



## RELAZIONE GEOMECCANICA DI STABILITA'

### **Premessa**

A seguito delle richieste pervenute in data 31/01/2025, a supporto della domanda del piano di coltivazione della cava "Fossaficola A" n° 150 situata nel comprensorio di Campanili nel bacino estrattivo di Colonnata nel Comune di Carrara, si riportano nel seguito le valutazioni riguardanti la stabilità dei due ravaneti redatti nel progetto vigente che risultano ancora in fase di esecuzione.

Il progetto di escavazione infatti risulta essere la logica prosecuzione di quanto sino ad oggi autorizzato e interessa anche la messa in sicurezza delle porzioni superiori dei ravaneti classificati a pericolosità geomorfologica, situati a partire dal cantiere Superiore sino alla zona di ingresso della cava Canalgrande B n°95 (lato Fantiscritti) e le aree a partire dal cantiere Superiore sino al fondo valle lato Colonnata.

### **Analisi di stabilità scarpate su ravaneti a pericolosità geomorfologica**

Come descritto in precedenza e in dettaglio nella relazione tecnica nei Piani Attuativi di Bacino adottati dal Comune di Carrara i ravaneti che caratterizzano le aree a partire dal cantiere Superiore sino alla zona di ingresso della cava Canalgrande B n°95 (lato Fantiscritti) e le aree a partire dal cantiere Superiore sino al fondo valle lato Colonnata risultano essere individuate come aree a pericolosità geologica elevata G.3b e molto elevata G.4.

La prima area è parte integrante di uno storico ravaneto che interessava l'intera area del Fosso di Canalgrande sino alla porzione sovrastante la cava Canalgrande B n°95.

Le operazioni previste nel presente progetto su questo deposito ricalcano quanto già previsto nell'autorizzazione vigente e hanno un duplice scopo: modificare la viabilità esistente attraverso la realizzazione della strada che dal tornante di quota 864 m slm giunge nel cantiere Superiore posto a N del monte Campanile e nel contempo la messa in sicurezza richiesta per la porzione superiore del deposito data la particolare condizione del ravaneto stesso.

La seconda area è parte integrante di uno storico ravaneto che interessava l'intera area del Fosso del Campanile che dal cantiere Superiore si sviluppa sino al fondo valle. Anche in questo caso le operazioni previste nel presente progetto su questo deposito ricalcano circa quanto già

