Comune di GENOVA
Sestri Ponente

UNICALCE S.p.A.

CAVA GIUNCHETTO

Progetto di coltivazione e recupero ambientale

VARIANTE AL PROGETTO

(ai sensi comma 1 art. 12 L.R. 12/2012)

VERIFICHE DI STABILITA'

a cura di: *Carlo AMBROGIO geologo*
Piercarlo GABRIELE geologo

ORDINE GEOLOGI REGIONE PIEMONTE
CARLO AMBROGIO GEOLOGO A.P. SEZ. A N. 98
ALBO PROFESSIONALE

ORDINE DEI GEOLOGI
Regione Autonoma Valle d'Aosta
ORDRE DES GEOLOGUES
Région Autonome Vallée d'Aoste
Dr. GABRIELE PIERCARLO
Iscr. Albo n. 32

Relazione C3668-S02

Cuneo, settembre 2017

GEOMIN srl

INDICE DEL TESTO

0. PREMESSA 1
1. VERIFICHE DI STABILITA' DEI FRONTI IN ROCCIA 2
1.1 Introduzione 2
1.2 Caratterizzazione geomeccanica 2
1.2.1 Caratteristiche delle discontinuità 3
1.2.2 Classificazione RMR dell'ammasso roccioso 5
1.3 Parametri geomeccanici 6
1.3.1 Gradoni 6
1.3.2 Superfici d'inviluppo dei fronti 7
1.4 Caratterizzazione sismica del sito 8
1.4.1 Classificazione 8
1.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche 10
1.4.3 Azione sismica 10
1.5 Test di Markland 11
1.5.1 Geometria dei fronti e dei gradoni 11
1.5.2 Fronte 35° 12
1.5.3 Fronte 70° 12
1.5.4 Fronte 150° 12
1.6 Calcoli di stabilità dei cinematismi potenziali 19
1.6.1 Introduzione 19
1.6.2 Parametri geomeccanici di progetto 19
1.6.3 Scivolamento planare e di cunei 20
1.6.4 Ribaltamento 20
1.6.5 Considerazioni conclusive 20
2. VERIFICHE DI STABILITA' DEi RILEVATI DI INERTI 23
2.1 Introduzione 23
2.2 Caratteristiche dei rilevati 23
2.3 Proprietà fisico-meccaniche dei materiali 23
2.4 Caratterizzazione sismica 24
2.4.1 Classificazione 25
2.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche 25
2.4.3 Azione sismica 25
2.5 Parametri geotecnici di progetto 26
2.6 Verifica di stabilità 26
2.7 Verifiche alla liquefazione 27

ALLEGATI

Tabulati di calcolo

INDICE DELLE TAVOLE E FIGURE NEL TESTO

Tav. 1 Schematizzazione dei fronti di cava scala 1 : 4.000
Fig. 1÷20 Verifiche di stabilità

0. PREMESSA

La relazione esposta di seguito concerne le verifiche di stabilità relative alla Variante del progetto di coltivazione e recupero ambientale della Cava Giunchetto.

In particolare ai fini della stabilità è necessaria un'integrazione rispetto al progetto originario, in quanto la Variante prevede una modifica alla configurazione del fronte di scavo finale e prevede inoltre la formazione di un nuovo grande rilevato di materiali sciolti al piede del fronte esaurito.

1. VERIFICHE DI STABILITA' DEI FRONTI IN ROCCIA

1.1 Introduzione

La caratterizzazione geomeccanica del giacimento, eseguita da Geomin nel 2004 e nel 2011 in occasione dei precedenti progetti di coltivazione, è stata aggiornata nel novembre 2016 per controllarne l'adeguatezza nelle nuove condizioni dei fronti.
Con i rilevamenti di terreno degli ammassi rocciosi sono state misurate in totale oltre 350 misure di discontinuità. L'ubicazione degli stendimenti e delle stazioni, rappresentata in fig. 1, è stata scelta, compatibilmente con le condizioni di accesso e di affioramento, allo scopo di studiare fronti ad orientazione spaziale differente e di coprire in modo il più possibile omogeneo l'area di coltivazione.

Per ogni discontinuità rilevata sono stati descritti i parametri geometrici e fisico-meccanici principali (giacitura, persistenza, spaziatura, scabrezza, apertura, condizioni d'alterazione, presenza d'acqua, riempimento). Le classi in cui sono stati suddivisi i valori misurati per i differenti parametri sono quelle suggerite da ISRM (1981).
Sono state eseguite misure della rugosità di alcune famiglie di discontinuità per mezzo di uno *Shape Tracer* (con passo di lettura uguale a 1 mm).
Misure della resistenza meccanica delle pareti dei giunti delle famiglie principali sono state effettuate con uno sclerometro di tipo L.
L'orientazione spaziale delle superfici di discontinuità è stata rappresentata mediante proiezioni stereografiche equiareali su reticolo di Schmidt (semisfera inferiore).

1.2 Caratterizzazione geomeccanica

Le rocce oggetto della coltivazione appartengono alla formazione delle Dolomie di M. Gazzo. Si tratta di dolomie a stratificazione decimetrico - metrica, di colore da grigio chiaro a nerastro, con rare intercalazioni di sottili livelli marnosi giallastri.

Il comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso delle dolomie è riferibile al modello di un mezzo discontinuo, in cui la resistenza complessiva dell'ammasso è determinata principalmente dalle caratteristiche meccaniche delle discontinuità.
I dati di orientazione spaziale delle discontinuità, ricavati dal rilevamento strutturale dei fronti di cava, sono stati sottoposti ad un'elaborazione statistica di *cluster analysis*, eseguita con il programma DIPS della *Rocscience* di Toronto.

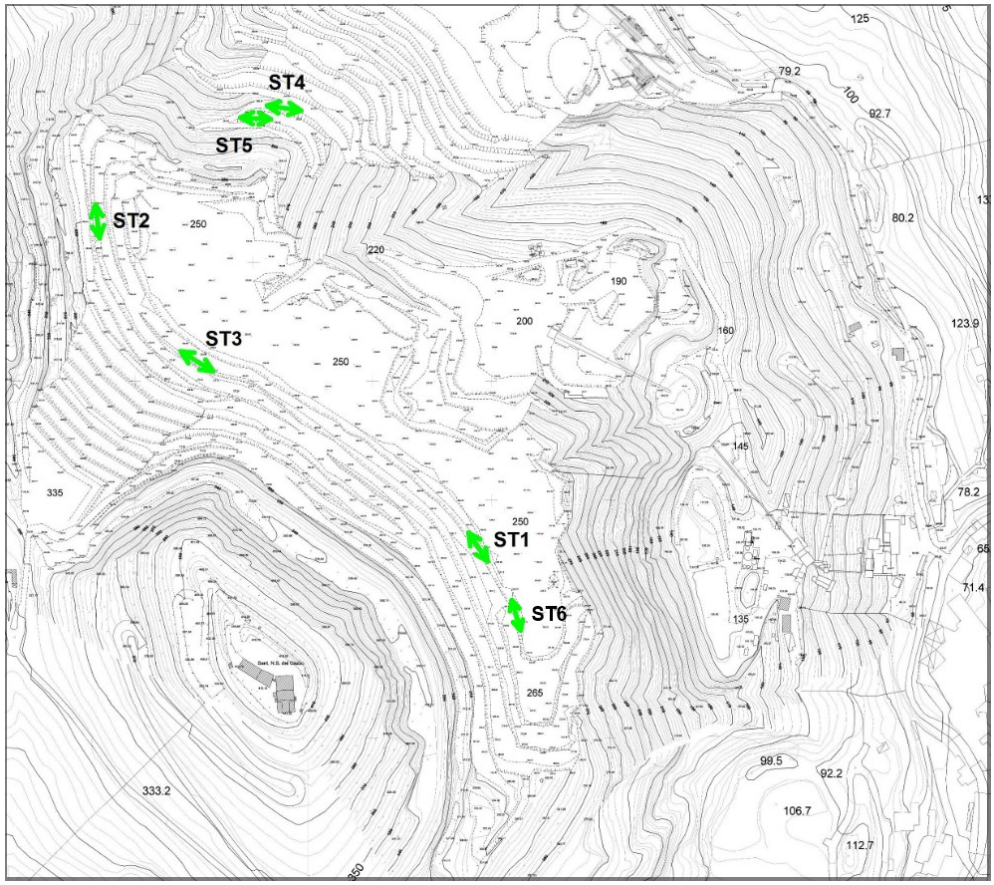


Fig. 1 - Ubicazione degli stendimenti del rilievo geomeccanico

1.2.1 Caratteristiche delle discontinuità

Nelle dolomie sono stati riconosciuti 5 sistemi di discontinuità significativi (vedi tabella 1), denominati S, K1, K2, K3, K4.
Per quanto riguarda l'orientazione media dei sistemi di discontinuità rispetto ai rilievi eseguiti in passato, le variazioni sono complessivamente modeste, di pochi gradi sia per la direzione di immersione che per l'inclinazione. K4 è un sistema non identificato nei rilievi degli anni precedenti.
A ciascun sistema è stato attribuito, come rappresentativo della giacitura media (fig. 1), il valore centrale della distribuzione delle misure, che è stato calcolato con un algoritmo di tipo *fuzzy cluster*.

