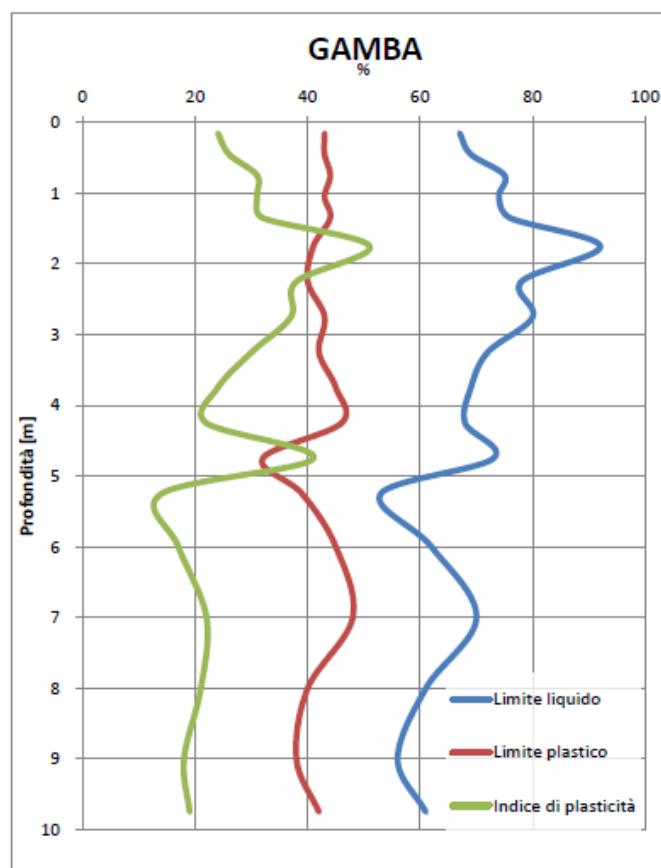


Fig.31: Variazione del valore dei limiti di Atterberg di Gamba di Monte di Malo all'aumentare della profondità (Fonte: Toaldo, 2014).

Il limite liquido WL presenta un'elevata variabilità per tutta la lunghezza del carotaggio, in particolare il valore minimo di circa 53% si ha attorno ai 5 metri, mentre il valore massimo di 92% si ha al di sopra della profondità di 2 metri. Il limite plastico WP assume valori pressoché simili tra 40 e 50% fino a 4.5 metri, mentre a profondità maggiori mostra un trend analogo a quello del limite liquido. L'andamento dell'indice di plasticità IP presenta anch'esso un trend simile a quello del limite liquido.

L'indice di plasticità ha un range complessivo che va da 15 a 50. Generalmente con l'indice di plasticità superiore a 40, il terreno viene definito *molto plastico*, quando è compreso tra 15 e 40 il terreno è *plastico*. Vista la preponderanza di campioni aventi indice di plasticità inferiore ai 40, il terreno della frana è considerato *plastico* (Toaldo, 2014).



## 2.1.2. Fara Vicentino

I dati riportati di seguito relativi ai risultati delle analisi di laboratorio geotecnico per la frana di Fara Vicentino sono derivati dalla consultazione della tesi magistrale “Caratterizzazione geotecnica e mineralogica dei terreni coinvolti in frane superficiali della Provincia di Vicenza” (Dalla Costa L., 2014).

L’analisi è stata condotta su 50 campioni di Fara Vicentino da una profondità di 0.00 metri a 10.00 metri.

Dal diagramma triangolare si può visualizzare contemporaneamente le componenti granulometriche di tutti i campioni esaminati. I campioni relativi alla frana di Fara Vicentino sono stati rappresentati in due tipologie di triangoli granulometrici: il primo utilizzando la terna granulometrica ghiaia - sabbia - limo+argilla (Fig.32) e il secondo prendendo in considerazione solamente i termini sabbia - limo - argilla (Fig.33).

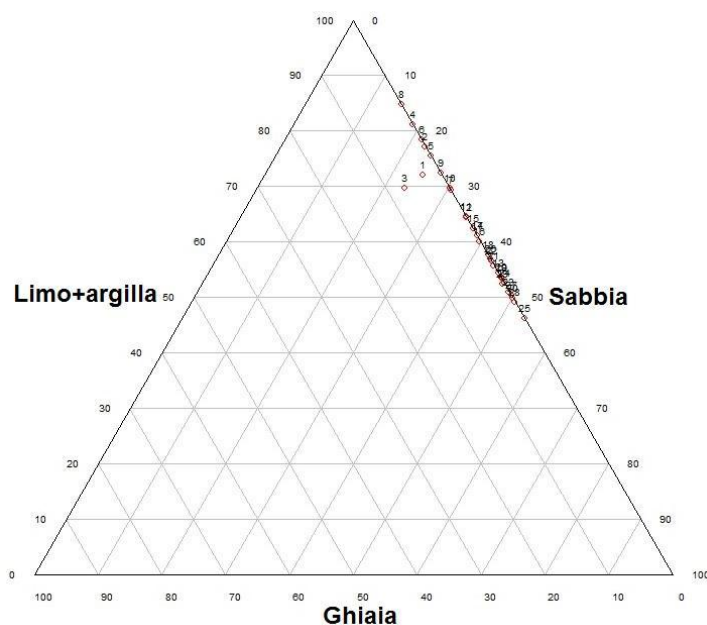


Fig.32: Diagramma triangolare Ghiaia-Sabbia-Limo+Argilla rappresentante il terreno di Fara Vicentino (Fonte: Dalla Costa, 2014).

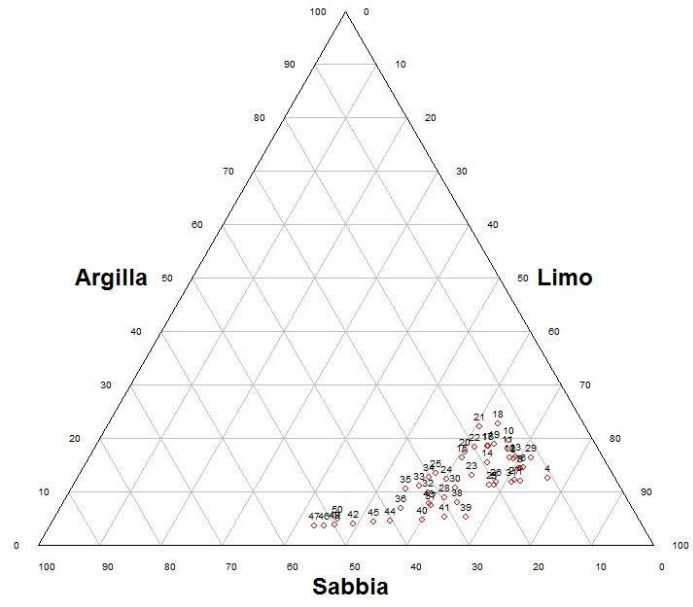


Fig.33: Diagramma triangolare Sabbia-Limo-Argilla rappresentante il terreno di Fara Vicentino (Fonte: Dalla Costa, 2014).

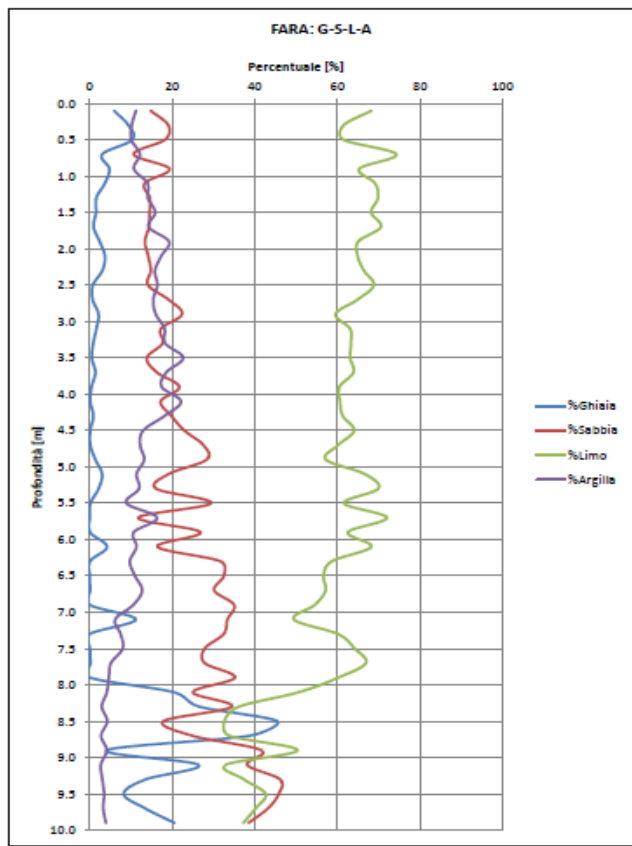


Fig.34: Grafico rappresentante il trend delle variazioni delle componenti granulometriche di Fara Vicentino (Fonte: Dalla Costa , 2014).

Come si può vedere in Figura 34, nei primi 6 metri il terreno di Fara Vicentino si può considerare nel complesso omogeneo, caratterizzato dall'abbondanza della frazione fine che risulta predominante fino a 8.4 m di profondità dal piano campagna. Il limo costituisce la classe granulometrica principale fino a 8.4 m di profondità; rimane circa costante nei primi 6 metri con valori compresi tra 60-74 %, poi diminuisce in modo oscillatorio, raggiungendo un minimo del 38% tra 9.0 e 9.2 metri..

L'argilla aumenta gradualmente con la profondità raggiungendo un massimo del 23% tra 3.4 e 3.6 metri di profondità dal piano campagna, diminuisce in modo graduale fino a 8.0 metri di profondità, dopodiché è presente con una percentuale circa costante e pari al 3-4%.

La sabbia rimane circa costante nei primi 3.4-3.6 metri su valori attorno al 15-20%, poi aumenta gradualmente con la profondità raggiungendo il 38% a 10.0 metri dal piano campagna.

La ghiaia è nel complesso poco presente fino a 8.0 m di profondità, eccezion fatta per i primi 0.6 metri, nel quale è superiore al 5%; sotto agli 8.0 metri di profondità aumenta in maniera oscillatoria attestandosi su valori medi del 20% e raggiungendo un massimo del 45% tra 8.6-8.8 m di profondità dal piano campagna. Il marcato incremento del contenuto in ghiaia dagli 8.0 metri di profondità in poi indica l'approssimarsi al substrato roccioso, evidenziato anche dalla presenza di un trovante basaltico di diametro medio pari a circa 7 cm, tra 8.80-9.00 m di profondità dal piano campagna (Dalla Costa,2014)

Dalle percentuali delle frazioni granulometriche presenti in ciascun campione sono stati individuati una serie di orizzonti identificati nella seguente Tabella 2:

FARA VICENTINO	
Profondità (m)	Orizzonte
0.0-0.6	Limo sabbioso argilloso debolmente ghiaioso
0.6-7.0	Limo sabbioso (con sabbia) argilloso
7.0-8.0	Limo sabbioso (con sabbia) argilloso
8.0-8.8	Limo (ghiaia) con sabbia
8.8-10.0	Sabbia con limo con ghiaia (ghiaiosa)

Tab.2: Stratigrafia di Fara Vicentino desunta dalle prove granulometriche (Fonte: Dalla Costa, 2014).

Sono stati successivamente plottati i risultati delle prove di Fara Vicentino con il valore dei limiti di Atterberg in ascissa e i valori di profondità in ordinata (Fig.35).

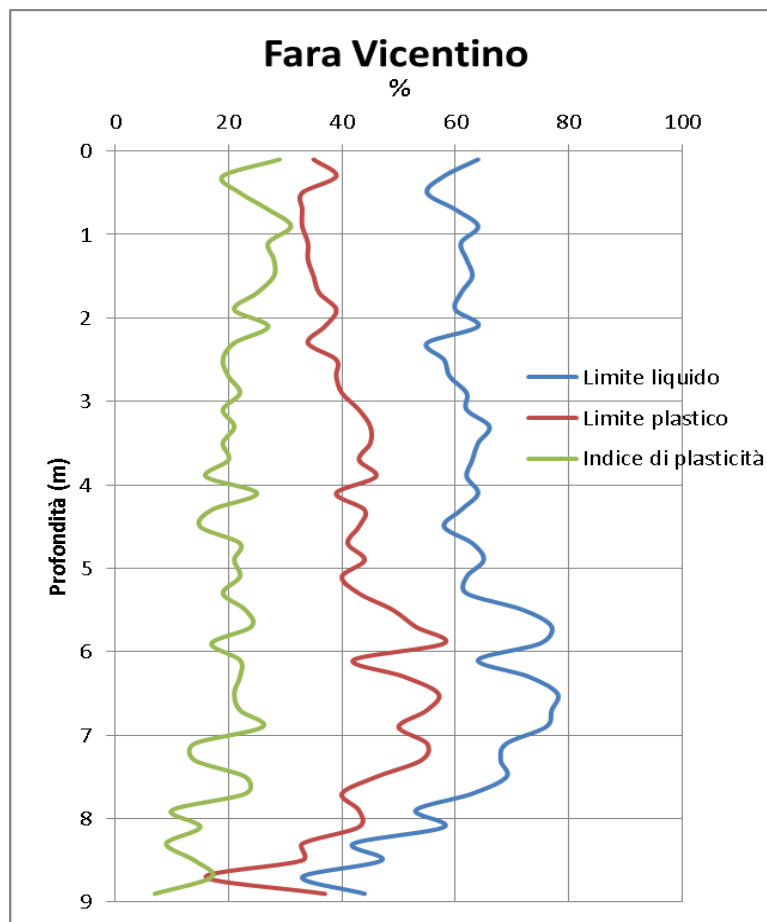


Fig.35: Variazione del valore dei limiti di Atterberg di Fara Vicentino all'aumentare della profondità (Fonte dati: Dalla Costa, 2014).

Dal grafico si può notare che la maggiore variazione del valore assoluto del limite liquido WL si colloca oltre i 5.0 metri di profondità. Quest'ultimo assume valori poco

variabili compresi tra 55 e 65%, nella porzione di terreno compresa tra il piano campagna e 5.0 metri di profondità, aumenta fino al massimo valore di 78% a 6.5 metri di profondità per poi diminuire progressivamente fino a 33% alla soglia di 9.0 metri di profondità. Il limite di plasticità aumenta leggermente fino alla profondità di 6.0 metri, andando da un valore di 33% e raggiungendo un massimo del 58%, per poi diminuire progressivamente fino al valore minimo del 16%. L'indice di plasticità varia poco con la profondità, da un massimo di 31 nel primo metro di profondità a un minimo di 7 a 9 metri dal piano campagna.

### 2.1.3. Carrè

I dati riportati di seguito relativi ai risultati delle analisi di laboratorio geotecnico per la frana di Carrè sono derivati dalla consultazione della tesi magistrale “Caratterizzazione geotecnica e mineralogica di depositi vulcanici alterati soggetti a fenomeni di scivolamento nell’area pedemontana della Provincia di Vicenza” (Toaldo M., 2014).

L’analisi è stata condotta su 19 campioni di Carrè da una profondità di 0.00 metri a 4.40 metri.

Per la rappresentazione delle componenti granulometriche di tutti i campioni esaminati sono stati utilizzati diagrammi triangolari (Fig.36).

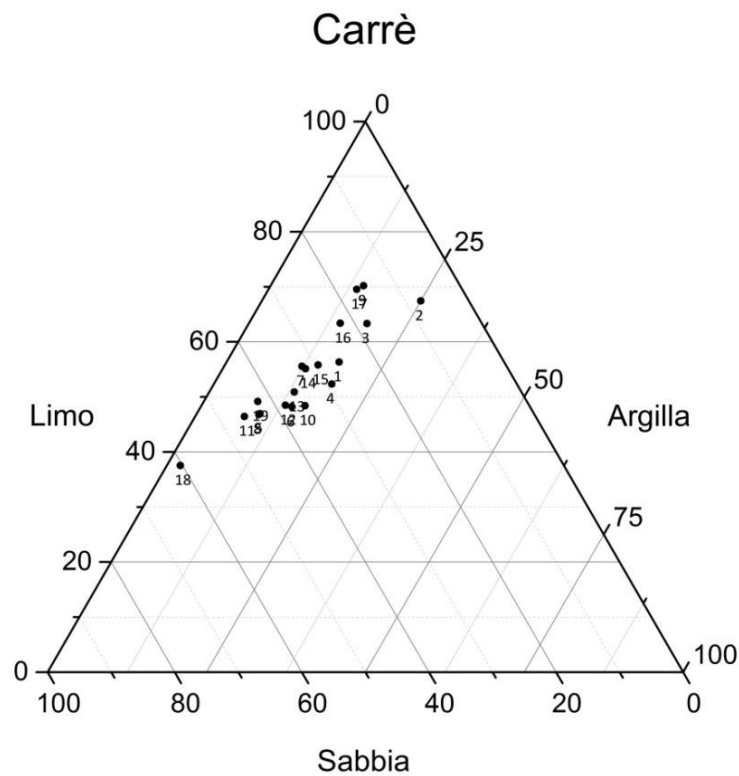


Fig.36: Diagramma triangolare rappresentante le componenti granulometriche di Carrè (Fonte: Toaldo M., 2014).

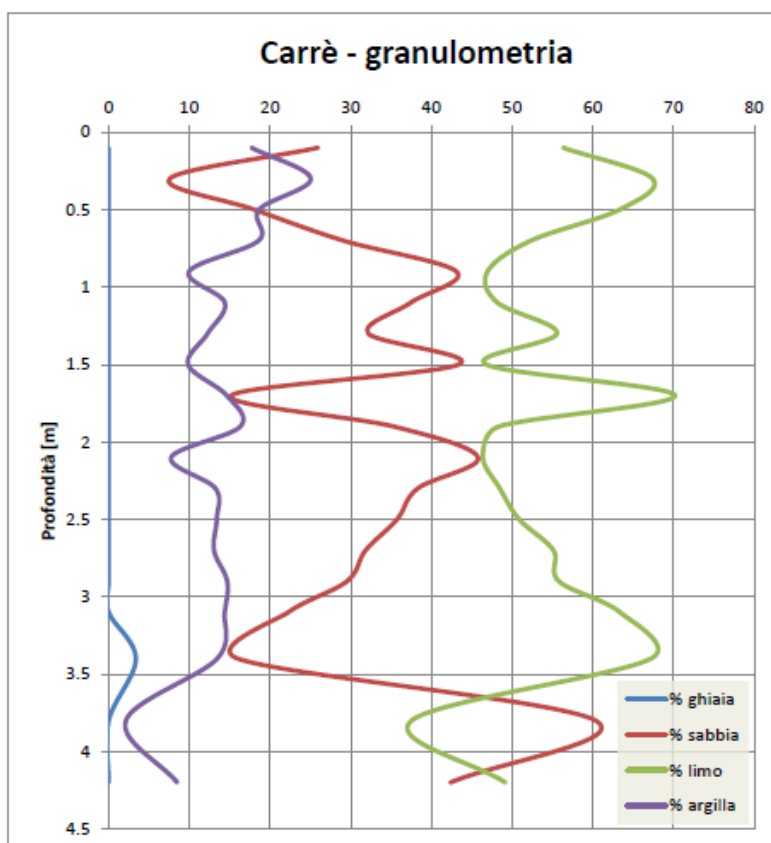


Fig.37: Grafico rappresentante il trend delle variazioni delle componenti granulometriche di Carrè (Fonte: Toaldo, 2014).

I campioni di Carrè, come mostrato in Fig.37, 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%. 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, precisamente a 3.60 metri con un valore di circa 3% (Toaldo, 2014).

Dalle percentuali delle frazioni granulometriche presenti in ciascun campione sono stati individuati una serie di orizzonti identificati nella seguente Tabella 3:

CARRE	
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.3: Stratigrafia di Carrè desunta dalle prove granulometriche (Fonte: Toaldo, 2014).

Sono stati successivamente plottati i risultati delle prove di Carrè con il valore dei limiti di Atterberg in ascissa e i valori di profondità in ordinata (Fig.38).

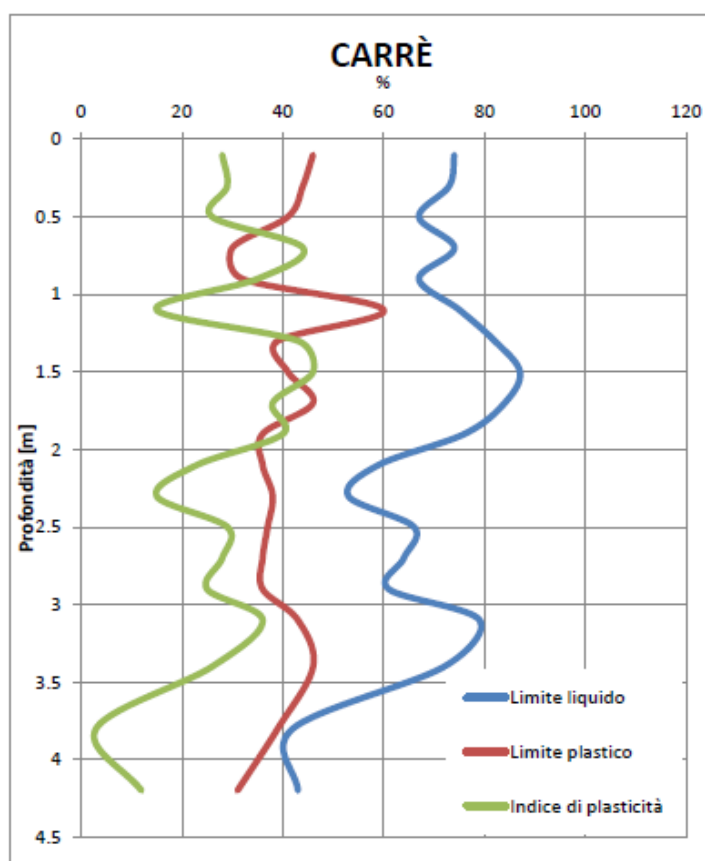


Fig.38: Variazione del valore dei limiti di Atterberg di Carrè all'aumentare della profondità (Fonte: Toaldo, 2014).



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 (Toaldo, 2014).

## **2.2. Laboratorio mineralogico**

Le analisi mineralogiche seguenti sono state eseguite 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  $\mu\text{m}$ .

### **2.2.1. Gamba di Monte di Malo**

I dati riportati di seguito relativi ai risultati delle analisi di laboratorio mineralogico per la frana di Gamba di Monte di Malo sono derivati dalla consultazione della tesi magistrale “Caratterizzazione geotecnica e mineralogica di depositi vulcanici alterati soggetti a fenomeni di scivolamento nell’area pedemontana della Provincia di Vicenza” (Toaldo M., 2014).

I minerali costituenti i campioni, ad eccezione della montmorillonite, sono stati suddivisi in 3 diversi raggruppamenti a seconda dell’ambiente di formazione (Fig.39).

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%).

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

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. 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.

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. A Gamba di Monte di Malo sono presenti quarzo, muscovite e clinocloro (clorite) (Toaldo,2014).

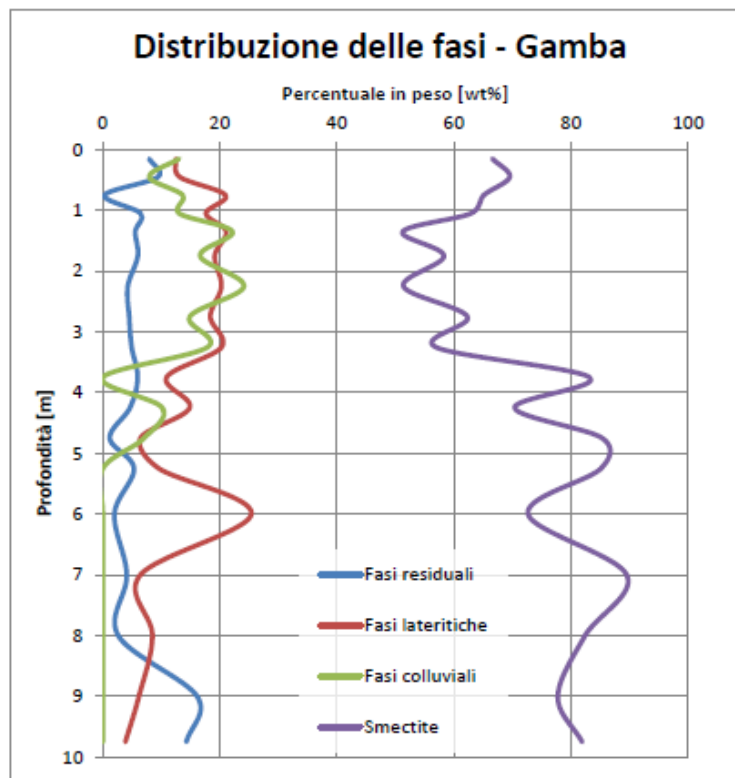


Fig.39: Distribuzione delle fasi di Gamba al variare della profondità (Fonte: Toaldo, 2014).

Come si può vedere in Figura 39, a Gamba di Monte di Malo si possono distinguere tre diversi orizzonti in base all'abbondanza delle fasi (Toaldo, 2014).

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.

Nel grafico seguente (Fig.40) vengono raffigurate le percentuali delle fasi mineralogiche presenti nel terreno di Gamba di Monte di Malo.

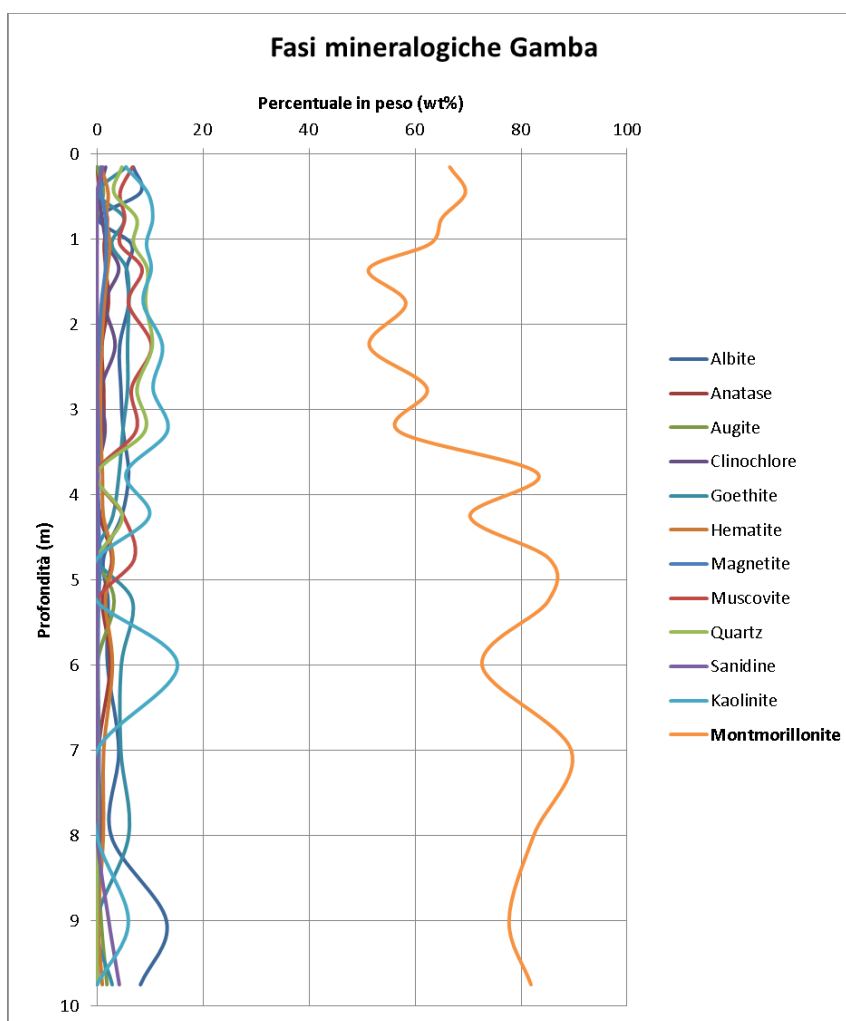


Fig.40: Fasi mineralogiche presenti nel terreno di Gamba di Monte di Malo (Fonte dati: Toaldo, 2014).

Tutte le fasi mineralogiche sono presenti tra 10-15% di contenuto in peso, ad eccezione della montmorillonite che è preponderante per tutta la profondità. Nel primo metro è presente con una percentuale di circa 60% per poi avere una lieve diminuzione fino a

3.0 metri. A partire dai 3.5 metri ha un aumento oscillatorio dove presenta tre picchi di contenuto in peso tra 80-90% a 3.5 metri, a 5 metri e a 7 metri; a profondità maggiori si stabilizza all'80%.

### **2.2.2. Fara Vicentino**

I dati riportati di seguito relativi ai risultati delle analisi di laboratorio mineralogico per la frana di Fara Vicentino sono derivati dalla consultazione della tesi magistrale “Caratterizzazione geotecnica e mineralogica dei terreni coinvolti in frane superficiali della Provincia di Vicenza” (Dalla Costa L., 2014).

Come per il caso precedente, i minerali costituenti i campioni sono stati raggruppati in due associazioni (fasi residuali, colluviali, idrotermali e fasi lateritiche) più una fase mineralogica a se stante (smectite), ognuna delle quali rappresenta il risultato dei processi avvenuti nel relativo ambiente di formazione.

Inserendo in una tabella le percentuali in peso dei vari minerali per ogni campione, proiettati successivamente su dei grafici, è stato possibile ricostruire un profilo della composizione mineralogica dei terreni e quindi individuare degli orizzonti caratterizzati da particolari concentrazioni delle associazioni mineralogiche presenti. Nel caso di Fara Vicentino sono stati individuati cinque orizzonti (Fig.41-42).

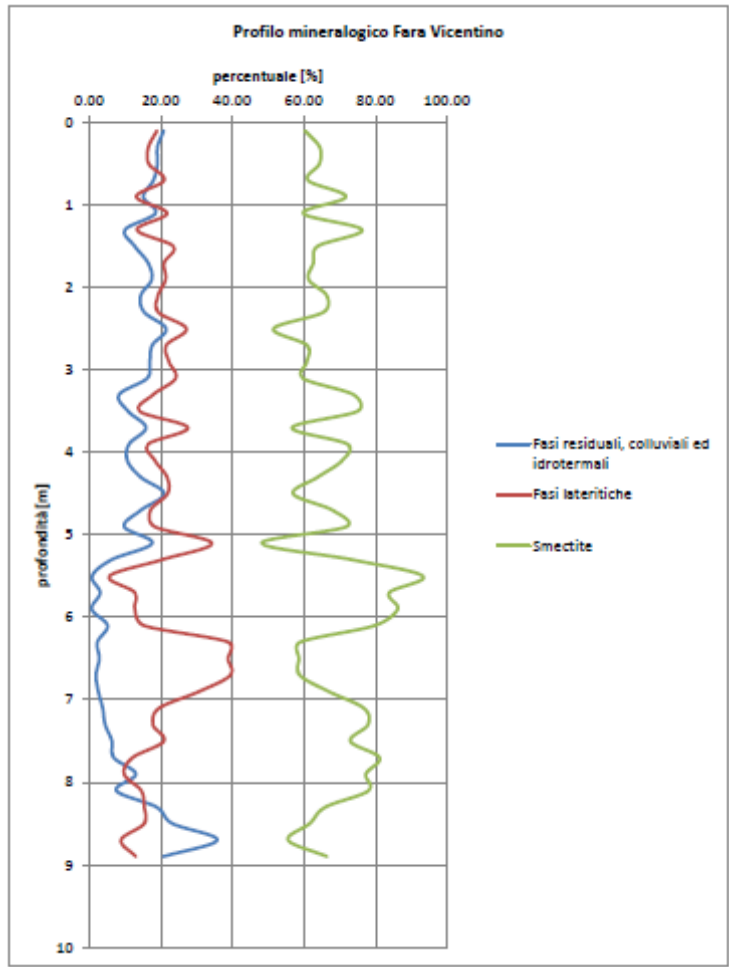


Fig.41: Distribuzione delle fasi di Fara Vicentino al variare della profondità (Fonte: Dalla Costa, 2014).

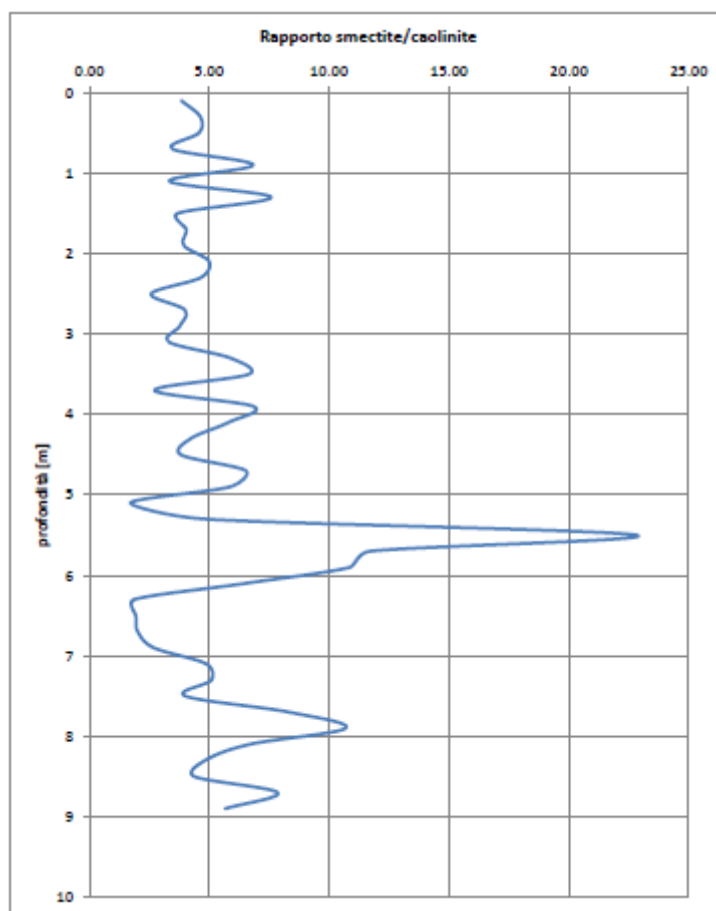


Fig.42: Variazione del rapporto smectite/kaolinite con la profondità. (Fonte: Dalla Costa, 2014).

L'orizzonte più superficiale (0.0-1.2 m) presenta un contenuto di smectite medio del 64%, 18% di fasi lateritiche e 18% di fasi residuali, colluviali ed idrotermali. Nonostante sia la porzione di terreno più superficiale, quindi teoricamente più alterata, presenta un discreto contenuto di fasi residuali; questo è dovuto essenzialmente al continuo rimaneggiamento antropico del colluvio, attività legata alla coltivazione del vigneto. Il rapporto smectite/kaolinite è mediamente pari a 4.

Il secondo orizzonte (1.2-5.4 m) contiene mediamente il 65% di smectite, 21% di fasi lateritiche, 14% di fasi residuali, colluviali ed idrotermali ed è caratterizzato da un rapporto smectite/kaolinite mediamente pari a 5. A differenza del primo orizzonte,

questo risulta essere più alterato, giacché il contenuto di fasi residuali diminuisce a spese dei minerali delle argille.

Tra 5.4 e 6.0 m si colloca il livello a maggiore contenuto in smectite, dove quest'ultima presenta valori tra l'84 e il 93% , portando il rapporto smectite/caolinite a raggiungere valori tra l'11 e il 23; le fasi lateritiche oscillano tra il 6% e il 13%, mentre le fasi residuali sono trascurabili.

Il quarto orizzonte (6.0-7.0 m) è caratterizzato da un'elevata concentrazione di fasi lateritiche (36%), con un contenuto medio di caolinite del 26%, mentre la smectite è presente con una concentrazione media del 65%. Anche in questo livello le fasi residuali sono trascurabili.

Nell'ultimo orizzonte (7.0-10.0 m) le fasi residuali diventano rilevanti, con concentrazione crescente all'aumentare della profondità, dal 4% al 36%; la smectite presenta un valore medio del 71% e le fasi lateritiche una percentuale del 15%, registrando un valore medio del rapporto smectite/caolinite pari a 6%. (Dalla Costa, 2014).

Nel grafico seguente (Fig.43) vengono raffigurate le percentuali delle fasi mineralogiche presenti nel terreno di Fara Vicentino.



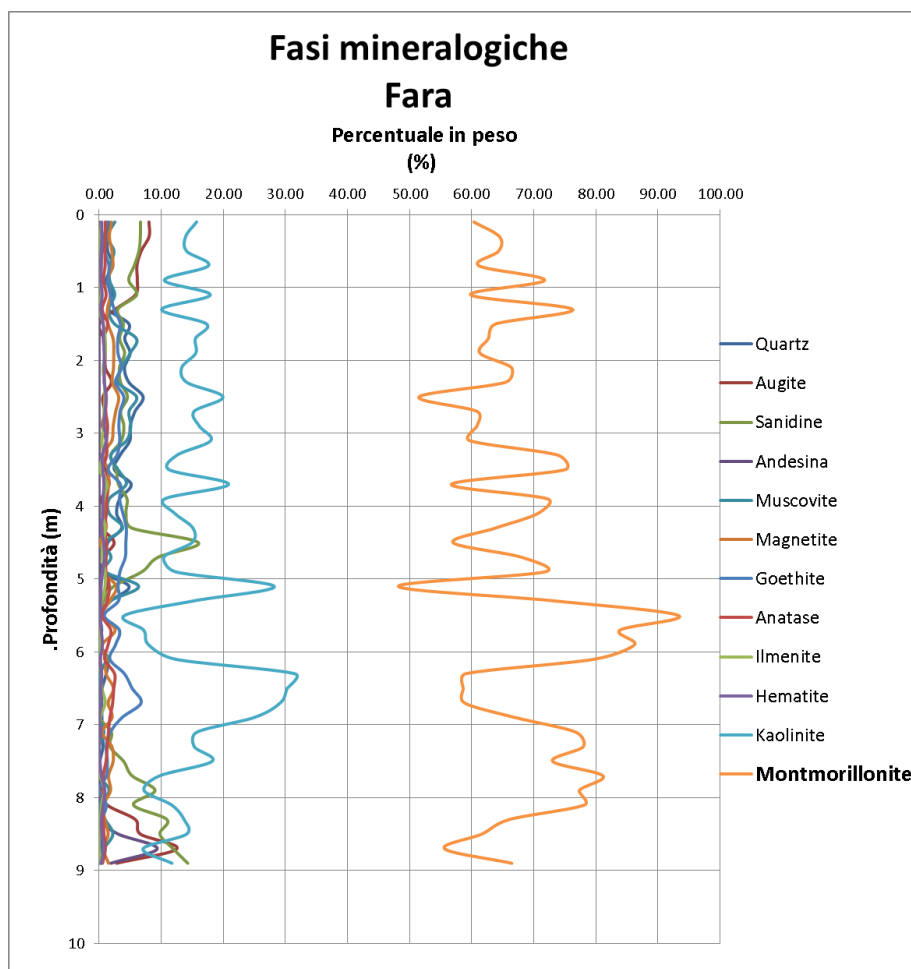


Fig.43: Fasi mineralogiche presenti nel terreno di Fara Vicentino (Fonte dati: Dalla Costa, 2014).

La maggior parte delle fasi mineralogiche sono presenti entro il 10-15% di contenuto in peso. La caolinite ha un andamento che oscilla maggiormente tra 10-20% di contenuto in peso con picchi fino al 30% a 5.0 metri e circa 6.0 metri di profondità. Preponderante è il contenuto di montmorillonite rispetto le altri fasi presenti che si aggira attorno al 60-70%. Un picco rilevante mostra il suo contenuto massimo di oltre il 90% alla profondità di 5.5 metri e un altro picco tra 7-8 metri dell' 80%. Il minimo contenuto lo si nota a 5 metri con un contenuto del 50%, subito prima del picco massimo.

### 2.2.3. Carrè

I dati riportati di seguito relativi ai risultati delle analisi di laboratorio mineralogico per la frana di Carrè sono derivati dalla consultazione della tesi magistrale “Caratterizzazione geotecnica e mineralogica di depositi vulcanici alterati soggetti a fenomeni di scivolamento nell’area pedemontana della Provincia di Vicenza” (Toaldo M., 2014).

Come per le due frane precedenti, i minerali costituenti i campioni, ad eccezione della montmorillonite, sono stati suddivisi in 3 diversi raggruppamenti fasi residuali, fasi lateritiche e fasi colluviali a seconda dell’ambiente di formazione (Fig.44).