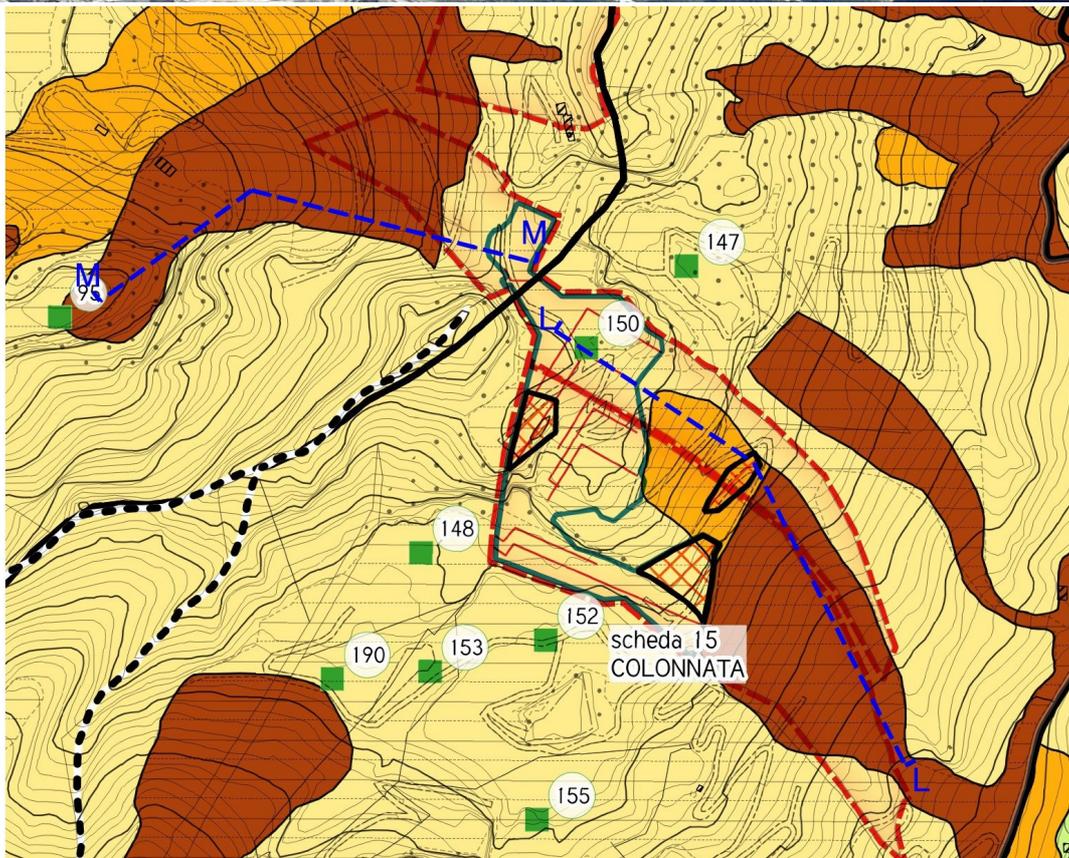


previsto nell'autorizzazione vigente e hanno un duplice scopo: modificare la viabilità esistente diminuendone la pendenza e nel contempo la messa in sicurezza richiesta per la porzione superiore del deposito data la particolare condizione del ravaneto stesso. Le lavorazioni da eseguirsi sul ravaneto riguardano il rimodellamento della scarpata a partire dalla porzione superiore sino alla quota di ca. 800 m. Questo avverrà, come già detto e visibile nelle tavole allegate, attraverso la modifica della strada di arroccamento la cui pendenza verrà ridotta notevolmente a vantaggio della sicurezza dei mezzi in transito. Il rimodellamento avverrà mediante parziale rimozione e parziale riempimento.

Anche la porzione di strada di arroccamento posta a monte dell'area impianti subirà una modifica attraverso l'asportazione di parte del detrito presente e che porterà ad un rimodellamento della scarpata migliorandone stabilità.

In questo paragrafo quindi si intende verificare la stabilità delle scarpate così come modificata nel progetto.

Come detto l'analisi è stata condotta lungo le sezioni più significative (vedasi estratto successivo). Nell'allegato I della presente relazione si riporta un estratto della normativa vigente e il calcolo dei coefficienti sismici da considerare nelle successive analisi.



Individuazione delle aree a pericolosità geomorfologica con indicate le sezioni di analisi.

#### Caratterizzazione dei parametri geotecnici del deposito.

Al fine di compiere l'analisi di stabilità è essenziale determinare un valore dell'angolo di attrito interno da avere come riferimento nelle scelte progettuali.

Sulla base della nomenclatura proposta da Baroni *et al.* gli elementi granulometrici sono i seguenti:

- *informi*: blocchi con dimensioni minime superiori ai 50 cm, non utilizzabili a scopi commerciali per la forma irregolare;
- *pezzame*: clasti con dimensioni variabili dai 30 ai 50cm;
- *sassi*: clasti di dimensione variabile tra i 10 e 30cm;
- *fine*: clasti di dimensione inferiori ai 10 cm;
- *terre*: elementi con dimensioni dalle argille alle ghiaie.

Si riconosce comunque che il deposito è un assemblaggio di particelle e clasti di varia pezzatura fino ai blocchi metrici che manifesta un comportamento variabile riconducibile tuttavia a quello di un *rockfill*, cioè di un ammasso di materiale incoerente di granulometria controllata, utilizzato per la costruzione dei paramenti delle dighe in terra, tranne



evidentemente nelle zone dove le terre (vale a dire il materiale francamente granulare) prevalgono costituendo stratificazione d'importante spessore. Queste particolari situazioni locali sono escluse dall'analisi di questo rapporto.

Come riportato ampiamente nella letteratura scientifica i *rockfill* hanno risposta meccanica paragonabile a quella di un giunto in roccia.

Barton introdusse la seguente relazione empirica per la resistenza a taglio di giunti di roccia:

$$\tau_{n,f} = \sigma_{n,f} \tan \left[ JRC \log \left( \frac{JCS}{\sigma_{n,f}} \right) + \varphi_b \right]$$

dove  $\tau_{n,f}$  è la resistenza d'attrito di picco,  $\sigma_{n,f}$  la tensione normale agente sul piano di rottura efficace, *JRC* il *Joint Roughness Coefficient*, *JCS* il *Joint wall Compressive Strength*,  $\varphi_b$  angolo d'attrito di base o residuo.