S (106°/89°) rappresenta la stratificazione delle dolomie, superficie ubiquitaria e di notevole persistenza, cui sono associate raramente faglie di analoga orientazione. Lungo la stratificazione si osservano localmente fenomeni di dissoluzione, con formazione di cavità sub-verticali di apertura decimetrica talora con concrezioni calcaree.

K1 (195°/55°) ha una frequenza di circa l'8% del totale delle misure di discontinuità di frattura, ed è caratterizzato da persistenza prevalentemente metrica. La distribuzione delle misure di K1 mostra una buona costanza della direzione, con dispersione più accentuata dell'inclinazione.

K2 (026°/75°, frequenza di circa il 15%), K3 (359°/81°, frequenza intorno all'11%) e K4 (056°/80°, con frequenza intorno al 9%), sono tutti sistemi caratterizzati da immersione compresa tra N e NE, con inclinazione mediamente elevata. Il sistema K4, caratterizzato da presenza sporadica nei rilievi precedenti, ha assunto maggiore frequenza nei fronti attuali, ed è stato quindi introdotto nelle verifiche di stabilità.

Il sistema di faglie più importante in cava (F1 in fig. 2) con direzione NO – SE ed immersione verso NE, affiora più frequentemente nei fronti attuali rispetto al passato, in cui era confinato principalmente in cava Gneo. Ne è stata valutata l'influenza sulle condizioni di stabilità per il fronte 70°.

Sistema	**S**	**K1**	**K2**	**K3**	**K4**
Orientazione	106°/89°	195°/55°	26°/75°	359°/81	56°/80°
Lunghezza	10 m – 20 m	< 1m, 1-3 m rara	< 1m e 1-3 m, 3-10 m (rara)	< 1m (prevalente) 1-3 m	< 1m (prevalente) 3-10 m
Spaziatura	20-60 cm (prevalente) 6-20 cm 60-200 cm	6-20 cm (prevalente) 2-6 cm	6-20 cm (prevalente) 2-6 cm	6-20 cm e 2-6 cm	6-20 cm e 2-6 cm
Scabrezza	planare/ ondulata, rugosa	Planare, talora ondulata, liscia	planare, ondulata, liscia, talora rugosa	Ondulata (preval.), planare, rugosa	Planare, Ondulata, liscia
JRC	12 – 14 prevalente	2 - 4	14 - 16 prevalente	-	-
Apertura	chiusa, talora aperta (dissoluzione)	chiusa, raramente aperta	chiusa	Chiusa, talora aperta	chiusa
Condizioni d'alterazione	da debolmente a moderatamente alterata	da non alterata a debolmente alterata	da non alterata a moderatamente alterata	da debolmente alterata a non alterata	da debolmente alterata a non alterata
Riempimento	argilla, marna	calcite rara	calcite, breccia	calcite, breccia	-
Presenza d'acqua	assente	assente	assente	assente	assente
JCS	100±20 Mpa	-	80±15 MPa	-	

Tabella 1 Caratterizzazione delle famiglie di discontinuità dell'ammasso roccioso in dolomie

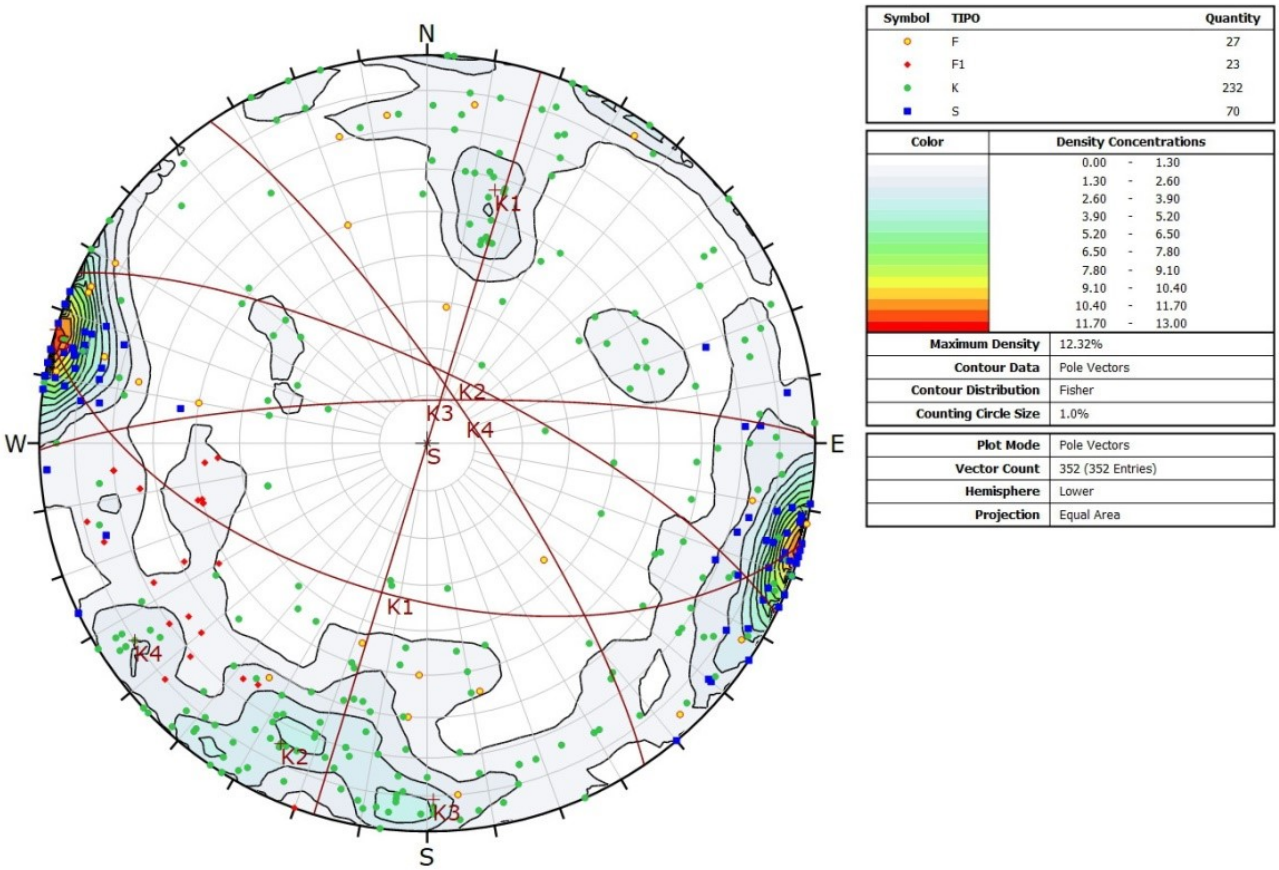


Fig. 2 – Proiezione equiareale sulla semisfera inferiore delle discontinuità rilevate nelle dolomie (per la simbologia vedi riquadro in alto).