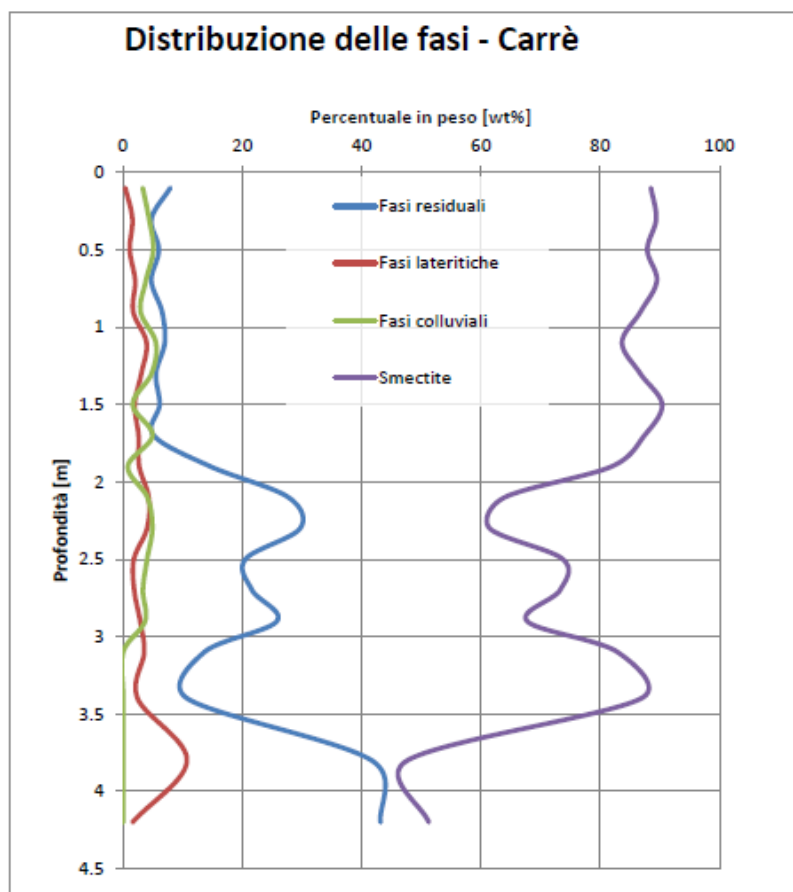


Fig.44: Distribuzione delle fasi di Carrè al variare della profondità (Fonte: Toaldo, 2014).

Come si può vedere in Figura 44, il profilo mineralogico a Carrè è suddivisibile in tre orizzonti.

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% (Toaldo, 2014)

Nel grafico seguente (Fig.45) vengono raffigurate le percentuali delle fasi mineralogiche presenti nel terreno di Carrè.

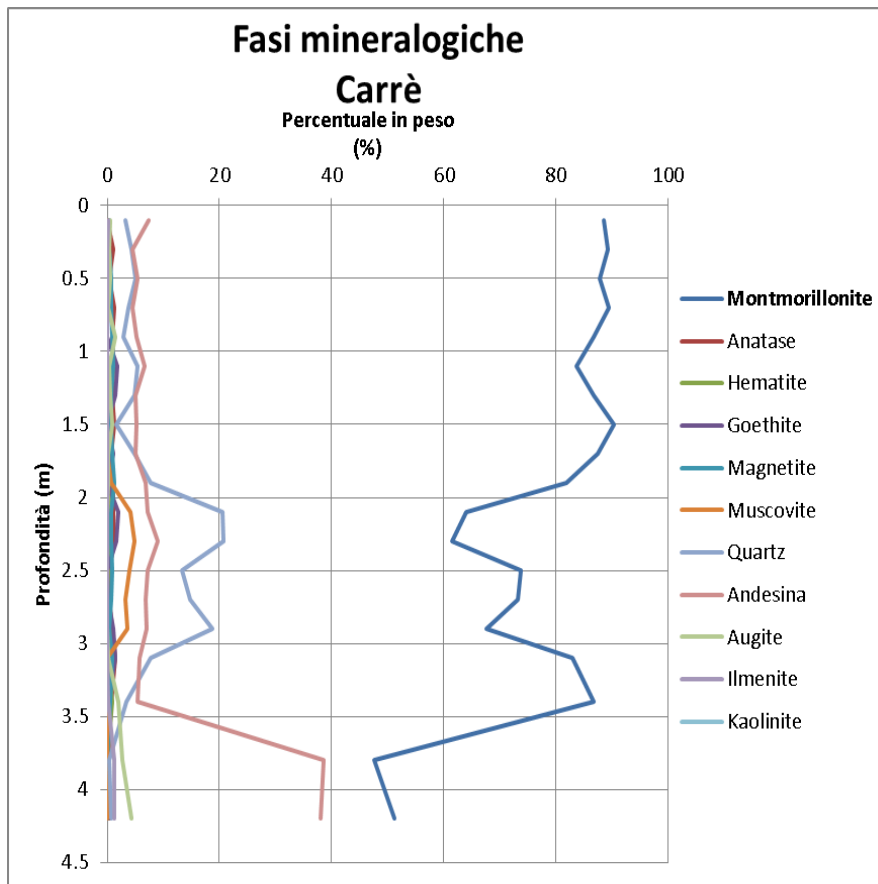


Fig.45: Fasi mineralogiche presenti nel terreno di Carrè (Fonte dati: Toaldo, 2014).

Tutte le fasi mineralogiche sono presenti tra 10-15% di contenuto in peso. Il quarzo presenta un aumento in peso fino al 20% tra i 2.0-3.0 metri. L'andamento dell'andesina risulta quasi speculare a quello della montmorillonite. Il contenuto rimane inalterato al 10-15% fino a 3.5 metri di profondità dove aumenta fino al 40% stabilizzandosi. Il contenuto della fase di montmorillonite risulta preponderante, con un contenuto che si aggira al 90% fino a 1.5 metri dal piano campagna. A profondità maggiore il contenuto diminuisce progressivamente a circa 60% fino a 2-2.5 metri di profondità. Con un andamento oscillatorio, il contenuto della montmorillonite aumenta progressivamente fino a raggiungere quasi il 90% a 3.5 metri di profondità, per poi diminuire vistosamente nel metro successivo fino a 40-45%.

## 2.3. Relazioni tecniche

Le informazioni seguenti derivano da relazioni tecniche stilate da professionisti per ciascuna area di dissesto.

### 2.3.1. Gamba di Monte di Malo

La relazione tecnica riguardante la frana di Gamba di Monte di Malo è stata stilata dallo studio di geologia Marcato in data 10 marzo 2011.

È stata effettuata una ricerca geologico-tecnica di dettaglio del sottosuolo con l'ausilio di prove in sito.

Al fine di definire l'estensione e la tipologia dell'area di dissesto, è stato realizzato un rilievo topografico satellitare (GPS), dal quale si sono prodotte planimetrie e sezioni (Fig.46).

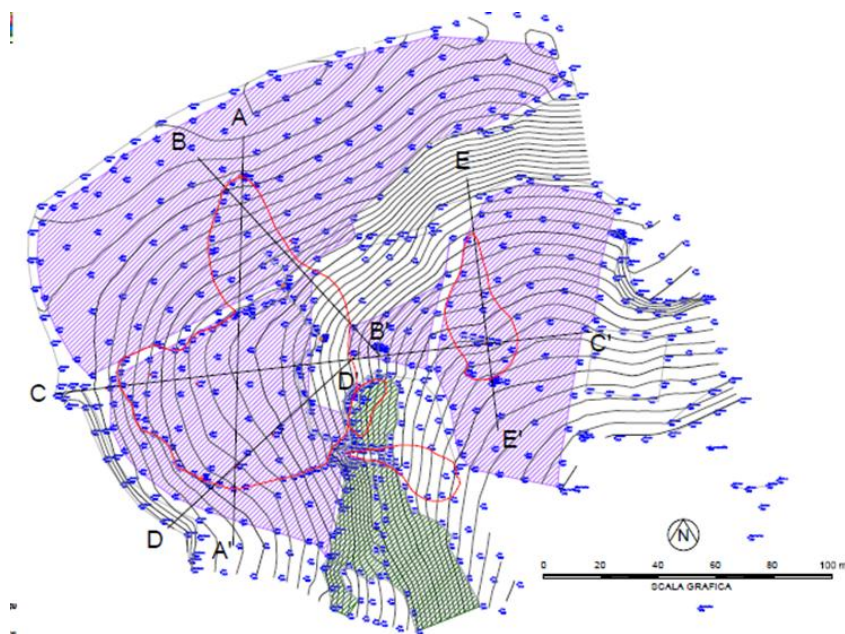


Fig.46: Rilievo topografico satellitare (GPS) dell'area di dissesto di Gamba di Monte di Malo (Fonte: studio di geologia Marcato).

Tra le varie sezioni a disposizione è stata utilizzata la sezione c-c' per l'elaborazione del modello di stabilità (Fig.47).

### Sezione C-C'

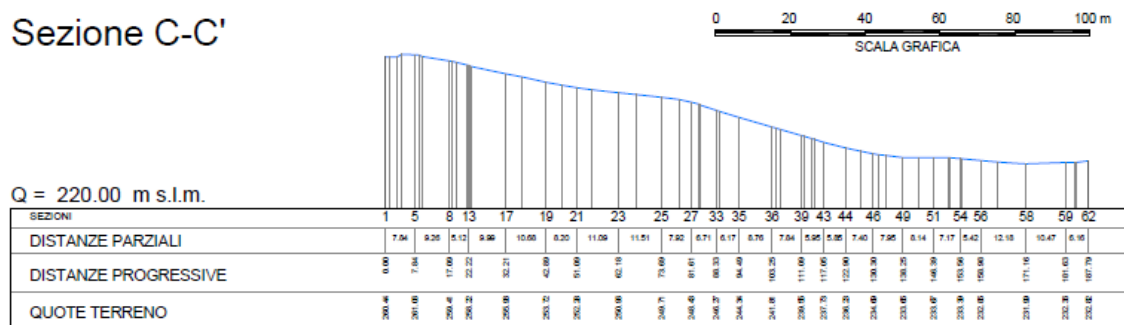


Fig.47: Sezione c-c' utilizzata per il modello di stabilità (Fonte: studio di geologia Marcato).

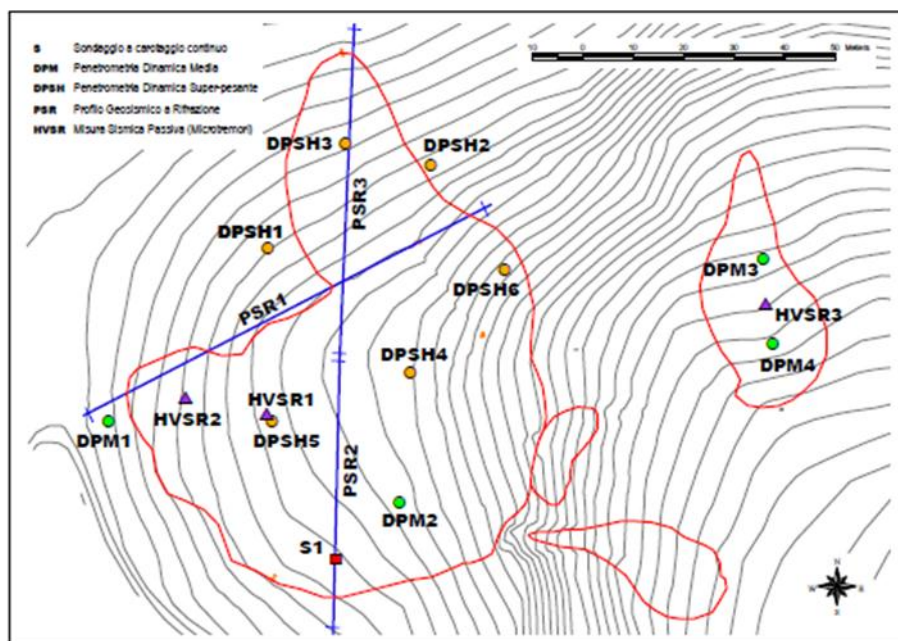


Fig.48: Ubicazione delle prove in sito nella frana di Gamba di Monte di Malo (Fonte: studio di geologia Marcato).

Sono stati presi in considerazione i risultati delle prove penetrometriche super pesanti DPSH5 posta a circa 46 metri dall'inizio della sezione e DPSH4 posta a circa 73 metri dall'origine (Fig.48). Dai risultati delle prove si sono osservati 3 orizzonti distinti (Fig.49) in base alle correlazioni con il risultato del sondaggio ed in base alla diversa resistenza alla penetrazione stimabile nello specifico sulla base del numero di colpi NDPSH / NDPM. Si nota quindi un livello superficiale "A" facilmente penetrabile e costituito da argille molli, che rappresentano i terreni soggetti a dissesto. In profondità poi sono presenti in successione un secondo livello "B" più consistente e costituito prevalentemente da limi entro cui le DPM si sono arrestate, e quindi dei depositi di versante ancora più consistenti, costituiti da ghiaie e sabbie "C", , che poggiano direttamente sul substrato roccioso impenetrabile anche da parte delle DPSH (Marcato, 2011).

DPSH5		PROFONDITA' (m)				N <sub>50</sub> (N)			R <sub>50</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	N <sub>50</sub>	DR(%)	CI(%)	Cu(kPa)
LIVELLO	NATURA	ab	a	spess.	med	min	med	max	med	med	med	med	med
A	Argille molli (corpo di frana)	0.0	3.8	3.8	19	1	3	6	25	4	0	0	47.13
B	Lim. argilloso-limosi	3.8	5.4	1.6	46	10	12	14	89	16	66	37	0.00
C	Ghiaie e sabbie adlerate	5.4	6.4	1.0	59	19	26	42	178	34	93	41	0.00

DPSH4		PROFONDITA' (m)				N <sub>50</sub> (N)			R <sub>50</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	N <sub>50</sub>	DR(%)	CI(%)	Cu(kPa)
LIVELLO	NATURA	ab	a	spess.	med	min	med	max	med	med	med	med	med
A	Argille molli (corpo di frana)	0.0	2.8	2.8	14	1	2	3	20	3	0	0	36.55
B	Lim. argilloso-limosi	2.8	4.8	2.0	38	5	8	11	65	11	58	36	0.00
C	Ghiaie e sabbie adlerate	4.8	6.2	1.4	55	16	25	46	178	33	92	41	0.00

Fig.49: Risultati delle prove penetrometriche superpesanti DPSH5 (in alto) e DPSH4 (in basso). (Fonte: studio di geologia Marcato).

È stato inoltre rilevato il livello di falda. In posizione della DPSH5 la falda si trova a 1.07 metri dal piano campagna e in DPSH4 la falda risulta a 2.7 metri di profondità (Marcato, 2011).

### 2.3.2. Fara Vicentino

La relazione tecnica riguardante la frana di Fara Vicentino è stata stilata dal Dott. Geol. Francesca Maroni in data 10 marzo 2011.

È stata effettuata una ricerca geologico-tecnica di dettaglio del sottosuolo con l'ausilio di prove in sito.

Al fine di definire l'estensione e la tipologia dell'area di dissesto, è stato realizzato un rilievo topografico satellitare (GPS), dal quale si sono prodotte planimetrie e sezioni (Fig.50).

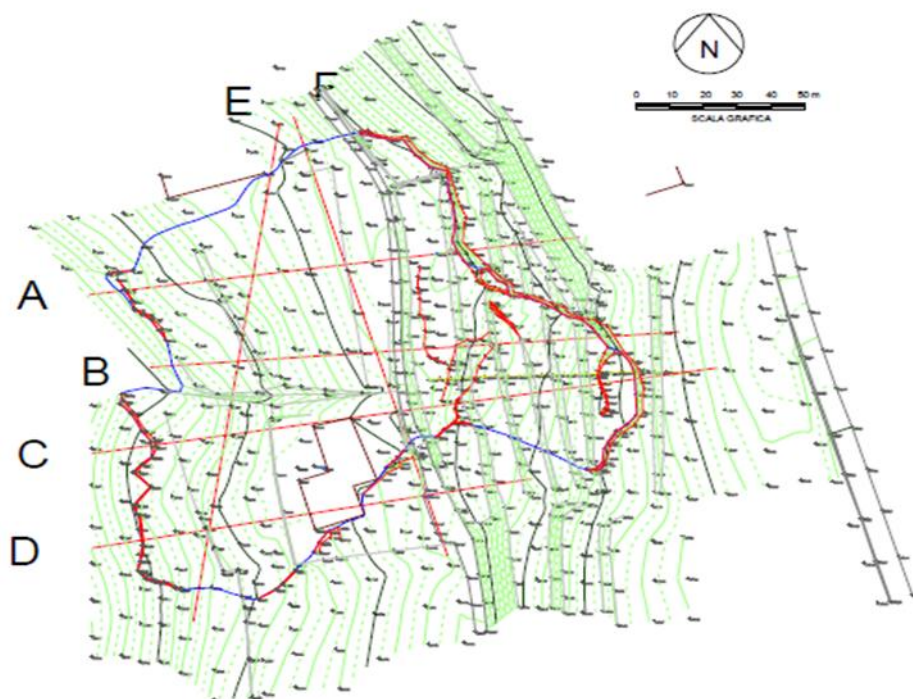


Fig.50: Rilievo topografico satellitare (GPS) dell'area di dissesto di Fara Vicentino (Fonte: Dott. Geol. Maroni, 2011).

Tra le varie sezioni a disposizione è stata utilizzata la sezione b-b' per l'elaborazione del modello di stabilità (Fig.51).



## Sezione B-B'

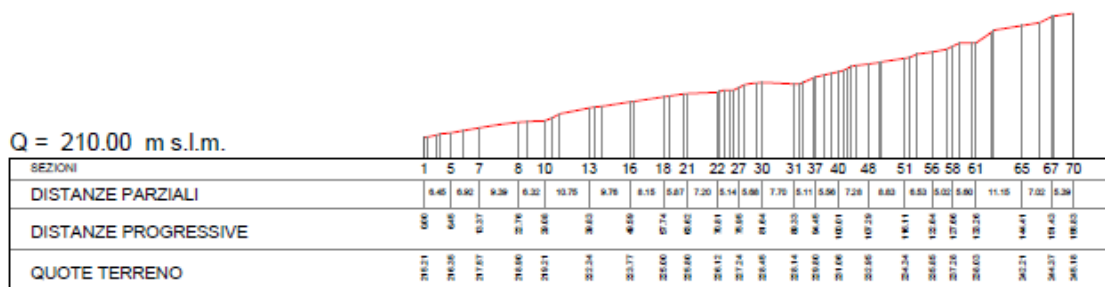


Fig.51: Sezione b-b' utilizzata per il modello di stabilità (Fonte: Dott. Geol. Maroni).

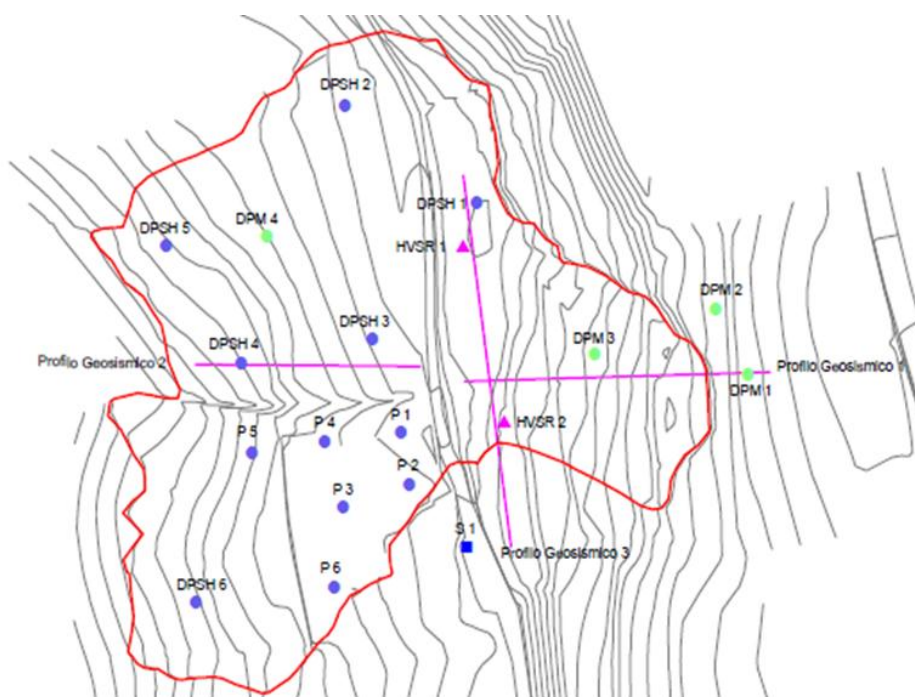


Fig.52: Ubicazione delle prove in sito (Fonte: Dott. Geol. Maroni).

Sono stati presi in considerazione i risultati delle prove penetrometriche super pesanti DPSH4 posta a circa 25 metri dall'inizio della sezione e DPSH3 posta a circa 58 metri dall'origine (Fig.52). Nel complesso comunque si sono osservati quattro orizzonti distinti (Fig.53) in base alle correlazioni con il risultato del sondaggio ed in base alla diversa resistenza alla penetrazione stimabile nello specifico sulla base del numero di colpi NDPSH / NDPM. Si nota quindi un livello superficiale "A" facilmente penetrabile

e costituito da argille molli. In profondità poi sono presenti in successione un secondo livello “B” costituito prevalentemente da argille mediamente consistenti, un terzo livello “C” costituito dalle argille di alterazione del substrato roccioso, e quindi dei depositi più consistenti, livello “D”, che poggiano direttamente sul substrato roccioso impenetrabile anche da parte delle DPSH (Dott. Geol. Maroni, 2011).

DPSH3		PROFONDITA' (m)				N <sub>60s1</sub>			R <sub>60s1</sub> (kPa)	N <sub>60r</sub>	DR(%)	σ <sub>v</sub> '	Q <sub>u</sub> (kPa)
LIVELLO	NATURA	ob	a	spess.	med	min	med	max	med	med	med	med	med
A	Argille molli	0.0	3.2	3.2	1.6	1	3	6	2843	4	0.00	0.00	15.20
B	Argille mediam. consistenti	3.2	5.2	2.0	4.2	5	8	11	5982	11	0.00	0.00	310.18
C	Argille conghiaie	5.2	7.2	2.0	6.2	13	16	20	10391	21	73	38	0.00
D	Regolite	7.2	7.6	0.4	7.4	26	27	28	16475	35	92	42	0.00

DPSH4		PROFONDITA' (m)				N <sub>60s1</sub>			R <sub>60s1</sub> (kPa)	N <sub>60r</sub>	DR(%)	σ <sub>v</sub> '	Q <sub>u</sub> (kPa)
LIVELLO	NATURA	ob	a	spess.	med	min	med	max	med	med	med	med	med
A	Argille molli (capo di frana)	0.0	4.0	4.0	2.0	1	2	3	1765	3	0.00	0.00	961
B	Argille mediam. consistenti	4.0	4.8	0.8	4.4	6	11	19	7943	14	0.00	0.00	411.68
D	Regolite	4.8	5.0	0.2	4.9	45	45	45	32460	59	127	46	0.00

Fig.53: Risultati delle prove penetrometriche superpesanti DPSH3 (in alto) e DPSH4 (in basso). (Fonte: Dott. Geol. Maroni).

È stato inoltre rilevato il livello di falda. In posizione della DPSH3 la falda si trova a 0.65 metri dal piano campagna e in DPSH4 la falda risulta a 1.57 metri di profondità (Dott. Geol. Maroni, 2011).

### 2.3.3. Carrè

La relazione tecnica riguardante la frana di Fara Vicentino è stata stilata dal Dott. Geol. Andrea Massagrande in data ottobre 2012.

È stata effettuata una ricerca geologico-tecnica di dettaglio del sottosuolo con l'ausilio di prove in sito.

Al fine di definire l'estensione e la tipologia dell'area di dissesto, sono state prodotte tre sezioni, la cui posizione la si può individuare in Figura 54:

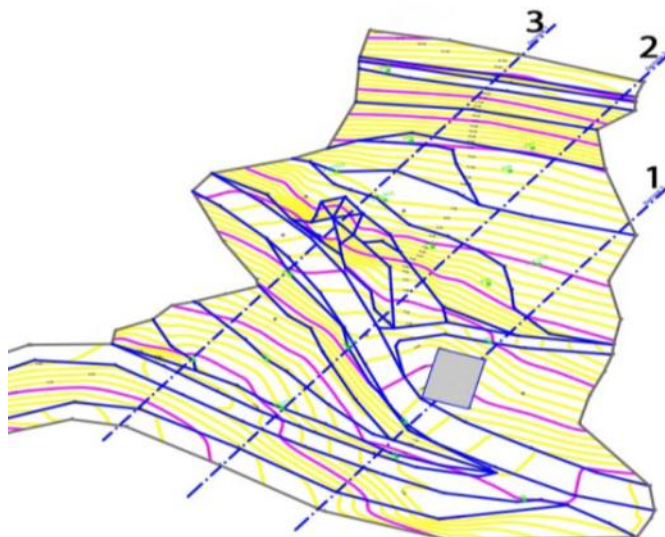


Fig.54: Posizione delle sezioni nell'area di dissesto di Carrè.

Tra le varie sezioni a disposizione è stata utilizzata la sezione 2 per l'elaborazione del modello di stabilità.

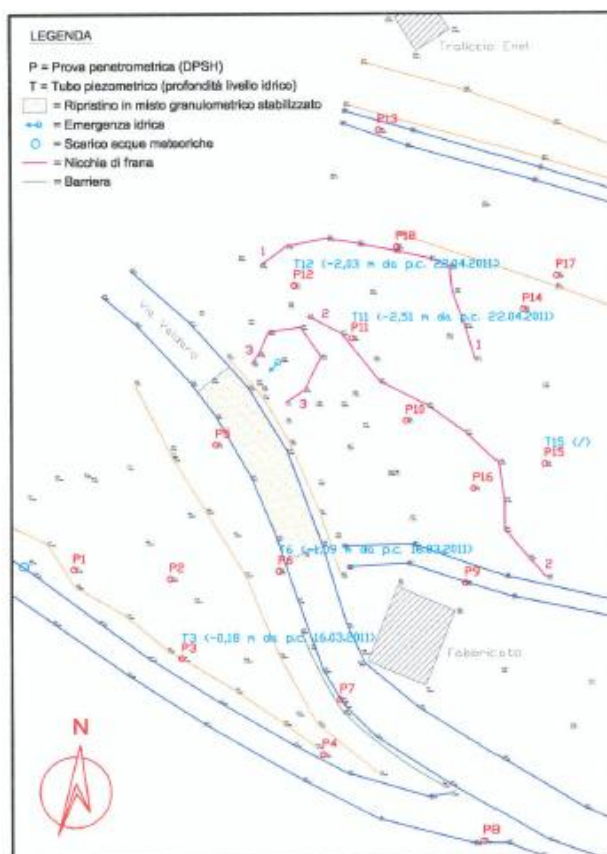


Fig.55: Ubicazione delle prove in sito (Fonte: Dott. Geol. Massagrande).

Visto che la raffigurazione delle prove in sito in Figura 55 non è molto chiara, in seguito verranno elencate le prove prese come riferimento.

Sono stati presi in considerazione i risultati delle prove penetrometriche super pesanti:

- DPSH17 posta a 2 metri dall'origine della sezione;
- DPSH17 posta a 8 metri dall'origine della sezione;
- DPSH10 posta a 29 metri dall'origine della sezione;
- DPSH6 posta a 54.5 metri dall'origine della sezione, con livello di falda misurato a 1.09 metri dal piano campagna;
- DPSH3 posta a 71.5 metri dall'origine della sezione, con livello di falda misurato a 0.18 metri di profondità.

Dalle analisi delle diagrafie penetrometriche si osserva che le prove sono state arrestate al rifiuto strumentale, correlabile nella fattispecie con il raggiungimento del substrato roccioso vulcanitico di base che non consente la penetrazione. I dati penetrometrici evidenziano la presenza di coperture detritiche, più superficialmente vulnerate dal dissesto, a prevalente frazione argilloso-limosa, a bassa resistenza meccanica, seguite dal substrato vulcanico che presenta caratteristiche di resistenza gradualmente crescenti con la profondità (Dott. Geol. Massagrande).

L'interfaccia coltre substrato, in corrispondenza delle verticali indagate, è stato intercettato alle seguenti profondità dal piano campagna (Fonte dati: Dott. Geol. Massagrande):

- 6.30 metri in DPSH3;
- 3.90 metri in DPSH6;
- 2.40 metri in DPSH10;
- 6.00 metri in DPSH14;
- 1.50 metri in DPSH17.

## **2.4. Considerazioni riassuntive dei dati**

Le prove di laboratorio sono state utili per comprendere le caratteristiche geotecniche dei terreni in esame. In particolare dai limiti di Atterberg è stato possibile caratterizzare il comportamento delle coltri di dissesto.

Il terreni di Gamba di Monte di Malo, di Fara Vicentino e di Carrè presentano la maggior parte dei campioni aventi indice di plasticità compreso tra 15 e inferiore ai 40, il terreno delle frane è considerato *plastico*.

Sono stati plottati i campioni di ogni frana all'interno della Carta di plasticità di Casagrande rappresentata in Fig.56. Dai valori di indice di plasticità e di limite liquido, i

tre terreni ricadono all'interno del campo MH e OH, ossia comprendente i *limi inorganici di elevata compressibilità* e *argille organiche con plasticità da media a alta*.

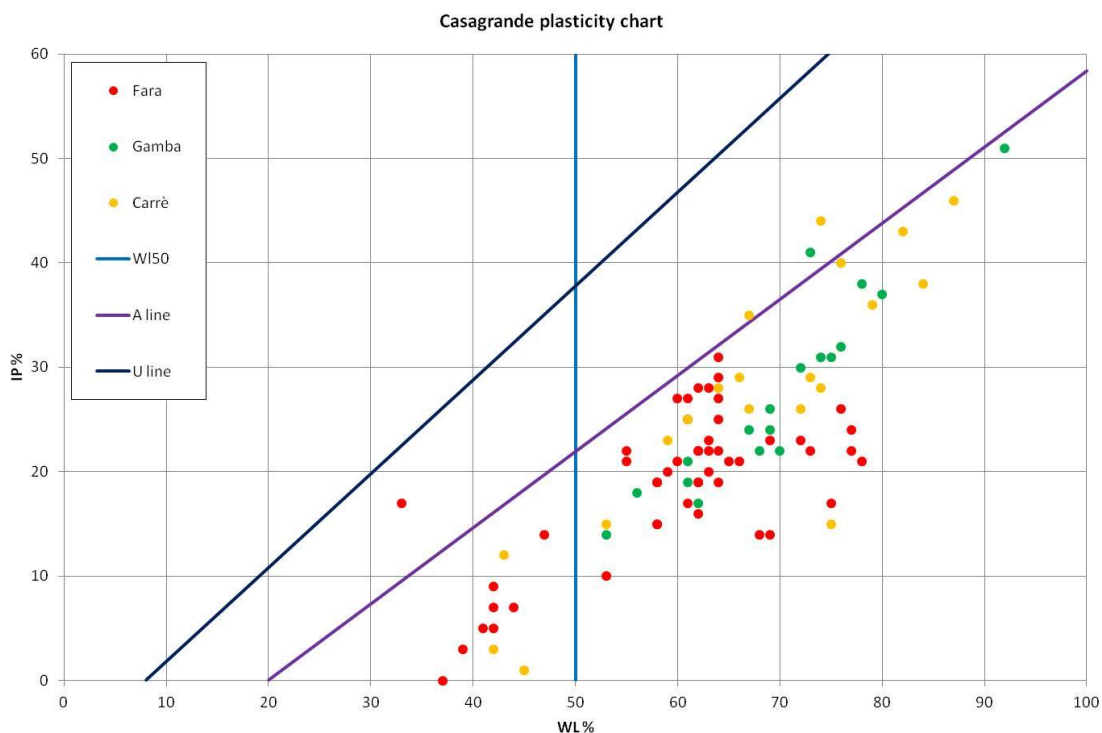


Fig.56: Campioni di terreno di Gamba di Monte di Malo, Fara Vicentino e Carrè plottati all'interno della Carta di plasticità.

Valori elevati di indice di plasticità sono tipicamente da associare alla presenza di minerali argillosi.

Sono state quindi utili visualizzare le analisi mineralogiche che hanno evidenziato per ciascuna frana, la preponderanza di montmorillonite. Questo minerale ha la caratteristica di espandersi abbondantemente in presenza di molecole d'acqua.

Nei grafici raffiguranti le fasi mineralogiche presenti in ciascun terreno di dissesto, si nota che la montmorillonite raggiunge una percentuale minima in peso attorno al 50%, mentre i massimi valori si aggirano oltre il 90%. Nonostante l'abbondanza di percentuale in montmorillonite può risultare un fattore che contribuisce a ridurre la

stabilità del versante, probabilmente la variazione rapida del contenuto di questa fase mineralogica all'interno della colonna stratigrafica di questi terreni crea punti di debolezza, o di accumulo di stress, che propagandosi formano dei piani, lungo i quali si può impostare la superficie di scivolamento della frana.

Questa ipotesi è validata se consideriamo che la profondità del piano di scivolamento delle frane desunta dalle relazioni tecniche stilate da professionisti, corrisponde con un buon grado di approssimazione alla profondità dove sono presenti le rapide variazioni del contenuto in montmorillonite.

Queste considerazioni rappresentano il punto di partenza per l'elaborazione dell'analisi di stabilità, descritta nel capitolo successivo.





### 3. ANALISI DI STABILITA' ALL'EQUILIBRIO LIMITE

#### 3.1. Caratteri teorici

I metodi di analisi della stabilità dei pendii più diffusi ed utilizzati nella pratica professionale sono **metodi all'equilibrio limite**, che ipotizzano per il terreno un comportamento rigido – perfettamente plastico. Si immagina cioè che il terreno non si deformi fino al raggiungimento della condizione di rottura, e che, in condizioni di rottura, la resistenza al taglio si mantenga costante e indipendente dalle deformazioni accumulate. Da tale ipotesi, fortemente semplificativa, consegue che:

- a) la rottura si manifesta lungo una superficie netta di separazione tra la massa in frana e il terreno stabile;
- b) la massa in frana è un blocco indeformato in moto di roto-traslazione rigida;
- c) la resistenza mobilitata lungo la superficie di scorrimento in condizioni di equilibrio limite è costante nel tempo, indipendente dalle deformazioni e quindi dai movimenti della frana, e ovunque pari alla resistenza al taglio;
- d) non è possibile determinare né le deformazioni precedenti la rottura, né l'entità dei movimenti del blocco in frana, né la velocità del fenomeno.

Inoltre la maggior parte dei metodi di verifica della stabilità dei pendii considerano il problema piano (cioè ipotizzano che la superficie di scorrimento sia di forma cilindrica con direttrici ortogonali al piano considerato), analizzando di norma una o più sezioni longitudinali del versante e trascurando gli effetti tridimensionali.

Ulteriori ipotesi semplificative, diverse da un metodo all'altro, sono necessarie per rendere il problema staticamente determinato, cosicché a parità di geometria e di caratteristiche fisico-meccaniche del terreno, il risultato dell'analisi, in termini di superficie di scorrimento critica (superficie per la quale il rapporto fra resistenza disponibile e resistenza mobilitata assume il valore minimo) e di coefficiente di

sicurezza (rapporto fra resistenza disponibile e resistenza mobilitata), non è unico ma dipende dal metodo adottato.

La condizione di equilibrio limite è verificata quando le forze agenti uguagliano le forze resistenti: in questo caso il versante si trova sul punto di collasso. Nel caso in cui la resistenza mobilitata in condizioni di equilibrio statico fosse minore di quella disponibile, il pendio risulterebbe stabile.

Ciò viene convenzionalmente espresso tramite un fattore di sicurezza  $F$  definito:

$$F = \frac{\text{resistenze disponibili}}{\text{resistenze mobilizzate}}$$

La massa potenzialmente instabile è suddivisa in un numero adeguato di conci. Ogni concio ha la base situata su una sola tipologia di terreno e per ogni concio sono calcolate le sollecitazioni, le resistenze e le pressioni dell'acqua.

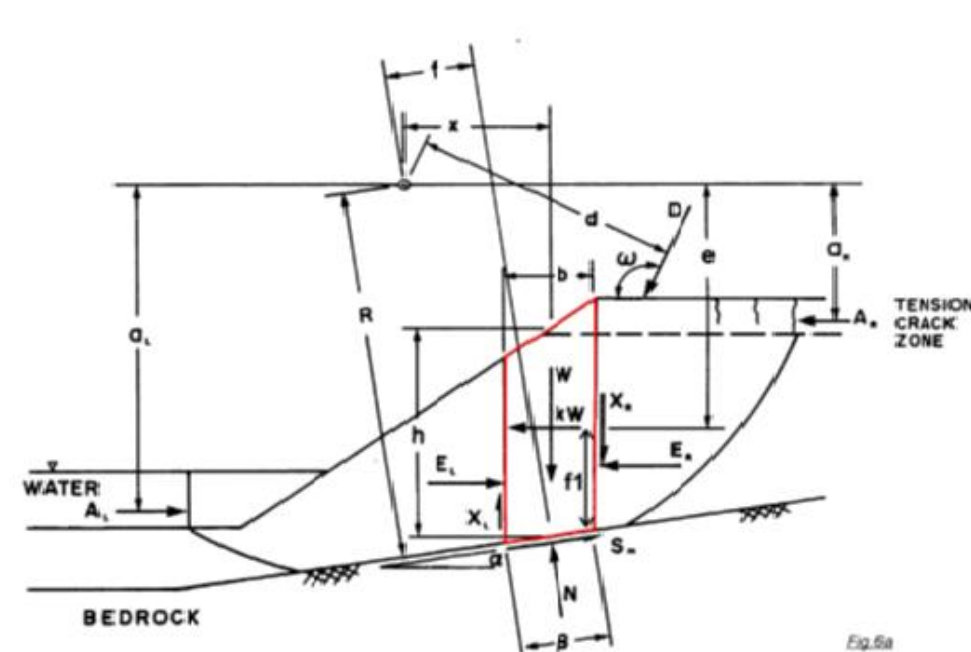


Fig.57: Forze agenti su un concio

Le variabili complessivamente in gioco (Fig.57) sono:

$W$  = peso totale del concio di larghezza  $b$  e altezza  $h$

$N$  = forza totale normale alla base del concio

**$S_m$**  = forza di taglio agente (mobilizzata) alla base di ogni concio  
 **$E$**  = forza normale interconcio  
 **$X$**  = forza di taglio interconcio  
 **$D$**  = carico esterno lineare  
 **$kW$**  = carico sismico orizzontale applicato al centroide di ogni concio  
 **$A$**  = risultante delle forze esterne dell'acqua  
 **$l$**  = lunghezza della base del concio  
 **$a$**  = angolo di inclinazione della base del concio  
 **$w$**  = angolo di inclinazione del carico lineare  **$D$**   
 **$f$**  = distanza tra il punto di applicazione di  **$N$**  e il centro di rotazione o dei momenti  
 **$f_1$**  = distanza tra il punto di applicazione di  **$E$**  e il centro di rotazione o dei momenti  
 **$x$**  = distanza orizzontale tra la linea centrale di ogni concio e il centro di rotazione o dei momenti  
 **$e$**  = distanza verticale tra il centroide di ogni concio e il centro di rotazione o dei momenti  
 **$d$**  = distanza perpendicolare dalla risultante di un carico esterno lineare  **$D$**  e il centro di rotazione o dei momenti  
 **$a$**  = distanza perpendicolare dalla risultante delle forze esterne dell'acqua e il centro di rotazione o dei momenti  
 **$R$**  = raggio di una superficie di scorrimento circolare o braccio del momento associato alla resistenza mobilizzata  **$S_m$**  per una superficie di scorrimento di forma non-circolare

Se la massa potenzialmente instabile è suddivisa in  **$n$  concii**, l'equazione risolutiva conterrà le seguenti incognite:

<b><math>n</math></b>	forze normali <b><math>N</math></b> agenti alla base del concio (la distribuzione delle pressioni interstiziali $u$ è assunta nota)
<b><math>n</math></b>	forze tangenziali <b><math>S_m</math></b>
<b><math>n-1</math></b>	forze normali interconcio <b><math>E</math></b>
<b><math>n-1</math></b>	forze tangenziali interconcio <b><math>X</math></b>
<b><math>n</math></b>	distanze <b><math>f</math></b> tra il punto di applicazione di <b><math>N</math></b> e il centro di rotazione o dei momenti
<b><math>n-1</math></b>	distanze <b><math>f_1</math></b> tra il punto di applicazione di <b><math>E</math></b> e il centro di rotazione o dei momenti
<b><math>1</math></b>	valore del Fattore di Sicurezza
<b><math>6n-2</math></b>	<b>numero totale di incognite</b>

Le equazioni disponibili relative all'equilibrio statico delle forze e dei momenti risultano:

<b>n</b>	sommatoria delle forze orizzontali
<b>n</b>	sommatoria delle forze verticali
<b>n</b>	sommatoria dei momenti
<b>n</b>	equazione del Fattore di Sicurezza
<b>4n</b>	<b>numero totale di equazioni</b>

---

Poiché il numero di incognite è maggiore del numero di equazioni, il problema risulta indeterminato dal punto di vista statico. E' necessario quindi, introdurre un numero di assunzioni tale da rendere il numero di equazioni uguale al numero di incognite, in modo tale che il problema diventi risolvibile dal punto di vista numerico.