Il modello per la stima della resistenza al taglio proposto per un *rockfill* è concettualmente identico al modello applicato ai giunti di roccia (modello di Barton e Kjaensrli, BK). I parametri che specializzano il *rockfill* nel modello sono la rugosità equivalente *R* (*effective roughness*), che sostituisce *JRC*, e la resistenza alla frantumazione dei clasti *S*, che sostituisce *JCS*. Questi sono funzione della porosità dell'accumulo e del grado di compattazione, della dimensione dei clasti, nonché della tipologia di prova (taglio piano, triassiale). In formula:

$$\tau_{n,f} = \sigma_{n,f} \tan \left[ R \log \left( \frac{S}{\sigma_{n,f}} \right) + \varphi_b \right]$$

Il modello BK ha il pregio di considerare la dilatanza che un sistema compatto di blocchi sufficientemente incastrati manifesta sotto sforzo di taglio in assenza di vincoli alla variazione volumetrica in condizioni drenate. La dilatanza si traduce in un angolo d'attrito apparente più pronunciato ai livelli tensionali bassi, corrispondenti agli strati più superficiali degli accumuli. All'aumento dello stato tensionale la graduale soppressione a seguito di disgregazione degli spigoli dei clasti e delle asperità (come nei giunti) porta ad una riduzione dell'angolo d'attrito fino al valore tendenziale corrispondente a quello della polvere di marmo o a quello che si manifesta tra superfici lisce di blocchi dello stesso materiale.

Al fine di definire i parametri del criterio di rottura nel 2013 è stato realizzato uno studio su uno dei ravaneti in indagine in cui sono state eseguite una serie di prove di *tilting* e di taglio



con carico variabile in sito utilizzando cassoni in lamiera di ferro di 1.5 x 3.0 x 0.5 m<sup>3</sup> sovrapposti e riempiti con materiale riveniente dai ravaneti di vari mucchi differenti prelevati sia nella cava in oggetto che in quelle limitrofe sulla scorta dello studio originale di Barton.



Apparecchiatura utilizzata per le prove di taglio e di tilt test.

Le prove effettuate riferiscono a livelli tensionali bassi e per un materiale non addensato, in accordo alla mancanza di costipamento dei clasti nello strato superficiale dei ravaneti ed alla potenzialità dei macchinari di movimentazione carico resi disponibili nei siti di cava.

La rispondenza del campione, in considerazione della sua dimensione, al comportamento del materiale negli strati superficiali del ravaneto può tuttavia considerarsi piena. Poiché i valori della tensione normale operante sul piano di rottura (sia nei tilt test che nelle prove di taglio diretto) sono modesti, i risultati si collocano (come descritto in seguito) nella parte iniziale del criterio di rottura, con tendenza sensibilmente lineare. Di conseguenza per l'interpolazione dei dati si è utilizzata una relazione di regressione lineare. Ne consegue che per tutti i mucchi per lo stato tensionale saggiato, corrispondente grossomodo a meno di 5 metri di copertura, si è introdotto in definitiva un criterio di resistenza a taglio alla Mohr-Coulomb (MC):

$$\tau_{n,f} = \sigma_{n,f} \tan \varphi + c$$

caratterizzato dai due parametri  $\varphi$  angolo d'attrito e  $c$  coesione. Si rimarca che i valori di coesione sono pressoché trascurabili, in accordo alla natura tipicamente incoerente dei materiali di ravaneto costituenti i mucchi saggiati.



Alla luce dei risultati conseguiti con suddette prove si può affermare che i mucchi esibiscono resistenza variabile con la profondità, riconoscendosi per la parte più superficiale un angolo d'attrito sui 50° dovuto all'effetto di interlocking con dilatanza non confinata, mentre per gli strati inferiori ai fini dell'effettuazione di analisi di stabilità si può attribuire al materiale una resistenza di 45° di angolo d'attrito  $\varphi$  ed una debole coesione  $c$  di 0.3t/mq se si opera considerando la resistenza di picco  $\varphi = \varphi_p$ .

Ovviamente nell'analisi svolta di seguito viene completamente trascurata la coesione e verrà utilizzato come valore di angolo di attrito caratteristico  $\varphi = 45^\circ$ .

### Verifica pendio

Il metodo di calcolo adoperato nella valutazione della stabilità è il metodo di Bishop, basato sul concetto dell'equilibrio limite globale, con superficie di scivolamento assimilabile ad un arco di circonferenza dove il livello di sicurezza può essere espresso in termini di momenti rispetto al centro della circonferenza stessa:

$$\frac{\frac{1}{\gamma_R} * M_S}{\gamma_{G1} * M_R}$$

in cui  $M_R$  è il momento delle forze ribaltanti,  $M_S$  il momento stabilizzante calcolato utilizzando i valori caratteristici dei parametri geotecnici del terreno divisi i loro coefficienti parziali  $\gamma_M$ , mentre  $\gamma_R$  e  $\gamma_{G1}$  i rispettivi coefficienti parziali per le azioni e per le resistenze sopra accennati.