1.2.2 Classificazione RMR dell'ammasso roccioso

La valutazione delle caratteristiche di resistenza degli ammassi rocciosi del giacimento è stata eseguita utilizzando la classificazione RMR di Bieniawski. La resistenza alla compressione monoassiale è stata stimata sulla base dei dati ricavati dalle misure sclerometriche.
Il valore di RQD è stato calcolato mediante la relazione empirica proposta da ISRM (1978):

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

con J_v = somma del numero di discontinuità per metro per ciascun sistema di discontinuità, risultando uguale a circa il 40%.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori base della classificazione, gli indici BMRM e i parametri di resistenza degli ammassi rocciosi, ottenuti impiegando le espressioni:

$$c\ (kPa) = 5\ BMRM$$

$$f\,(°) = 5 + (0.5\ BMRM)$$

Parametri	Valore	*Rating*
Resistenza alla compressione monoassiale	*50-100 Mpa*	***7***
RQD	*25% - 50%*	***8***
Spaziatura delle discontinuità	*6 – 20 cm*	***8***
Condizioni delle discontinuità	*-*	***19***
Condizioni idrauliche	*Drenate*	***15***
INDICE BRMR		***57***
Coesione (kPa)		***285***
Angolo d'attrito (°)		***33.5***

Tabella 2 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso in dolomie

1.3 Parametri geomeccanici

1.3.1 Gradoni

Nei calcoli di stabilità relativi ai gradoni, la resistenza al taglio dei giunti dei diversi sistemi di discontinuità riconosciuti è stata stimata ricorrendo al criterio empirico di Barton (1976) [1]

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n) + \phi_b]$$

in cui τ è la resistenza al taglio del giunto, σ_n lo sforzo normale agente sul piano, ϕ_b l'angolo d'attrito di base, JRC e JCS i parametri che tengono conto rispettivamente della rugosità della superficie e della resistenza a compressione delle pareti del giunto.

Per tener conto degli effetti di scala che influiscono su JRC e su JCS, legati alla diversa persistenza dei sistemi di discontinuità in rapporto alla lunghezza della superficie su cui è misurato JRC (lunghezza della base pari a 30 cm) sono state applicate le equazioni di Barton & Bandis (1990)[2]

$$JRC_n = JRC_0[L_n/L_0]^{-0.02\ JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0[L_n/L_0]^{-0.03\ JRC_0}$$

in cui JRC_0 e JCS_0 sono i valori effettivamente misurati, JRC_n e JCS_n i valori scalati in base alla persistenza del sistema di discontinuità, L_n la lunghezza effettiva del sistema di discontinuità, L_0 la lunghezza della base su cui è misurato sul terreno JRC.

[1] Barton N. – *The shear strength of rock and rock joints* – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1976

[2] Barton N., Bandis S. – *Review of predictive capabilities of JRC–JCS model in engineering practice* – Rock joints, Balkema, Rotterdam, 1990.

Sistema di discontinuità	JRC_0	JRC_n	JCS_0	JCS_n
K1	3	2,8	80	72
K2	10	6,3	80	40
K3	5	3,5	80	47
K4	5	1,8	80	67
S	15	4,6	100	28

Tabella 3 Valori misurati e calcolati di JRC e JCS

1.3.2 Superfici d'inviluppo dei fronti

I calcoli di stabilità vengono eseguiti analizzando i tetraedri rimuovibili (costituiti da due superfici di discontinuità dell'ammasso roccioso e dalle superfici libere della scarpata e dalla berma del gradone), delle dimensioni massime compatibili con l'altezza del fronte considerato.

Nel caso dei fronti del progetto, la cui altezza è compresa tra 50 e 200 m circa, le dimensioni (ettometriche) dei cunei analizzati sono maggiori di almeno un ordine di grandezza rispetto alle dimensioni della maggior parte dei sistemi di discontinuità che danno luogo ai cunei potenzialmente instabili (aventi persistenze generalmente comprese tra 1 m e 10 m). Ciò implica che le superfici che definiscono i cunei potenzialmente instabili dei fronti corrispondano in minima parte a piani di discontinuità e in massima parte a ponti di roccia integra.

Allo scopo di tener conto della resistenza al taglio di tali ponti di roccia, ai diversi sistemi di discontinuità è stato attribuito un valore di coesione pari ad una frazione della resistenza al taglio della matrice rocciosa risultante dalla classificazione RMR, in funzione del valore medio della persistenza rilevata in ciascuno di essi. Al sistema di discontinuità S, la cui persistenza è sempre decametrica, è stata attribuita il valore più basso di coesione. Per tutti i sistemi è stato adottato un angolo d'attrito di 30°, conservativo rispetto al valore stimato con la classificazione RMR (33,5°).

Sistema di discontinuità	c (kPa)	φ (°)
S	25	30
K1	150	30
K2	150	30
K3	75	30
K4	75	30

Tabella 4 Dolomie. Resistenza al taglio dei sistemi di discontinuità nelle verifiche di stabilità dei fronti

1.4 Caratterizzazione sismica del sito

1.4.1 Classificazione

La pericolosità sismica di riferimento è stata ricavata, sulla base dei dati forniti a livello nazionale nel sito *web* dell'INGV, con il *software* NCTSISMA (Castalia Srl).

Le coordinate geografiche decimali del centroide del sito di cava nel sistema ED50 sono le seguenti:

lat: 44,446719; long: 8,851159

I risultati ottenuti sono riportati in fig. 3 e nella tabella 5. Sulla base delle indicazioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008, § 2.4), nella stima dei parametri sismici si è tenuto conto cautelativamente di una Vita Nominale di 50 anni (opera ordinaria) e di una Classe d'uso I, per costruzioni con presenza occasionale di persone. è stata assunta di conseguenza un periodo di riferimento, Vr, uguale a 35 anni (D.M. 14/01/2008, § 2.4.3).

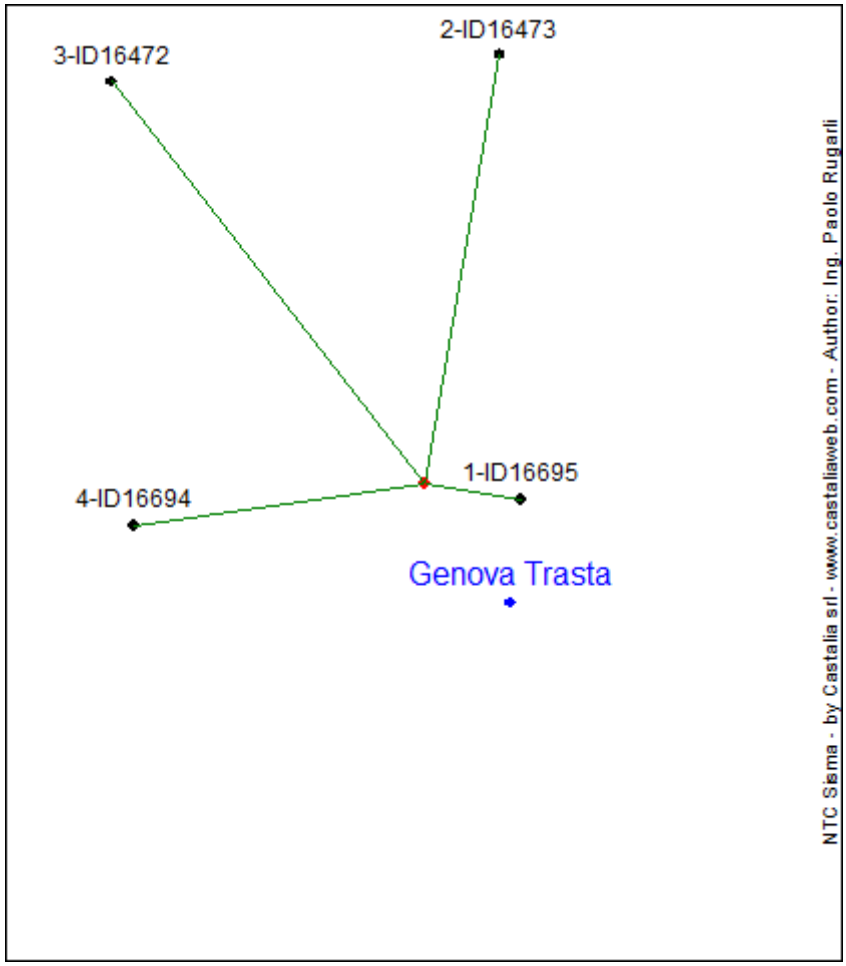


Fig. 3 – Localizzazione del sito di cava (in rosso) e dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento entro la quale si trova il sito.