Diversi Autori hanno effettuato varie assunzioni per rendere determinato il problema dal punto di vista statico e tutte si basano sulle forze interconco. I metodi più comunemente utilizzati sono riportati nella tabella seguente (Fig.58):

Tabella 7.2. Caratteristiche dei metodi dell'equilibrio limite più utilizzati per l'analisi di stabilità dei pendii	
METODO	LIMITAZIONI, ASSUNZIONI, E CONDIZIONI DI EQUILIBRIO CHE DEVONO ESSERE SODDISFATTE
Metodo ordinario dei concii (Fellenius 1927)	Coefficienti di sicurezza bassi, metodo poco accurato per pendii di modesta pendenza e con elevati valori della pressione interstiziale, applicabile solamente a superfici di scivolamento circolari, assume che la forza normale alla base di ogni concio è pari a $w \cdot \cos\alpha$ , un'equazione (momento di equilibrio alla rotazione dell'intera massa), un'incognita (coefficiente di sicurezza)
Metodo di Bishop modificato (Bishop 1955)	Metodo di calcolo accurato, applicabile solamente a superfici di rottura circolari. Soddisfa l'equilibrio alla traslazione verticale e l'equilibrio alla rotazione, assume che le forze scambiate all'interfaccia dei diversi concii siano orizzontali, $N+1$ equazioni ed incognite
Metodi di equilibrio delle forze	Soddisfano l'equilibrio delle forze; sono applicabili a superfici di scorrimento di forma qualsiasi. Assumono per le forze di interfaccia dei vari concii un'inclinazione che può essere la medesima per tutti i concii o differire da concio a concio. Se l'inclinazione delle forze che si scambiano i vari concii è modesta si ottengono valori del coefficiente di sicurezza inferiori a quelli che si ottengono adottando metodi che soddisfano tutte le condizioni di equilibrio, al contrario se l'angolo di inclinazione delle forze che si scambiano i diversi concii è elevato, i coefficienti di sicurezza calcolati sono superiori a quelli che si ottengono adottando metodi che soddisfano tutte le condizioni di equilibrio, $2N$ equazioni ed incognite
Metodo di Janbu Semplificato (Janbu 1968)	Metodo basato sull'equilibrio delle forze, applicabile a superfici di rottura di forma qualsiasi; assume che le forze di interfaccia fra i diversi concii siano orizzontali, i coefficienti di sicurezza calcolati sono usualmente considerevolmente più bassi di quelli calcolati utilizzando metodi che soddisfano tutte le condizioni di equilibrio, $2N$ equazioni ed incognite
Metodo Svedese Modificato (U.S. Army Corps of Engineers 1970)	Metodo basato sull'equilibrio delle forze, applicabile a qualsiasi forma di superficie di scorrimento, assume che l'inclinazione delle forze scambiate tra i diversi concii abbiano inclinazione uguale a quella del pendio e uguale per tutti i concii; i coefficienti di sicurezza sono spesso considerevolmente più elevati di quelli che si possono ottenere utilizzando metodi che soddisfano tutte le condizioni di equilibrio, $2N$ equazioni ed incognite
Metodo di Lowe e Karafiath's (Lowe e Karafiath 1960)	Generalmente più accurato dei metodi basati sull'equilibrio delle forze, applicabile a superfici di scivolamento di qualsiasi forma; per le forze che si scambiano i concii si assume che abbiano un'inclinazione intermedia fra l'inclinazione del pendio e quella della superficie di scivolamento (variabile da concio a concio); soddisfa l'equilibrio alla traslazione verticale ed orizzontale, $2N$ equazioni ed incognite
Procedura dei concii generalizzata di Janbu (Janbu 1968)	Soddisfa tutte le condizioni di equilibrio, applicabile a superfici di scivolamento di forma qualsiasi; assume il valore dell'altezza di applicazione delle forze scambiate fra i diversi concii, con riferimento alla base del concio (variabile da concio a concio), si hanno più frequentemente di altri metodi problemi di convergenza numerica, metodo accurato, $3N$ equazioni ed incognite
Metodo di Spencer (1967)	Soddisfa tutte le condizioni di equilibrio, applicabile a superfici di scivolamento di forma qualsiasi, metodo accurato, $3N$ equazioni ed incognite
Metodo di Morgenstern e Price (Morgenstern e Price 1965)	Soddisfa tutte le condizioni di equilibrio, applicabile a qualsiasi forma di superficie di scorrimento, assume che l'inclinazione delle forze che si scambiano i concii segue un ben definito modello, definito da una funzione $f(x)$ , l'inclinazione delle forze scambiate dai concii può essere variabile da concio a concio o può essere la medesima per tutti i concii; l'inclinazione di tali forze è calcolata durante l'analisi di stabilità al fine di soddisfare tutte le condizioni di equilibrio, metodo accurato, $3N$ equazioni ed incognite
Metodo di Sarma (Sarma 1973)	Soddisfa tutte le condizioni di equilibrio, applicabile a superfici di rottura di forma qualsiasi; assume che il valore delle forze verticali che si scambiano i concii seguano un determinato modello; determina l'accelerazione critica per la quale il pendio ha un coefficiente di sicurezza pari a 1, $3N$ equazioni, $3N$ incognite.

Fig.58: Metodi principali utilizzati nell'analisi di stabilità (Fonte: corso di Geologia Tecnica e Progettazione Geologico-tecnica).

In sostanza, considerando i risultati ottenuti da studi comparativi sui metodi di analisi di stabilità, si può riassumere che:

- I metodi come Janbu, Spencer e Morgenstern & Price che soddisfano sia l'equilibrio delle forze sia quello dei momenti, forniscono risultati accurati (errore del 5%) per l'analisi di versanti.
- Il metodo Bishop che soddisfa solo l'equilibrio dei momenti, fornisce l'accuratezza dei dati ad eccezione del caso in cui la superficie di scorrimento sia fortemente inclinata al piede, dove si utilizzerà un metodo

che considera la distribuzione delle forze interconco (es. Morgenstern & Price).

- Altri metodi che non soddisfano tutte le condizioni di equilibrio possono non fornire dati esatti.

Importante è l'influenza della pressione dei pori nell'espressione del fattore di sicurezza, che considerando un peso dell'unità di volume costante sia sopra sia sotto la falda, può essere espresso come:

$$F = \frac{c + (\gamma z \cos^2 \alpha - \mu A) \tan \phi}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha}$$

Dove:

$\gamma$  = peso dell'unità di volume del terreno

$z$  = profondità della superficie di scorrimento

$\alpha$  = inclinazione della superficie di scorrimento nella zona di rottura rispetto al piano orizzontale

$c$  = coesione

$\phi$  = angolo di attrito interno

$\mu A$  = pressione dei pori

Nel caso che la pressione dei pori sulla superficie di scorrimento risulti più elevata di quella idrostatica (flusso diretto verso l'alto), il fattore di sicurezza diminuisce e il versante risulterà meno stabile. Nel caso contrario, una pressione di pori sulla superficie di scorrimento minore di quella idrostatica farà aumentare il fattore di sicurezza.

Nel caso particolare di un terreno puramente attrittivo con  $c=0$  e terreno completamente saturo (falda al piano campagna), il fattore di sicurezza si ridurrà a:

$$F = \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma}\right) \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}$$

Nel caso di terreno in assenza di fluidi e privo di coesione avrò:

$$F = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha}$$

Il calcolo di stabilità di un versante si basa sul confronto tra le forze resistenti e le forze che agiscono lungo una determinata superficie di scivolamento. La superficie critica al momento di rottura ( $F=1$ ), avrà caratteristiche di forma e posizione che dipenderanno essenzialmente dalla geometria del versante, dalle condizioni idrauliche, dalle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e da eventuali carichi esterni applicati.

Pertanto, se si conosce la posizione della superficie di scivolamento, la geometria del versante e le caratteristiche dei terreni, è possibile calcolare le condizioni idrauliche e di resistenza che hanno portato alla rottura il versante. Il fattore di sicurezza non sarà un elemento da calcolare ma un valore noto, risultando teoricamente uguale a 1 nel momento di rottura.

Queste analisi prevedono innanzitutto la definizione della situazione topografica e la ricostruzione della stratigrafia, mediante sondaggi e prove eseguite in campo e in laboratorio, definendo le caratteristiche dei terreni mediante parametri idraulici e meccanici. La modifica dei parametri dei terreni più vulnerabili a rottura, permette di effettuare ipotesi ragionevoli sulle condizioni del sito al momento dell'avvenuto movimento franoso.

### 3.2. Modellazione con Geostudio 2007

Geostudio 2007 è un software di analisi numerica utilizzato da ingegneri geotecnici, idrogeologi e geologi e comprende l'analisi di stabilità all'equilibrio limite e sette applicazioni per la modellazione agli elementi finiti.

L'applicazione utilizzata sarà SLOPE/W per l'analisi di stabilità dei versanti in terra e roccia.

Solitamente con questo software si esegue un'analisi di stabilità "diretta", ossia conoscendo i valori di parametri di coesione, angolo di attrito e peso di volume dei terreni interessati e l'esatto livello di falda, è possibile individuare la profondità in cui si è imposta la superficie di scivolamento.

In questo caso invece, le relazioni tecniche hanno permesso di definire la posizione del coronamento e del piede delle tre frane. Sono stati quindi imposti l'inizio e la fine di ciascuna superficie di scivolamento. Inoltre, basandoci sui risultati delle prove mineralogiche e geotecniche, è stato identificato lo strato con le caratteristiche geotecniche più scadenti: questo corrisponde allo strato con la maggior variazione del contenuto in montmorillonite. Si è valutato che la superficie di scivolamento si sviluppi in corrispondenza di tale strato e si è quindi, imposto un punto all'interno di tale strato per cui la superficie critica debba passare. L'obiettivo finale dell'analisi è stimare i valori dei parametri geotecnici che possano creare le condizioni per le quali il fattore di sicurezza scenda sotto l'unità, quindi alla situazione di instabilità del versante. Per raggiungere tale obiettivo sono stati variati i valori di tali parametri, seguendo un preciso schema logico.

La prima operazione è la creazione della geometria del versante (Fig.59). Inserendo le varie coordinate (x, z) dei punti noti si definisce la superficie topografica dell'area di interesse e gli spessori degli strati che caratterizzano il modello geotecnico concettuale.



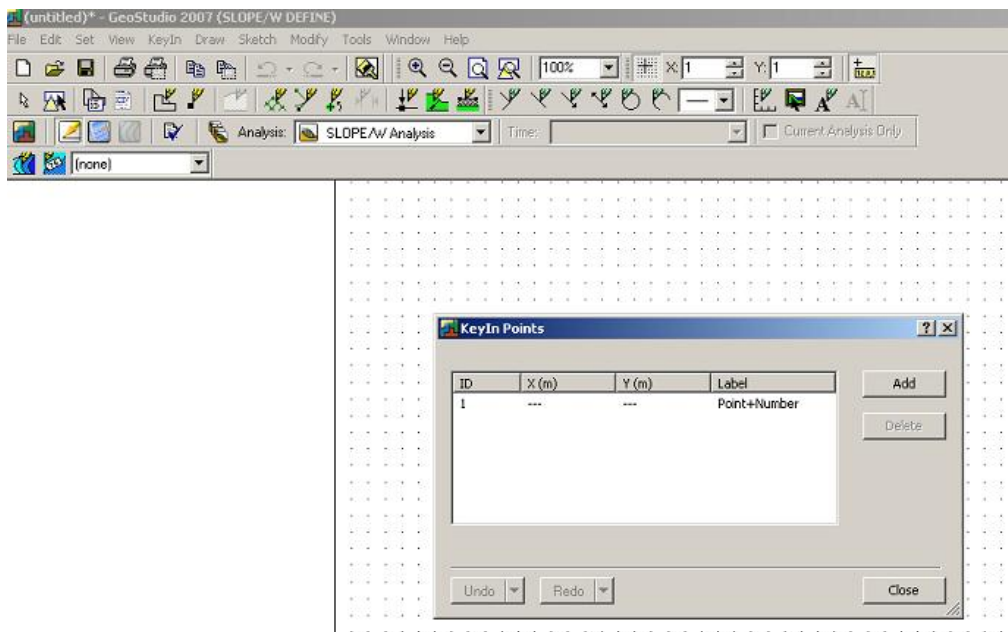


Fig.59: Particolare del programma Geostudio 2007 relativo alla creazione del modello all'interno della griglia.

L'analisi segue il modello di Morgenstern & Price.

Il criterio di rottura applicato è il modello Mohr-Coulomb. Esso si basa sulla definizione dei seguenti parametri geotecnici del materiale:

- $\gamma$  = peso di volume [ $kN/m^3$ ]
- $c$  = coesione [kPa]
- $\phi$  = angolo di attrito [°]

Una volta inseriti i parametri si dà l'avvio alla soluzione dell'analisi. Il risultato è in grado di fornire il fattore di sicurezza del modello in esame e creare la superficie di scivolamento idonea alle caratteristiche inserite.

E' possibile produrre nuove configurazioni con diverse caratteristiche e ricalcolare nuovamente la nuova condizione di stabilità del modello.

L'obiettivo della modellazione è verificare quali parametri geotecnici dei terreni e quali condizioni idrogeologiche, portano il versante a condizioni di rottura. Il punto di partenza è la creazione di un modello numerico attraverso l'ausilio dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio, delle analisi mineralogiche e delle prove in sito all'interno delle relazioni tecniche citate nel capitolo 2 "Caratteristiche geotecniche e mineralogiche".

La scelta delle sezioni utilizzate per la modellazione delle aree di studio di Gamba di Malo, Fara Vicentino e Carrè già descritte nel paragrafo “Relazioni tecniche” all’interno del Capitolo 2 è stata effettuata in base alla direzione di movimento della frana e all’ubicazione delle prove eseguite in sito.

Sono stati presi in considerazione due modelli geotecnici:

a) Il modello stratigrafico seguirà una struttura a 4 strati (orizzonti A, Abis, B, C) validato dalle considerazioni sulle analisi mineralogiche e prove geotecniche. La scelta della zonazione mineralogica parte dall’esistenza di un livello ricco di montmorillonite (orizzonte Abis), all’interno del primo orizzonte A, posizionato in corrispondenza alla variazione maggiore del contenuto in peso di montmorillonite (Paragrafo 2.2. “Laboratorio mineralogico”), che può dar luogo a una superficie di debolezza. Per vincolare il passaggio della superficie di scivolamento all’interno di tale strato, sarà imposto all’interno di quest’ultimo un punto per cui la superficie dovrà passare. I parametri saranno calibrati all’interno dell’orizzonte Abis.

b) Il modello successivo seguirà una zonazione geotecnica a 3 strati (orizzonti A, B, C). Questa ipotesi è validata dal fatto che l’orizzonte A è molto ricco in contenuto di montmorillonite. Ciò può a una debolezza diffusa dell’intero strato A. Il passaggio della superficie di scivolamento è stato vincolato alla base del suddetto strato e i parametri calibrati comprenderanno l’intero orizzonte A.

In seguito viene riportata la modellazione con le due configurazioni per ognuna delle tre frane. Sono state rappresentate e calcolate diverse casistiche con la falda a differenti profondità dal piano campagna. Essendo in possesso di dati piezometrici non affidabili e incompleti, è stata implementata un’analisi con una falda sub-parallela al piano campagna, collocata a diverse profondità. Infine sono stati abbattuti man mano i parametri riguardanti lo strato con caratteristiche di resistenza più scarse, al solo scopo di portare il fattore di sicurezza vicino all’unità, quindi in condizioni di instabilità del versante:

a) Falda assente;

b) Posizione di falda in condizioni ordinarie, ottenuta mediante i livelli di falda misurati durante le prove in situ.

c) Falda a piano campagna

Per simulare quanto avvenuto durante l'alluvione nella Provincia di Vicenza del 2010, si manterrà costante il livello di falda a piano campagna. Verrà abbassato gradualmente prima il parametro di coesione mantenendo costante l'angolo di attrito, successivamente si abbasserà gradualmente l'angolo di attrito con il valore di coesione iniziale.

In questo modo si mostreranno le configurazioni che porteranno il fattore di sicurezza vicino all'unità, quindi in situazione di instabilità del versante, evidenziando l'influenza che avrà ciascun parametro nella condizione di stabilità.

### 3.3. Modellazione della frana di Gamba di Monte di Malo

La sezione utilizzata per la modellazione è c-c', scelta tra le varie sezioni eseguite dai professionisti (Paragrafo 2.3. "Relazioni tecniche") per la direzione risultante parallela al movimento di frana e per la presenza di prove penetrometriche realizzate in prossimità di essa (Fig.60).

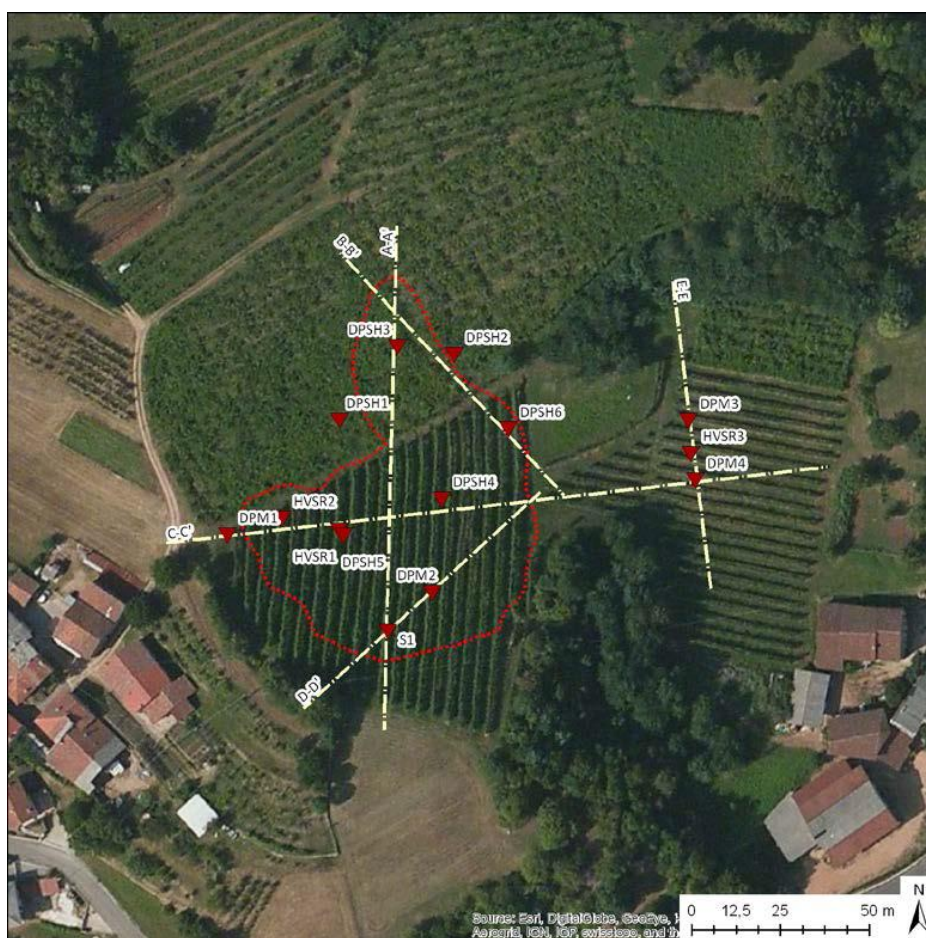


Fig.60: Sezione c-c' e posizione delle prove penetrometriche nella frana di Gamba di Monte di Malo.

Inizialmente è stata discretizzata la griglia dove si è costruita la geometria del versante. Il punto di origine (0,0) rappresenta l'inizio della sezione c-c' scelta a una quota di circa 261 metri; la sezione ha una lunghezza che si aggira sui 134 metri, terminando alla quota di 234 metri.

Sono stati imposti il coronamento e il piede della frana, coordinate note lungo la sezione posti rispettivamente a 18 metri e a 98 metri dall'origine della sezione (la direzione di movimento della frana è da sinistra a destra della sezione).

Considerando i livelli di falda misurati durante le prove penetrometriche di interesse (Paragrafo 2.3.1. "Relazioni tecniche" relativo a Gamba di Monte di Malo) si è valutato di posizionare la falda in condizioni ordinarie a circa 1.5 metri di profondità dal piano campagna (Fig.1.02 per la modellazione a 4 strati e Fig.1.16 per la modellazione a 3 strati, presenti nell' Allegato 1).

Di seguito verranno rappresentate la geometria del versante nelle due modellazioni: a 4 strati nella zonazione mineralogica; a 3 strati nella zonazione geotecnica.

Tutte le configurazioni della frana di Gamba di Monte di Malo per entrambi i modelli geotecnici, vengono riportate nell'Allegato 1.

### 3.3.1. Zonazione mineralogica

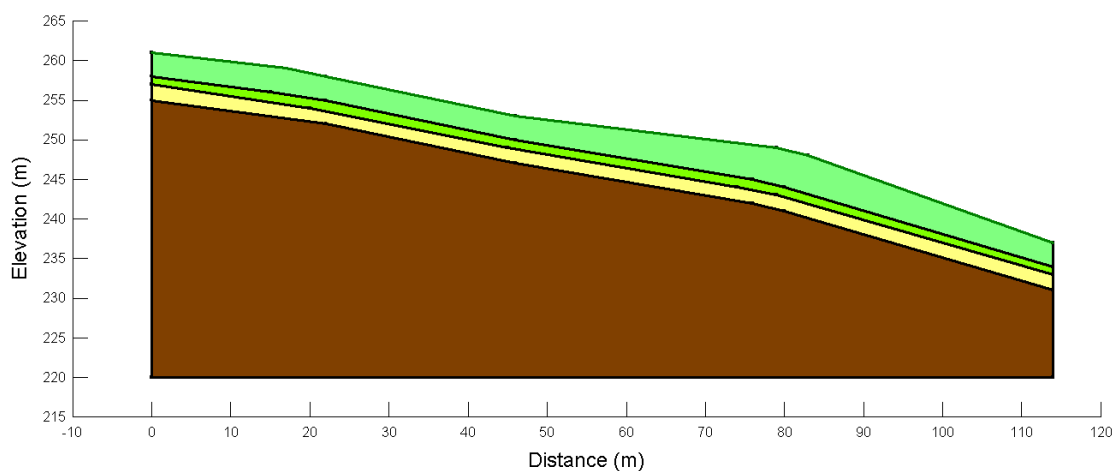


Fig.61 : Schematizzazione a quattro strati della morfologia del versante della frana di Gamba di Monte di Malo.

Il modello (Fig.61) presenta una geometria a quattro strati con le seguenti caratteristiche fornite dalle analisi mineralogiche e geotecniche di laboratorio:

- Orizzonte **A**: Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 4 metri comprendente lo strato Abis;
- Orizzonte **Abis**: Livello ricco di montmorillonite con spessore di 1 metro, posto alla base dello strato A alla profondità di circa 3-4 metri (come indicato nelle indagini mineralogiche);
- Orizzonte **B**: Limo con sabbia debolmente argilloso, con spessore di circa 2 metri;
- Orizzonte **C**: Roccia vulcanica alterata.

Ogni strato è caratterizzato dai parametri riportati in Tabella 4. A partire dai risultati delle prove penetrometriche, sono stati stimati i valori  $\phi$  (Sowers, 1961);  $\gamma$  e  $\gamma'$  (Meyerhof, 1956);  $c$  (Terzaghi and Peck, 1967).

Strato	$\gamma'$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c$ (KPa)
A	14,9	18,1	28,4	9,1
B	18,7	20,0	31,2	75,0
C	23,9	24,0	39,2	289,4

Tab.4: Parametri assegnati agli strati costituenti il terreno di Gamba di Monte di Malo, stimati a partire dai risultati delle prove penetrometriche.

Dove:

- $\gamma$  e  $\gamma'$ : peso di volume e peso di volume saturo [kN/m<sup>3</sup>]

- $\phi$ : angolo di attrito [°]

- $c$ : coesione [kPa]

Secondo le indicazioni fornite dalle indagini mineralogiche, si è voluto vincolare il passaggio della superficie di scivolamento all'interno dell'orizzonte Abis, posizionato a 3-4 metri di profondità dal piano campagna e i parametri saranno calibrati al suo interno.

### 3.3.2. Zonazione geotecnica

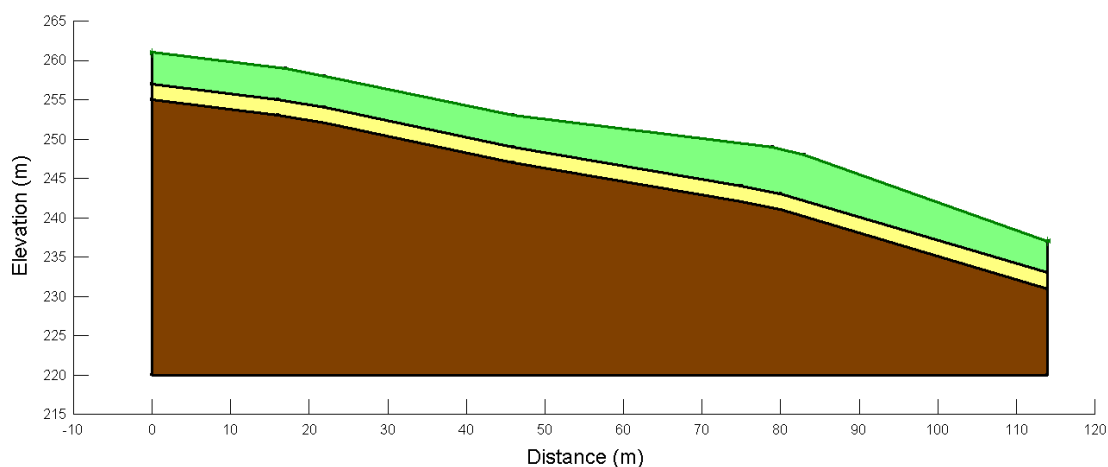


Fig.62 : Schematizzazione a tre strati della morfologia del versante della frana di Gamba di Monte di Malo.

Il modello (Fig.62) presenta una geometria a tre strati con le seguenti caratteristiche fornite dalle analisi mineralogiche e geotecniche di laboratorio:

- Orizzonte **A**: Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 4 metri;
- Orizzonte **B**: Limo con sabbia debolmente argilloso, con spessore di circa 2 metri;
- Orizzonte **C**: Roccia vulcanica alterata

Ogni strato è caratterizzato dai parametri riportati nella precedente Tabella 4 utilizzata per la zonazione mineralogica.

Come per la configurazione a quattro strati, il passaggio della superficie di scivolamento è stato vincolato a 3-4 metri di profondità, alla base dell'orizzonte A. I parametri sono calibrati per l'intero strato A.

### 3.4. Modellazione della frana di Fara Vicentino

La sezione utilizzata per la modellazione di Fara Vicentino è b-b', scelta tra le varie sezioni eseguite dai professionisti (Paragrafo 2.3. "Relazioni tecniche") per la direzione risultante parallela al movimento di frana e per la presenza di prove penetrometriche realizzate in prossimità di essa (Fig.63).

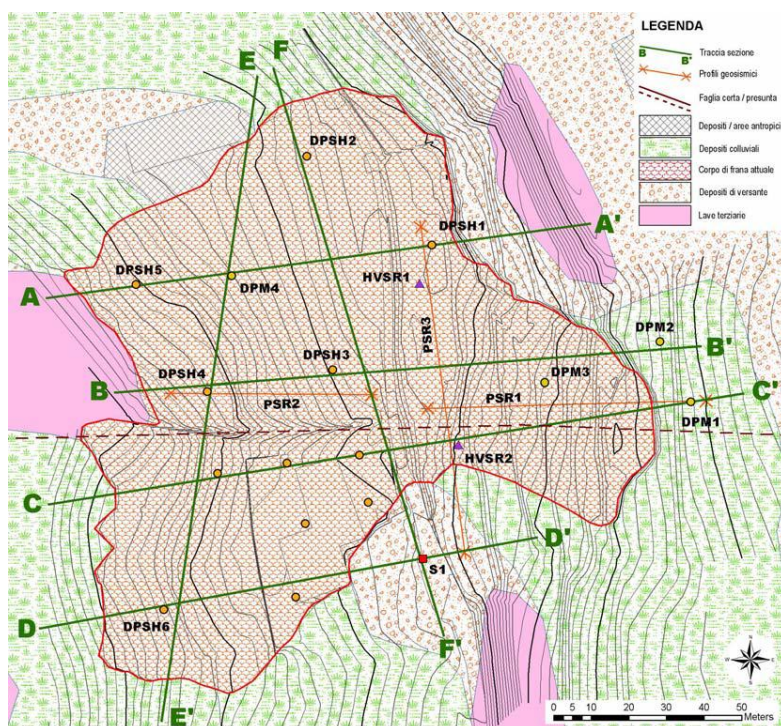


Fig.63: Sezione b-b' e posizione delle prove penetrometriche nella frana di Fara Vicentino.

Come fatto precedentemente, si è discretizzata la griglia e riprodotto la geometria del versante utilizzando la sezione b-b'.

La sezione lunga 156 metri ha origine a una quota pari a 215 metri e termina alla quota 245 metri. Sono stati imposti il coronamento e il piede della frana, coordinate note lungo la sezione posti rispettivamente a 140 metri e a 11 metri dall'origine della sezione (la direzione di movimento della frana è da destra a sinistra della sezione).



Sono stati considerati i livelli di falda misurati durante le prove penetrometriche di interesse (Paragrafo 2.3.2. “Relazioni tecniche” relativo a Fara Vicentino). Dalle misurazioni si è valutato di posizionare la falda in condizioni ordinarie a circa 1 metro di profondità dal piano campagna (Fig.2.02 per la modellazione a 4 strati e Fig.2.19 per la modellazione a 3 strati, presenti nell’ Allegato 2).

Di seguito verranno rappresentate la geometria del versante nelle due modellazioni: a 4 strati nella zonazione mineralogica; a 3 strati nella zonazione geotecnica.

Tutte le configurazioni della frana di Fara Vicentino per entrambi i modelli geotecnici, vengono riportate nell’ Allegato 2.

Di seguito verranno rappresentate la geometria del versante nelle due tipologie di modellazione: a 4 strati nella zonazione mineralogica e a 3 strati nella zonazione geotecnica.

### 3.4.1. Zonazione mineralogica

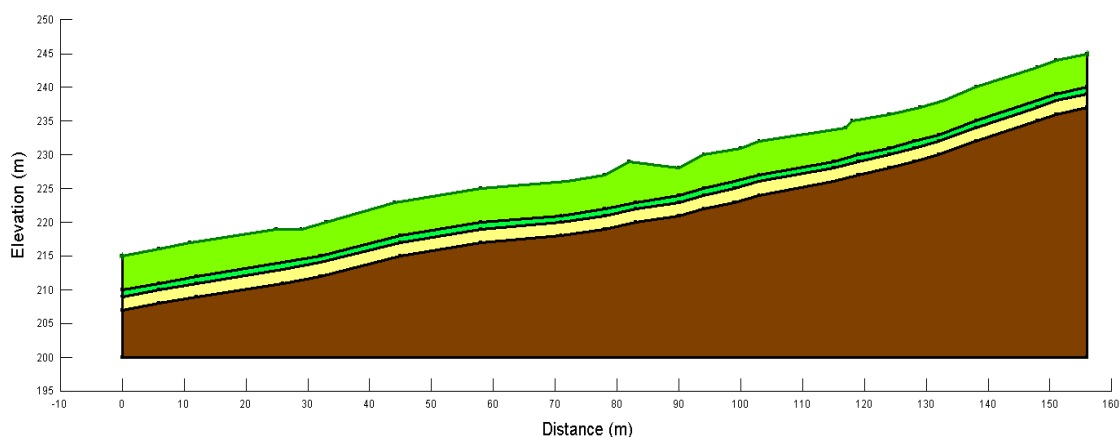


Fig.64: Schematizzazione a quattro strati della morfologia del versante della frana di Fara Vicentino.

Il modello (Fig.64) presenta una geometria a quattro strati con le seguenti caratteristiche fornite dalle analisi mineralogiche e geotecniche di laboratorio:

- Orizzonte **A**: Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 6 metri comprendente lo strato Abis;
- Orizzonte **Abis**: Livello ricco di montmorillonite con spessore di 1 metro, posto alla base dello strato A alla profondità di circa 5-6 metri (come indicato nelle indagini mineralogiche);
- Orizzonte **B**: Limo con sabbia debolmente argilloso, con spessore di circa 2 metri;
- Orizzonte **C**: Roccia vulcanica alterata

Ogni strato è caratterizzato dai parametri riportati in Tabella 5. A partire dai risultati delle prove penetrometriche, sono stati stimati i valori di  $\phi$  (Sowers, 1961);  $\gamma$  e  $\gamma'$  (Meyerhof, 1956);  $c$  (Terzaghi and Peck, 1967).

Strato	$\gamma'$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c$ (KPa)
A	16,1	18,3	28,8	18,6
B	19,9	21,9	31,6	87,7
C	22,6	23,8	35,9	260,0

Tab.5: Parametri assegnati agli strati costituenti il terreno di Fara Vicentino, stimati a partire dai risultati delle prove penetrometriche.

Dove:

- $\gamma$  e  $\gamma'$ : peso di volume e peso di volume saturo [KN/m<sup>3</sup>]

- $\phi$ : angolo di attrito [°]

- $c$ : coesione [KPa]

Secondo le indicazioni fornite dalle indagini mineralogiche, si è voluto vincolare il passaggio della superficie di scivolamento all'interno dell'orizzonte Abis, posizionato a 5-6 metri di profondità dal piano campagna e i parametri saranno calibrati al suo interno.

### 3.4.2. Zonazione geotecnica

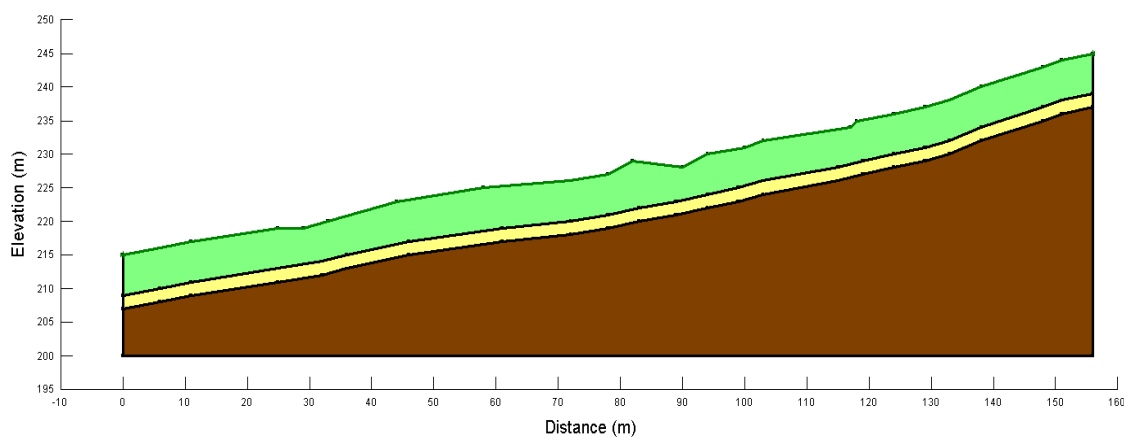


Fig.65: Schematizzazione a tre strati della morfologia del versante della frana di Fara Vicentino.

Il modello (Fig.65) presenta una geometria a tre strati con le seguenti caratteristiche fornite dalle analisi mineralogiche e geotecniche di laboratorio:

- Orizzonte **A**: Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 6 metri;
- Orizzonte **B**: Limo con sabbia debolmente argilloso, con spessore di circa 2 metri;
- Orizzonte **C**: Roccia vulcanica alterata

Ogni strato è caratterizzato dai parametri riportati nella precedente Tabella 5 utilizzata per la zonazione mineralogica.

Come per la configurazione a quattro strati, il passaggio della superficie di scivolamento è stato vincolato a 5-6 metri di profondità, alla base dell'orizzonte A. I parametri sono calibrati per l'intero strato A.

### 3.5. Modellazione della frana di Carrè

Si procede allo stesso modo anche per la frana di Carrè. La sezione utilizzata per la modellazione è la 2, scelta tra le varie sezioni eseguite dai professionisti (Paragrafo 2.3. “Relazioni tecniche”) per la direzione risultante parallela al movimento di frana e per la presenza di prove penetrometriche realizzate in prossimità di essa (Fig.66).

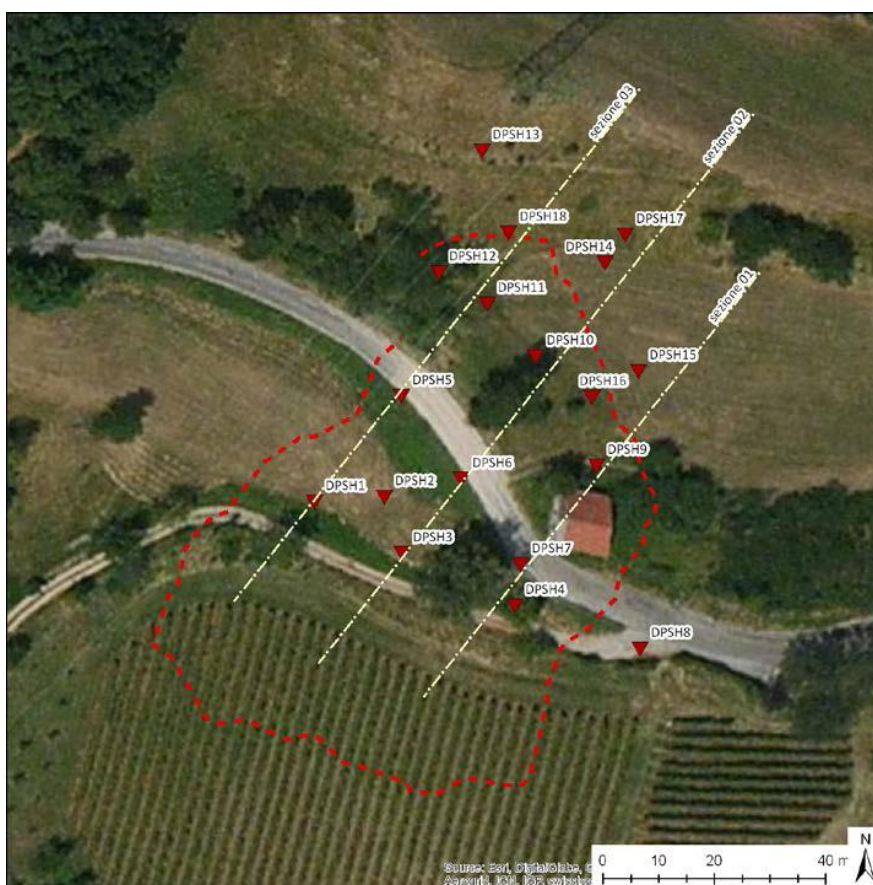


Fig.66: Sezione 2 e posizione delle prove penetrometriche nella frana di Carrè.

Come fatto precedentemente si discretizza la griglia riproducendo la geometria del versante. In questo caso si è utilizzata la sezione 2 per implementare il modello.

La sezione lunga circa 121 metri ha origine a una quota pari a 273 metri e termina a 244 metri di altitudine.

Sono stati imposti il coronamento e il piede della frana, coordinate note lungo la sezione posti rispettivamente a 20 metri e a circa 115 metri dall'origine della sezione (la direzione di movimento della frana è da sinistra a destra della sezione).

Considerando i livelli di falda misurati durante le prove penetrometriche di interesse (Paragrafo 2.3.3. "Relazioni tecniche" relativo a Carrè), si è valutato di posizionare la falda in condizioni ordinarie a circa 1 metro di profondità dal piano campagna (Fig.3.02 per la modellazione a 4 strati e Fig.3.19 per la modellazione a 3 strati, presenti nell'Allegato 3).

Di seguito verranno rappresentate la geometria del versante nelle due modellazioni: a 4 strati nella zonazione mineralogica; a 3 strati nella zonazione geotecnica.

Tutte le configurazioni della frana di Carrè per entrambi i modelli geotecnici, vengono riportate nell'Allegato 3.

### 3.5.1. Zonazione mineralogica

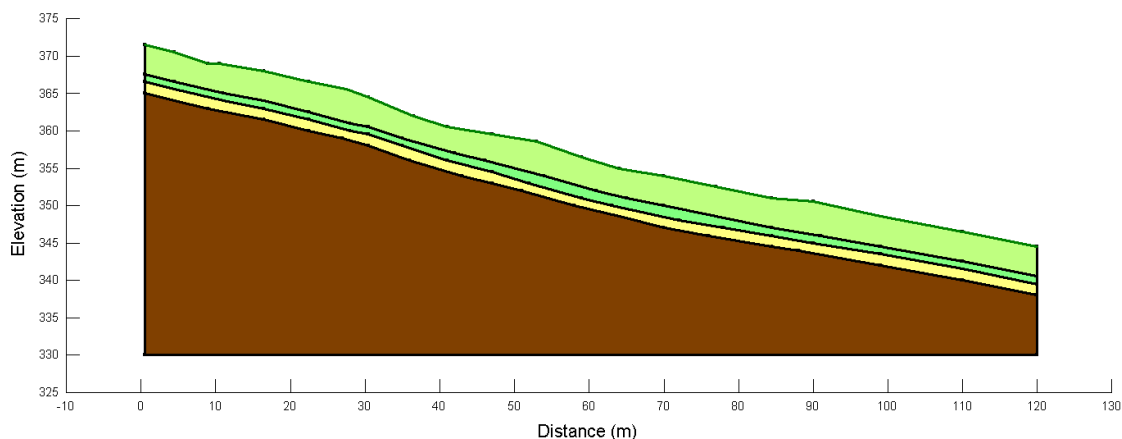


Fig.67: Schematizzazione a quattro strati della morfologia del versante della frana di Carrè.