Tale metodo ha il vantaggio della semplicità in quanto, rispetto a metodi più complessi e completi quali quello di Morgenstern-Price, differisce nei risultati di poche unità percentuali.

Per la ricerca della superficie occorre, prima di tutto, considerare una serie di cerchi di scorrimento aventi il medesimo centro di rotazione, ma di raggio diverso. Se si trova il fattore di sicurezza di ciascuno di questi cerchi, uno dopo l'altro, e si traccia un grafico rispetto al raggio, è probabile che a un certo punto si trovi un "fattore di sicurezza minimo".

Ciò si può ottenere semplicemente dalla forma del pendio oppure perché quel particolare cerchio di scorrimento ha intercettato un terreno debole. Se un insieme analogo di cerchi di scorrimento viene esaminato da ciascuno di una intera serie di cerchi (una griglia rettangolare è molto adatta) si può, allora, ottenere un fattore di sicurezza minimo per ogni punto: quello col fattore più basso darà il fattore di sicurezza per l'intero pendio. Il contributo dovuto alla



presenza di un battente idraulico è a parere dello scrivente di minima entità. Questa affermazione si basa su vari aspetti legati sia al tipo di materiale di cui è costituito il deposito, sia dal fatto che le opere di regimazione poste al di sopra di esso, tendono ad allontanare le acque piovane che gravano in questa zona non permettendo un notevole accumulo di acqua all'interno del deposito stesso, inoltre la pendenza del substrato roccioso impedisce qualunque ristagno o formazione di battenti (direzione fosso ca. ortogonale alla sezione di analisi).

Infatti come già detto in precedenza, la granulometria del deposito è molto variabile il che porta a considerare questo materiale nella sua quasi totalità, ma soprattutto alle profondità dove ipoteticamente si realizza la superficie di rottura, come discretamente permeabile.

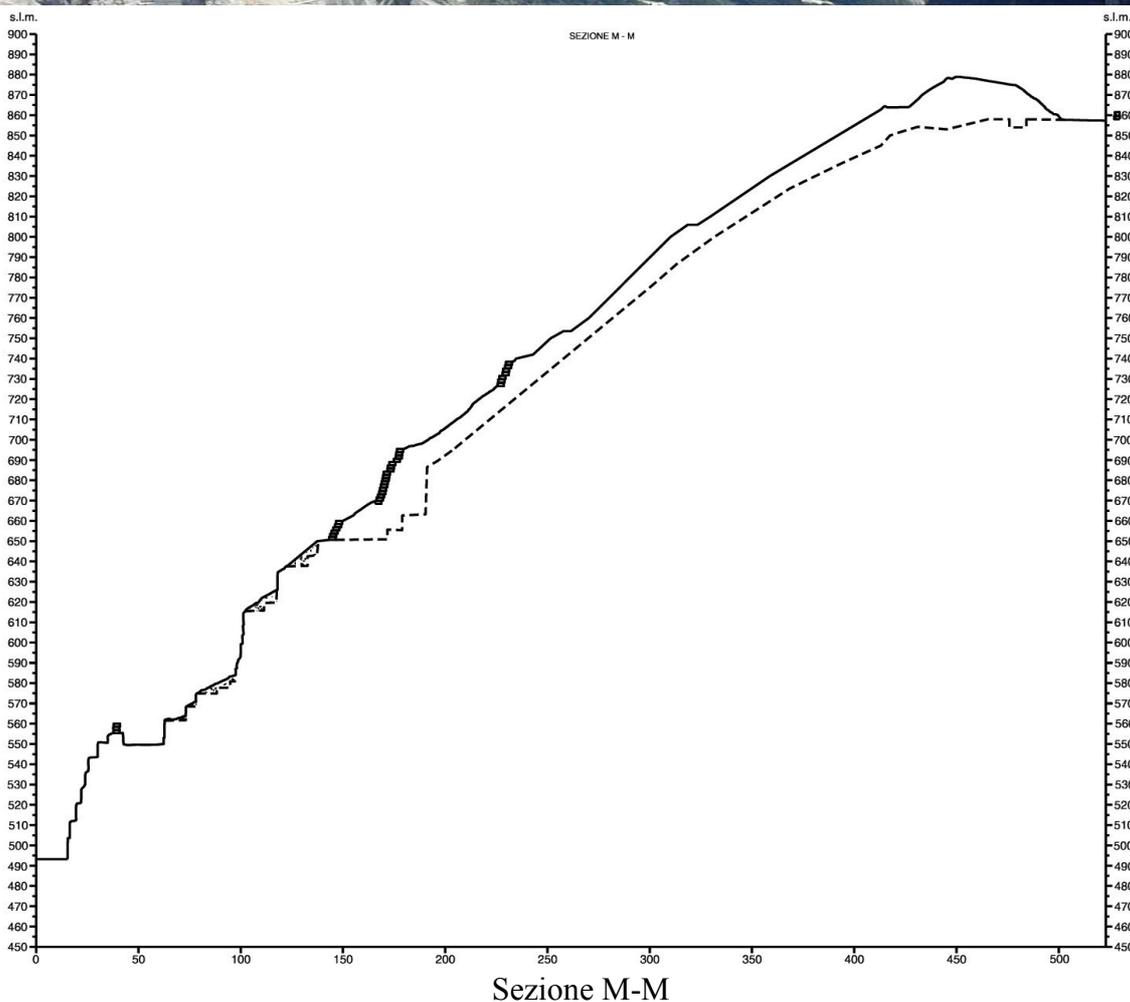
Comunque per porsi in ogni caso nella condizione peggiore, come d'altronde suggerisce il D.M. LL.PP. del 14/01/2008, si è deciso in ogni modo di considerare il contributo legato alla presenza di acqua andando a valutare la stabilità del versante impostando il materiale saturo con peso specifico ( $\gamma_s=2.2t/m^3$ ).