Parametri	SLO	SLD	SLV	SLC
Probabilità di superamento nel Vr	0.81	0.63	0.1	0.05
Tr	35 anni	35 anni	332 anni	682 anni
a_g	0.0225 g	0.0243 g	0.0599 g	0.0774 g
F_o	2.5486	2.5392	2.5212	2.5234
Tc	0.1800 sec	0.1864 sec	0.2807 sec	0.2902 sec

Tabella 5 – Parametri sismici ottenuti per le condizioni degli stati limite del collasso (SLC), del danno (SLD), di operatività (SLO) e di salvaguardia della vita (SLV). (Vr periodo di riferimento, Tr tempo di ritorno, a_g accelerazione massima di riferimento, F_o fattore di amplificazione spettrale, Tc periodo relativo all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro).

1.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche

Il profilo stratigrafico del substrato roccioso nei fronti di cava è assimilabile ai sottosuoli compresi nella categoria A, per la quale il parametro di amplificazione stratigrafica S_S vale 1 (D.M. 14/01/2008, Tabella 3.2.V).
Per pendii con inclinazione media superiore ai 15°, le condizioni topografiche del sito rientrano nella categoria T2 della tabella 3.2.VI delle citate Norme Tecniche per le Costruzioni, cui corrisponde un valore di ST = 1,20.

1.4.3 Azione sismica

Poiché mancano analisi specifiche riguardanti la risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa nel sito può essere calcolata (§ 7.11.3.5.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni) con la relazione

$$a_{max} = S_S \, ST \, a_g$$

che, utilizzando i parametri ottenuti nei paragrafi precedenti, fornisce per il sito i valori di amax riportati nella tabella sottostante.

	SLO	SLD	SLV	SLC
a_{max}	0.02700 g	0.02916 g	0.07188 g	0.09288 g

Tabella 6 – Valori di amax ottenuti per i diversi stati limite

Nel metodo di verifica di stabilità pseudo - statico che è stato adottato, l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, i cui coefficienti sismici orizzontale e verticale possono calcolarsi secondo le relazioni:

$$k_h = \beta s \, a_{max}/g$$
$$k_v = 0.5 \, k_h$$

in cui kh è il coefficiente della componente orizzontale della forza, kv il coefficiente della componente verticale e βs il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa, valutato secondo i valori riportati nella tabella 7.11.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni e pari nel caso attuale a 0.20. I valori ottenuti sono riportati nella tabella che segue.

	SLO	SLD	SLV	SLC
k_h	0.00540	0.00583	0.01437	0.01857
k_v	0.00270	0.00292	0.00719	0.00929

Tabella 7 – Coefficienti sismici ottenuti per le condizioni degli stati limite del collasso (SLC), del danno (SLD), di operatività (SLO) e di salvaguardia della vita (SLV)

1.5 Test di Markland

1.5.1 Geometria dei fronti e dei gradoni

Per analizzare i possibili meccanismi di instabilità sono stati eseguiti i *test* di Markland, utilizzando i valori medi di giacitura dei sistemi di discontinuità principali e l'orientazione media dei fronti prevista dal progetto di coltivazione nella configurazione finale della cava, ad attività esaurita.

Nelle fasi intermedie della coltivazione i fronti provvisori avranno sostanzialmente la stessa orientazione prevista per la configurazione finale. Ne consegue che le verifiche di stabilità dei fronti nella configurazione finale, essendo più gravose, in ragione della maggiore altezza complessiva, valgono anche per i fronti provvisori.

Per le singole famiglie di discontinuità sono stati utilizzati i valori centrali della distribuzione delle misure di orientazione, calcolati secondo gli algoritmi statistici del programma DIPS (Rocscience Inc., Toronto). Nel *test* è stato introdotto, come valore dell'angolo di attrito di base delle discontinuità, un cerchio d'attrito di 30°.
Le caratteristiche geometriche dei fronti nella configurazione finale del progetto di coltivazione sono illustrate nella tabella 8 ed in tav. 1.

Orientazione del fronte (immersione - gradi)	Altezza (m)	Inclinazione (°)
Fronte 35	140	45
Fronte 70	200	45
Fronte 150°	50	50

Tabella 8. Geometria dei fronti e dei gradoni

In tutti i fronti i gradoni hanno altezza di 15 m, inclinazione di 70°, profondità della pedata pari a circa 7 - 8 m.
Le verifiche sono state effettuate sia per la superficie di inviluppo del fronte sia per le alzate dei singoli gradoni.

Scivolamento su cunei

Nei diagrammi che riproducono i test di Markland (vedi le pagine seguenti) l'area in colore rosso indica la zona critica primaria, compresa tra la traccia ciclografica della superficie del fronte o del gradone e il cono d'attrito, il cui valore è stabilito nell'analisi cinematica in 30° per tutti i sistemi di discontinuità. I punti di intersezione tra due superfici di discontinuità che cadono all'interno dell'area in colore rosso rappresentano cunei che soddisfano le condizioni geometriche e d'attrito per lo scivolamento. Lo scivolamento può avvenire lungo una delle due superfici o lungo la linea di intersezione.

L'area in colore giallo indica la zona critica secondaria, compresa tra la superficie del fronte o del gradone e la traccia ciclografica del piano inclinato di un angolo pari all'angolo del cono di attrito. I punti di intersezione di due superfici di discontinuità che cadono all'interno dell'area in colore giallo rappresentano cunei il cui scivolamento avviene su una delle due superfici di discontinuità. Tali punti di intersezione hanno un'inclinazione inferiore all'angolo d'attrito; tuttavia il cinematismo può verificarsi se l'inclinazione della superficie di discontinuità su cui avviene lo scivolamento ha un'inclinazione superiore all'angolo di attrito.

Scivolamento planare

Nei diagrammi del *test* di Markland per lo scivolamento planare (vedi le pagine seguenti) l'area in colore rosso indica la zona critica primaria, compresa tra il cono d'attrito, il cui valore è stabilito nell'analisi cinematica in 30° per tutti i sistemi di discontinuità, i limiti laterali corrispondenti ad un intervallo di 20° (che definiscono la massima differenza di orientazione tra la superficie del fronte o del gradone e la discontinuità) e il limite dell'inviluppo di emersione (*daylight envelope*), che contiene i poli delle superfici di discontinuità con inclinazione minore dell'inclinazione del fronte o del gradone. I poli delle superfici di discontinuità che cadono all'interno dell'area in colore rosso soddisfano le condizioni geometriche, e in prima approssimazione d'attrito, per lo scivolamento planare.

1.5.2 Fronte 35°

Per la superficie d'inviluppo non esiste alcun potenziale cinematismo (fig. 4 e 5). Ugualmente non sono stati rilevati possibili cinematismi per il gradone (fig. 6 e 7).

1.5.3 Fronte 70°

Nell'esame dei cinematismi di fronte e gradone immergenti a 70° è stata introdotta l'orientazione più sfavorevole del sistema di faglie F1, che, in quanto caratterizzata da orientazione subparallela al fronte, può dar luogo a cinematismi di scivolamento planare. Per quanto riguarda la superficie d'inviluppo non è possibile alcun cinematismo (fig. 8 e 9). Per il gradone (fig. 10 e 11), è possibile lo scivolamento planare su F1.

1.5.4 Fronte 150°

Per quanto riguarda la superficie d'inviluppo è possibile un cinematismo, il cuneo K1/K4 (fig. 12 e 13).
Per il gradone sono stati rilevati due possibili cinematismi, i cunei S/K1 e K1/K4 (fig. 14 e 15).

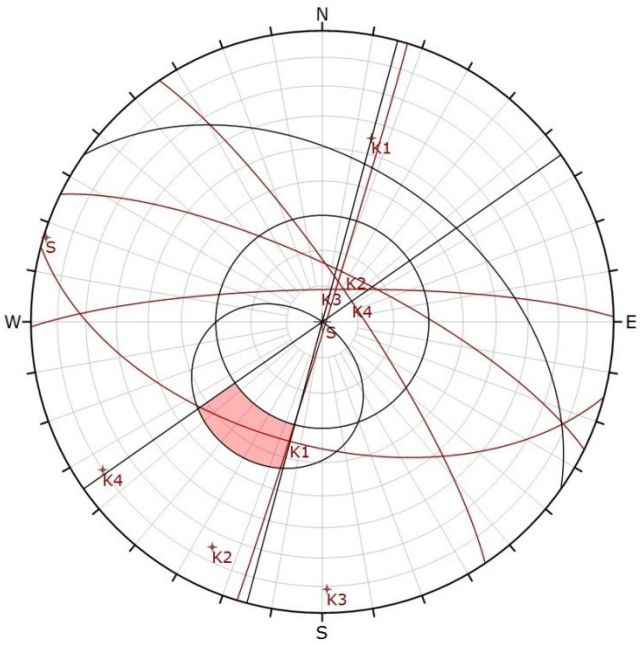


Fig. 4 – Fronte 35°. Test di Markland per lo scivolamento planare.