Il modello in Figura 67 presenta una geometria a quattro strati con le seguenti caratteristiche fornite dalle analisi mineralogiche e geotecniche di laboratorio:

- Orizzonte **A**: Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 5 metri comprendente lo strato Abis;
- Orizzonte **Abis**: Livello ricco di montmorillonite con spessore di 1 metro, posto alla base dello strato A alla profondità di circa 4 metri (come indicato nelle indagini mineralogiche);
- Orizzonte **B**: Sabbia limosa, con spessore di circa 1.5 metri;
- Orizzonte **C**: Roccia vulcanica alterata

Ogni strato è caratterizzato dai parametri riportati nella Tabella 6. A partire dai risultati delle prove penetrometriche, sono stati stimati i valori di  $\phi$  (Sowers, 1961);  $\gamma$  e  $\gamma'$  (Meyerhof, 1956);  $c$  (Terzaghi and Peck, 1967).

Strato	$\gamma'$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ (°)	$c$ (KPa)
A	15,1	18,2	28,5	11,8
B	18,5	20,0	30,5	56,5
C	24,5	24,5	43,9	375,4

Tab.6: Parametri assegnati agli strati costituenti il terreno di Carrè, stimati a partire dai risultati delle prove penetrometriche.

Dove:

- $\gamma$  e  $\gamma'$ : peso di volume e peso di volume saturo [KN/m<sup>3</sup>]

- $\phi$ : angolo di attrito [°]

- $c$ : coesione [KPa]

Secondo le indicazioni fornite dalle indagini mineralogiche, si è voluto vincolare il passaggio della superficie di scivolamento all'interno dell'orizzonte Abis, posizionato a 4 metri di profondità dal piano campagna e i parametri saranno calibrati al suo interno.

Tutte le configurazioni della modellazione della frana di Carrè vengono riportate nell'Allegato 3.

### 3.5.2. Zonazione geotecnica

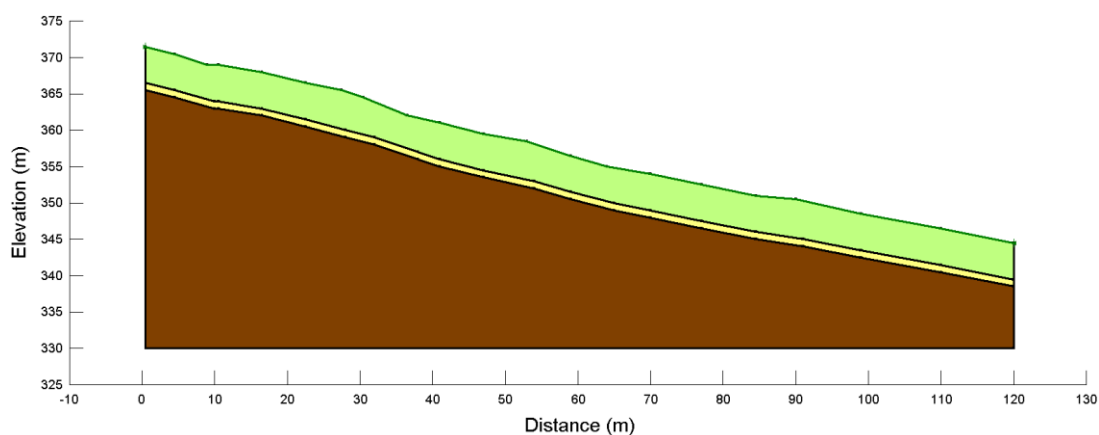


Fig.68: Schematizzazione a tre strati della morfologia del versante della frana di Carrè

Il modello in Figura 68 presenta una geometria a tre strati con le seguenti caratteristiche fornite dalle analisi mineralogiche e geotecniche di laboratorio

- Orizzonte **A**: Limo sabbioso-argilloso, con spessore di circa 5 metri;
- Orizzonte **B**: Sabbia limosa, con spessore di circa 1.5 metri;
- Orizzonte **C**: Roccia vulcanica alterata

Ogni strato è caratterizzato da parametri differenti riportati nella precedente Tabella 6 utilizzata per la zonazione mineralogica.

Come per la configurazione a quattro strati, il passaggio della superficie di scivolamento è stato vincolato a 4 metri di profondità, alla base dell'orizzonte A. I parametri sono calibrati per l'intero strato A.





## 4. RISULTATI

### 4.1. Risultati dell'analisi di stabilità

Di seguito sono riportati i risultati dei modelli di stabilità globale per ciascuna delle simulazioni eseguita.

Sono riportati in verde i valori il cui fattore di sicurezza è superiore a 1.3, quindi non vi è possibilità di condizione di instabilità del versante. In giallo i valori del fattore di sicurezza prossimi all'unità e possono rappresentare una situazione molto vicina all'instabilità. In rosso sono rappresentati i valori del fattore di sicurezza minori o uguali a 1, valori che delineano la condizione di instabilità del versante.

Il valore dei fattori di sicurezza è stato approssimato ad una sola cifra decimale.

#### 4.1.1. Gamba di Monte di Malo

Nella seguente tabella (Tab.7) sono raffigurati i valori del fattore di sicurezza di entrambe le modellazioni a 3 e 4 strati. Le configurazioni presenti (Allegato 1, dalla Fig.1.01 alla 1.03 per la modellazione a 4 strati e dalla Fig.1.15 alla 1.17 per la modellazione a 3 strati) mantengono i valori dei parametri geotecnici dei terreni intatti modificando solo la profondità del livello di falda dal piano campagna. Come mostrato in tabella tutte le configurazioni presentano valori del fattore di sicurezza molto superiori a 1, quindi una condizione di stabilità del versante.

	F.S. Modellazione 3 strati	F.S. Modellazione 4 strati
<b>Assenza di falda</b>	3,9	5,1
<b>Falda ordinaria</b>	2,9	3,8
<b>Falda a p.c.</b>	2,0	3,1

Tab.7: Tabella raffigurante i valori di F.S. delle configurazioni a varie profondità di falda con i parametri dei terreni intatti di entrambe le tipologie di modellazione della frana di Gamba di Monte di Malo

Le configurazioni raffigurate in seguito presentano una costante che è il livello di falda fissato al piano campagna. La scelta di mantenere la falda a piano campagna è per simulare le possibili condizioni a seguito delle piogge eccezionali che hanno causato l'alluvione del 2010. I parametri di coesione e angolo di attrito sono stati abbassati gradualmente. Sono riportati i valori del fattore di sicurezza per ogni configurazione.

Nella modellazione a 4 strati in Tabella 8, tutti i valori di F.S. sono maggiori dell'unità. Il valore minore si riscontra per la configurazione  $c=0$  KPa e  $\phi=20^\circ$  con un fattore di sicurezza pari a 1.3. (Tali configurazioni sono riportate nell'Allegato 1, dalla Fig.1.03 alla Fig.1.14).

	9.1	1.8	1.9	3
C	6	1.6	1.7	1.8
	3	1.5	1.5	1.7
	0	1.3	1.4	1.5
		20	24	28.5
			$\phi$	

Tab.8: Matrice raffigurante tutti i valori di F.S. di tutte le configurazioni di modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo.

Le configurazioni nella modellazione a 3 strati (Tab.9) mostrano situazioni più varie di instabilità. A partire dalla configurazione con  $c=3$  e  $\phi=20^\circ$ , e tutte le configurazioni con  $c=0$ , i fattori di sicurezza raffigurano valori uguali o inferiori a 1, delineando condizioni di instabilità del versante. Tali configurazioni sono riportate nell'Allegato 1, dalla Fig.1.17 alla Fig.1.28.

	9.1	1.7	1.8	2
C	6	1.3	1.4	1.6
	3	1	1.1	1.2
	0	<1	<1	<1
		20	24	28.5
			$\phi$	

Tab.9: Matrice raffigurante tutti i valori di F.S. di tutte le configurazioni di modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo

#### 4.1.2. Fara Vicentino

La tabella seguente (Tab.10) raffigura i valori del fattore di sicurezza di entrambe le modellazioni a 3 e 4 strati. Le configurazioni presenti mantengono i valori dei parametri geotecnici dei terreni intatti modificando solo la profondità del livello di falda dal piano campagna. Come mostrato in tabella tutte le configurazioni presentano valori del fattore di sicurezza molto superiori a 1, quindi una condizione di stabilità del versante. (Configurazioni riportate nell'Allegato 2, dalla Fig.2.01 alla Fig.2.03 per la modellazione a 4 strati; dalla Fig.2.18 alla Fig.2.20 per la modellazione a 3 strati).

	F.S. Modellazione 3 strati	F.S. Modellazione 4 strati
<b>Assenza di falda</b>	5,1	5,2
<b>Falda ordinaria</b>	3,8	3,7
<b>Falda a p.c.</b>	3,0	3,1

Tab.10: Tabella raffigurante i valori di F.S. delle configurazioni a varie profondità di falda con i parametri dei terreni intatti di entrambe le tipologie di modellazione della frana di Fara Vicentino

Le configurazioni raffigurate successivamente, presentano il livello di falda fissato al piano campagna. I parametri di coesione e angolo di attrito sono stati abbassati gradualmente. Sono mostrati i valori del fattore di sicurezza per ogni configurazione. (Le configurazioni sono riportate nell'Allegato 2, dalla Fig.2.03 alla Fig.2.17 per la modellazione a 4 strati e dalla Fig.2.20 alla Fig.2.34 per la modellazione a 3 strati).

Nella modellazione a 4 strati (Tab.11) tutti i valori di F.S. sono maggiori del valore 1, mostrando una condizione di stabilità del versante.

	18.6	2.8	2.9	3.1
	12	2.5	2.6	2.8
C	8	2.4	2.5	2.6
	4	2.2	2.3	2.5
	0	2	2.1	2.3
		20	24	28.8
			$\phi$	

Tab.11: Matrice raffigurante tutti i valori di F.S. di tutte le configurazioni di modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino.

Nella modellazione a 3 strati (Tab.12), sono presenti alcune configurazioni caratterizzate da valori del fattore di sicurezza uguali o inferiori a 1, con valore di coesione pari a 0 e angolo di attrito abbassato a 24° e 20°.

	18.6	2.6	2.8	3
	12	2	2.1	2.4
C	8	1.6	1.8	2
	4	1.2	1.4	1.6
	0	<1	1	1.2
		20	24	28.8
			$\phi$	

Tab.12: Matrice raffigurante tutti i valori di F.S. di tutte le configurazioni di modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino

### 4.1.3. Carrè

Nella seguente tabella (Tab.13) sono raffigurati i valori del fattore di sicurezza di entrambe le modellazioni a 3 e 4 strati. Le configurazioni presenti mantengono i valori dei parametri geotecnici dei terreni intatti modificando solo la profondità del livello di falda dal piano campagna. Come mostrato in tabella tutte le configurazioni presentano valori del fattore di sicurezza molto superiori a 1, quindi una condizione di stabilità del versante. (Tali simulazioni sono riportate nell'Allegato 3, dalla Fig.3.01 alla Fig.3.03 per la modellazione a 4 strati e dalla Fig.3.18 alla Fig.3.20 per la modellazione a 3 strati).

	F.S. Modellazione 3 strati	F.S. Modellazione 4 strati
<b>Assenza di falda</b>	3,5	3,5
<b>Falda ordinaria</b>	2,5	2,3
<b>Falda a p.c.</b>	1,8	1,8

Tab.13: Tabella raffigurante i valori di F.S. delle configurazioni a varie profondità di falda con i parametri dei terreni intatti di entrambe le tipologie di modellazione della frana di Carrè

Le prossime configurazioni raffigurate nelle matrici, presentano il livello di falda fissato al piano campagna. I parametri di coesione e angolo di attrito sono stati abbassati gradualmente. Sono mostrati i valori del fattore di sicurezza per ogni configurazione.

Nella modellazione a 4 strati in Tabella 14 della frana di Carrè, quasi tutti i valori di F.S. sono maggiori dal valore 1. La configurazione  $c=0$  KPa e  $\phi=20^\circ$  presenta un valore di fattore di sicurezza uguale a 1 che raffigura una condizione di instabilità del versante. (Tali simulazioni vengono riportate nell'Allegato 3, dalla Fig.3.03 alla Fig.3.17).

	11.8	1.6	1.7	1.8
	8	1.4	1.5	1.6
C	6	1.3	1.4	1.5
	4	1.2	1.3	1.4
	0	1	1.1	1.2
		20	24	28.5
			$\phi$	

Tab.14: Matrice raffigurante tutti i valori di F.S. di tutte le configurazioni di modellazione a quattro strati della frana di Carrè

Nella modellazione a 3 strati (Tab.15), molte configurazioni sono caratterizzate da valori del fattore di sicurezza uguali, o inferiori a 1. Con  $\phi=20^\circ$ , il fattore di sicurezza mostra una condizione di instabilità di versante con tutte le configurazioni caratterizzate dal valore di coesione abbattuto. Con valori di coesione uguali a 4 e 0, il fattore di sicurezza è 1 o inferiore con qualsiasi valore di  $\phi$  assegnato. (Tali configurazioni vengono riportate nell'Allegato 3, dalla Fig.3.20 alla Fig.2.34).

	11.8	1.2	1.7	1.8
	8	1	1.3	1.5
C	6	1	1.2	1.3
	4	<1	1	1.1
	0	<1	<1	<1
		20	24	28.5
			$\phi$	

Tab.15: Matrice raffigurante tutti i valori di F.S. di tutte le configurazioni di modellazione a tre strati della frana di Carrè.

## 5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

I dissesti franosi superficiali che avvengono sulle colline del Marosticano e sui Monti Lessini, coinvolgono i depositi limoso-argillosi prodotti dall'alterazione dei basalti e tufi Terziari del distretto vulcanico del Veneto.

Il confronto dei dati ottenuti dalle prove geotecniche in sito ha consentito l'individuazione di tre orizzonti con diverse caratteristiche geotecniche. Dall'analisi granulometrica emerge che le granulometrie dei depositi coinvolti nei tre dissesti sono molto simili: parliamo di *limi sabbiosi argillosi* e *limi argillosi con sabbia*. I limiti di Atterberg mostrano che i depositi coinvolti nei dissesti hanno un comportamento sostanzialmente *plastico* per un ampio range di contenuto d'acqua.

Dalle analisi diffrattometriche si riscontra che la fase mineralogica preponderante, per ciascuna frana presa in esame, è la Montmorillonite, la cui quantità varia complessivamente dal 51% all'89% nella frana di Gamba di Monte di Malo, dal 48% al 93% nella frana di Fara Vicentino e dal 47% al 90% in quella di Carrè. Ne deriva quindi, la presenza di strati con caratteristiche più scadenti in corrispondenza dei quali è possibile ipotizzare che si sia impostata la superficie di scivolamento della frana. Si può dedurre che la profondità dei piani di scivolamento delle frane di Gamba e di Carrè 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 Montmorillonite, mentre per la frana di Fara Vicentino sia compresa tra i 5 e i 6 metri.

La presenza di questi orizzonti ricchi in Montmorillonite è stata fondamentale per realizzare l'analisi di stabilità globale tramite il programma Geostudio 2007. La mancanza di dati certi ed affidabili dei parametri geotecnici dei terreni presi in esame, ha portato a vincolare il passaggio della superficie di scivolamento all'interno dello strato con contenuto di Montmorillonite più elevato. La realizzazione delle analisi di stabilità per ciascun versante, è stata predisposta 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. Sono stati quindi abbattuti gradualmente i parametri di coesione e angolo di attrito.

L'obiettivo della modellazione è verificare quali parametri geotecnici dei terreni e quali condizioni idrogeologiche, portano il versante a condizioni di rottura.

La modellazione numerica si è basata su due modelli geotecnici concettuali. In primis il modello stratigrafico presenta una struttura a 4 strati validata dalle considerazioni sulle analisi mineralogiche e delle indagini geotecniche. La scelta della zonazione mineralogica parte dall'esistenza di un livello ricco di montmorillonite, posizionato alla base del primo orizzonte, corrispondente alla variazione maggiore del contenuto in peso di montmorillonite. La superficie di scivolamento è stata forzata a passare a quella profondità ed i parametri sono stati variati solo al suo interno. Il modello successivo segue una zonazione geotecnica a 3 strati, ipotesi validata dalla considerazione che l'intero strato A sia ricco di Montmorillonite e questo causi una debolezza diffusa dell'intero strato. La superficie di rottura è stata forzata a passare alla stessa profondità della precedente simulazione, ma i parametri sono stati variati in corrispondenza del primo orizzonte nel suo insieme.

Ai terreni delle tre frane sono state assegnate proprietà geotecniche simili. Inoltre sussistono analogie anche dal punto di vista geomorfologico, poiché i tre versanti sono caratterizzati da pendenze del tutto simili. Mediante il calcolo del fattore di sicurezza, è stato possibile determinare quali valori dei parametri  $c$  e  $\phi$  portano il versante in condizioni di instabilità. Il valore del fattore di sicurezza discriminante le condizioni di stabilità da quelle di instabilità è considerato pari a 1. Per quanto riguarda la modellazione a 4 strati, quindi abbattendo solamente la base del primo orizzonte, non ci sono condizioni di instabilità, eccezion fatta per valori di  $c=0$  KPa  $\phi=20^\circ$ . La modellazione a 3 strati mostra varie configurazioni che hanno portato il fattore di sicurezza a 1. Per la frana di Gamba di Monte di Malo con la falda al piano campagna, il versante risulta instabile solo con valori di  $c$  uguali e inferiori a 3 e con l'angolo di attrito abbassato a  $24^\circ$  e  $20^\circ$ . Per Fara Vicentino con falda al piano campagna, l'instabilità si raggiunge solamente abbattendo  $c$  a 0 con  $\phi$  a  $24^\circ$  e  $20^\circ$ . Infine per Carrè



L'instabilità con falda al piano campagna, viene raggiunta più facilmente già con valori da  $c=8$  KPa e angolo di attrito abbassato a  $20^\circ$ , con valori a partire da  $c=4$  KPa e angolo di attrito uguale a  $24^\circ$  e per tutte le configurazioni con  $c=0$  KPa.

Le matrici all'interno del Capitolo 4, riportano i valori del fattore di sicurezza ottenuti al variare dei parametri geotecnici di coesione e angolo di attrito all'interno dello strato ricco in montmorillonite:

- L'angolo di attrito è stato lievemente abbassato per via della possibile sovrastima causata dall'utilizzo di formule empiriche e dalla necessità di ottenere delle caratteristiche medie dell'orizzonte geotecnico, partendo da indagini puntuali.
- La coesione invece, è stata abbattuta fino al valore 0, ipotizzando che tale parametro sia fortemente influenzato dalla presenza di acqua, che va ad alterare le caratteristiche elettrochimiche del materiale; pertanto risulta il parametro che maggiormente influenza il verificarsi di condizioni di rottura del versante.

A partire dai risultati delle modellazioni, si può ipotizzare che i terreni coinvolti dai dissesti, sono legati a un abbassamento della coesione, innescando così il movimento franoso.

I modelli di stabilità globale definiti hanno permesso di riassumere in un modello numerico semplificato, i risultati delle indagini e delle prove disponibili per ciascun versante. I risultati ottenuti hanno permesso di definire quali potrebbero essere le condizioni che portano all'instabilità del versante. Quanto emerso fornisce informazioni utili per la definizione degli interventi di consolidamento più appropriati al fine di garantire la stabilità del versante.

## **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.

Bosellini A. (2004) The Western passive margin of Adria and its carbonate Platform. *Special Volume of Italian Geological Society for the IGC 32 Florence-2004*: 79-92.

Carta Geologica d'Italia (Foglio n° 36 Schio, Foglio n° 37 Bassano, Foglio n° 49 Verona).

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

Dalla Costa L. (2014) Caratterizzazione geotecnica e mineralogica dei terreni coinvolti in frane superficiali della Provincia di Vicenza. *Tesi magistrale in Geologia e Geologia Tecnica* (2014).

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

Genevois R. *Dispense del corso di Geologia Tecnica e Progettazione Geologico-tecnica* (2014-2015).

Geo-Slope International Ltd. (2010) *Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version*, Fourth Edition.

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

Marcato E. (2011) *Relazione geologico-tecnica (Progetto: Segnalazione di un dissesto geologico in località Gamba)*.

Maroni F. (2011) *Relazione geologica (Progetto: Dissesto geologico in via Costa)*.

Massagrande A. (2012) *Relazione geologica e parametrizzazione geotecnica (Progetto: Dissesto franoso lungo la strada comunale di via Valdaro a seguito delle precipitazioni di eccezionale intensità nei mesi di ottobre e novembre 2010)*.

Meisina C. (2004) Swelling-shrinking properties of weathered clayey soils associated with shallow landslides. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 2004, v.37; p77-94.

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

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

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

Zampieri D. (2000) Segmentation and linkage of the Lessini Mountains normal faults, Southern Alps, Italy. Tectonophysics, 319: 19-34.

Zampieri D. (1995) Tertiary extension in the southern Trento Platform, Southern Alps, Italy. Tectonics, Vol.14, No.3: 645-657.

## **ALLEGATI**

## Allegato 1: Modellazione della frana di Gamba di Monte di Malo

### Zonazione mineralogica

-Falda assente:

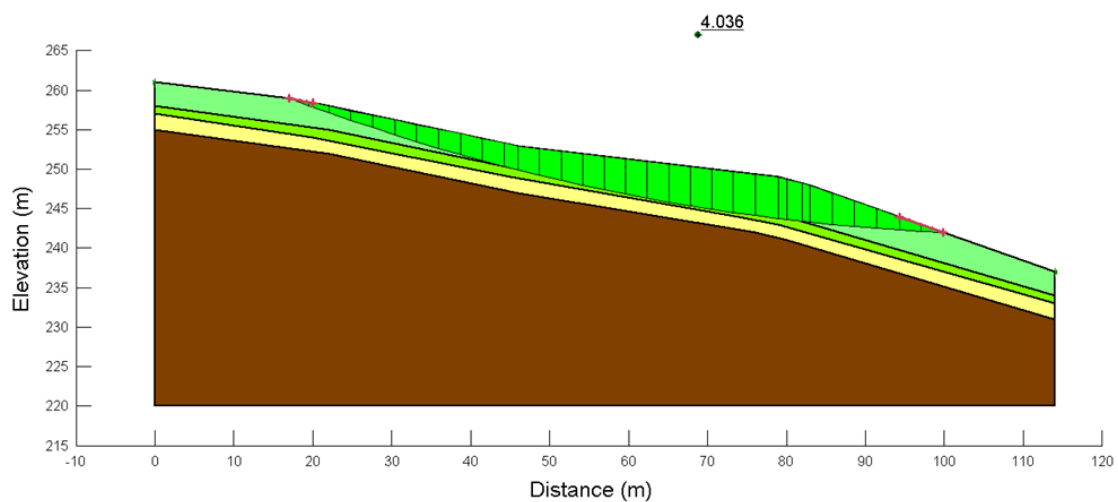


Fig.1.01: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo in assenza di falda.  
F.S. = 4.036.

-Falda in condizioni ordinarie (posta a 1.5 metri di profondità):

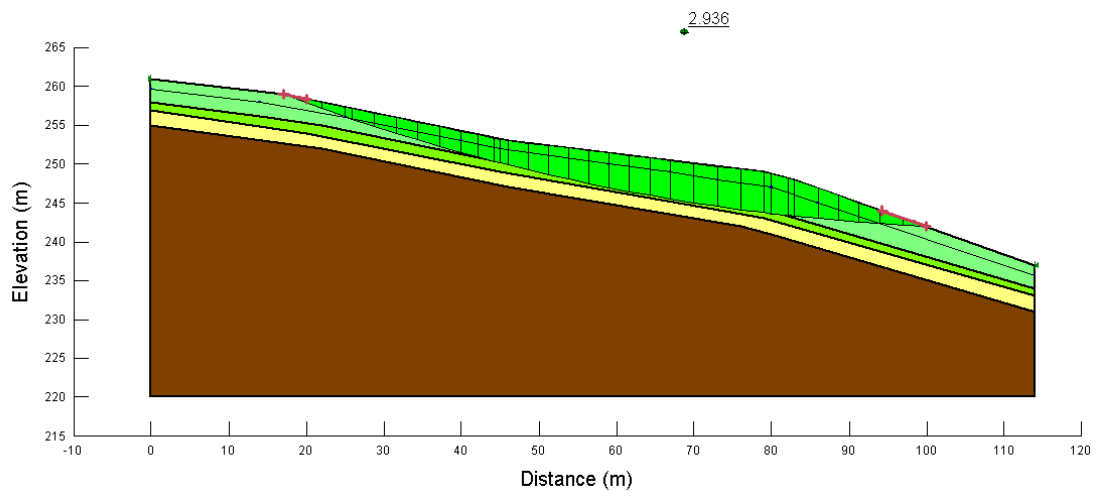


Fig.1.02: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda posta a 1.5 metri dal piano campagna. F.S.= 2.936.

-Falda a piano campagna:

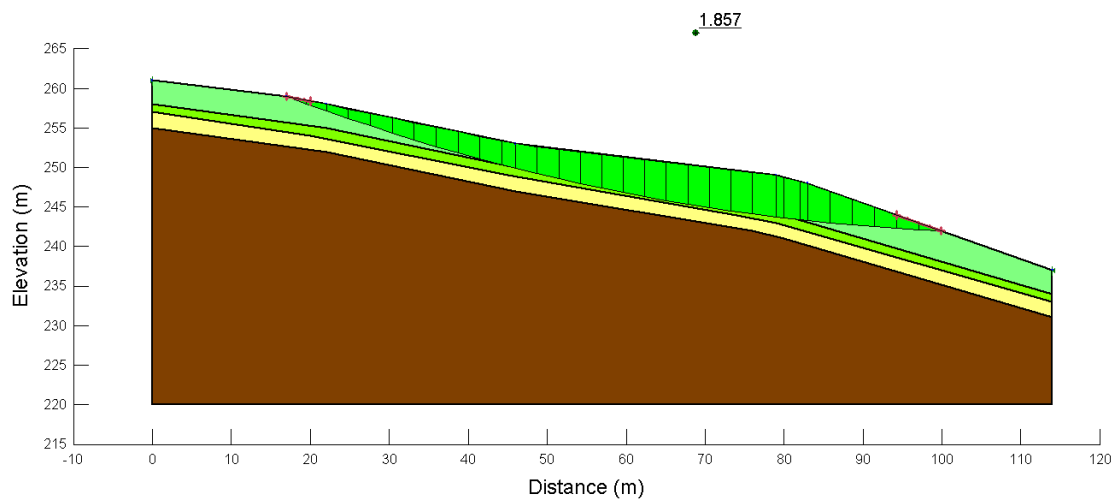


Fig.1.03: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna. F.S.= 1.857.

Abbattimento dei parametri dell'orizzonte Abis:

- $\phi$  costante a  $28.4^\circ$  e abbassamento graduale di c a 6, 3, 0 kPa:

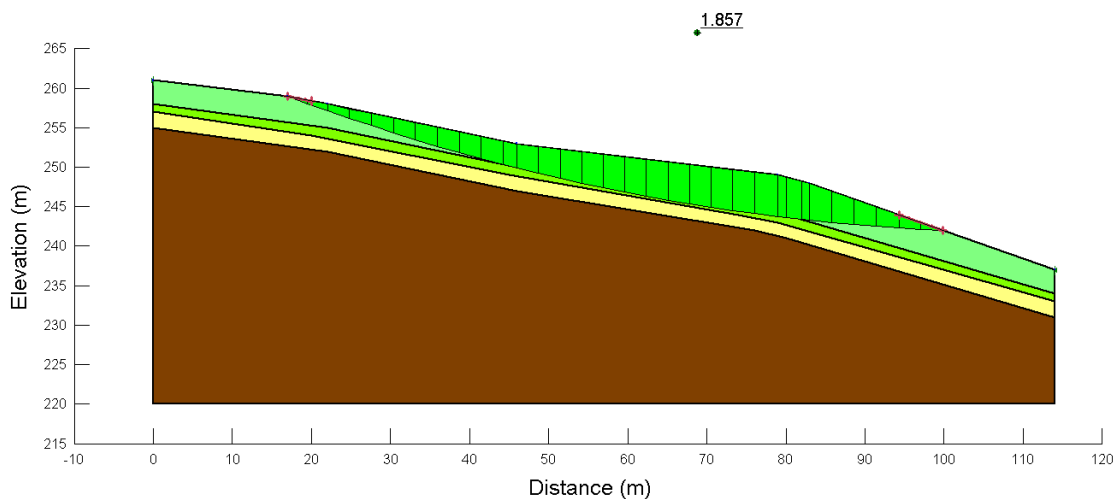


Fig.1.04: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di c abbattuto a 6 kPa con  $\phi$  costante a  $28.4^\circ$ . F.S.= 1.857.

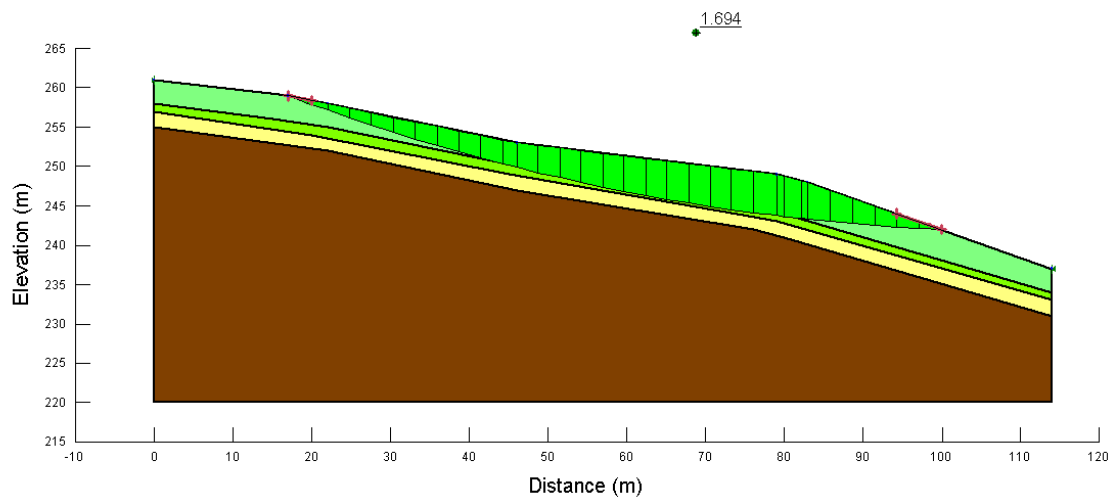


Fig.1.05: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di c abbattuto a 3 kPa con  $\phi$  costante a  $28.4^\circ$ . F.S.= 1.694.

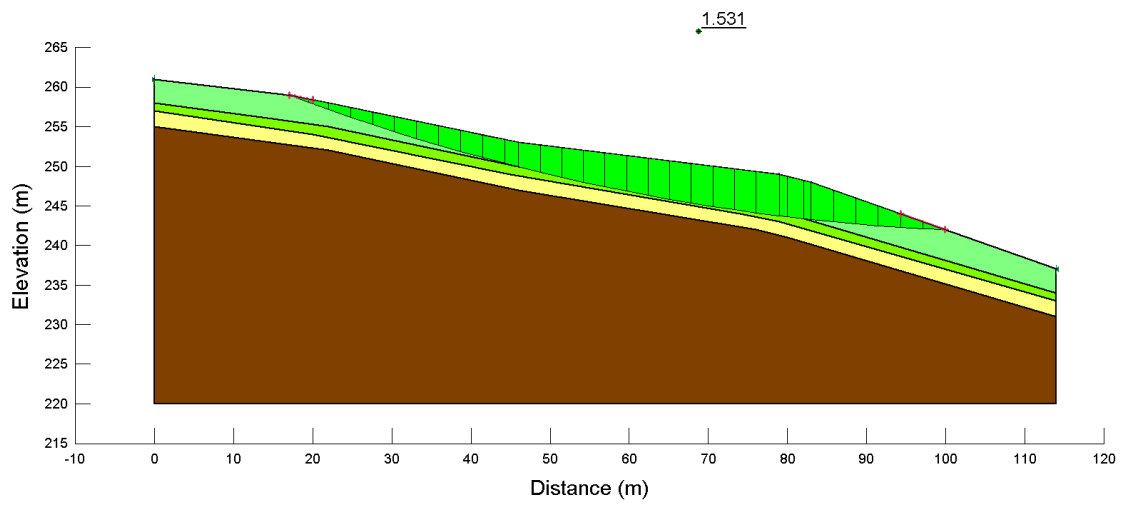


Fig.1.06: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 0 kPa con  $\phi$  costante a  $28.4^\circ$ . F.S.= 1.531.

-  $c$  costante a 9.1 kPa e abbassamento graduale di  $\phi$  a  $24^\circ$ ,  $20^\circ$ :

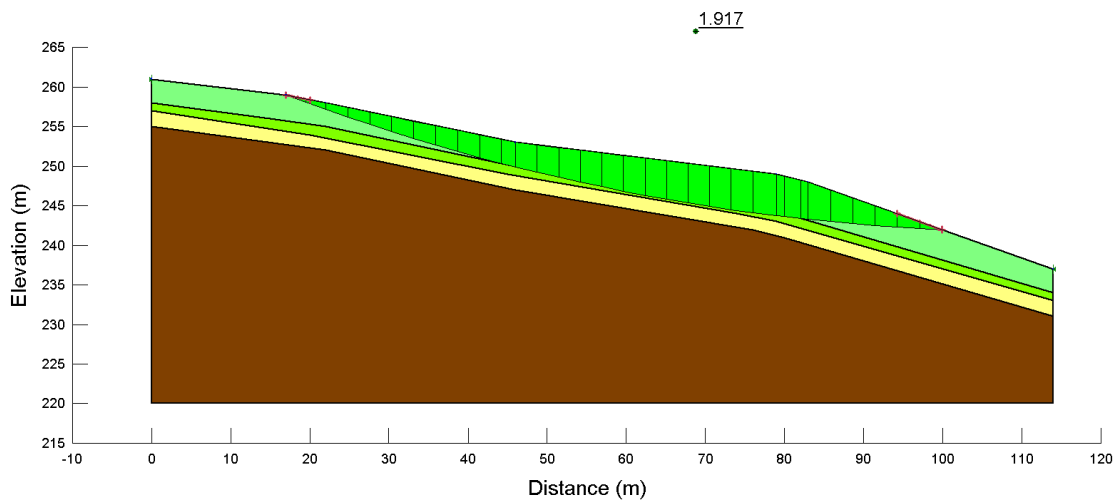


Fig.1.07: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $24^\circ$  con  $c$  costante a 9.1 kPa. F.S.= 1.917.



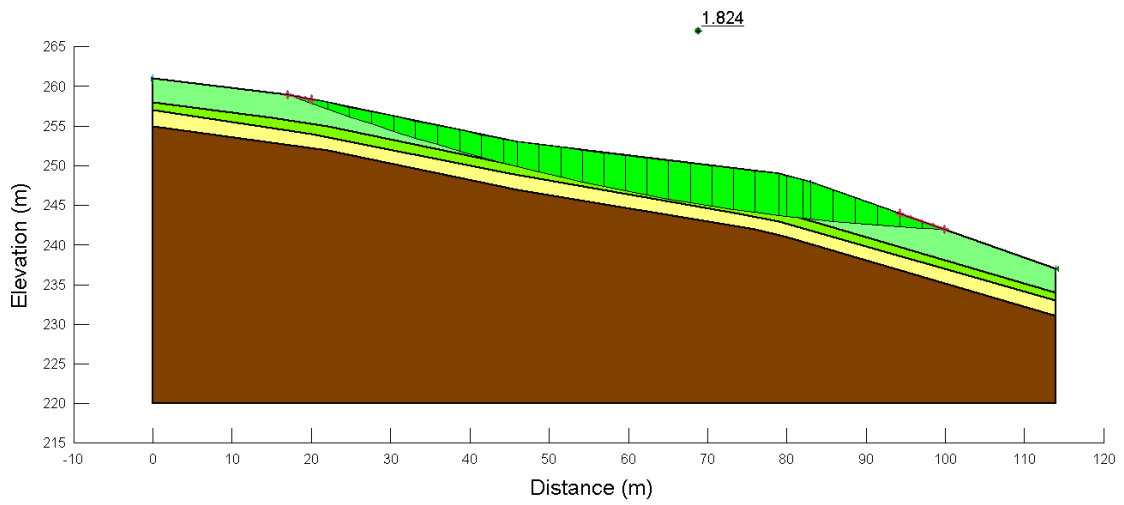


Fig.1.08: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $20^\circ$  con  $c$  costante a 9.1 kPa. F.S.= 1.824.

$\phi$  costante a  $24^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 6, 3, 0 kPa:

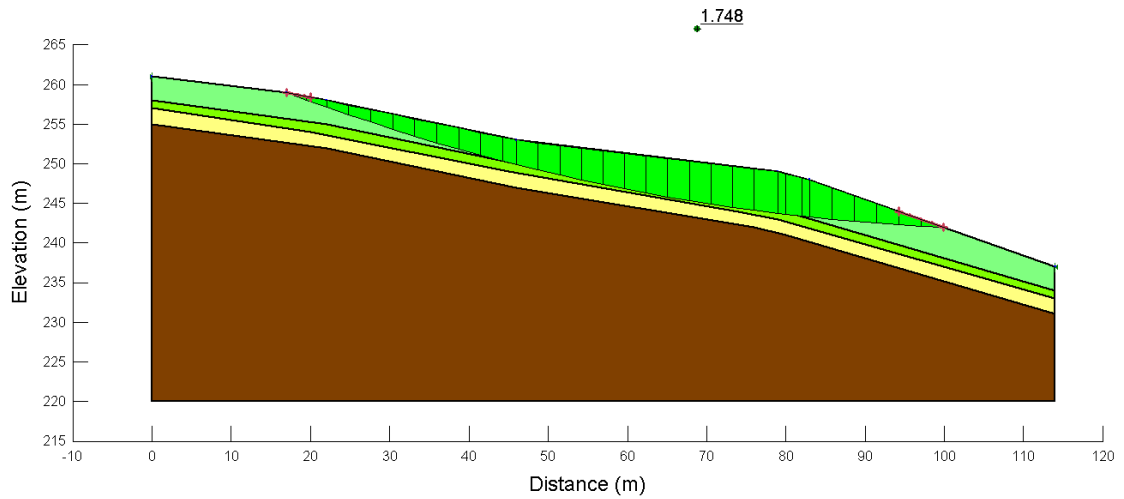


Fig.1.09: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti di  $\phi=24^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.748.

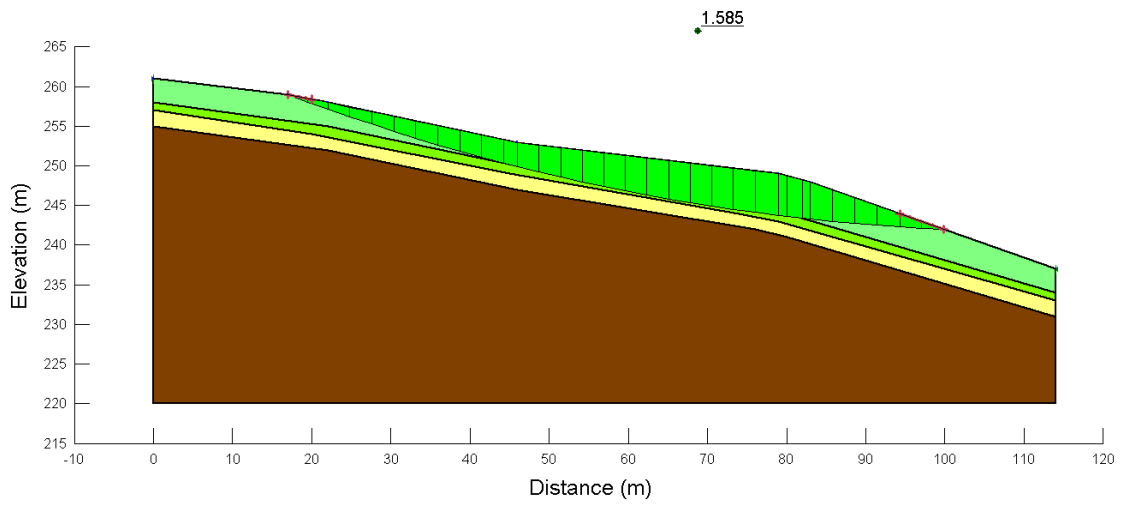


Fig.1.10: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti di  $\phi=24^\circ$  e  $c=3$  kPa. F.S.= 1.585.