Al valore del Livello di Sicurezza riportato nelle immagini successive, per entrambi i ravaneti, bisogna applicare il coefficiente parziale  $\gamma_R$  per cui l'effettivo livello di sicurezza valutato secondo il D.M. 14/01/2008. Nel caso statico il suddetto valore deve essere diviso per 1.1 mentre nel caso dinamico per 1.2.

### Ravaneto lato Fantiscritti

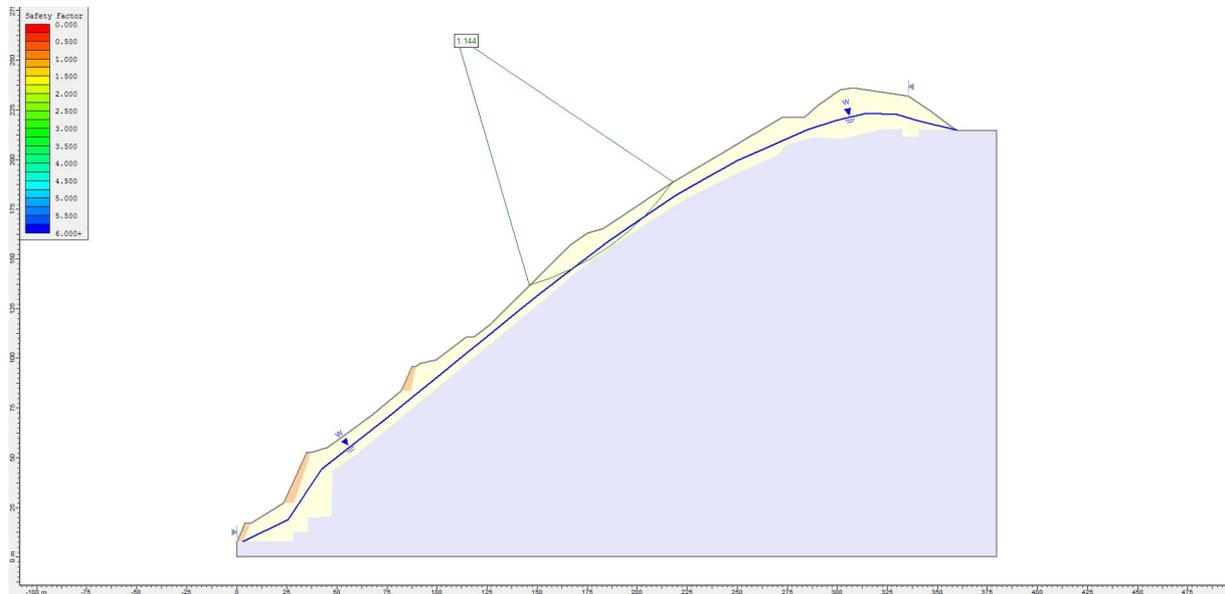
Nel seguito si riportano le immagini delle analisi eseguite per la sezione rappresentativa andando a considerare la presenza sia del sisma e dell'acqua, introducendo i parametri di resistenza del materiale detritico descritti nel paragrafo dedicato.