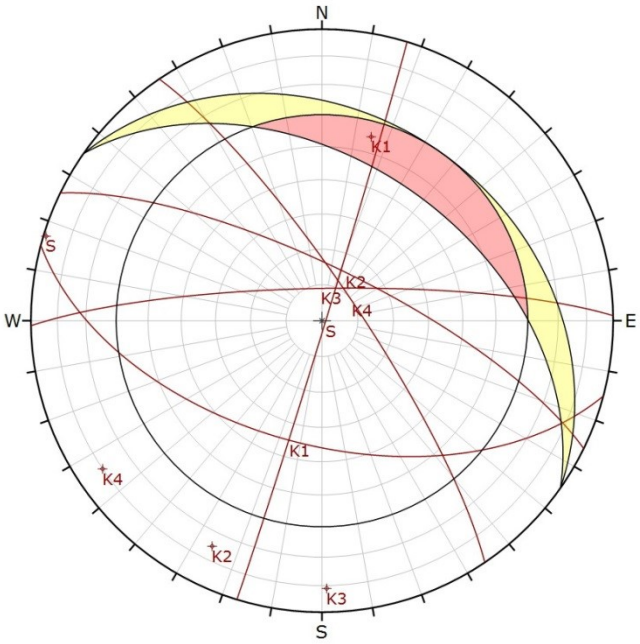


Fig. 5 – Fronte 35°. Test di Markland i cunei.

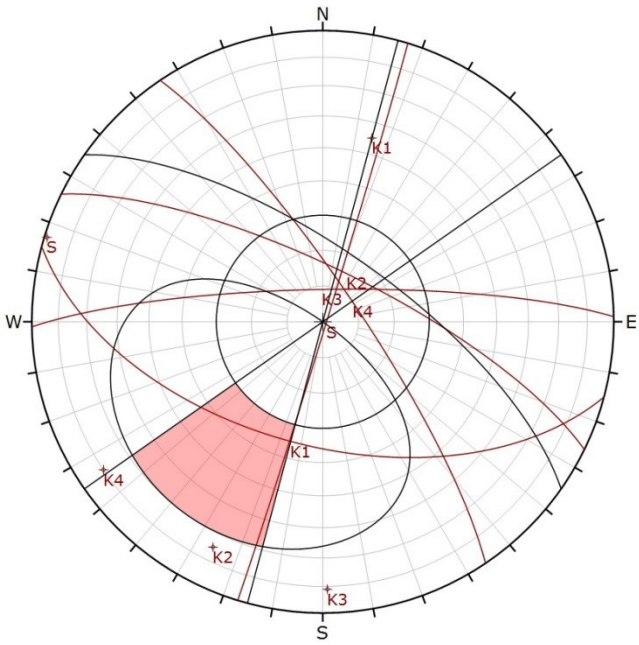


Fig. 6 – Gradone 35°. Test di Markland per lo scivolamento planare.

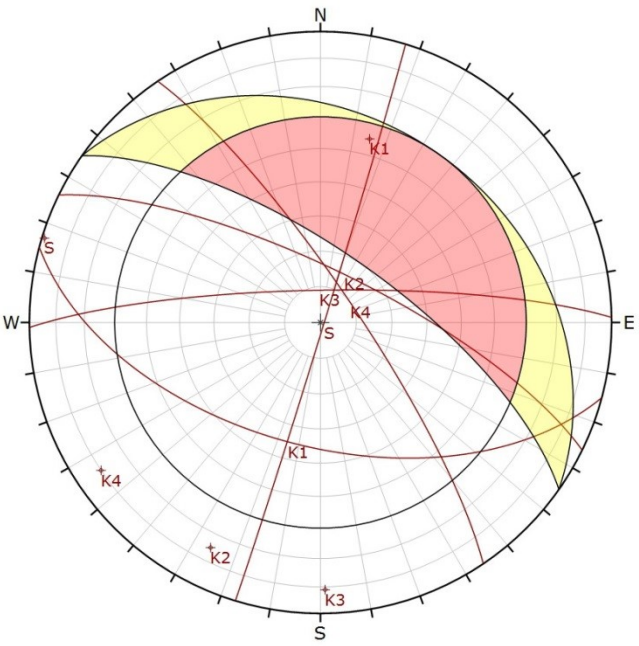


Fig. 7 – Gradone 35°. Test di Markland. Test di Markland i cunei.

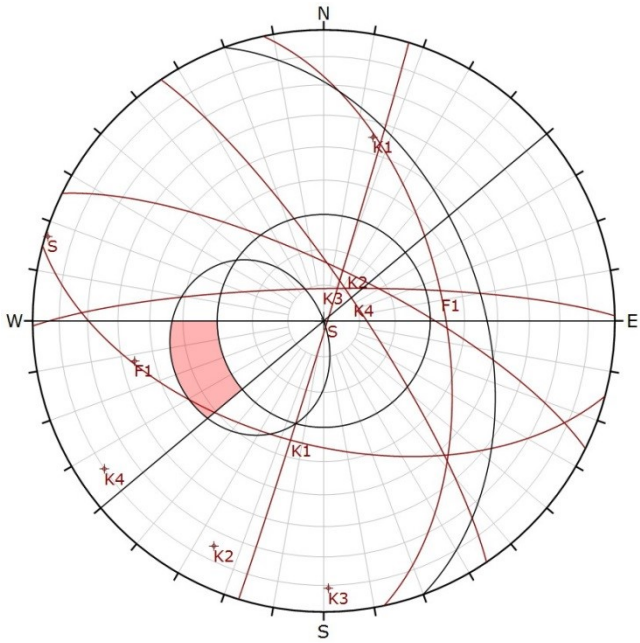


Fig.8 – Fronte 70°. Test di Markland per lo scivolamento planare.

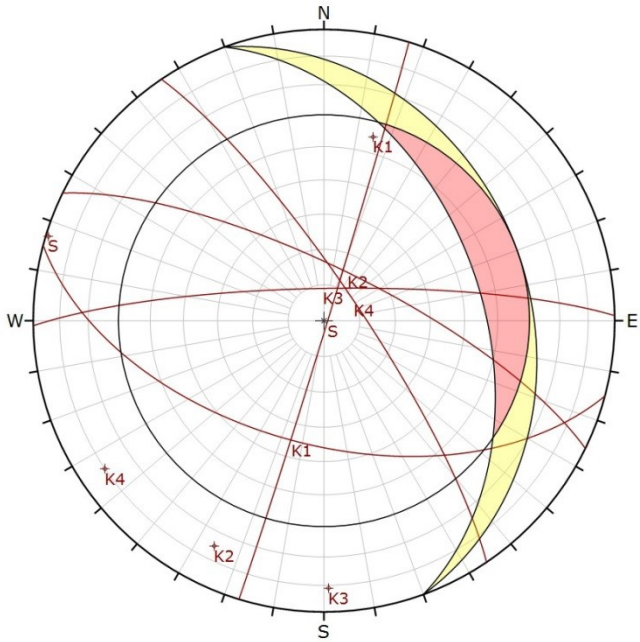


Fig. 9 – Fronte 70°. Test di Markland i cunei.

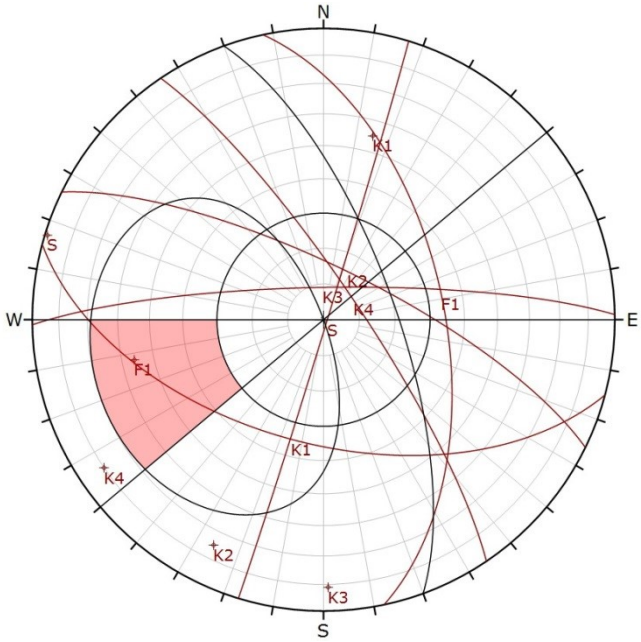


Fig. 10 – Gradone 70°. Test di Markland per lo scivolamento planare.