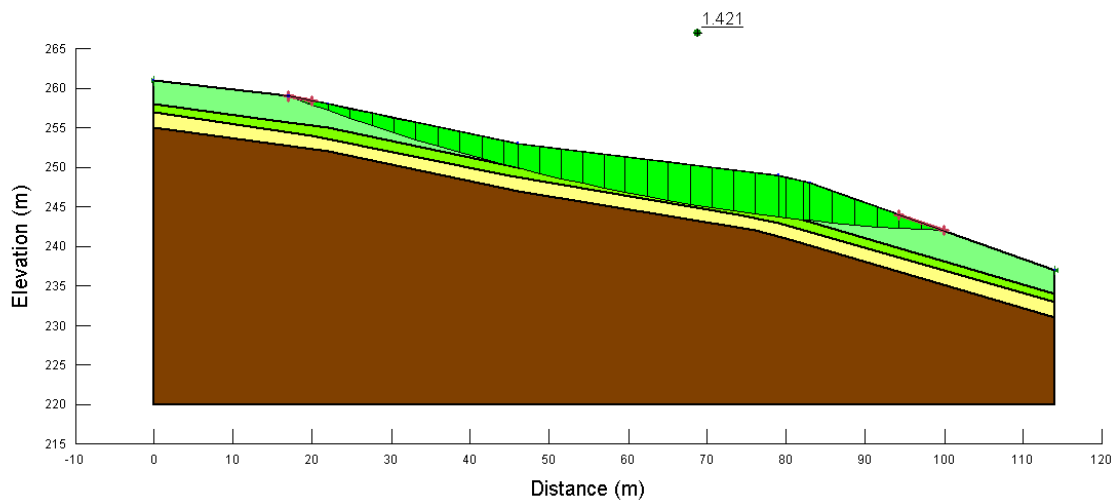


Fig.1.11: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti di  $\phi=24^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 1.421.

$-\phi$  costante a  $20^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 6, 3, 0 kPa:

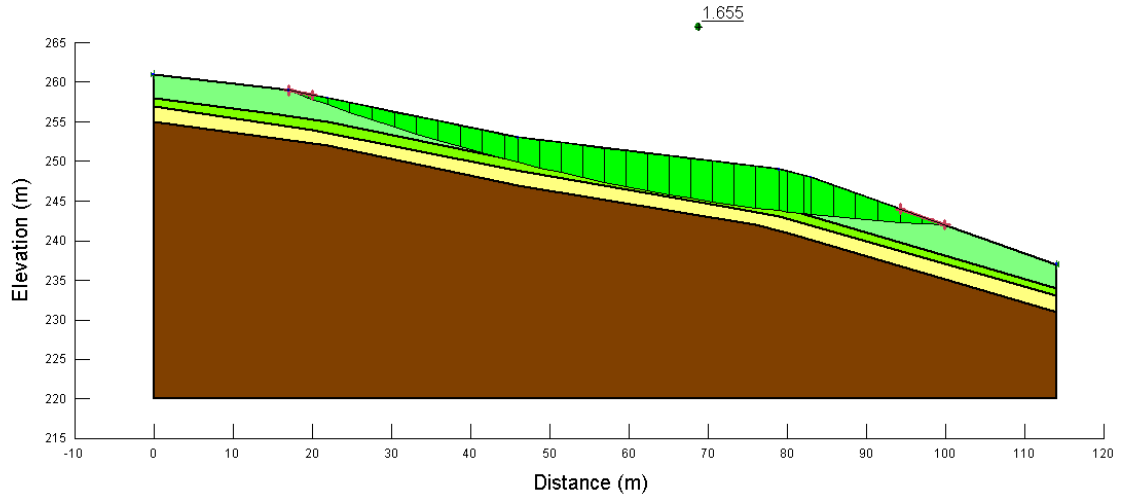


Fig.1.12: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti di  $\phi=20^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.655.

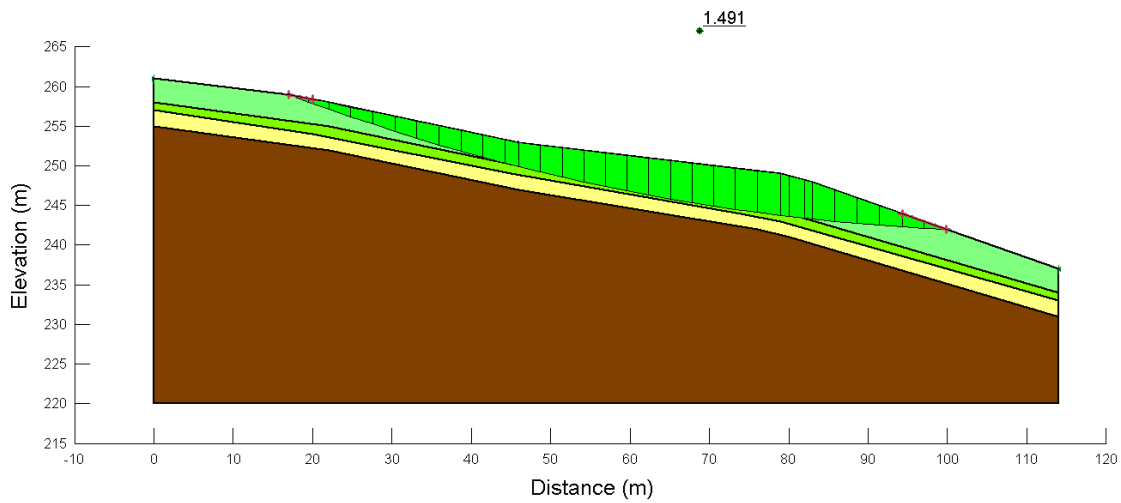


Fig.1.13: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti di  $\phi=20^\circ$  e  $c=3$  kPa. F.S.= 1.491.

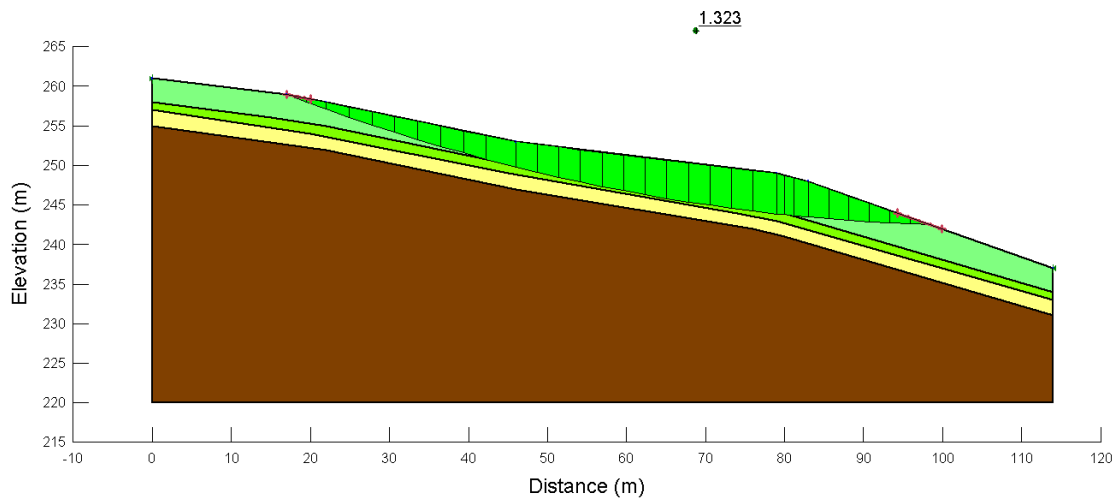


Fig.1.14: Modellazione a quattro strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti di  $\phi=20^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 1.323.

### Zonazione geotecnica

-Falda assente:

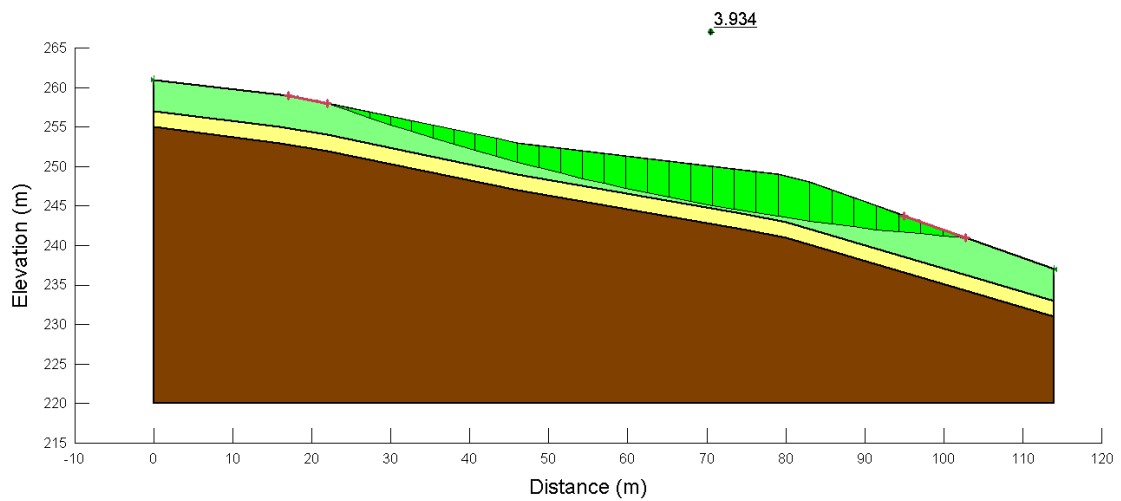


Fig.1.15: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo in assenza di falda. F.S.= 3.934.

-Falda ordinaria (posta a 1.5 metri di profondità):

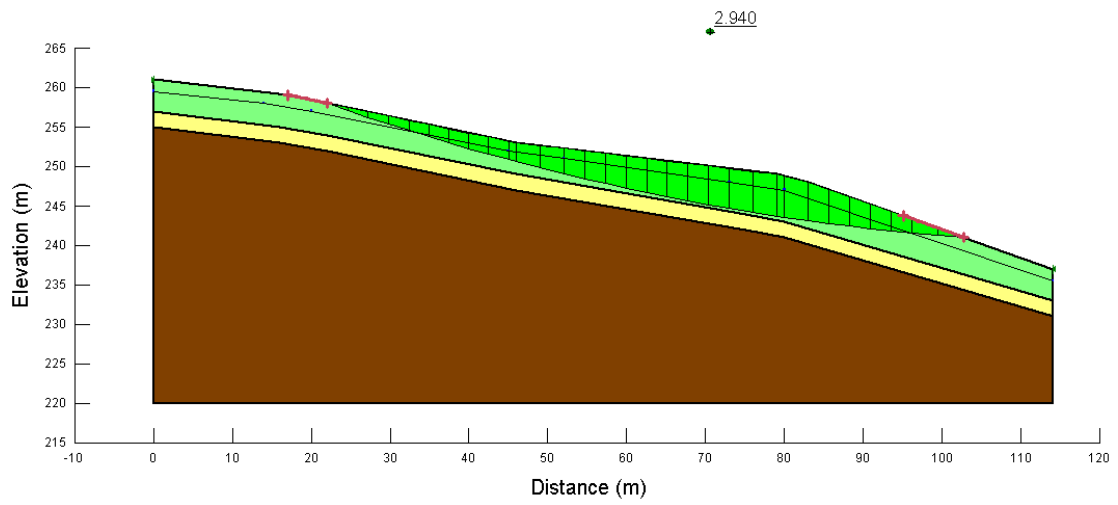


Fig.1.16: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda posta a 1.5 metri dal piano campagna. F.S.= 2.940.

-Falda a piano campagna:

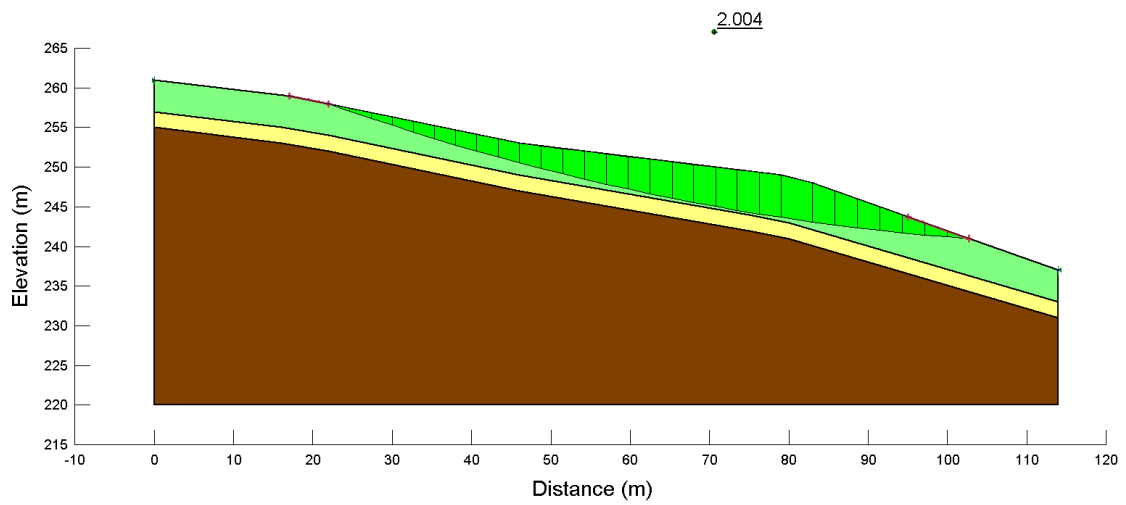


Fig.1.17: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna. F.S.= 2.004.

Abbattimento dei parametri dell'orizzonte A:

- $\phi$  costante a  $28.4^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 6, 3, 0 kPa:

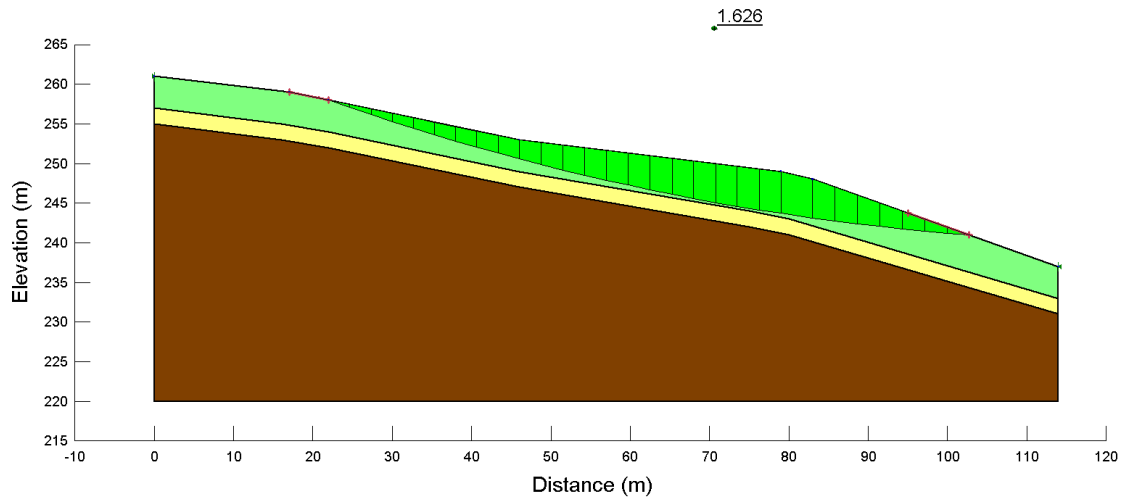


Fig.1.18: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 6 kPa con falda al piano campagna e  $\phi$  costante a  $28.4^\circ$ . F.S.= 1.626.

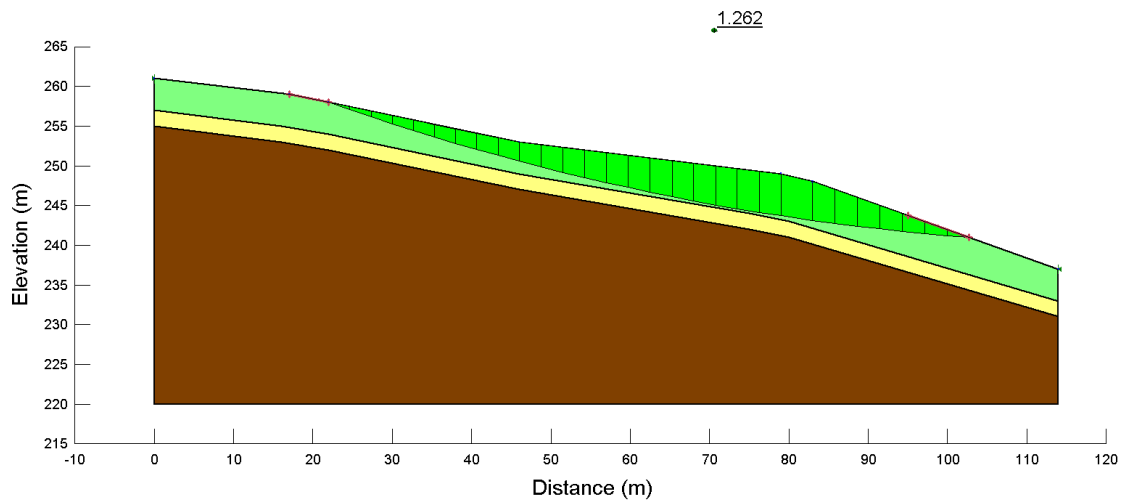


Fig.1.19: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 3 kPa e  $\phi$  costante a  $28.4^\circ$ . F.S.= 1.262.

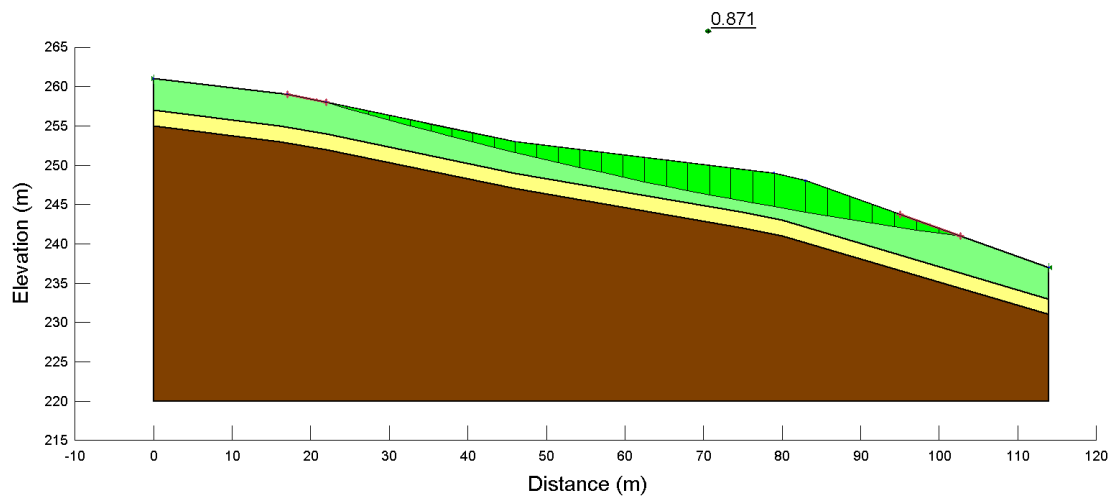


Fig.1.20: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 0 kPa e  $\phi$  costante a  $28.4^\circ$ . F.S.= 0.871.

-  $c$  costante a 9.1 kPa e abbassamento graduale di  $\phi$  a  $24^\circ$ ,  $20^\circ$ :

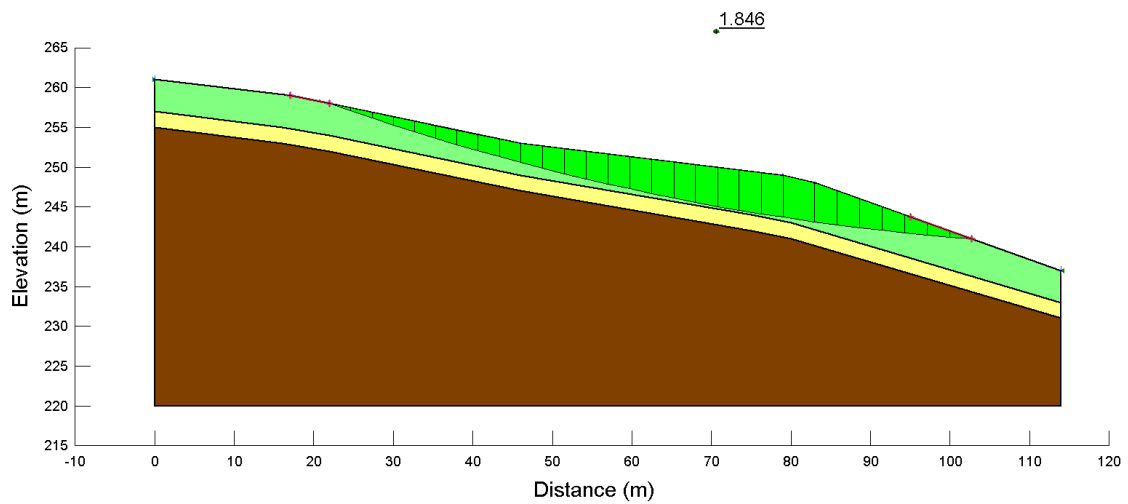


Fig.1.21: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $24^\circ$  e  $c$  costante a 9.1 kPa. F.S.= 1.846.

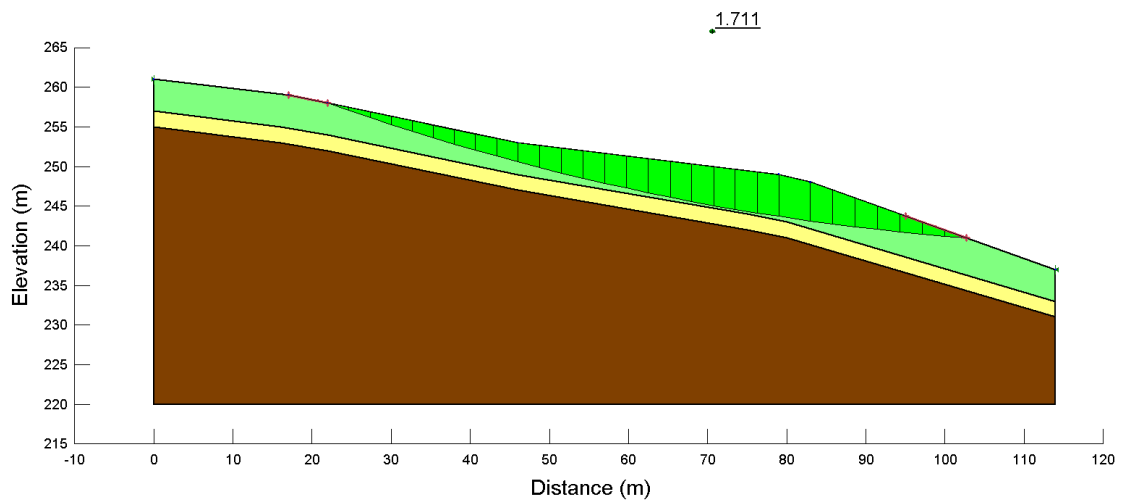


Fig.1.22: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $20^\circ$  e  $c$  costante a 9.1 kPa. F.S.= 1.711.

- $\phi$  costante a  $24^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 6, 3, 0 kPa:

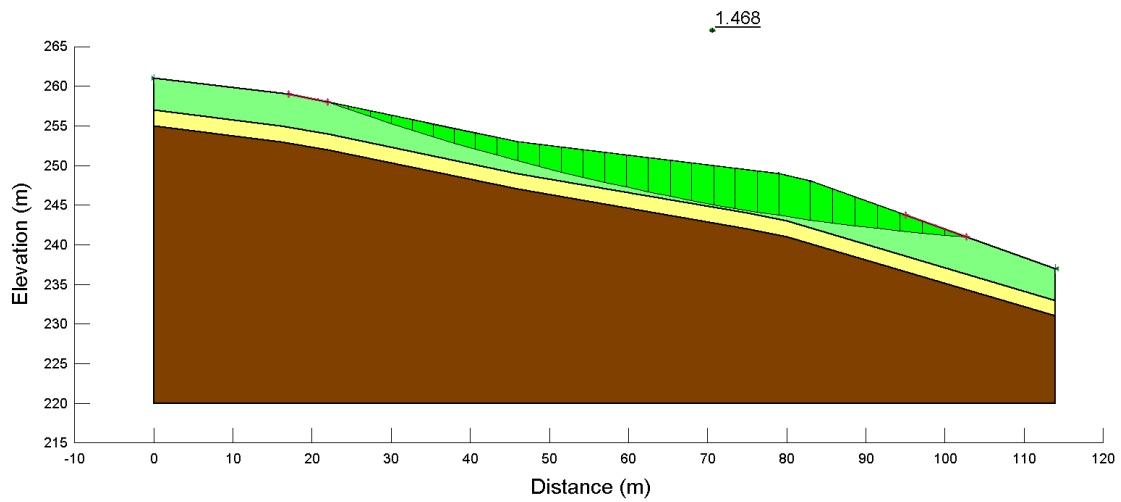


Fig.1.23: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.468.



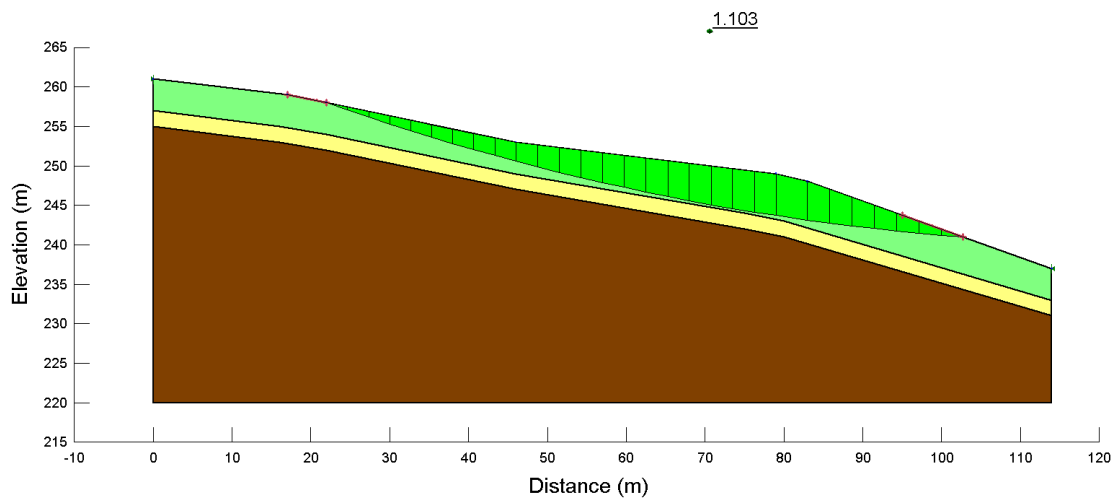


Fig.1.24: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=3$  kPa. F.S.= 1.103.

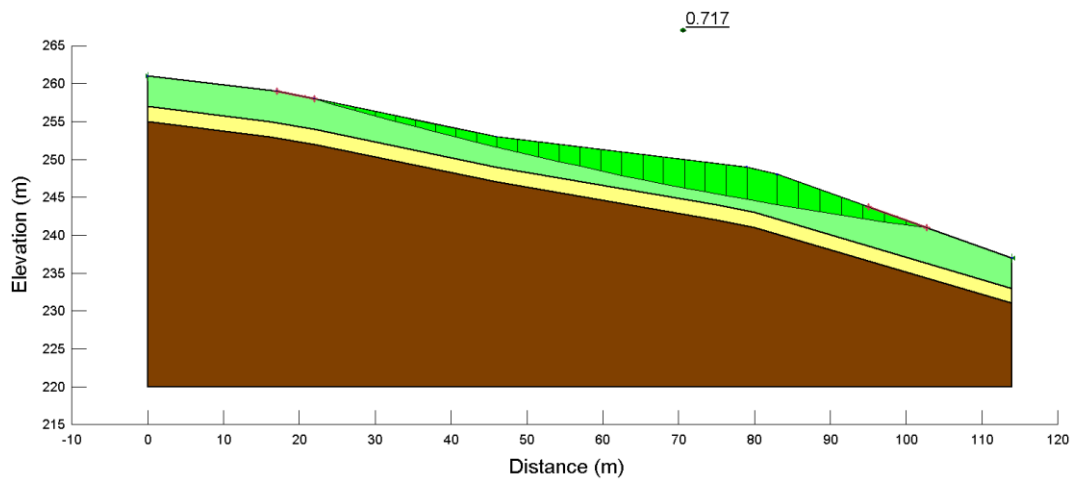


Fig.1.25: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 0.717.

$-\phi$  costante a  $20^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 6, 3, 0 kPa:

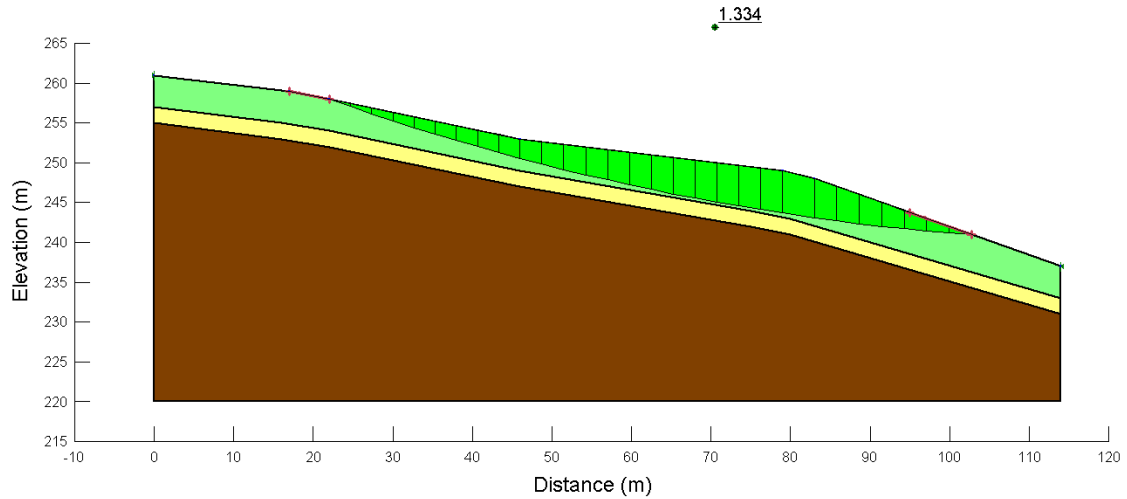


Fig.1.26: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.334.

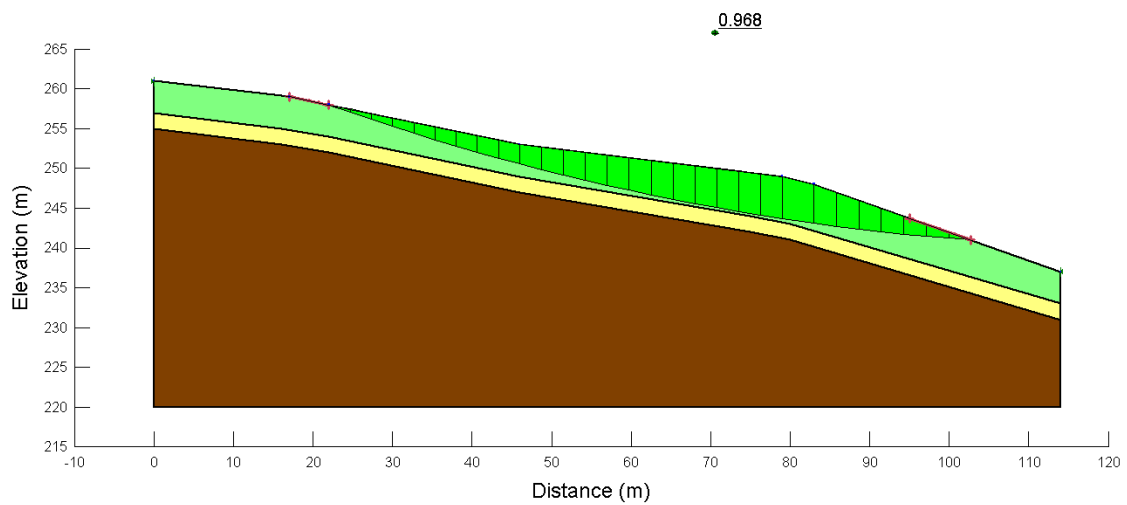


Fig.1.27: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=3$  kPa. F.S.= 0.968.

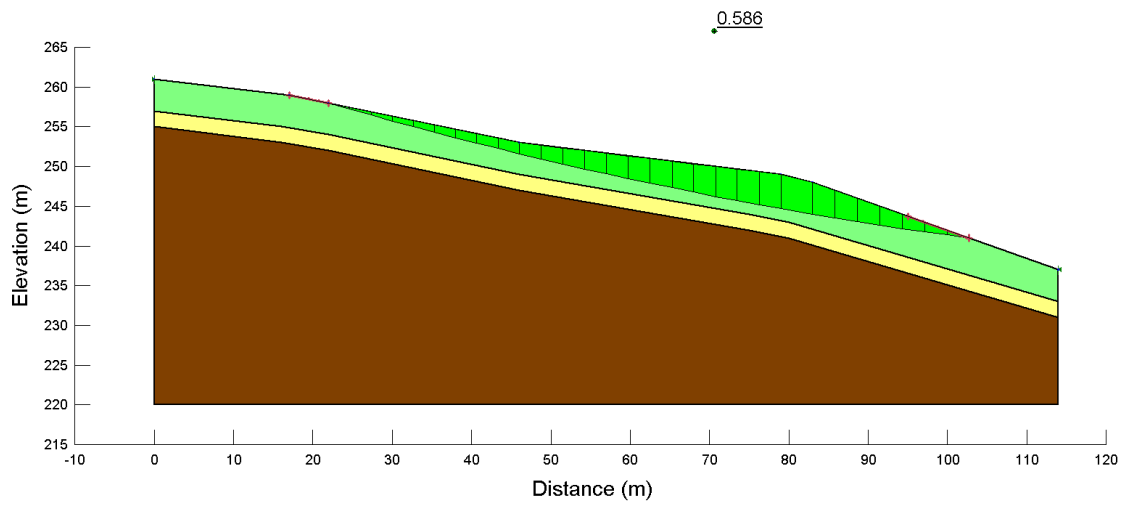


Fig.1.28: Modellazione a tre strati della frana di Gamba di Monte di Malo con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 0.586.

## Allegato 2: Modellazione della frana di Fara Vicentino

### Zonazione mineralogica

-Falda assente:

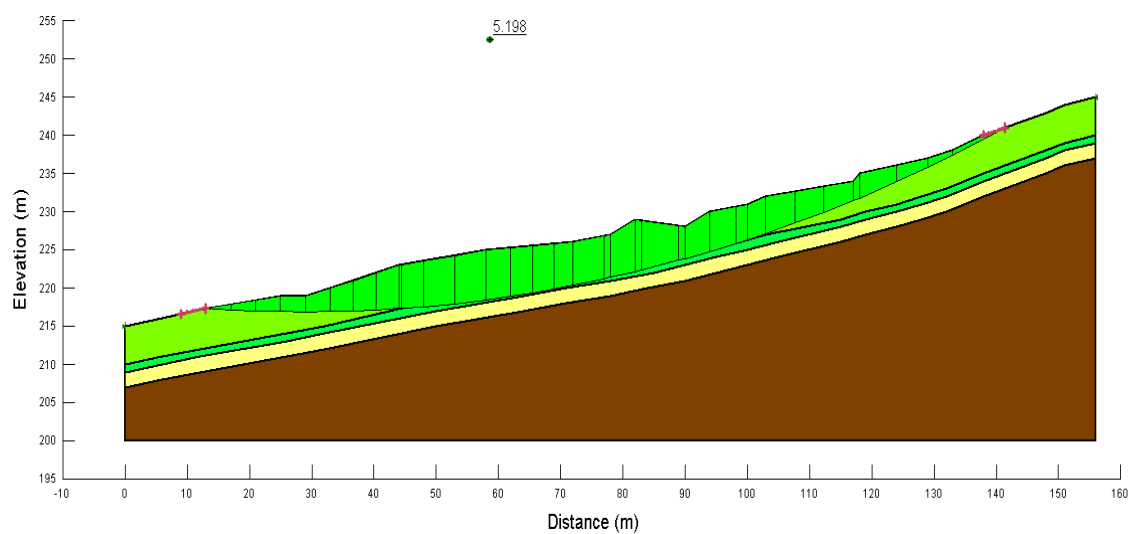


Fig.2.01: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino in assenza di falda. F.S.= 5.198.

-Falda in condizioni ordinarie (posta a 1 metro di profondità):

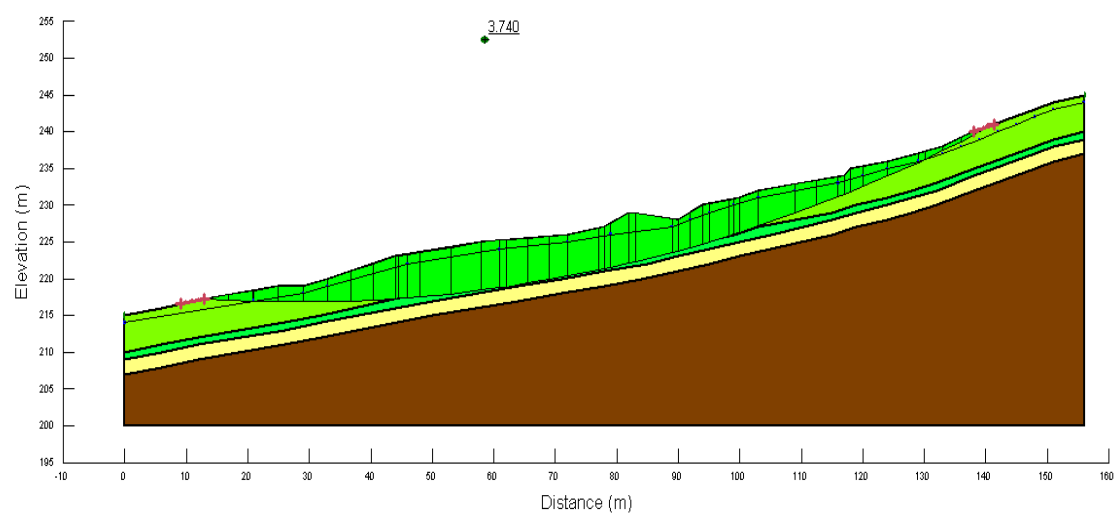


Fig.2.02: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda posta a 1 metro dal piano campagna. F.S.= 3.740.

-Falda a piano campagna

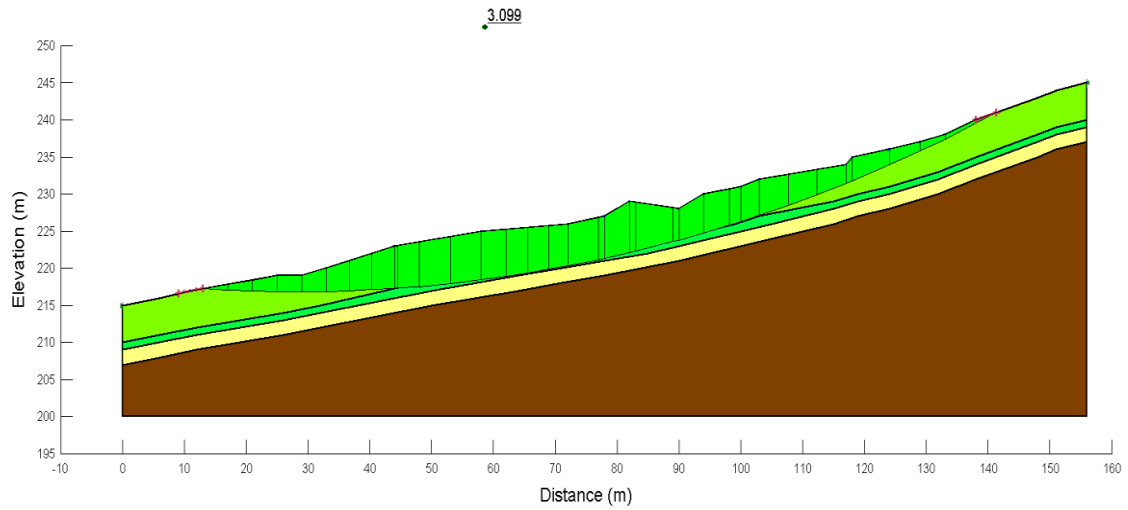


Fig.2.03: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna. F.S.= 3.099

Abbattimento dei parametri dell'orizzonte Abis:

- $\phi$  costante a  $28.8^\circ$  e abbassamento graduale di c a 12, 8, 4, 0 kPa:

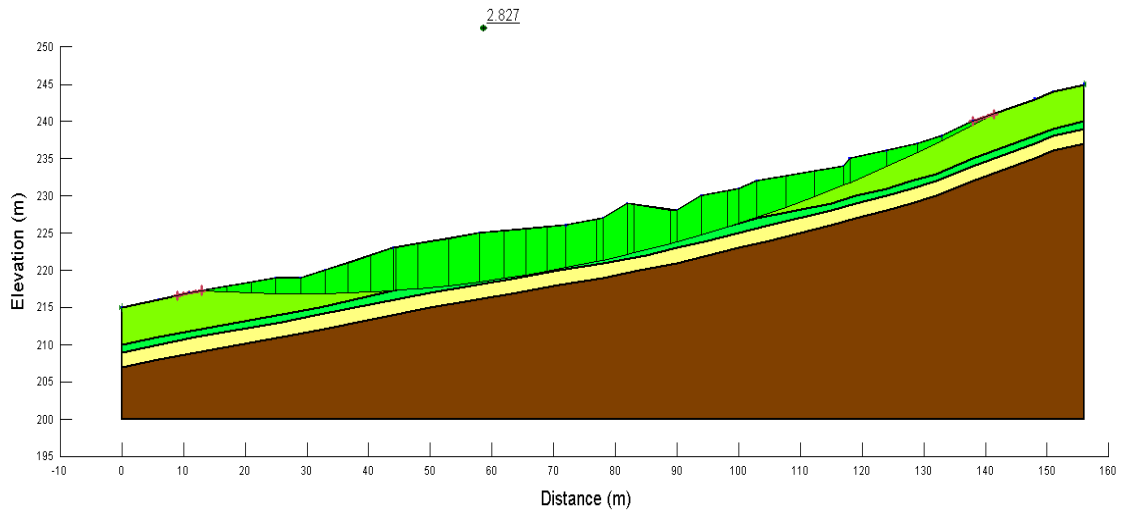


Fig.2.04: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di c abbattuto a 12 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 2.827.