Nell'immagine successiva si riporta la sezione di analisi dove il substrato roccioso è stato ipotizzato approssimando attraverso le pendenze dei due versanti rocciosi che caratterizzano la porzione sx e dx della sezione stessa. Al di sotto del bastione intermedio il profilo delle lavorazioni passate è stato approssimato secondo il CTR del 1975, carta più recente in cui era ancora visibile la cava situata in questa zona.

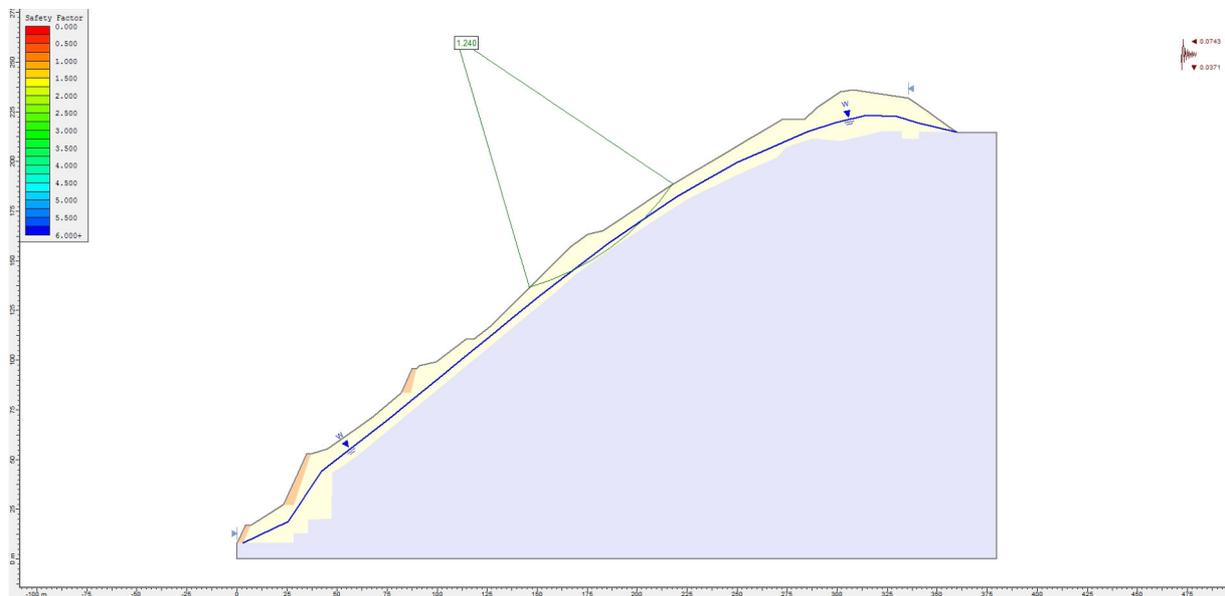


Per la verifica è stato utilizzato il programma Slide in cui è stato inserito un profilo del pendio approssimato. Come visibile lungo questa sezione sono presenti una serie di bastionature, la cui stabilità è stata analizzata e verificata nel piano di coltivazione recentemente autorizzato della cava Canalgrande B n°95.

Come si può notare dalle immagini successive il valore del livello di sicurezza allo stato attuale supera il valore minimo richiesto dalla normativa, e successivamente si mostra come le lavorazioni previste nel presente progetto apportino un miglioramento alle condizioni del deposito, per cui è garantita la stabilità del deposito sia attualmente che a lungo termine.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione attuale in condizioni statiche.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione attuale in condizioni pseudostatiche.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione progettuale in condizioni statiche.