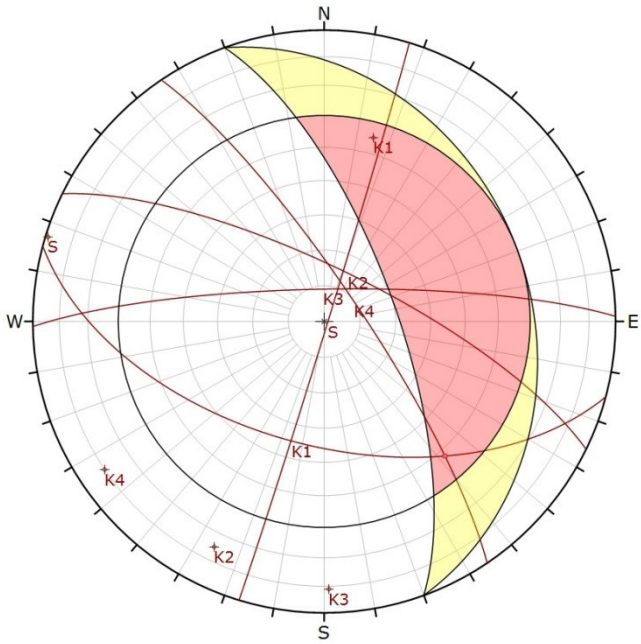


Fig. 11 – Gradone 70°. Test di Markland i cunei.

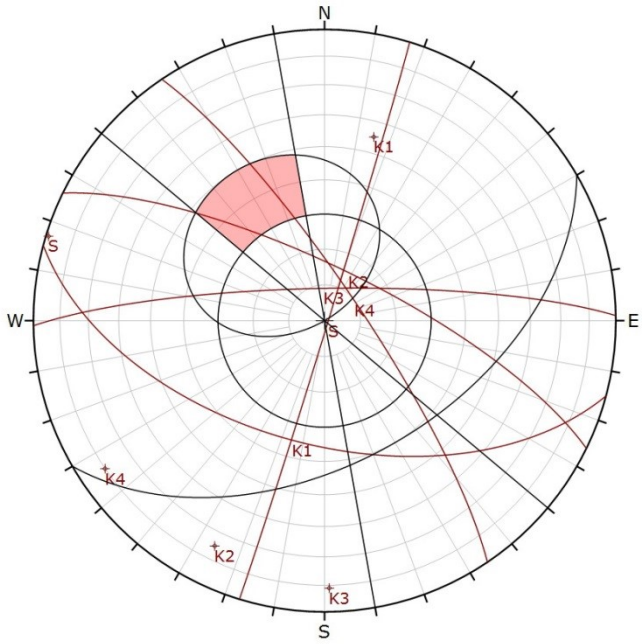


Fig. 12 – Fronte 150°. Test di Markland per lo scivolamento planare.

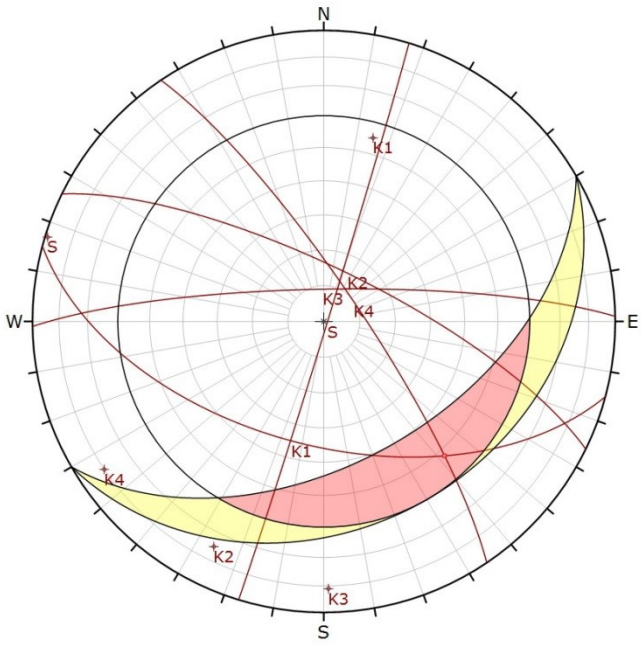


Fig. 13 - Fronte 150°. Test di Markland i cunei.

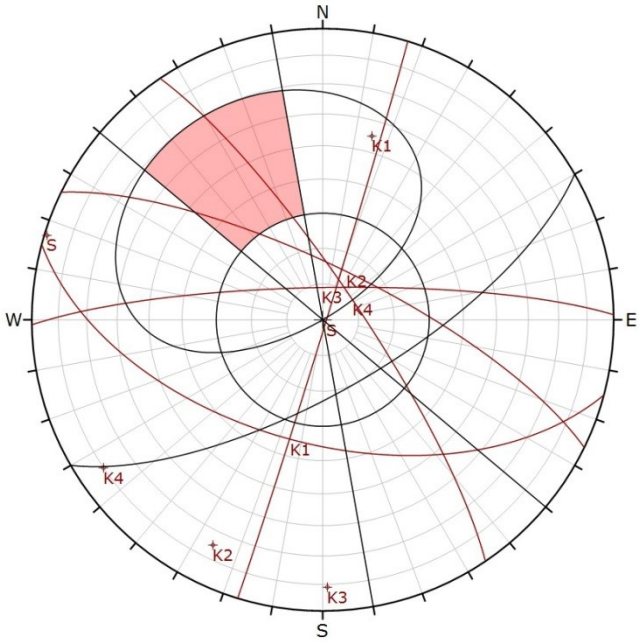


Fig. 14 – Gradone 150°. Test di Markland per lo scivolamento planare.

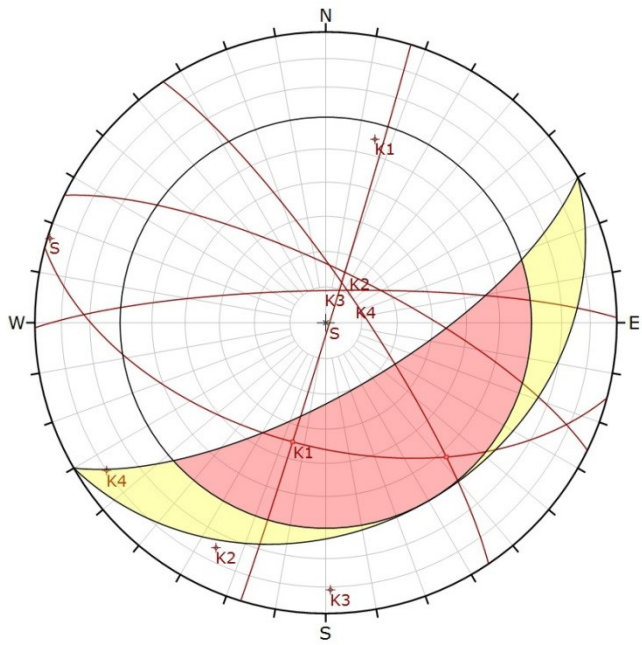


Fig. 15 – Gradone 150°. Test di Markland i cunei.

1.6 Calcoli di stabilità dei cinematismi potenziali

1.6.1 Introduzione

Secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008, § 7.1) il rispetto degli stati ultimi in condizioni sismiche si considera soddisfatto quando siano state eseguite le verifiche relative agli stati limite SLD, stato limite di danno, e SLV, stato limite di salvaguardia della vita.
Non essendo valutabile per un fronte in roccia uno stato limite di esercizio, nelle verifiche di stabilità è stato preso in considerazione solo lo stato limite ultimo SLV.

I potenziali cunei di scivolamento ricavati dai *test* di Markland sono stati sottoposti a verifica analitica, eseguendo i calcoli di stabilità con il programma *Swedge* di Rocscience Inc. (Toronto, Canada). Il programma utilizza le equazioni di Hoek[3].