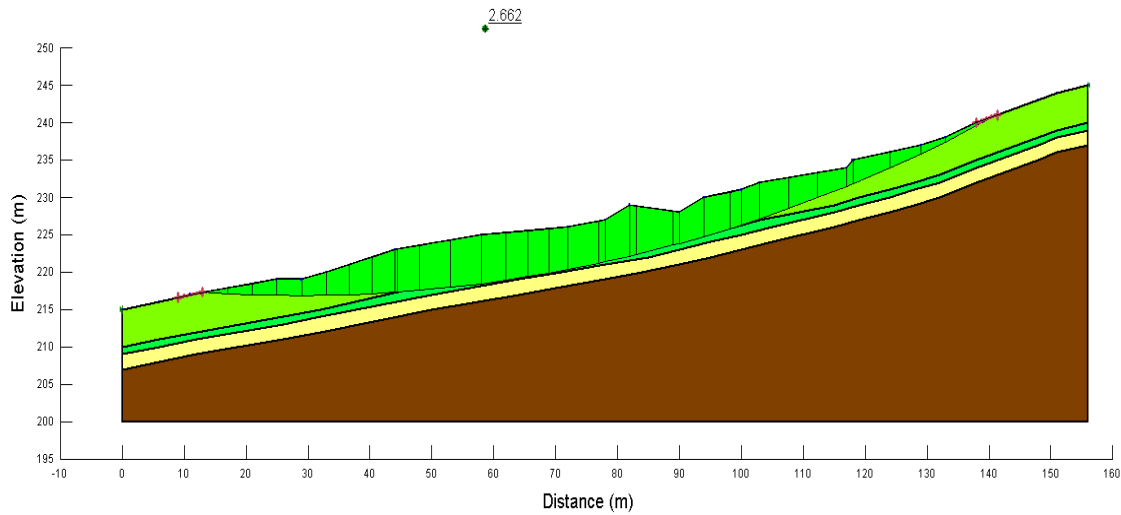


Fig.2.05: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di c abbattuto a 8 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 2.662.

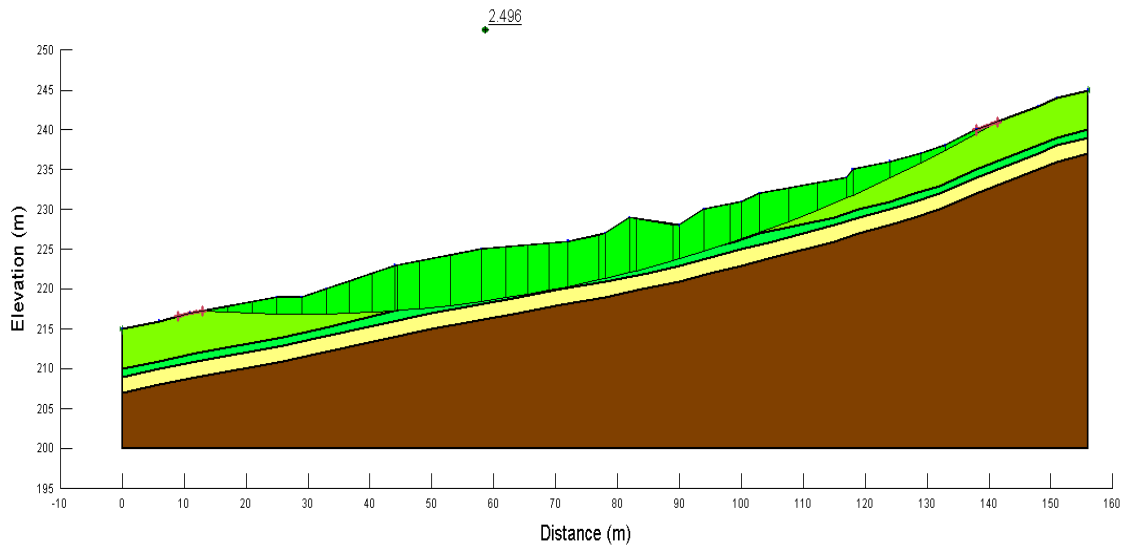


Fig.2.06: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 4 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 2.496.

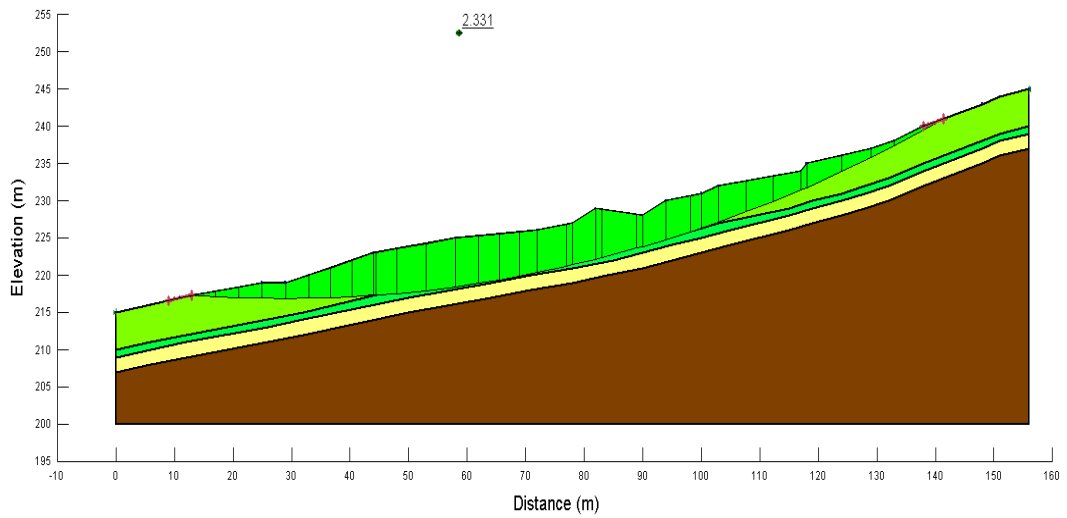


Fig.2.07: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 0 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 2.331.

-c costante a 18.6 KPa e abbassamento graduale di  $\phi$  a  $24^\circ$ ,  $20^\circ$ :

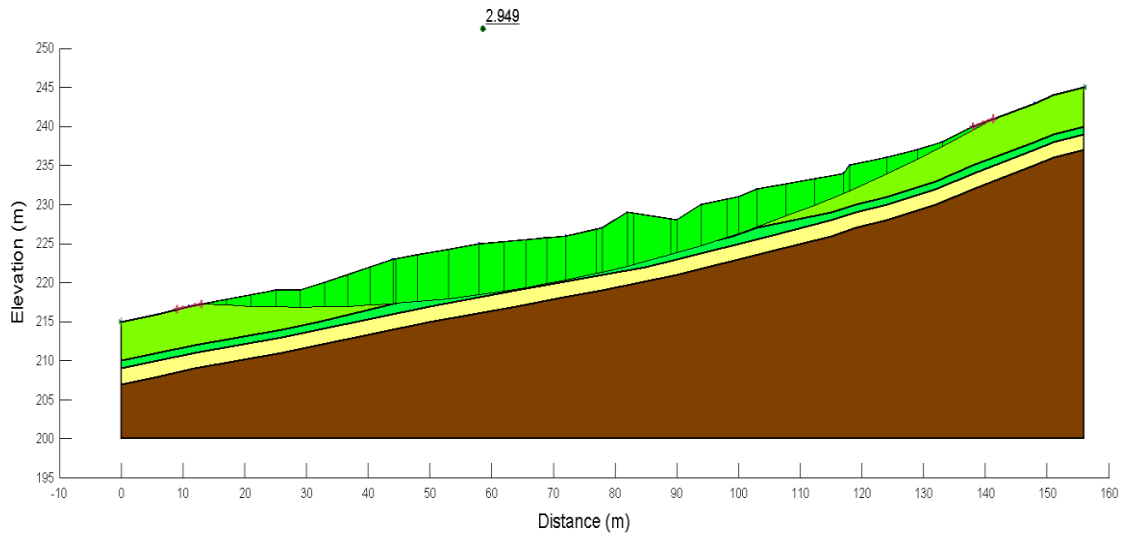


Fig.2.08: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $24^\circ$  c costante a 18.6 kPa. F.S.= 2.949.

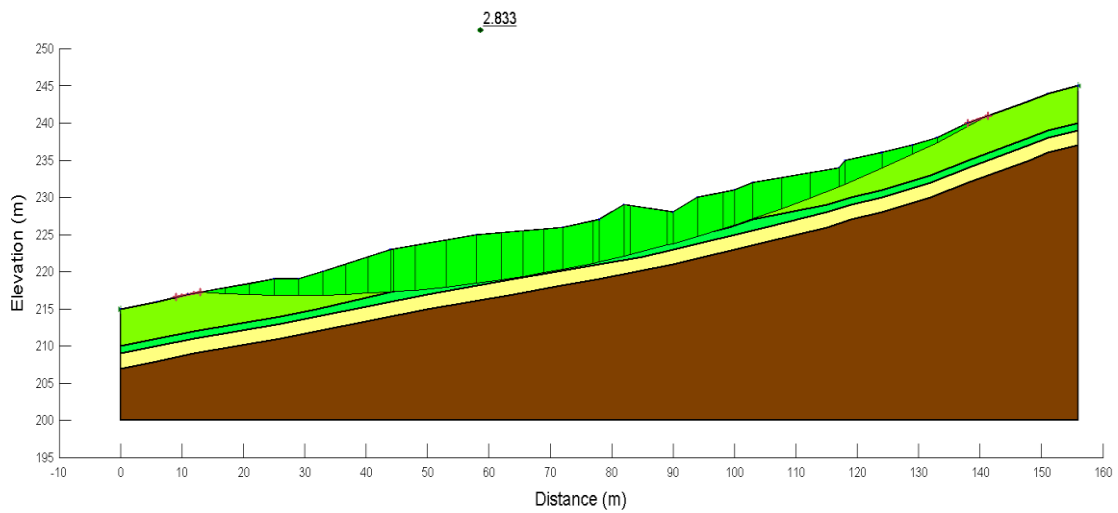


Fig.2.09: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $20^\circ$  c costante a 18.6 kPa. F.S.= 2.833.



$-\phi$  costante a  $24^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 12, 8, 4, 0 kPa:

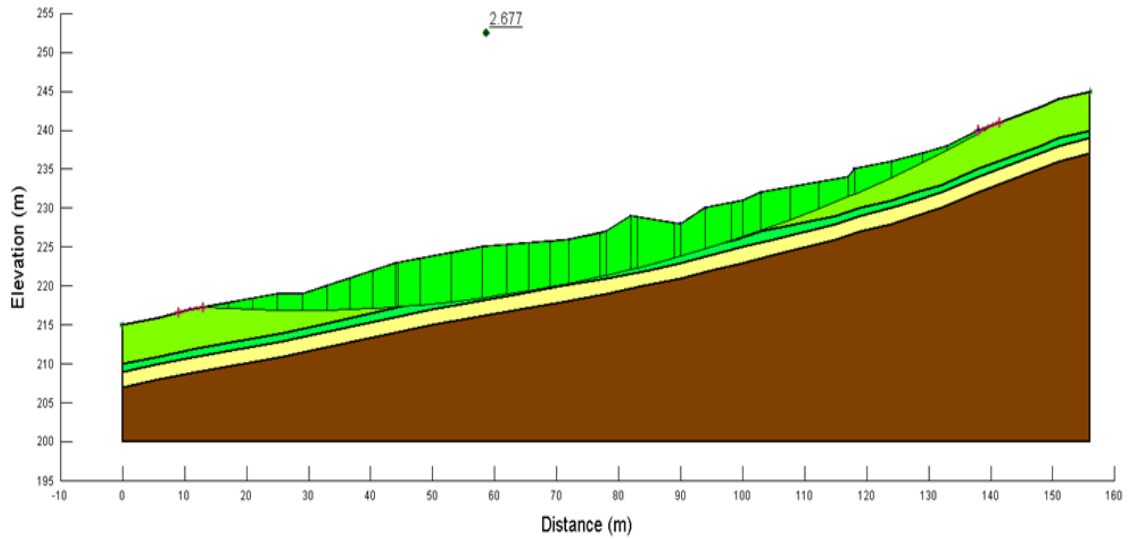


Fig.2.10: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=12$  kPa. F.S.= 2.677.

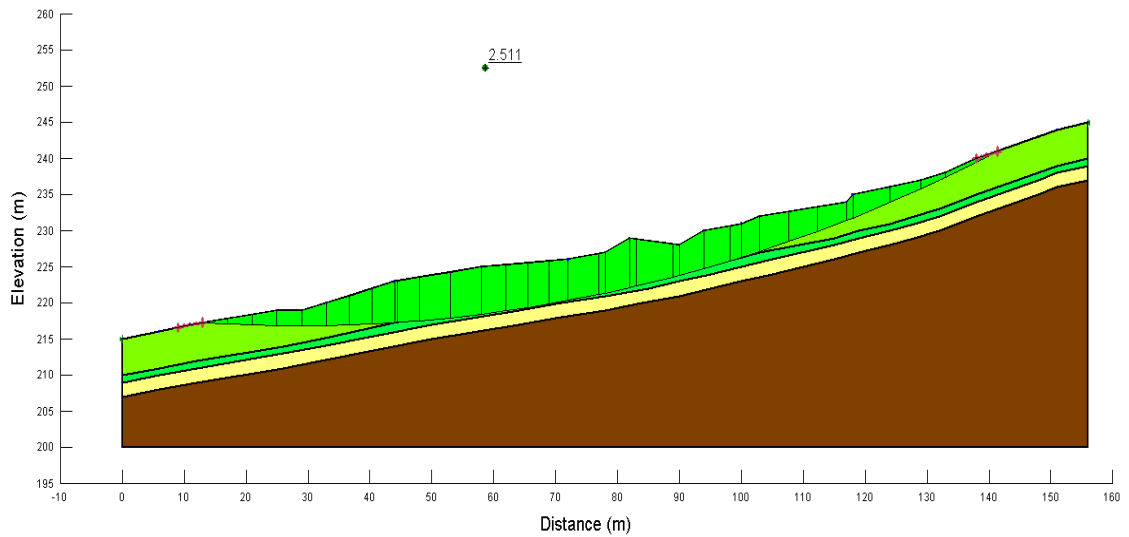


Fig.2.11: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 2.511.

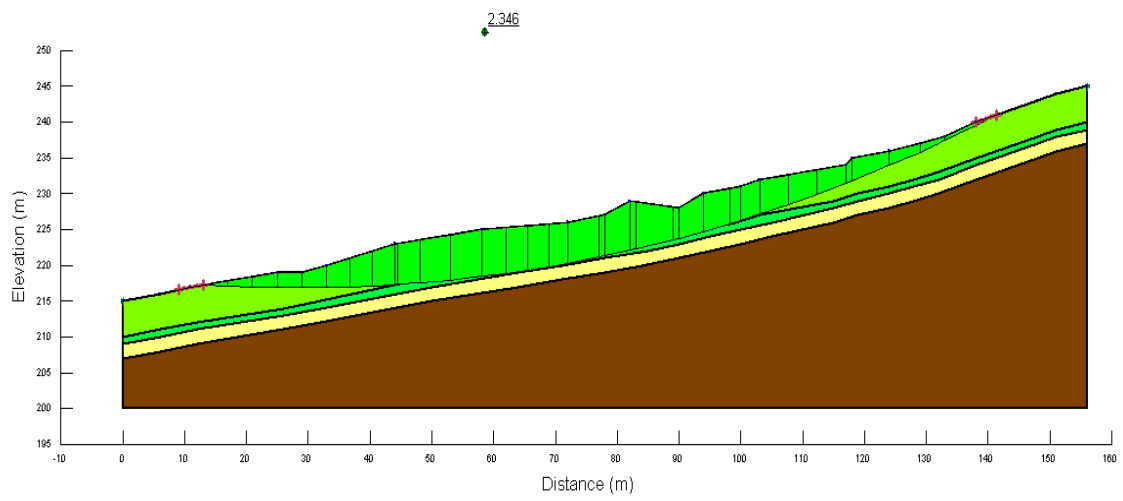


Fig.2.12: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 2.346.

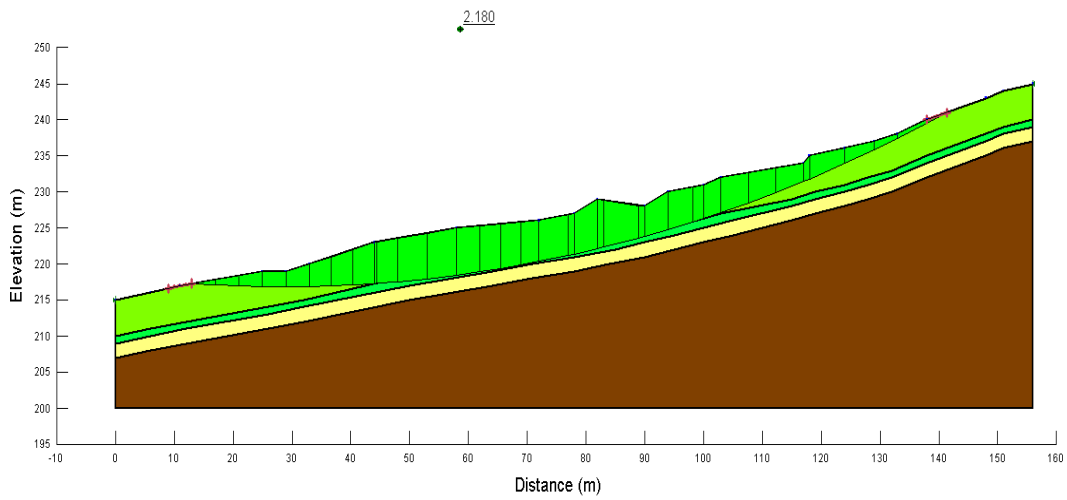


Fig.2.13: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 2.180.

$-\phi$  costante a  $20^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 12, 8, 4, 0 kPa:

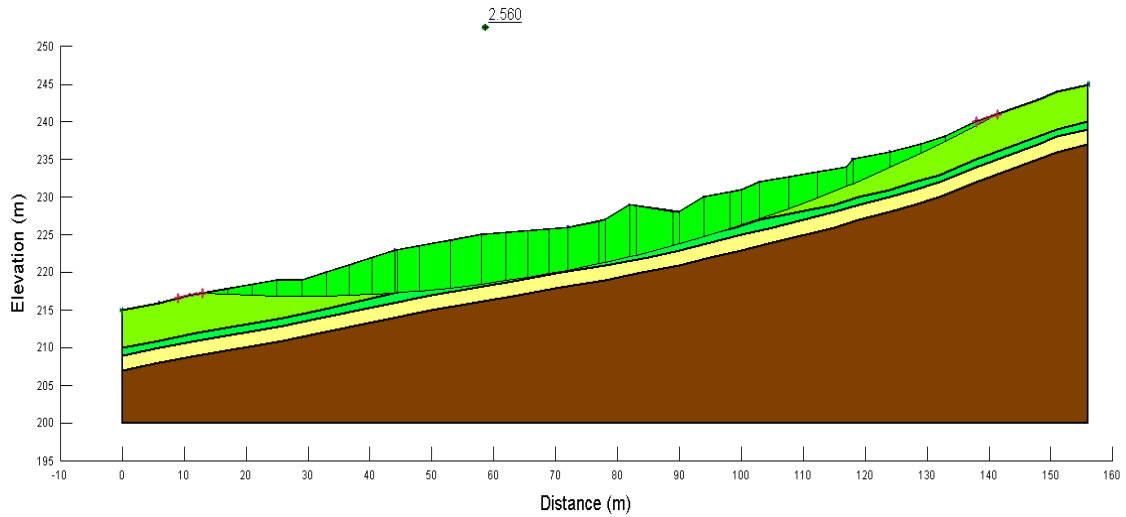


Fig.2.14: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=12$  kPa. F.S.= 2.560.

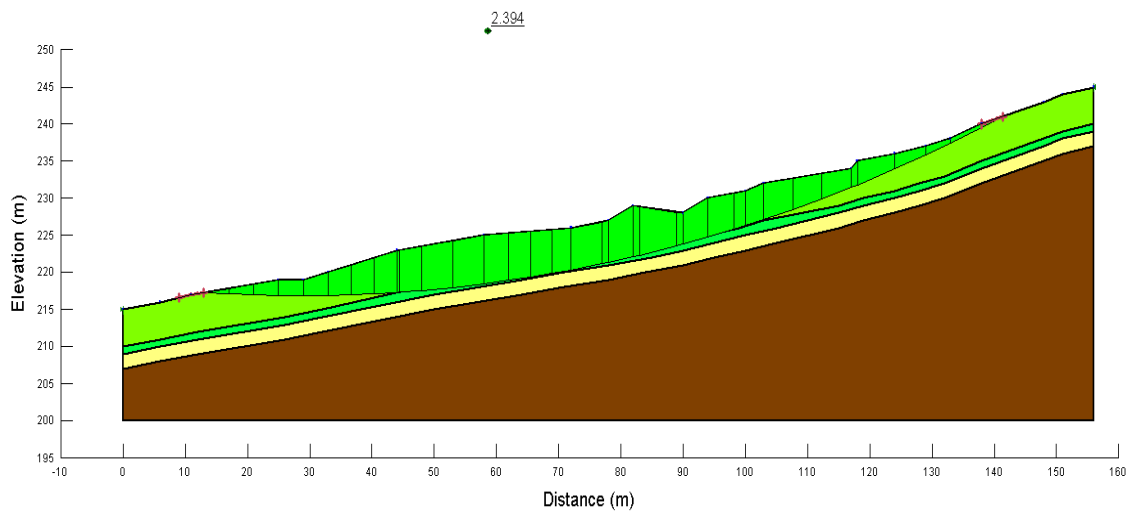


Fig.2.15: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 2.394.

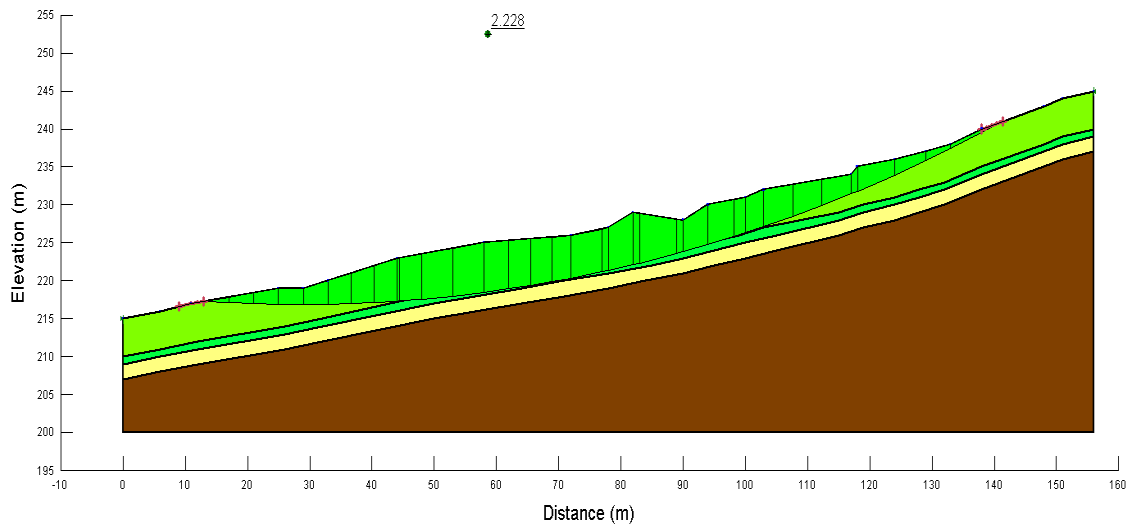
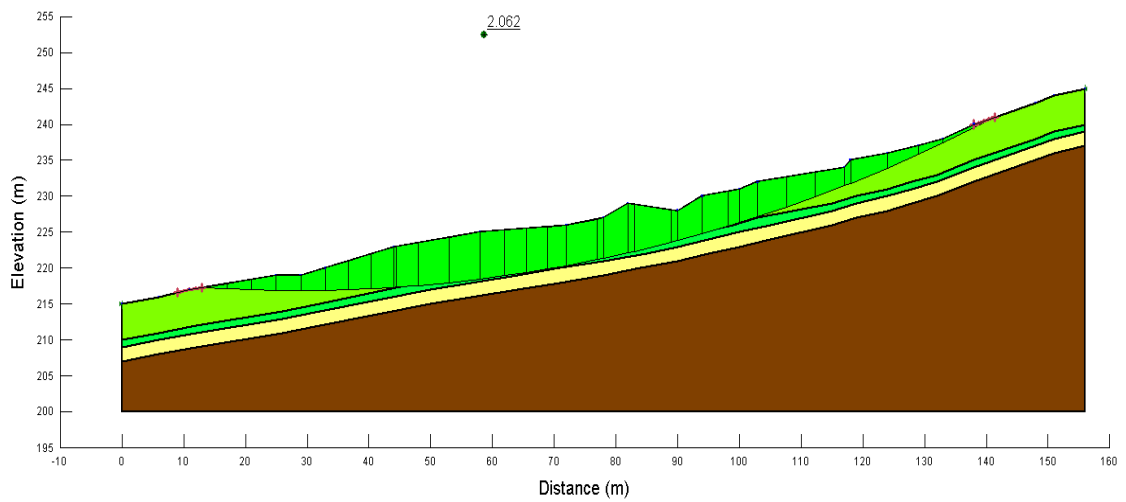


Fig.2.16: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 2.228.



2.17: Modellazione a quattro strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 2.062.

## Zonazione geotecnica

-Falda assente:

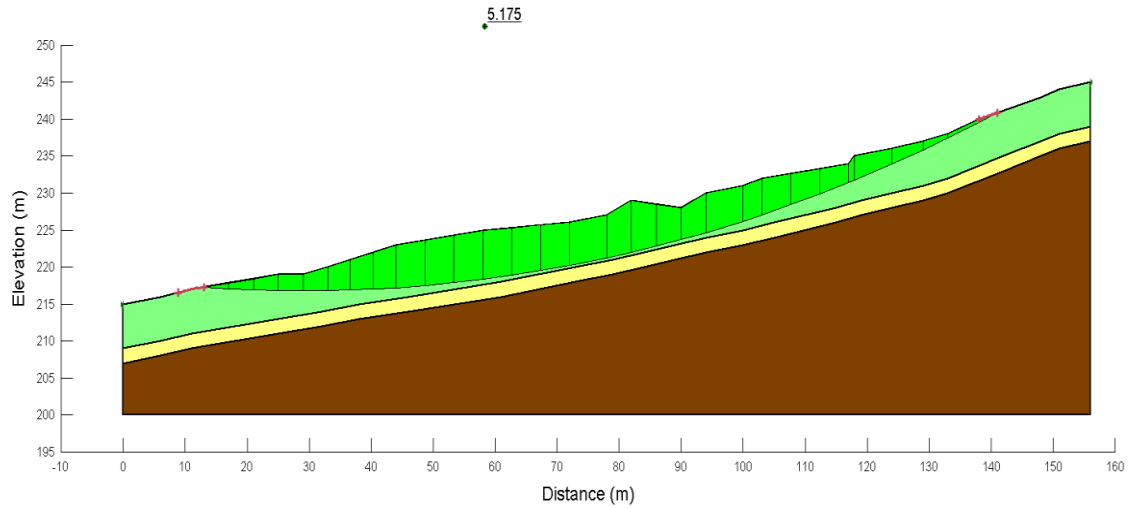


Fig.2.18: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino in assenza di falda. F.S.= 5.175.

-Falda in condizioni ordinarie (posta a 1 metro di profondità):

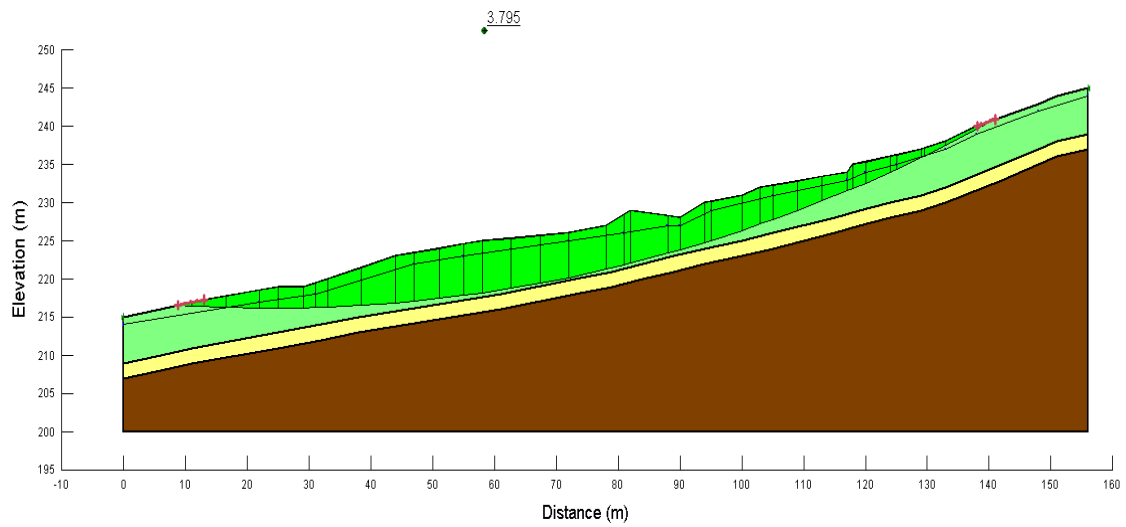


Fig.2.19: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda posta a circa 1 metro dal piano campagna. F.S.= 3.795.

-Falda a piano campagna:

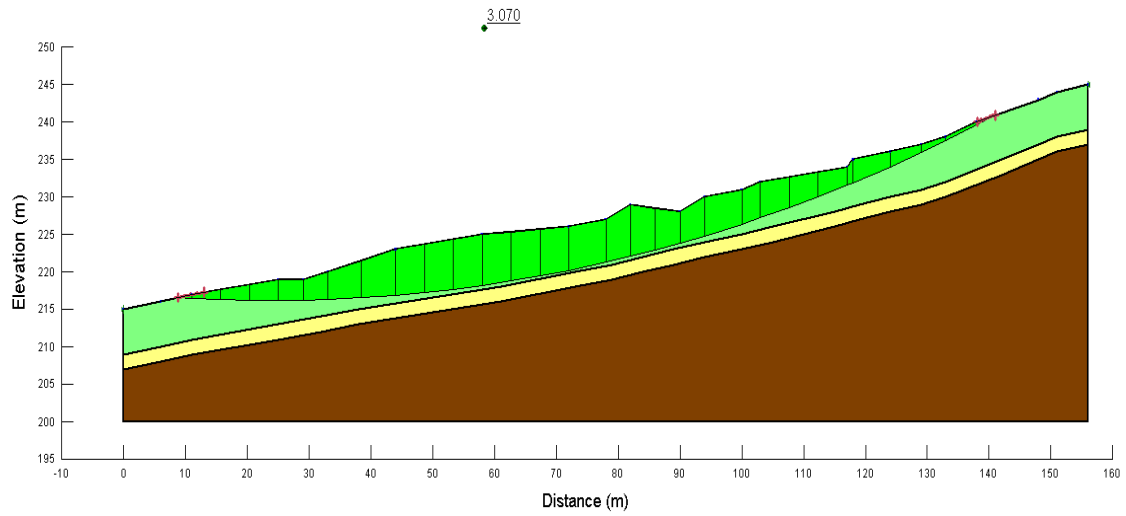


Fig.2.20: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna. F.S.= 3.070.

Abbattimento dei parametri dell'orizzonte A:

- $\phi$  costante a  $28.8^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 12, 8, 4, 0 kPa:

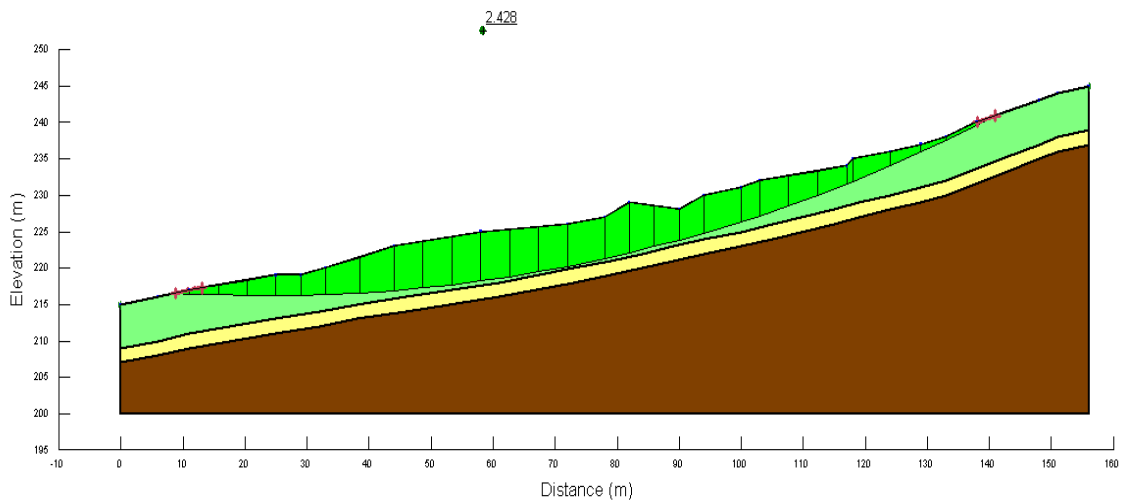


Fig.2.21: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 12 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 2.428.

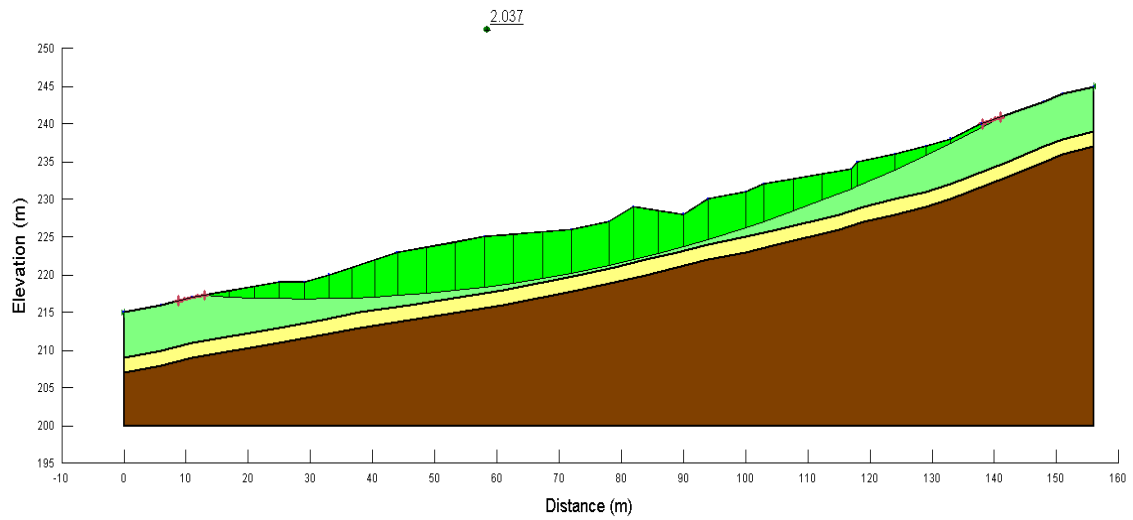


Fig.2.22: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 8 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 2.037.

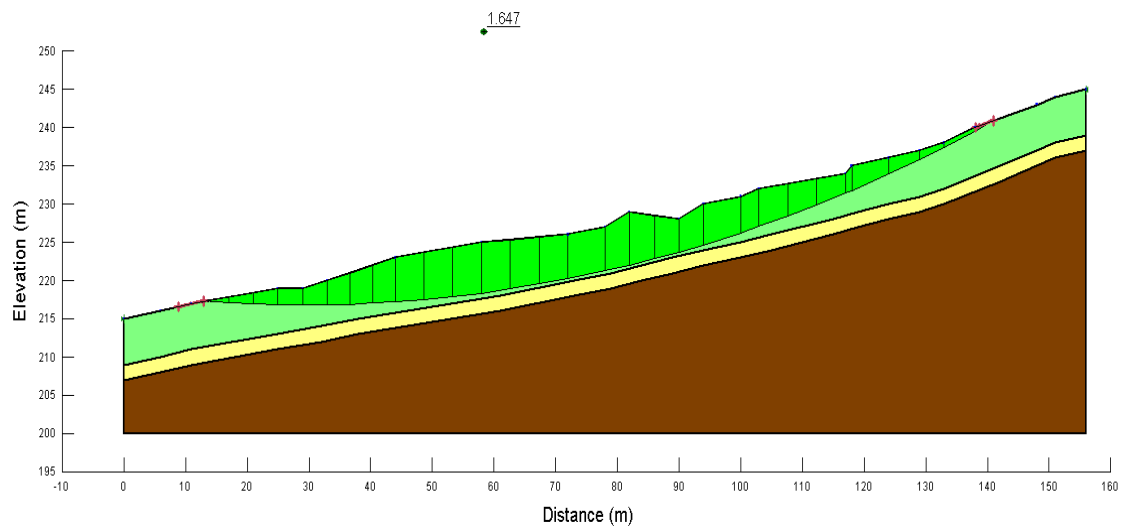


Fig.2.23: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 4 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 1.647.

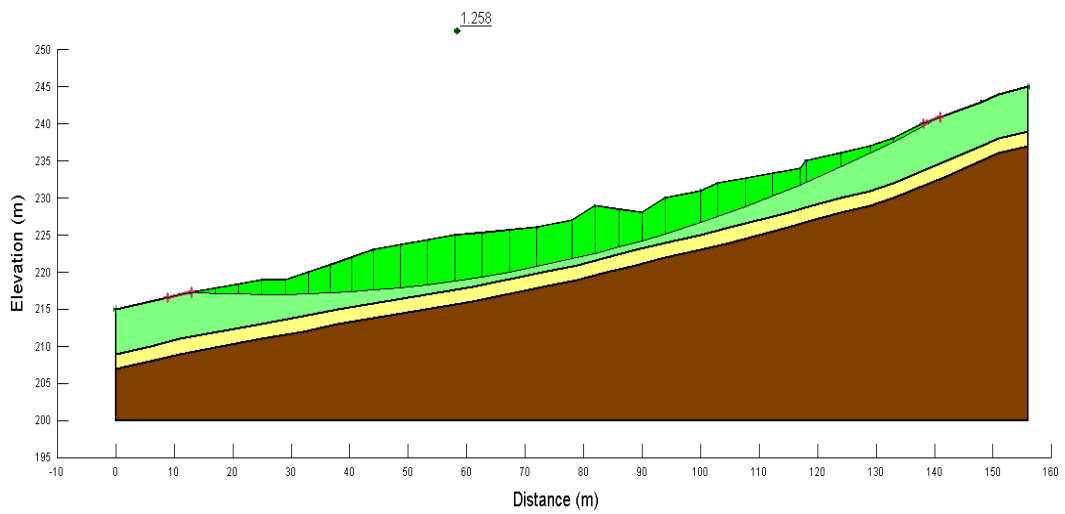


Fig.2.24: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 0 kPa e  $\phi$  costante a  $28.8^\circ$ . F.S.= 1.258.