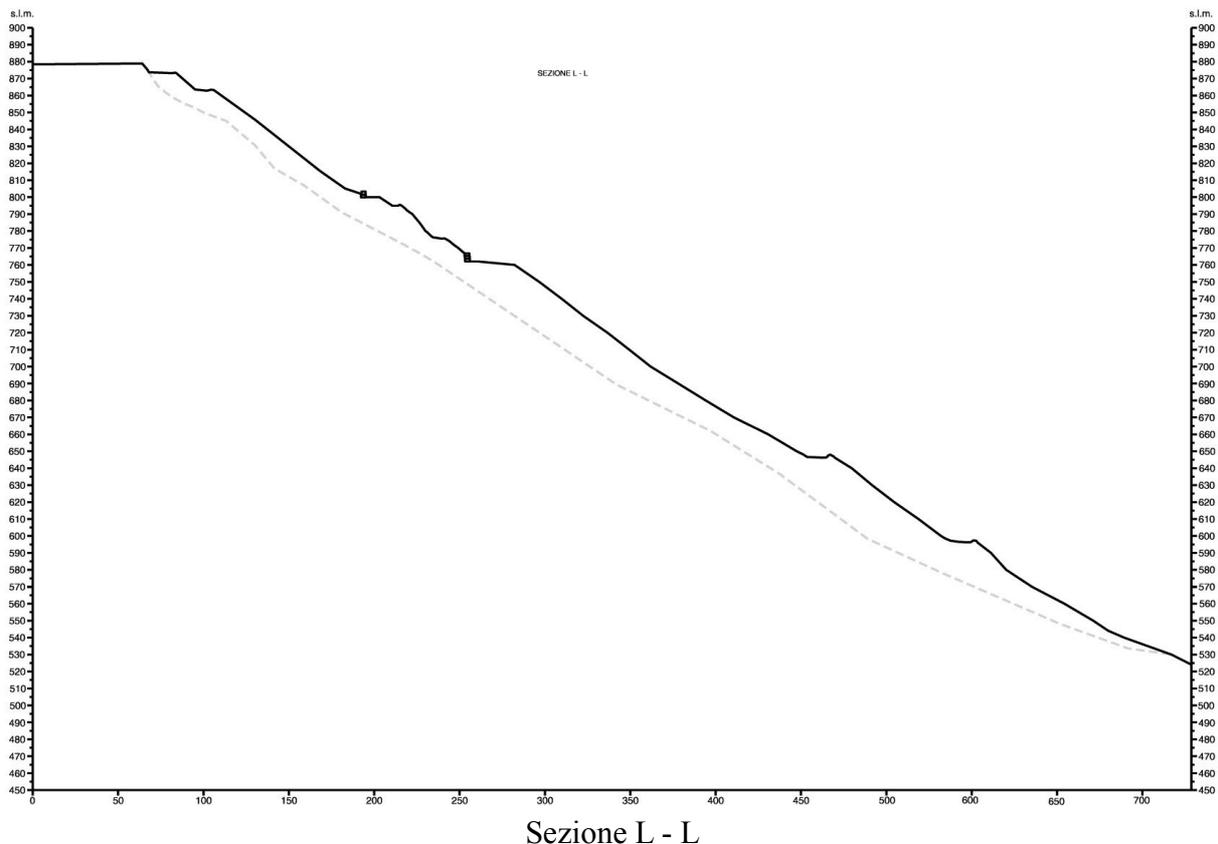
Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione progettuale in condizioni pseudostatiche.