1.6.2 Parametri geomeccanici di progetto

Per ottenere i parametri di progetto sono stati adottati i coefficienti parziali dell'Approccio 1 Combinazione 2 previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per i fronti di scavo. Pertanto ai valori caratteristici della coesione intercetta e della tangente dell'angolo di resistenza al taglio sono stati applicati i coefficienti parziali (1,25 in entrambi i casi, secondo la tabella 6.2.II delle citate norme). Alla resistenza globale deve essere applicato il coefficiente 1,1 (tabella 6.8.I).

Nel caso delle verifiche di stabilità dei gradoni, i valori dei parametri geomeccanici di progetto sono calcolati direttamente per ogni singolo cinematismo dal programma *Swedge 6.011* sulla base dei valori caratteristici stimati nei relativi paragrafi, applicando l'Eurocodice 7, che utilizza gli stessi coefficienti parziali delle NTC-2008.

Per la generalità dei casi sono state assunte condizioni idrauliche drenate. Il peso specifico apparente è stato assunto pari a γ= 26,5 kN/m^3. L'azione sismica è stata simulata con il metodo pseudo - statico, per mezzo di un'azione statica equivalente, espressa dai coefficienti sismici calcolati nel capitolo precedente. Per quanto riguarda le dimensioni dei cunei potenzialmente instabili, la stima è stata eseguita assumendo il valore modale (di maggior frequenza) della persistenza dei diversi sistemi di discontinuità, indicata in allegato nei tabulati.

[3] Hoek E., Bray J. – *Rock Slope Engineering* – IMM, London, 1977.

Sistema di discontinuità	c (kPa)	φ (°)
S	20	25
K1	120	25
K2	120	25
K3	60	25
K4	60	25

Tabella 9 – Parametri di progetto. Resistenza al taglio dei sistemi di discontinuità per le superfici d'inviluppo dei fronti

1.6.3 Scivolamento planare e di cunei

I coefficienti di sicurezza ottenuti dai calcoli sono riportati nella tabella 10.

Cinematismo	**Fattore di sicurezza**	**Volume (m³)**	**Peso (t)**
Gradone 70°			
Planare su F1	0,60	-	-
Fronte 150°/50°			
Cuneo K1/K4	16,5	-	-
Gradone 150°/70°			
Cuneo S/K1	1,47	-	-
Cuneo K1/K4	0,51	0,088	0,234

Tabella 10 Fattori di sicurezza calcolati per i cinematismi potenziali

1.6.4 Ribaltamento

Il cinematismo di ribaltamento, potenzialmente possibile per la stratificazione S, caratterizzata da elevata persistenza e inclinazione, non è più significativo nella configurazione finale del progetto attuale, in cui le direzioni dei fronti non sono più subparallele alla giacitura di S.

1.6.5 Considerazioni conclusive

Superfici di inviluppo dei fronti

Per quanto riguarda le superfici d'inviluppo dei fronti, i valori di inclinazione adottati secondo le indicazioni progettuali (45°-50°), assicurano complessivamente adeguate condizioni di stabilità, anche nel caso in cui siano presenti potenziali cinematismi.

Scivolamento per cuneo sulle alzate dei gradoni

Relativamente ai gradoni, i fattori di sicurezza calcolati risultano superiori al limite di 1,1 tranne che in un caso (il cuneo K1/K4).
Il volume ed il peso di tale cuneo, stimato sulla base dei valori modali di persistenza, sono sufficientemente bassi e tali che, nel caso si verifichi un'intersezione sfavorevole con i gradoni, sia possibile effettuare il disgaggio e la messa in sicurezza del fronte mediante le ordinarie operazioni di profilatura attuate abitualmente in occasione delle volate di abbattimento.

Scivolamento planare sulle alzate dei gradoni

Rispetto ai rilievi geostrutturali eseguiti nelle campagne precedenti con il rilievo più recente è stato messo in luce un aumento di frequenza del sistema di discontinuità legato a faglie di orientazione compresa tra NNO-SSE e NO-SE, con immersione da media a elevata verso E (F1), che in passato era stato riscontrato quasi esclusivamente nella vicina cava Gneo. Tale situazione è stata riscontrata in particolare nell'alzata definita dai gradoni di quota 235 e 250, in corrispondenza della fascia di raccordo tra le due superfici principali del fronte esposte rispettivamente verso NNE e NE.
Va rimarcato che si tratta di un fenomeno localizzato, non rilevato, né come superficie di discontinuità né come instabilità attiva, nei fronti soprastanti, esauriti da oltre 10 anni.

Tale settore di cava è stato oggetto di un approfondimento di indagine e di verifica di stabilità illustrato nella relazione specialistica datata febbraio 2017, parte integrante della relazione annuale dei lavori di cava, consegnata all'Ufficio Attività Estrattive della Regione Liguria.

Le dimensioni delle faglie del sistema F1, di ordine decametrico, possono implicare la formazione di volumi instabili riguardanti l'intera alzata del gradone, pur se variabili in funzione della lunghezza effettiva della discontinuità implicata.
Nel caso specifico dell'alzata 235-250 m, gli interventi di messa in sicurezza attuati dopo le indagini sono consistiti nella riprofilatura e nel disgaggio sistematico delle porzioni instabili e, localmente, nella messa in opera di chiodature. Con gli interventi eseguiti è stata salvaguardata la continuità (e l'accessibilità) della pedata residua di quota 250 m.

Per il prosieguo della coltivazione, al fine di garantire la stabilità a lungo termine dei gradoni definitivi che verranno rilasciati con i futuri ribassi delle spianate attive, alla luce dei nuovi dati geostrutturali ricavati dai rilievi e dell'esperienza acquisita con gli interventi effettuati, al fine di prevenire il rischio di instabilità si prevede di:

- in fase di esaurimento di ciascuna spianata di coltivazione, eseguire un rilievo geostrutturale sistematico di dettaglio per integrare l'archivio dei dati già disponibili e verificare l'esistenza e le caratteristiche di eventuali discontinuità appartenenti alla famiglia in oggetto (F1)
- valutare mediante verifiche numeriche l'esistenza di un rischio effettivo di instabilità legato a tali discontinuità e definire le eventuali azioni di messa in sicurezza da adottare
- prevenire il rischio riducendo, se necessario, l'inclinazione dell'alzata finale per portarla a coincidere con l'orientazione delle discontinuità suscettibili di cinematismi; nel caso in cui, a causa della bassa inclinazione della discontinuità si rischi un restringimento eccessivo della pedata residua, andrà previsto di modificare localmente la geometria del fronte, limitando l'arretramento del piede dell'alzata e riducendo l'inclinazione media di inviluppo del fronte: in tal modo si potrà garantire il mantenimento di una larghezza minima di pedata pari a 4-5 m, idonea per conservare un'agevole accessibilità; come estremo rimedio, nel caso in cui permangano delle potenziali instabilità a carattere locale, sarà possibile intervenire con opportune chiodature, come già sperimentato nel caso affrontato recentemente.

Come considerazione finale in merito alla correttezza dei provvedimenti di sicurezza e prevenzione proposti nei punti precedenti va sottolineato che:

- con il metodo di coltivazione per fette orizzontali discendenti i tempi di esaurimento di ciascuna fetta di giacimento sono dell'ordine di 2-3 anni e pertanto ogni spianata sarà soggetta ad almeno 2-3 campagne annuali di rilievo geostrutturale e relativa verifica nel corso della coltivazione, oltre alla ulteriore campagna specificamente prevista nella fase di profilatura definitiva
- nel corso della coltivazione è uno specifico compito del Direttore dei Lavori effettuare un controllo assiduo della situazione dei fronti, rilevare eventuali anomalie o scostamenti rispetto alle condizioni geostrutturali assunte nel progetto e mettere in atto i necessari provvedimenti ai fini della sicurezza (indagini, verifiche, interventi).

Si ritiene che con tale previsione possano essere garantite una corretta sorveglianza della sicurezza dei lavori ed un'agevole attuazione delle eventuali azioni correttive e/o preventive.