-  $c$  costante a 18.6 kPa e abbassamento graduale di  $\phi$  a  $24^\circ$ ,  $20^\circ$ :

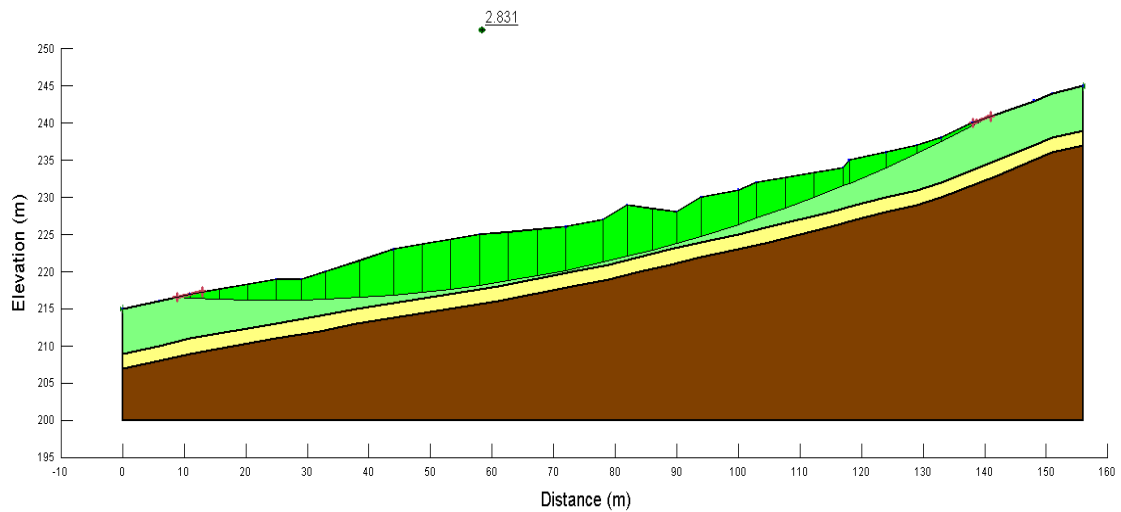


Fig.2.25: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $24^\circ$  e  $c$  costante a 18.6 kPa. F.S.= 2.831.



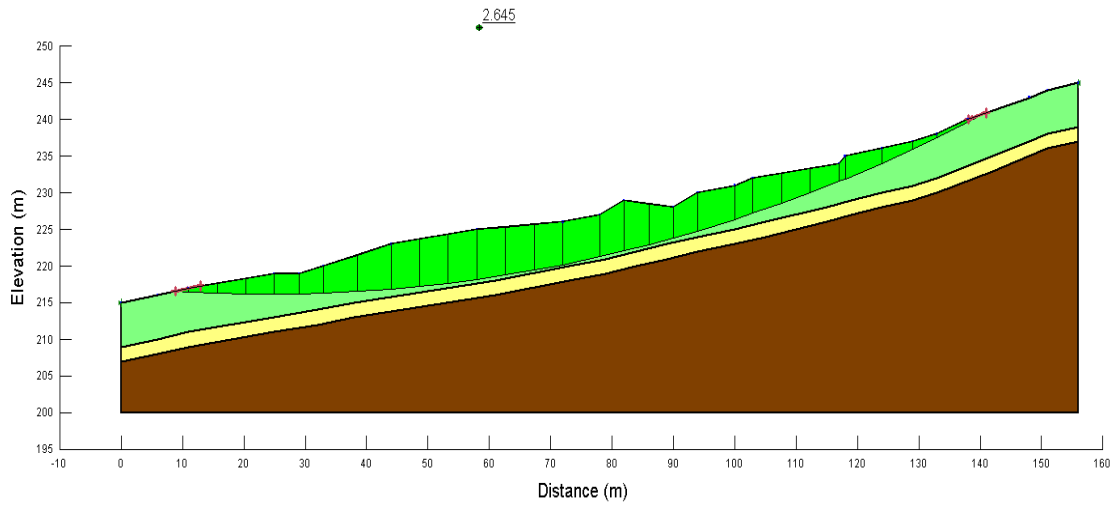


Fig.2.26: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $20^\circ$  e c costante a 18.6 kPa. F.S.= 2.645.

- $\phi$  costante a  $24^\circ$  e abbassamento graduale di c a 12, 8, 4, 0 kPa:

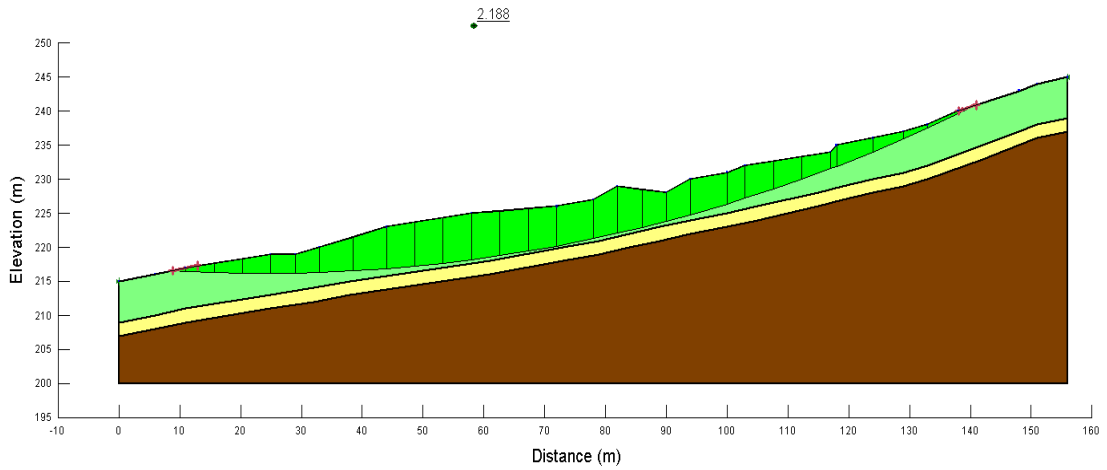


Fig.2.27: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=12$  kPa. F.S.= 2.188.

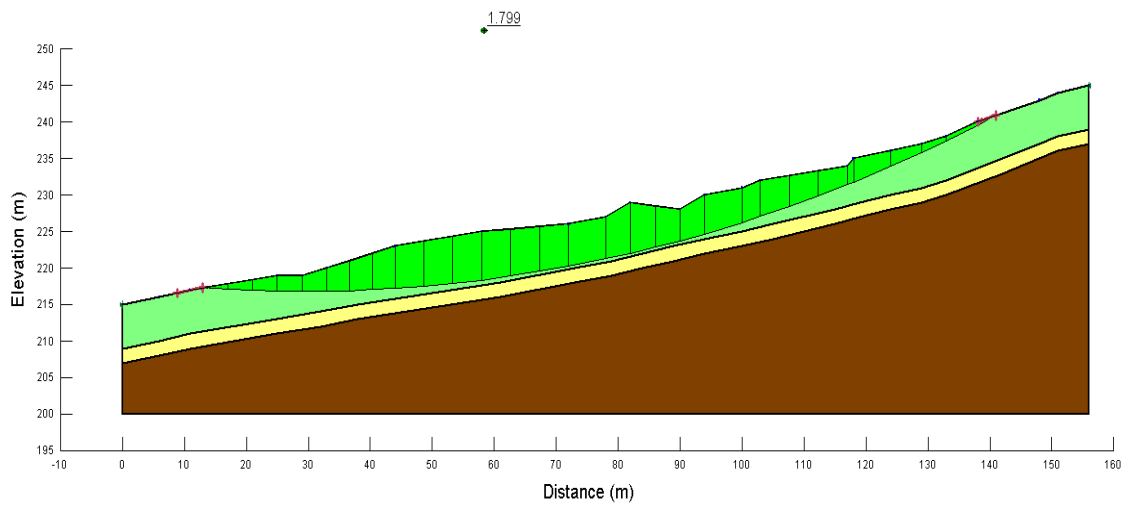


Fig.2.28: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 1.799.

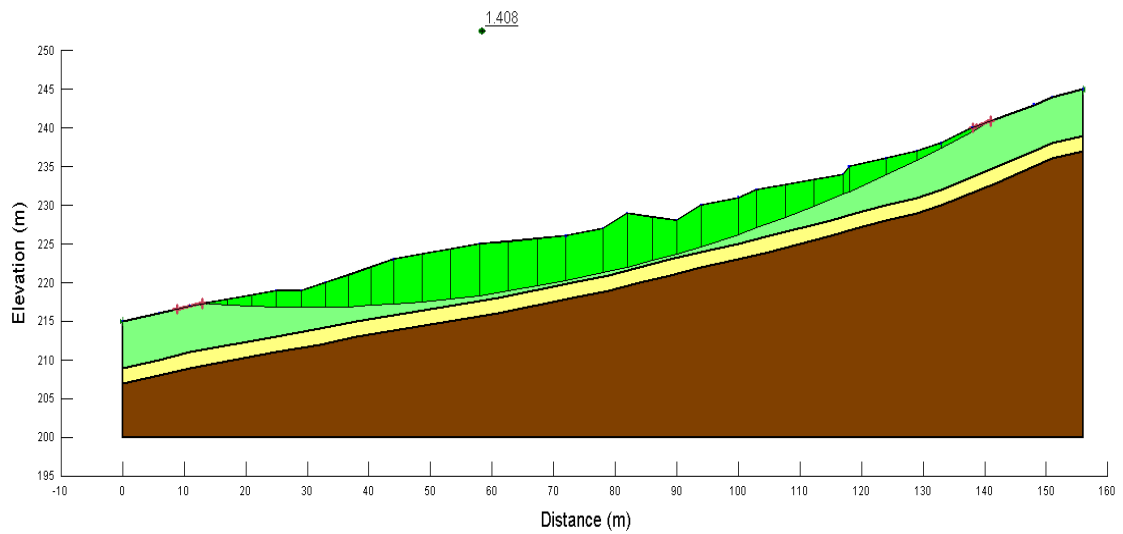


Fig.2.29: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 1.408.

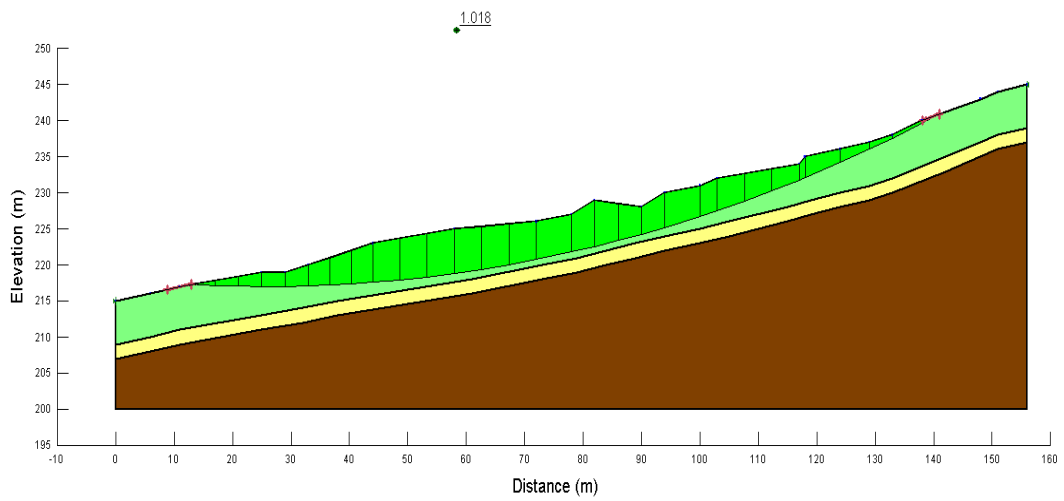


Fig.2.30: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 1.018.

$-\phi$  costante a  $20^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 12, 8, 4, 0 kPa:

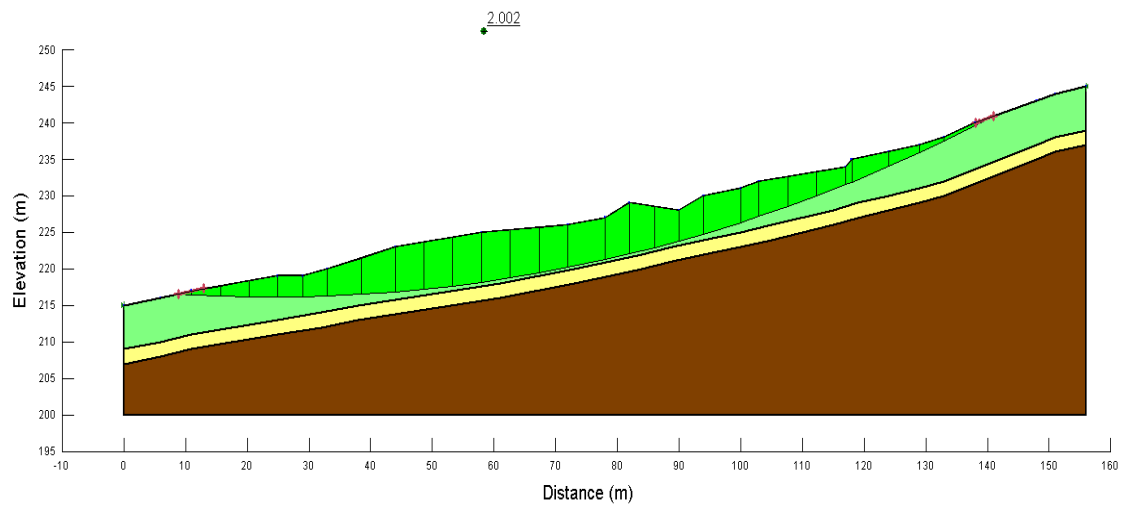


Fig.2.31: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=12$  kPa. F.S.= 2.002.

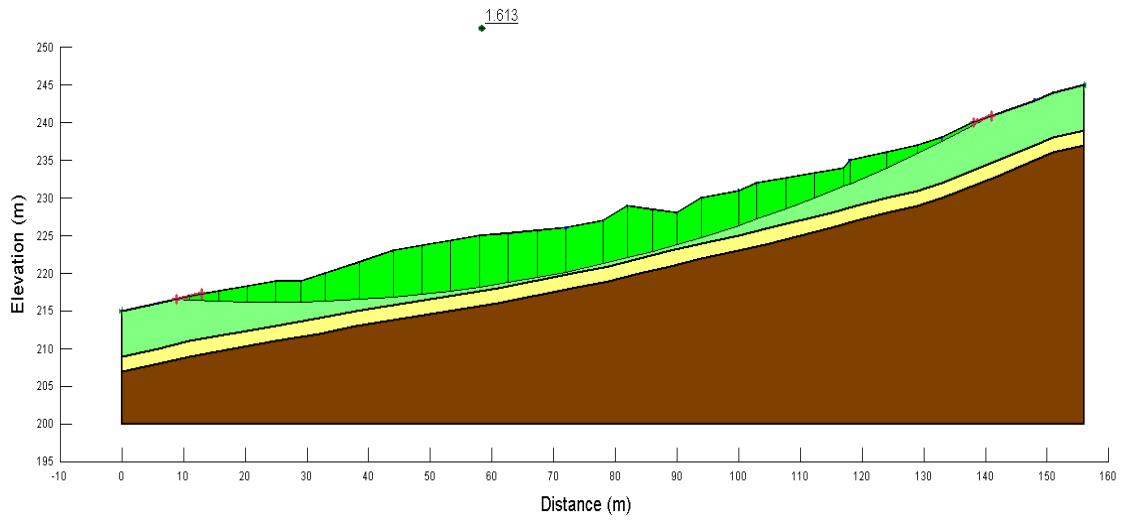


Fig.2.32: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 1.613.

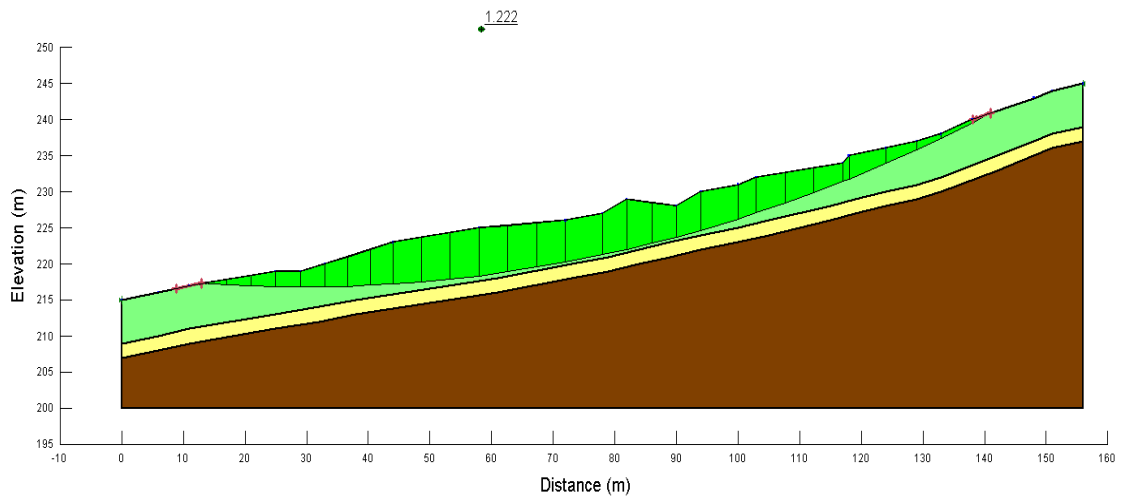


Fig.2.33: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 1.222.

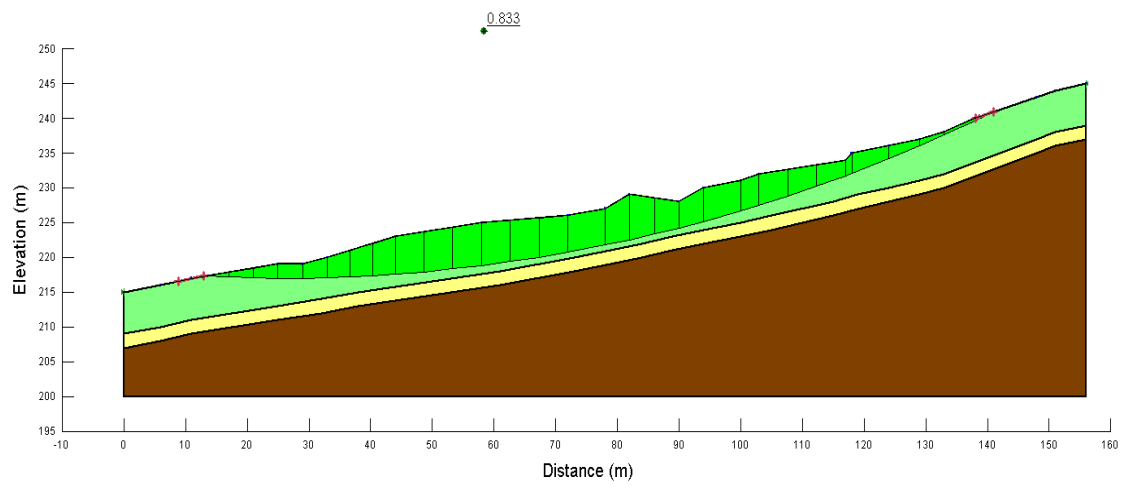


Fig.2.34: Modellazione a tre strati della frana di Fara Vicentino con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 0.833.

## Allegato 3: Modellazione della frana di Carrè

### Zonazione mineralogica

-Falda assente:

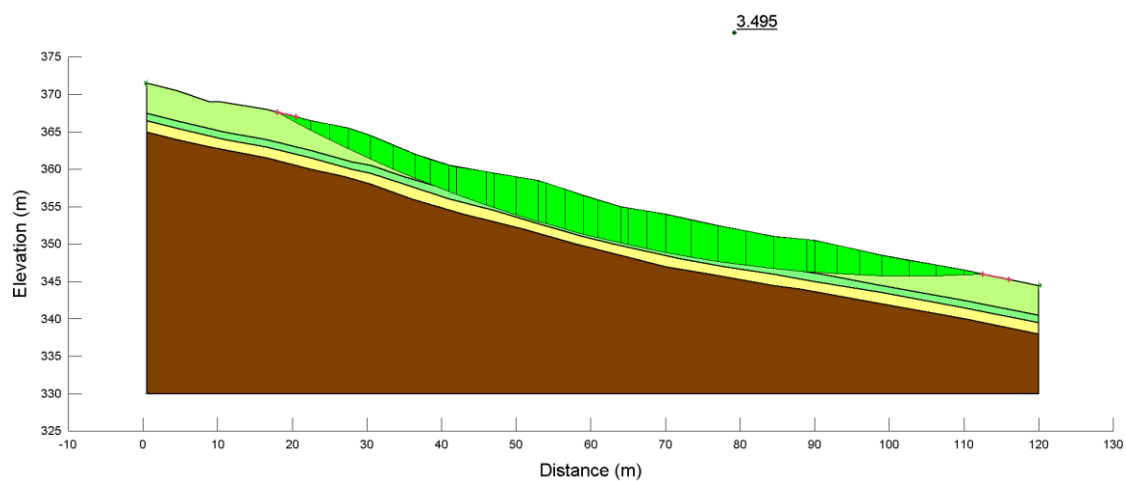


Fig.3.01: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè in assenza di falda. F.S.= 3.495.

-Falda in condizioni ordinarie (posta a 1 metro di profondità):

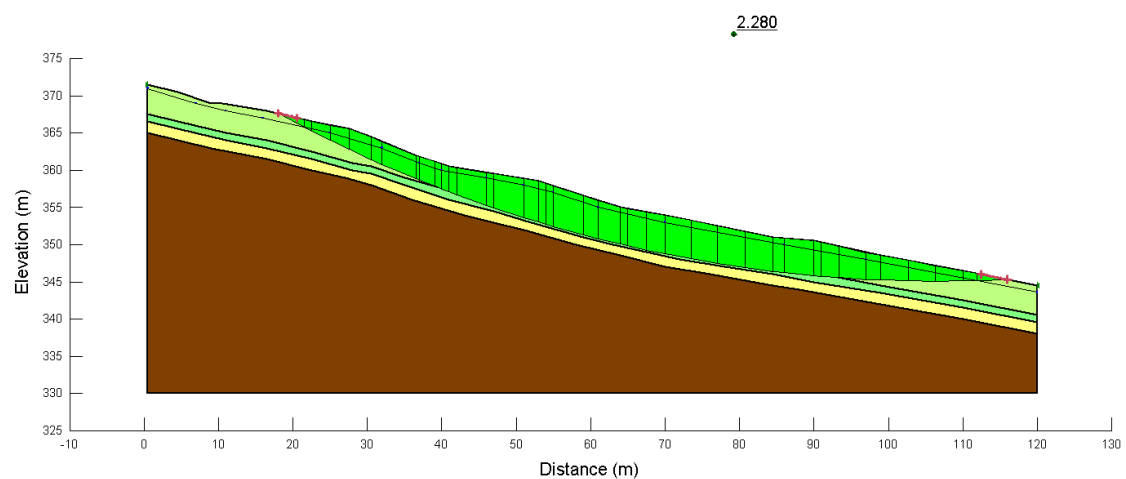


Fig.3.02: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda posta a 1 metro dal piano campagna. F.S.= 2.280.

-Falda a piano campagna:

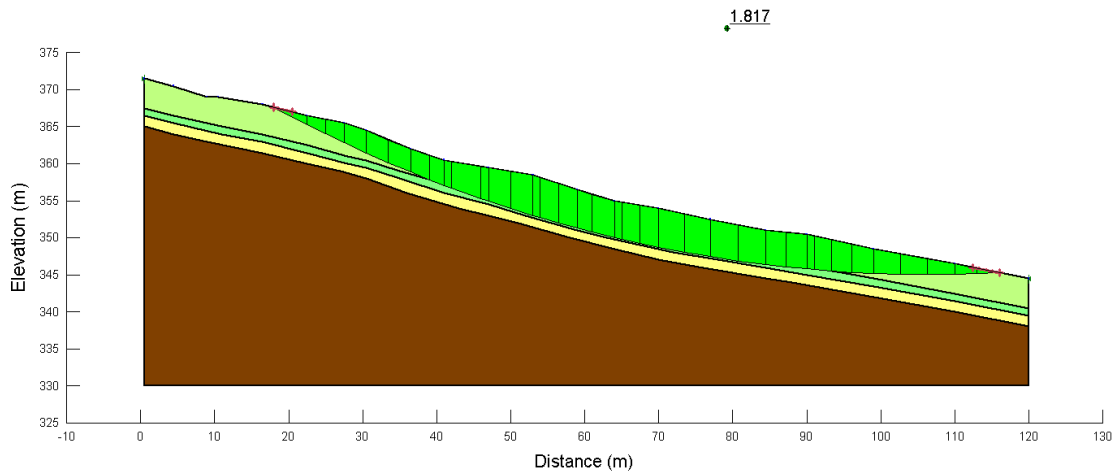


Fig.3.03: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna. F.S.= 1.817.

Abbattimento dei parametri dell'orizzonte Abis:

- $\phi$  costante a  $28.5^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 8, 6, 4, 0 kPa:

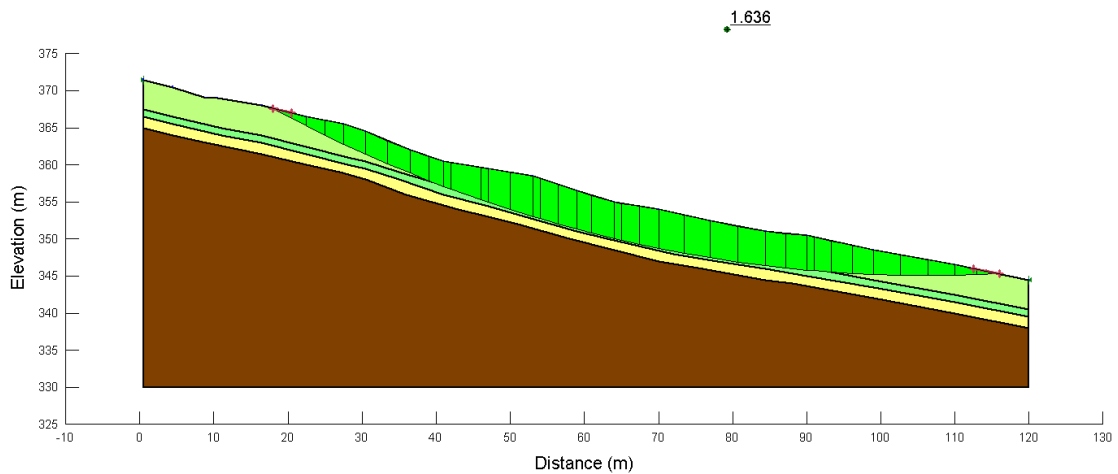


Fig.3.04: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 8kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.636.

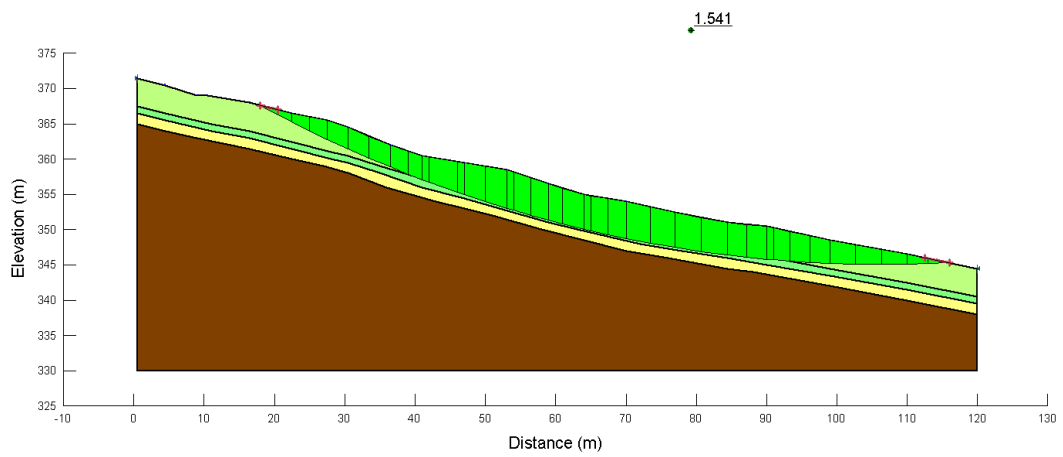


Fig.3.05: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 6 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.541.

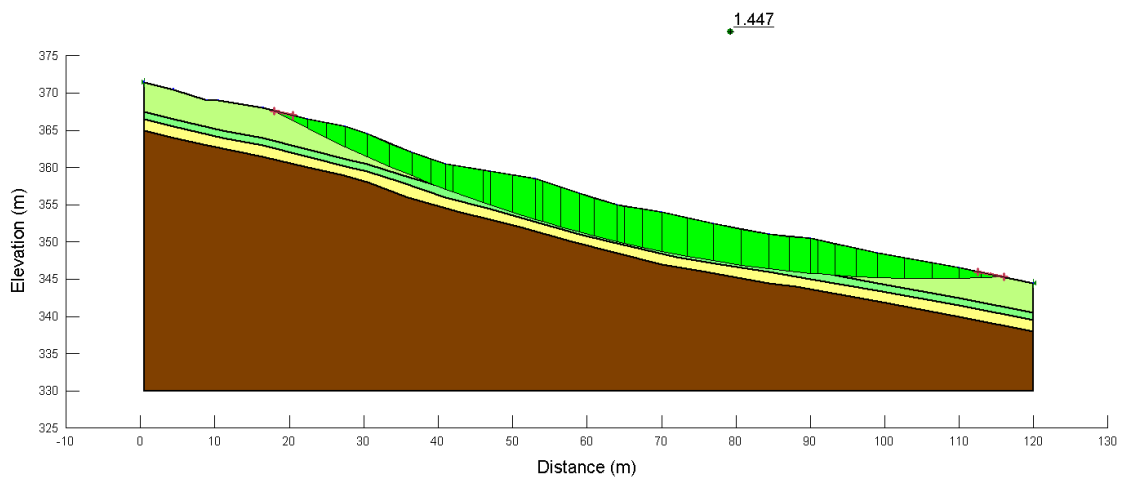


Fig.3.06: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 4 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.447.



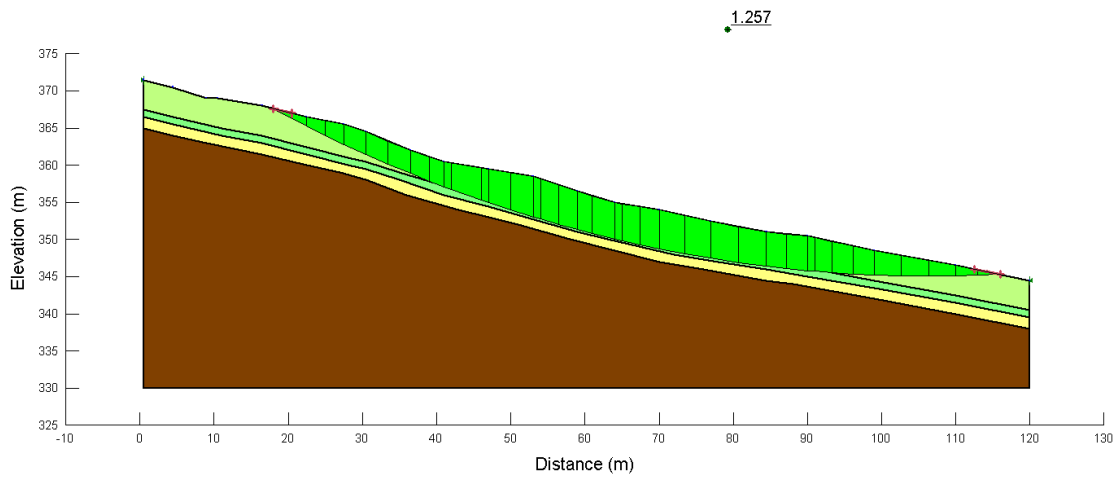


Fig.3.07: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 0 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.257.

-  $c$  costante a 11.8 kPa e abbassamento graduale di  $\phi$  a  $24^\circ$ ,  $20^\circ$ :

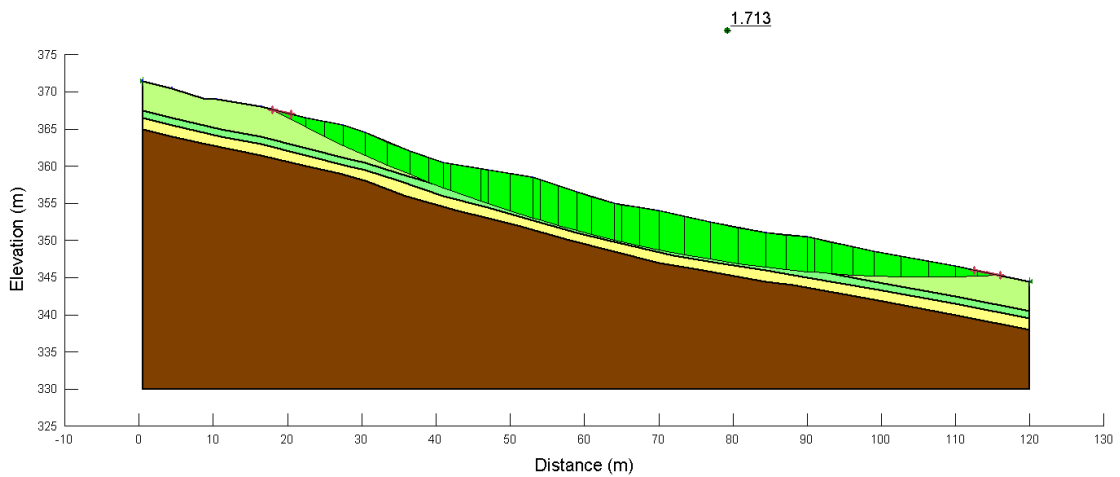


Fig.3.08: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $24^\circ$  e  $c$  costante a 11.8 kPa. F.S.= 1.713.

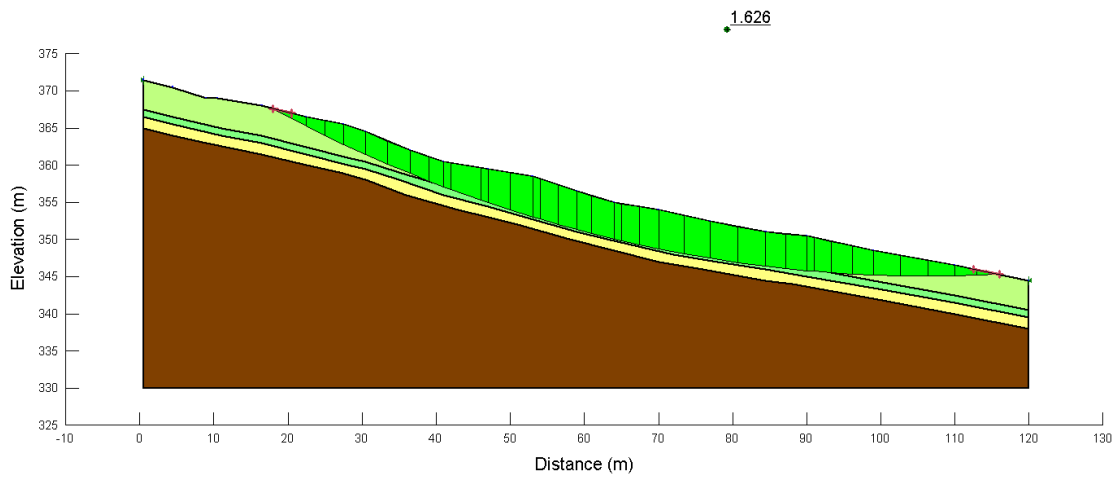


Fig.3.09: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $20^\circ$  e  $c$  costante a 11.8 kPa. F.S.= 1.713.

$-\phi$  costante a  $24^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 8, 6, 4, 0 kPa:

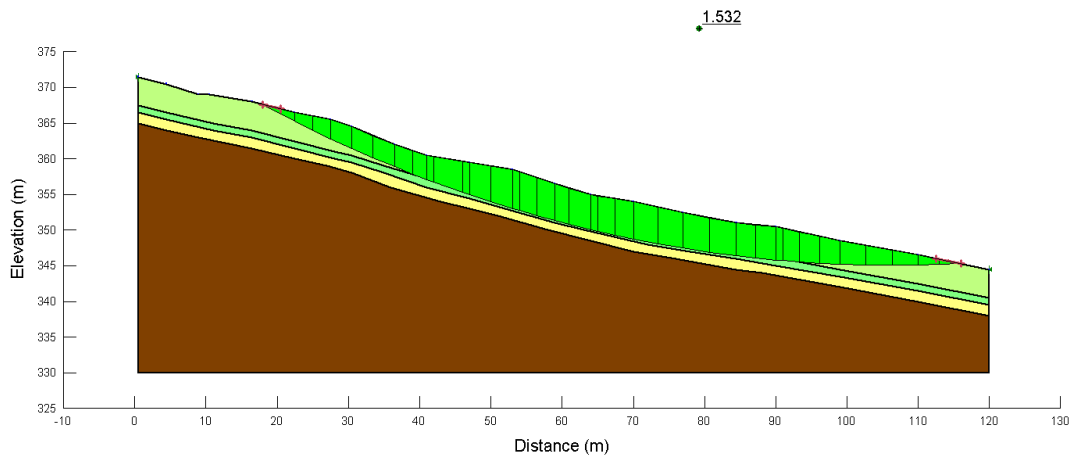


Fig.3.10: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 1.532.

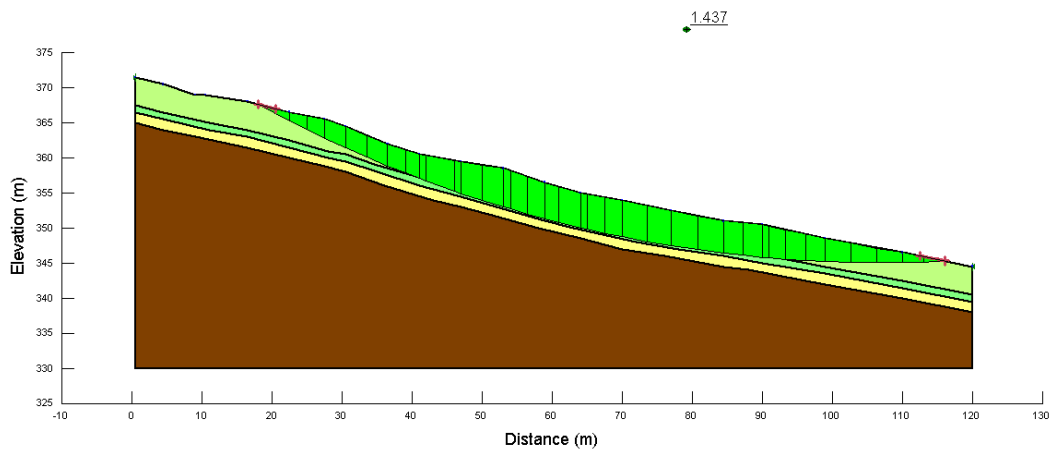


Fig.3.11: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.437.

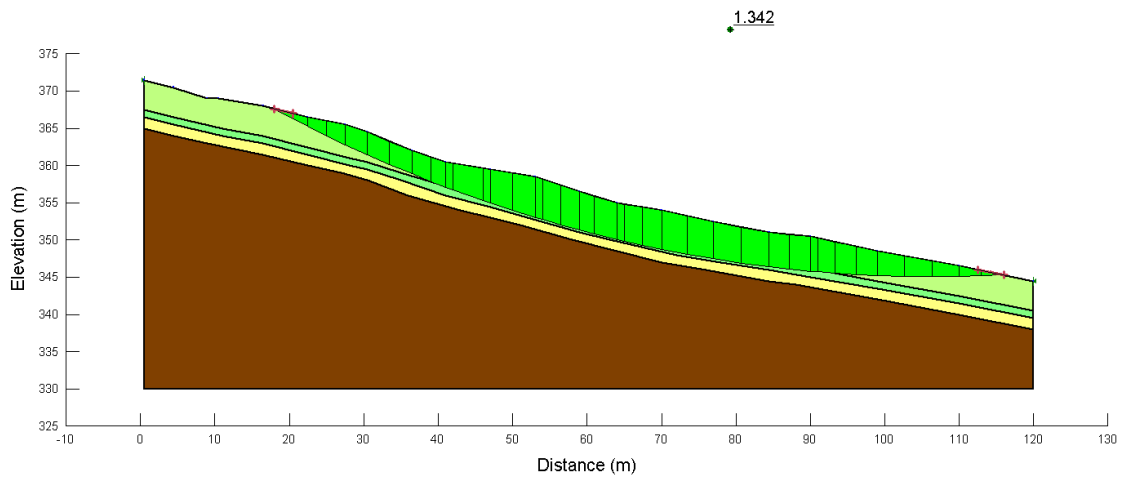


Fig.3.12: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 1.342.