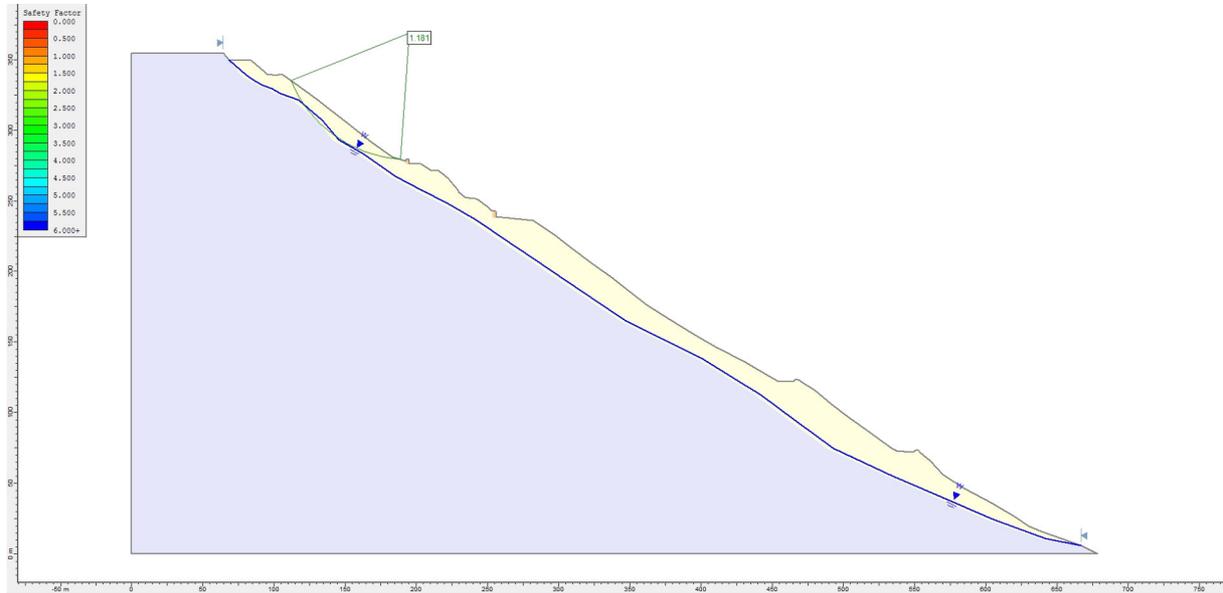
### Ravaneto lato Colonnata

Nel seguito si riportano le immagini delle analisi eseguite per la sezione rappresentativa andando anche in questo caso a considerare la presenza sia del sisma e dell'acqua, introducendo i parametri di resistenza del materiale detritico descritti nel paragrafo dedicato.

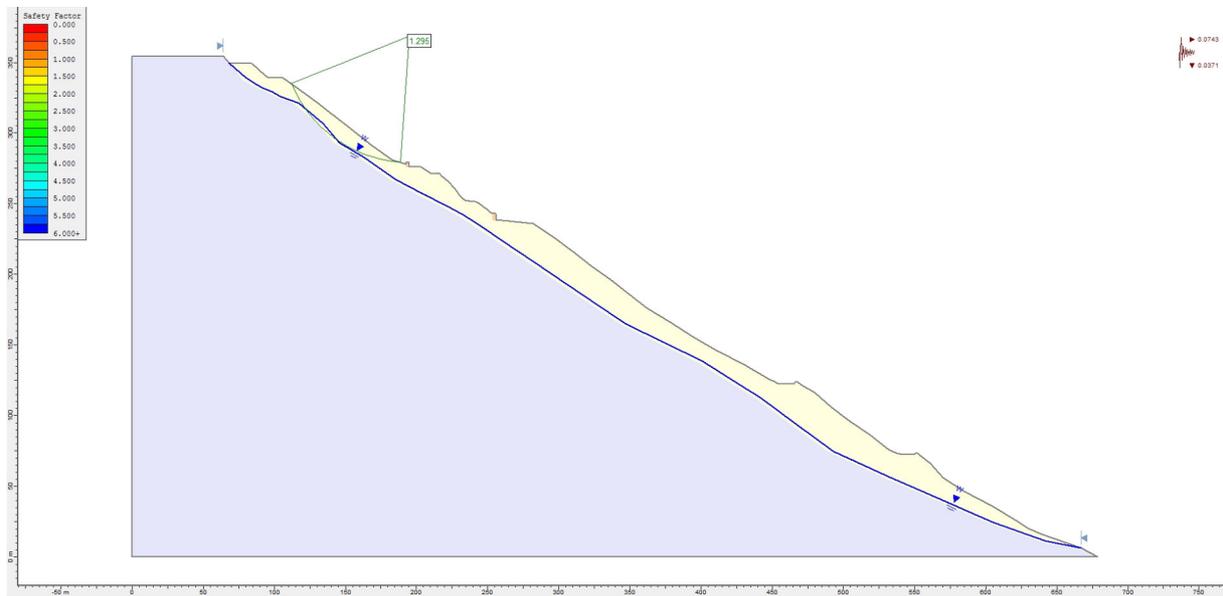
Nell'immagine successiva si riporta la sezione di analisi dove il substrato roccioso è stato ipotizzato approssimando secondo le carte storiche in cui era ancora visibile il versante.



Anche per l'occasione per la verifica è stato utilizzato il programma Slide in cui è stato inserito un profilo del pendio approssimato. Come si può notare dalle immagini successive il valore del livello di sicurezza allo stato attuale supera il valore minimo richiesto dalla normativa, e successivamente si mostra come le lavorazioni previste nel presente progetto apportino un miglioramento alle condizioni del deposito, per cui è garantita la stabilità del deposito sia attualmente che a lungo termine.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione attuale in condizioni statiche.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione attuale in condizioni pseudostatiche.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione progettuale in condizioni statiche.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione progettuale in condizioni pseudostatiche.

Carrara, Gennaio 2025

Il Tecnico  
Dott. Ing. Massimo Gardenato

**COMMITTENTE:** Cooperativa Cavatori Canalgrande Soc.Coop.

**OGGETTO:** Relazione di stabilità Ravaneti - Piano di coltivazione della cava Fossaficola A n°150

**DATA:** Gennaio 2025