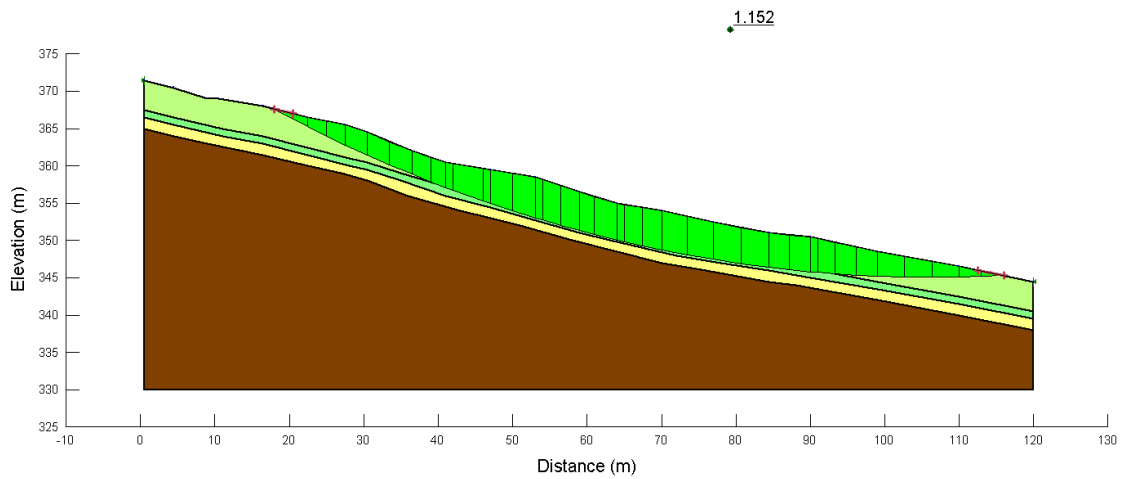


Fig.3.13: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 1.152.

$-\phi$  costante a  $20^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 8, 6, 4, 0 kPa:

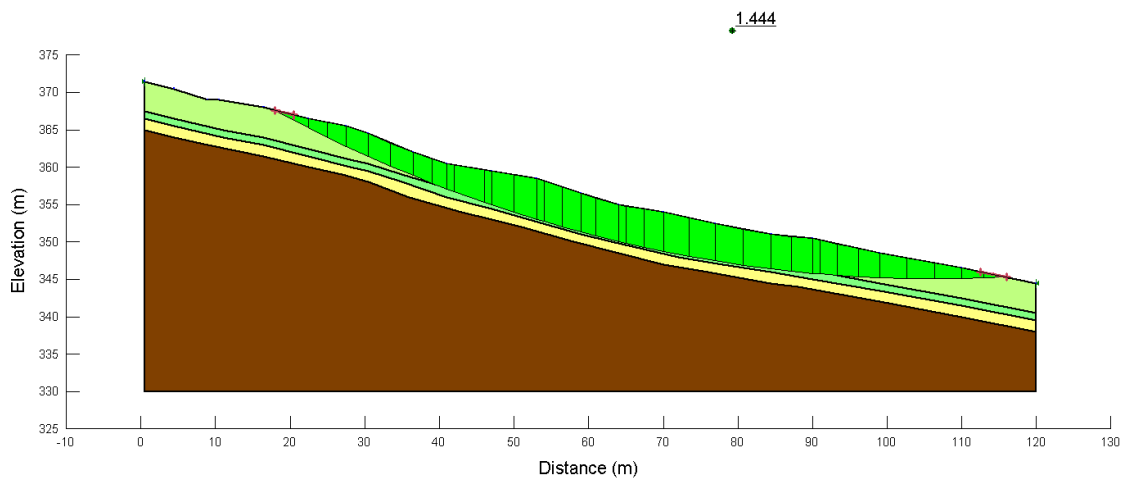


Fig.3.14: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 1.444.

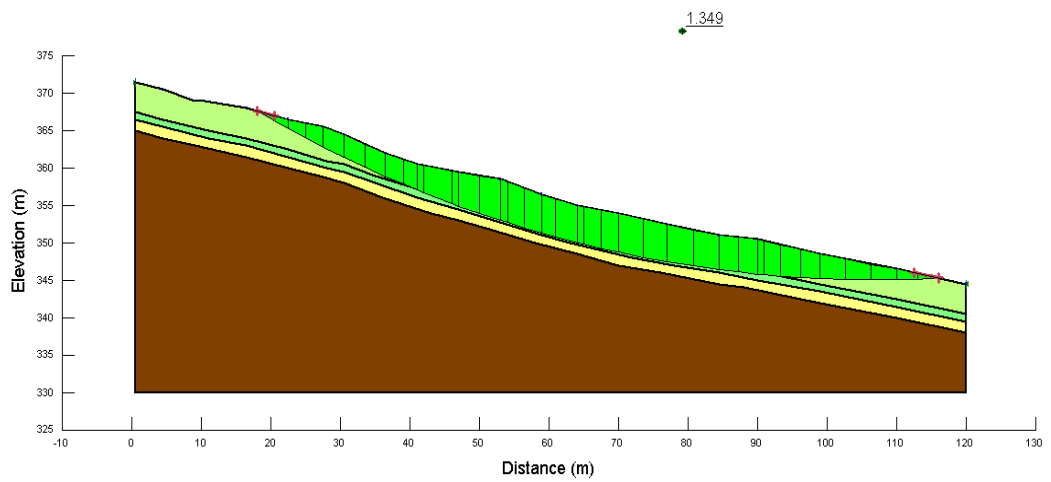


Fig.3.15: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.349.

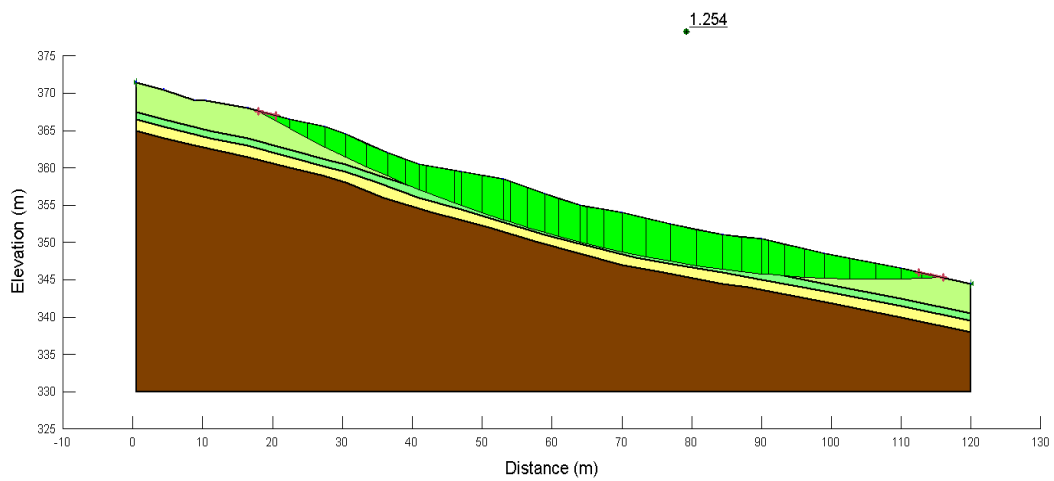


Fig.3.16: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=4$  KPa. F.S.= 1.254.

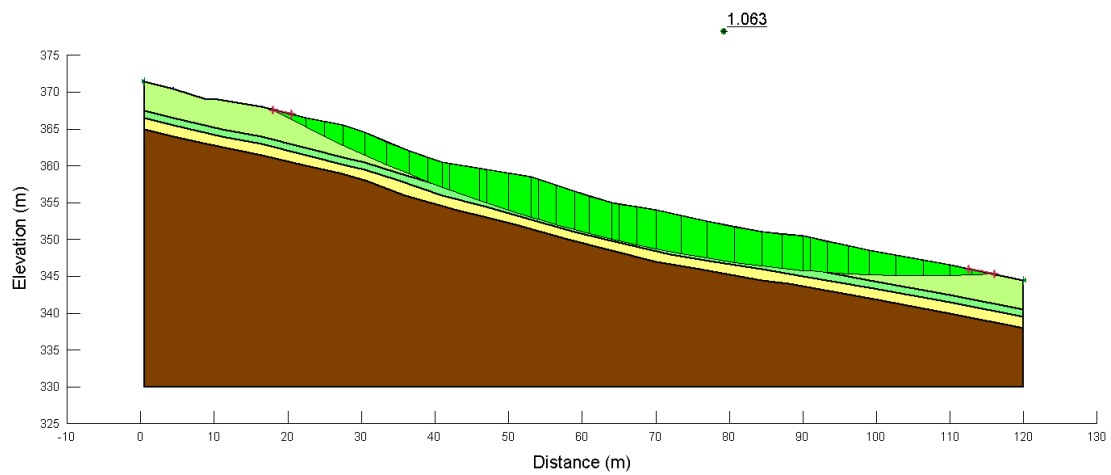


Fig.3.17: Modellazione a quattro strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=0$  KPa. F.S.= 1.063.

### Zonazione geotecnica

-Falda assente:

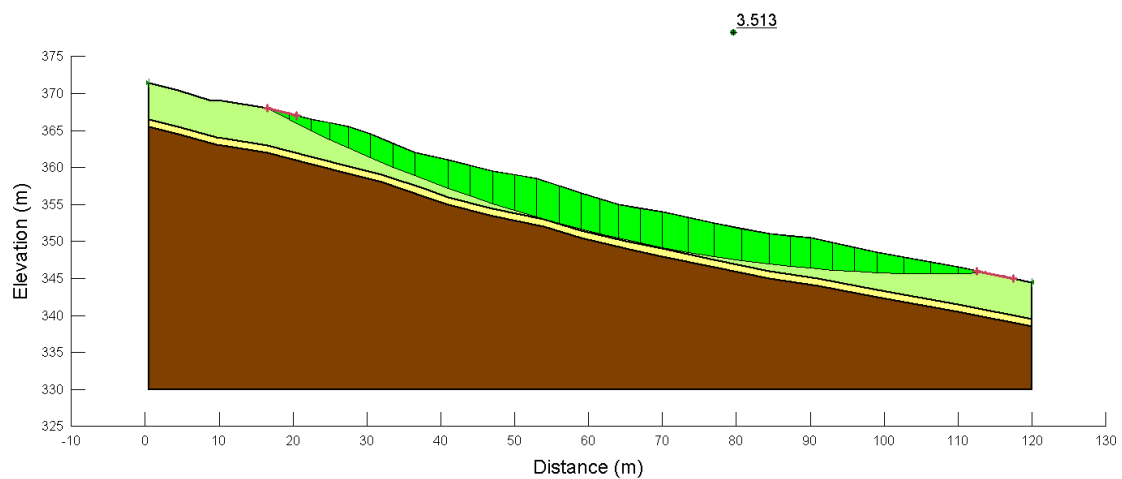


Fig.3.18: Modellazione a tre strati della frana di Carrè in assenza di falda. F.S.= 3.513.

-Falda in condizioni ordinarie (posta a 1 metro di profondità):

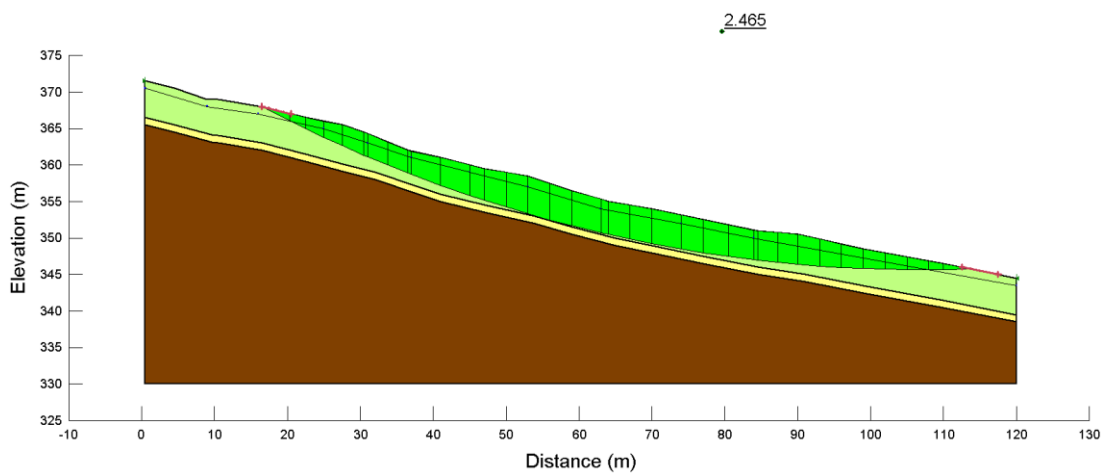


Fig.3.19: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda posta a 1 metro dal piano campagna. F.S.= 2.465.

-Falda a piano campagna:

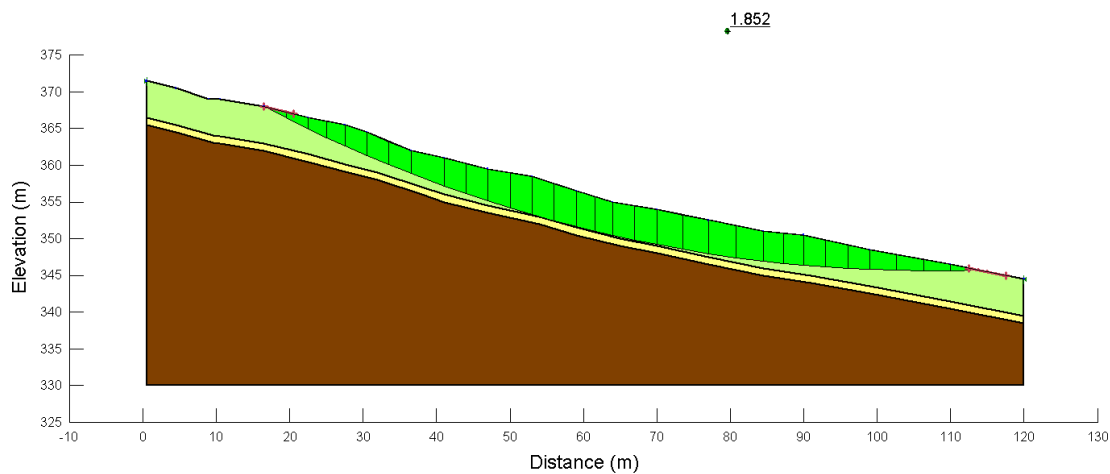


Fig.3.20: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna. F.S.= 1.852.

Abbattimento dei parametri dell'orizzonte A:

$-\phi$  costante a  $28.5^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 8, 6, 4, 0 kPa:

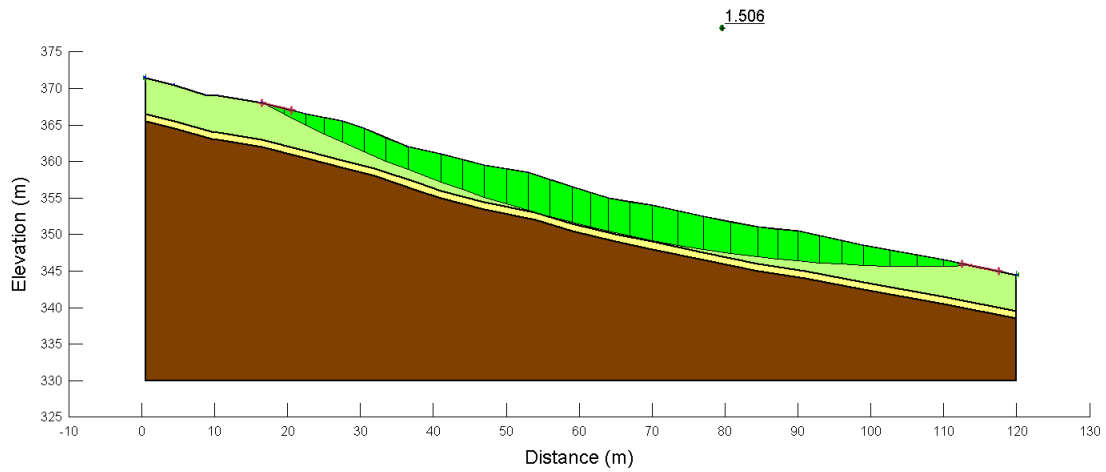


Fig.3.21: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 8 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.506.

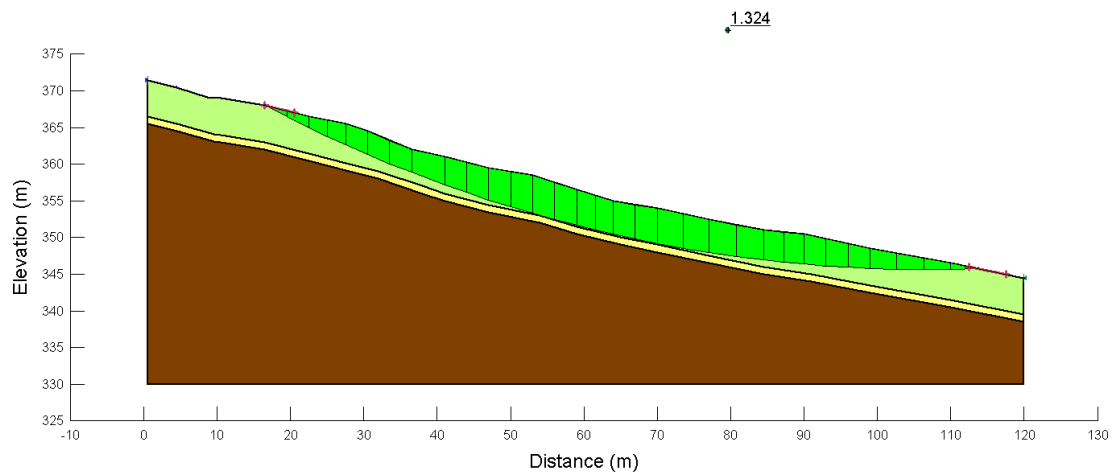


Fig.3.22: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $c$  abbattuto a 6 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.324.



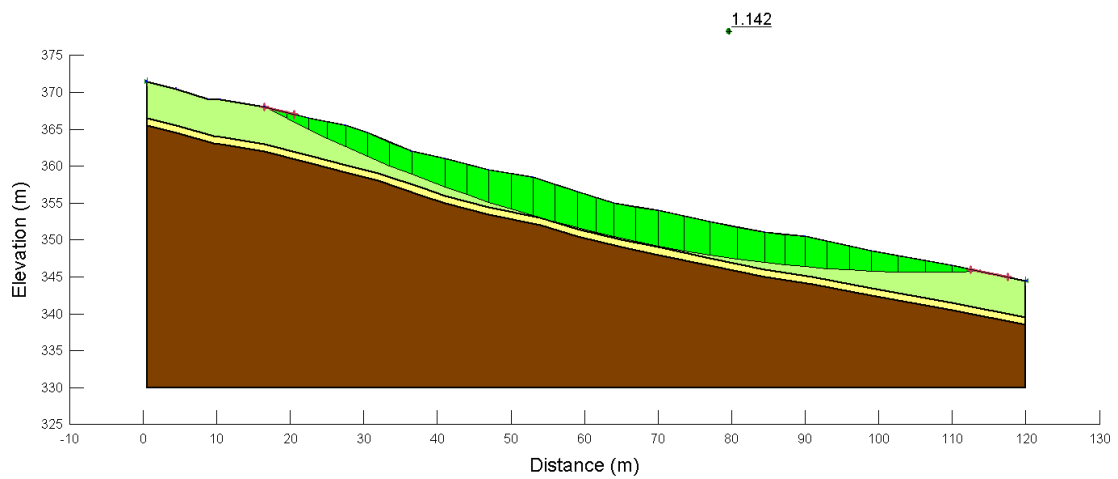


Fig.3.23: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di c abbattuto a 4 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 1.142.

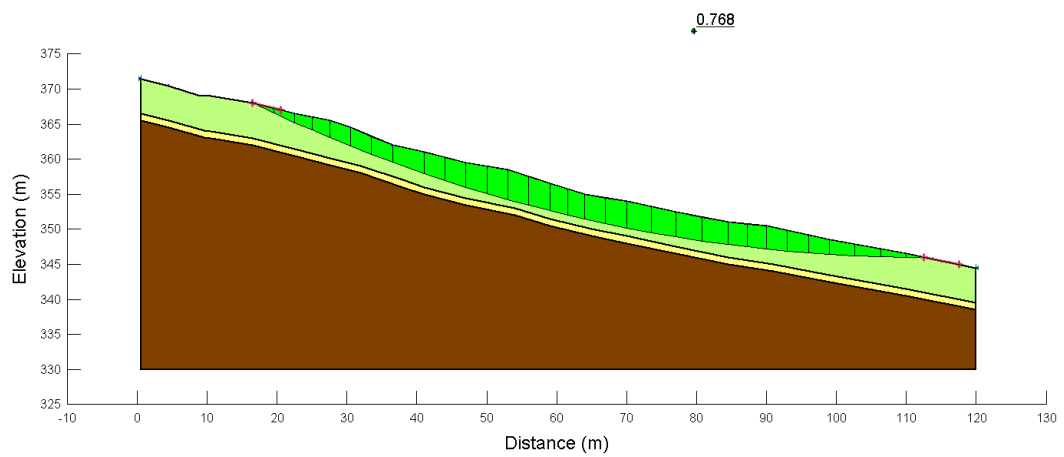


Fig.3.24: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di c abbattuto a 0 kPa e  $\phi$  costante a  $28.5^\circ$ . F.S.= 0.768.

-c costante a 11.8 kPa e abbassamento graduale di  $\phi$  a  $24^\circ$ ,  $20^\circ$ :

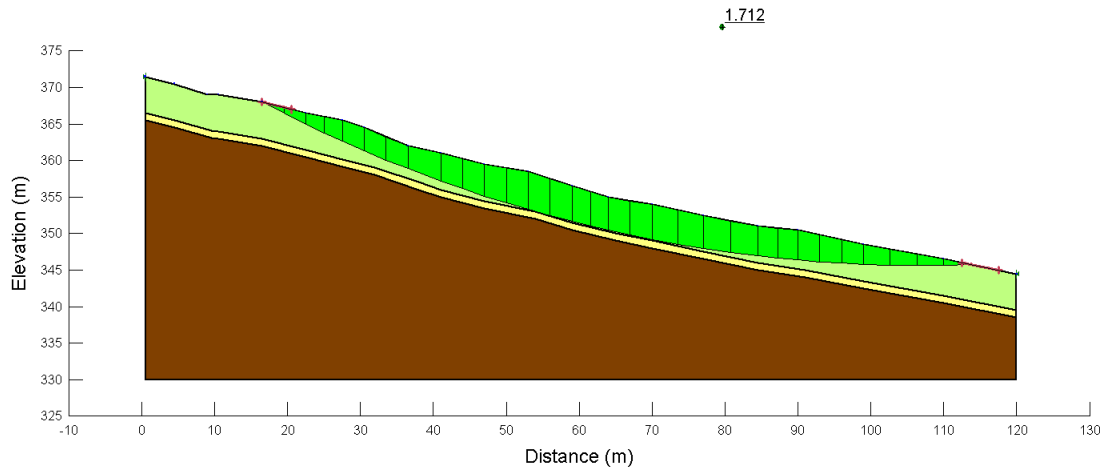


Fig.3.25: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $24^\circ$  e c costante a 11.8 kPa. F.S.= 1.712.

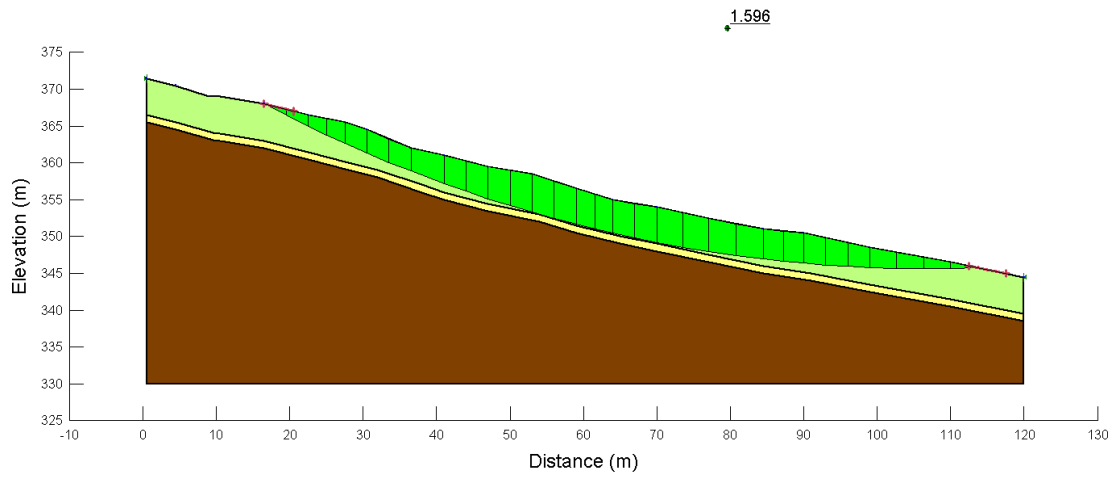


Fig.3.26: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametro di  $\phi$  abbattuto a  $20^\circ$  e c costante a 11.8 kPa. F.S.= 1.596.

$-\phi$  costante a  $24^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 8, 6, 4, 0 kPa:

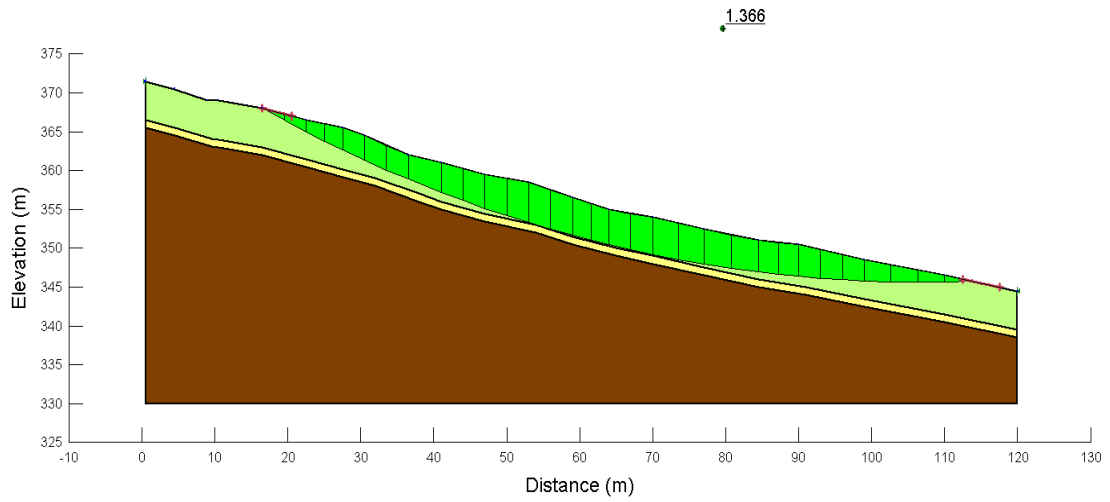


Fig.3.27: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 1.366.

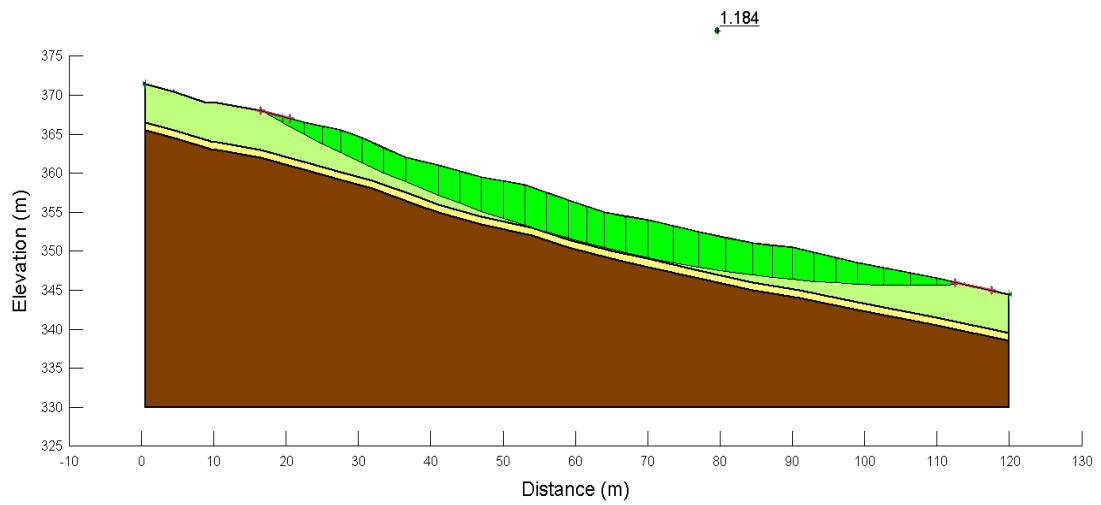


Fig.3.28: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.184.

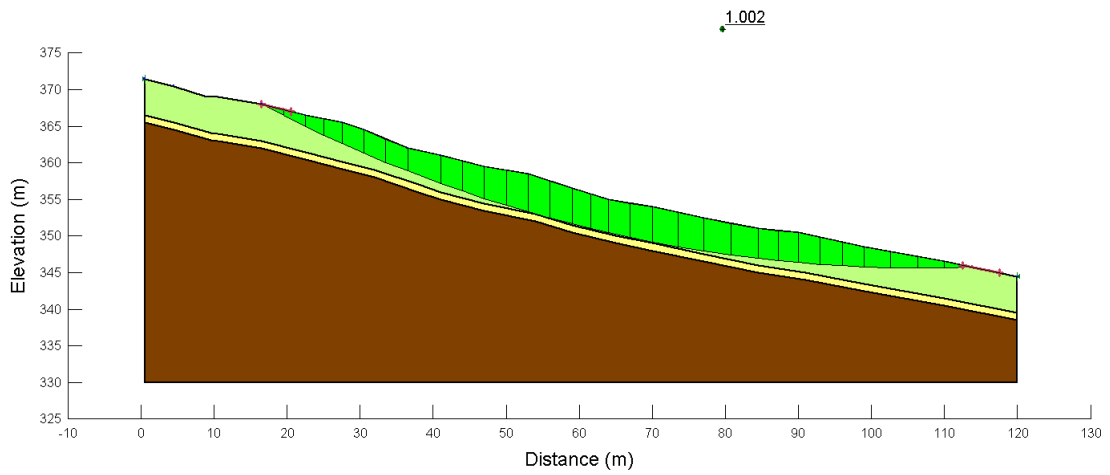


Fig.3.29: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 1.002.

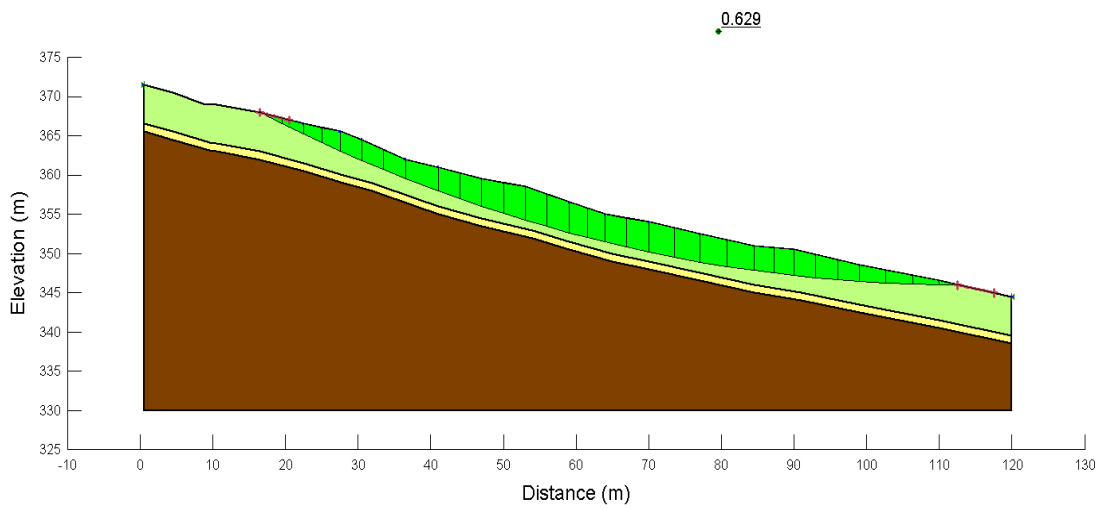


Fig.3.30: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=24^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 0.629.

$-\phi$  costante a  $20^\circ$  e abbassamento graduale di  $c$  a 8, 6, 4, 0 kPa:

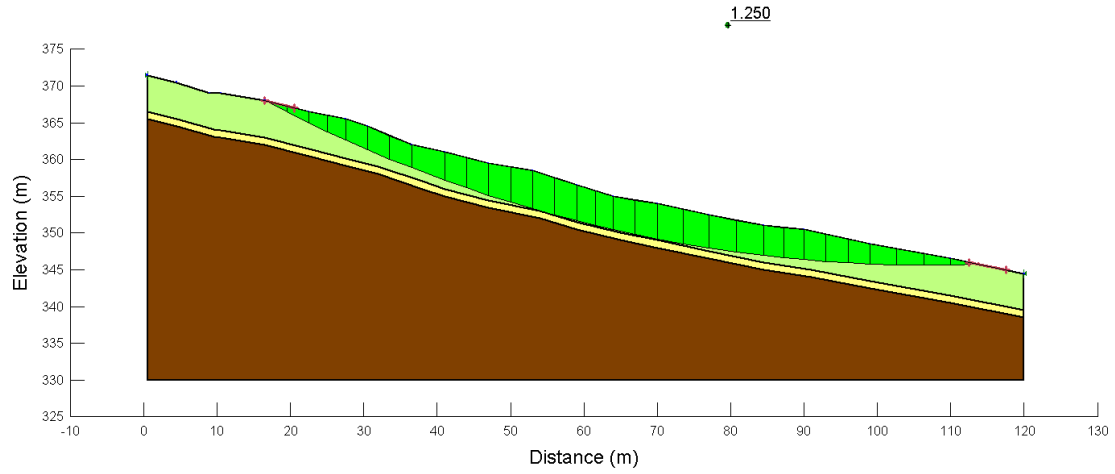


Fig.3.31: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=8$  kPa. F.S.= 1.250.

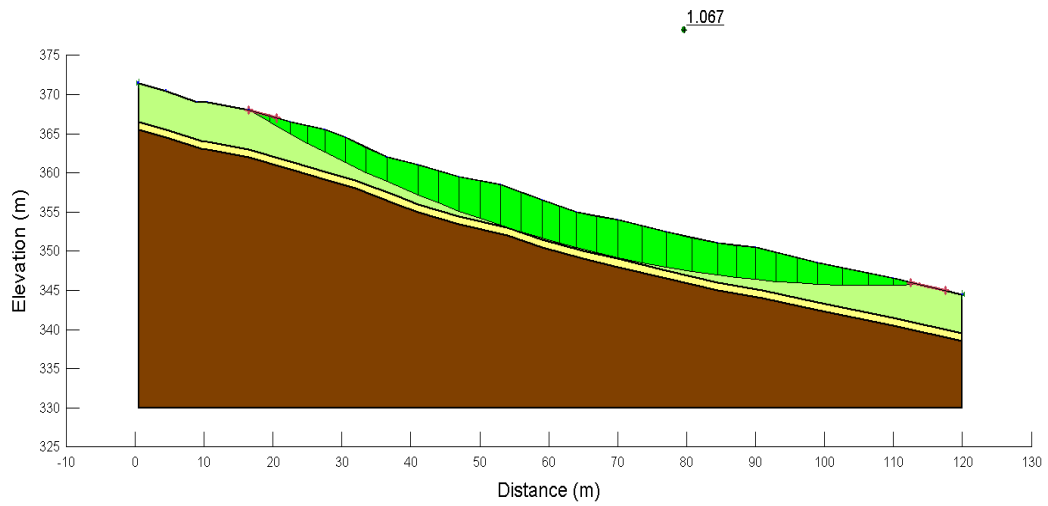


Fig.3.32: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=6$  kPa. F.S.= 1.067.

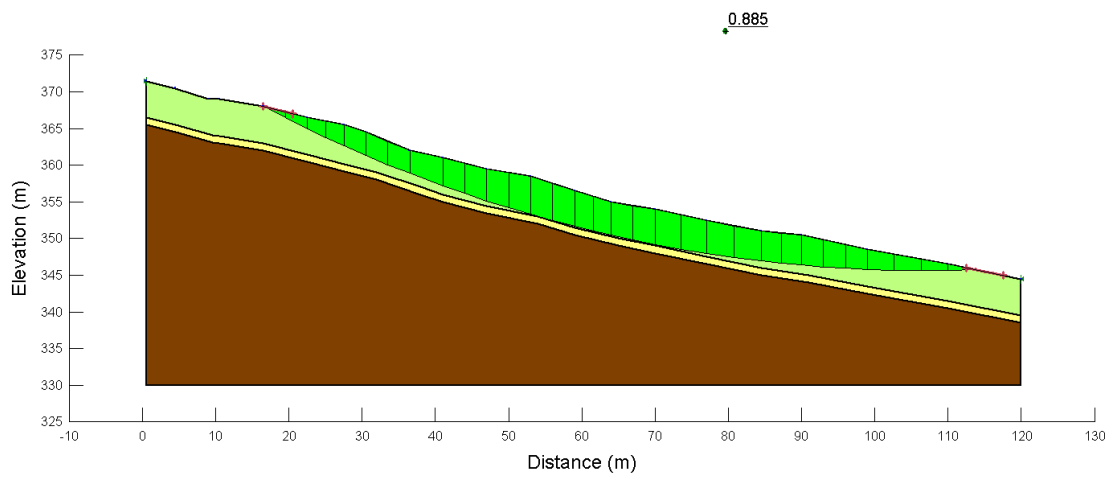


Fig.3.33: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=4$  kPa. F.S.= 0.885.

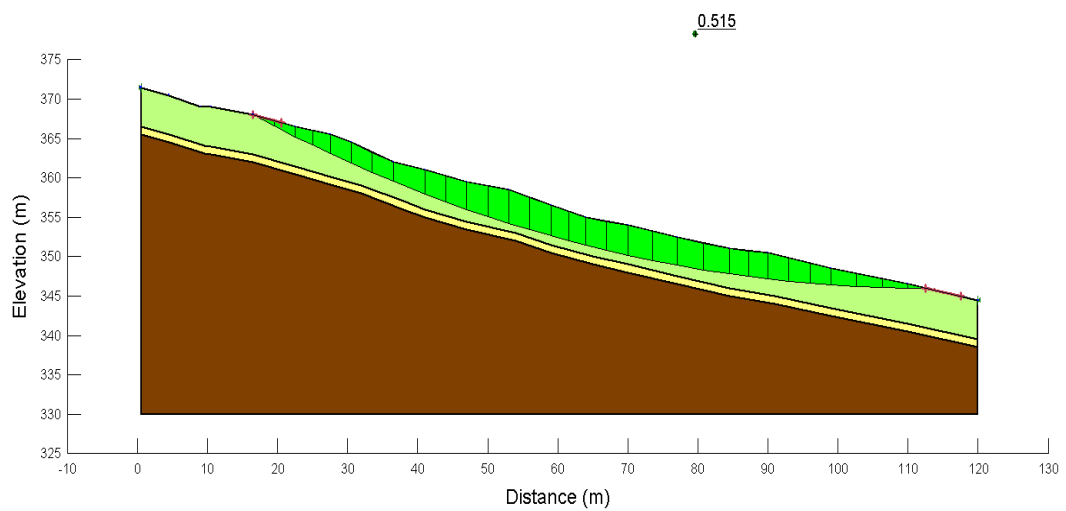


Fig.3.34: Modellazione a tre strati della frana di Carrè con falda al piano campagna e parametri abbattuti a  $\phi=20^\circ$  e  $c=0$  kPa. F.S.= 0.515.

## RINGRAZIAMENTI

*Desidero ringraziare il Prof. 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 tutto il periodo della tesi e per avermi insegnato molto sul lavoro del geologo.*

*Ringrazio Giulia Tessari per le molte delucidazioni riguardo il "mondo" delle modellazioni e per i consigli dati.*

*Ringrazio i miei amici per esserci, nonostante i miei periodi di silenzio totale...so che capite!*

*Ringrazio la mia famiglia, che ha fatto un ultimo immenso sforzo permettendomi di frequentare il corso magistrale. Grazie per la pazienza e per la fiducia.. Vi voglio bene!*

*Un grazie immenso alla mia "persona" Davide che ha sopportato i miei scleri e che mi è sempre vicino.. ce l'abbiamo fatta insieme!*