2. VERIFICHE DI STABILITA' DEI RILEVATI DI INERTI

2.1 Introduzione

I rilevati di materiali inerti saranno formati da terre e rocce da scavo e da limi sabbiosi. Si tratta dei limi sabbiosi che escono dagli impianti di frantumazione e sono successivamente inviati in filtropressa. Il processo produce terre a granulometria limoso-sabbiosa con umidità non superiore al 20%, quindi "palabili" e immediatamente trasportabili, nel sito di discarica.
Le terre e rocce da scavo proverranno dallo smarino di gallerie o da altri lavori di sbancamento. Si tratta di materiali inerti di litologia variabile e di granulometria eterometrica ma complessivamente grossolana, assimilabili a ghiaie sabbiose.

2.2 Caratteristiche dei rilevati

Il rilevato di riporto in sabbie limose, sagomato con opportuna geometria, sarà realizzato nel settore centrale della cava (vedi dis. D14). Le scarpate verso valle saranno caratterizzate da un'inclinazione di 23°. I gradoni avranno un'altezza massima di 10 m e pendenze intorno a 25°-30°. La sequenza operativa di realizzazione del cumulo prevede la formazione di un argine esterno di contenimento, utilizzando terre e rocce da scavo, il riempimento del vuoto alle spalle dell'argine con sabbie limose di lavaggio e la compattazione dell'intero strato con mezzi meccanici. Il ciclo sarà ripetuto fino all'esaurimento del vuoto disponibile. Il cumulo così realizzato risulterà costituito da una parte interna di limi di lavaggio e da una parte superficiale, spessa mediamente 4 m, costituita da terre e rocce da scavo, dotate di un elevato angolo di attrito, in grado di garantire buone condizioni di stabilità.

Un secondo rilevato sarà realizzato interamente con terre e rocce da scavo nel settore settentrionale della cava (vedi dis. D14). La scarpata verso valle sarà caratterizzata da una superficie di inviluppo con inclinazione di circa 21°. I gradoni avranno un'altezza massima di 10 m e pendenze intorno a 25°-30°.

La configurazione geometrica descritta è riprodotta nelle sezioni rappresentative delle fig. 17 e 19 (sezioni di verifica D-D' e E-E').

2.3 Proprietà fisico-meccaniche dei materiali

Le caratteristiche geotecniche dei materiali sabbioso – limosi sono state studiate in passato per mezzo di analisi e prove di laboratorio (relazioni dello Studio di Geologia Applicata Maifredi).

I risultati delle prove indicano che la composizione granulometrica dei materiali di risulta è compresa tra limi di bassa plasticità e sabbie limose non

coesive. I valori dei parametri geotecnici ottenuti dalle analisi sono riportati nella tabella sottostante.

Parametri geotecnici	Limi	Sabbie limose
Peso di volume	16,4 ÷ 19,6 kN/m^3	16,4 kN/m^3
Angolo di attrito di picco	26,6°	33,3°
Coesione	15,4 kPa	0 kPa

Tabella 11 Parametri geotecnici dei materiali sterili fini

Per quanto riguarda le terre e le rocce da scavo, si tratta di materiali inerti di granulometria eterometrica, complessivamente grossolana, assimilabili a ghiaie sabbiose. Tenendo conto di un grado di addensamento medio, alle ghiaie sabbiose è stato attribuito l'intervallo di valori dei parametri di resistenza indicati da Lambe e Whitman (1969)[4] per materiali di tali caratteristiche, riportato in tabella 12.

Parametri geotecnici	Terre e rocce da scavo
Peso di volume	17 kN/m^3
Angolo di attrito di picco	36°-42°
Coesione	0 kPa

Tabella 12 Parametri geotecnici dei materiali sterili grossolani

Le NTC consentono l'uso come valori caratteristici dei parametri medi quando debba essere preso in considerazione un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità.
In accordo con tale considerazione e tenendo conto del fatto che le sabbie limose sono di gran lunga predominanti, per i materiali di lavaggio è stato assunto come valore caratteristico della resistenza un angolo di attrito di picco inferiore al valore misurato, ed una coesione cautelativamente nulla; per le terre e rocce da scavo il valore centrale dell'intervallo.

Parametri geotecnici	Sabbie limose	Terre e rocce da scavo
Peso di volume	16,4 kN/m^3	17 kN/m^3
Coesione	32°	39°
Angolo d'attrito di picco	0 kPa	0 kPa

Tabella 13 Valori caratteristici dei parametri geotecnici dei materiali sterili

2.4 Caratterizzazione sismica

[4] T. W Lambe, R. Whitman – Soil mechanics – J.Wiley & Sons, Inc., 1969.

2.4.1 Classificazione

Si riprende quanto detto nel paragrafo 1.4.1. per quanto riguarda i parametri sismici di base funzione della localizzazione del sito di cava. Vengono modificati invece per le verifiche di stabilità delle sabbie limose le categorie di suolo e l'azione sismica risultante.

2.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche

Il profilo stratigrafico del substrato roccioso nei fronti di cava è assimilabile ai sottosuoli compresi nella categoria E, per la quale il parametro di amplificazione stratigrafica S_S ha un valore di 1,8÷1,9 (D.M. 14/01/2008, Tabella 3.2.V).
Per pendii con inclinazione media superiore ai 15°, le condizioni topografiche del sito rientrano nella categoria T2 della tabella 3.2.VI delle citate Norme Tecniche per le Costruzioni, cui corrisponde un valore di ST = 1,20.

2.4.3 Azione sismica

Poiché mancano analisi specifiche riguardanti la risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa nel sito può essere calcolata (§ 7.11.3.5.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni) con la relazione

$$a_{max} = S_S \, ST \, a_g$$

che, utilizzando i parametri ottenuti nei paragrafi precedenti, fornisce per il sito i valori di amax riportati nella tabella sottostante.

	SLO	SLD	SLV	SLC
a_{max}	0,0524 g	0,0563 g	0,1315 g	0,1663 g

Tabella 14 – Valori di amax ottenuti per l diversi stati limite

Nel metodo di verifica di stabilità pseudo - statico che è stato adottato, l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, i cui coefficienti sismici orizzontale e verticale possono calcolarsi secondo le relazioni:

$$k_h = \beta s \, a_{max}/g$$
$$k_v = 0.5 \, k_h$$

in cui k_h è il coefficiente della componente orizzontale della forza, k_v il coefficiente della componente verticale e βs il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa, valutato secondo i valori riportati nella

tabella 7.11.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni e pari nel caso attuale a 0.20. I valori ottenuti sono riportati nella tabella che segue.

E	SLO	SLD	SLV	SLC
k_h	0,0105	0,0113	0,0263	0,0332
k_v	0,0053	0,0057	0,0132	0,0166

Tabella 15 – Coefficienti sismici ottenuti per le condizioni degli stati limite del collasso (SLC), del danno (SLD), di operatività (SLO) e di salvaguardia della vita (SLV).

2.5 Parametri geotecnici di progetto

Per ottenere i parametri di progetto sono stati adottati i coefficienti parziali dell'Approccio 1 Combinazione 2 previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per i rilevati. Pertanto ai valori caratteristici della coesione intercetta e della tangente dell'angolo di resistenza al taglio sono stati applicati i coefficienti parziali (1,25 in entrambi i casi, secondo la tabella 6.2.II delle citate norme).
Alla resistenza globale deve essere applicato il coefficiente 1,1 (tabella 6.8.I).

Parametri geotecnici	Sabbie limose	Terre e rocce da scavo
Peso di volume	16,4 kN/m^3	17 kN/m^3
Angolo di attrito di picco	26,5°	32,9°
Coesione	0 kPa	0 kPa

Tabella 16 – Parametri di progetto

2.6 Verifica di stabilità

Secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008, § 7.1) il rispetto degli stati ultimi in condizioni sismiche si considera soddisfatto quando siano state eseguite le verifiche relative agli stati limite SLD, stato limite di danno, e SLV, stato limite di salvaguardia della vita.
Non essendo valutabile per un rilevato uno stato limite di esercizio, nelle verifiche di stabilità è stato preso in considerazione solo lo stato limite ultimo SLV.
I calcoli di stabilità sono stati eseguiti applicando il metodo dell'equilibrio limite nelle versioni di Bishop, Spencer, Lowe - Karafiath e GLE/Morgenstern-Price, per potenziali superfici di scorrimento circolari, con il programma *Slide 5.0* (Rocscience Inc.- Toronto, Canada). Sono stati adottati i parametri geotecnici definiti nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche, la permeabilità medio – bassa dei materiali fini posti a discarica, la permeabilità per contro elevata del substrato carbonatico e l'efficiente effetto del sistema di regimazione delle acque progettato consentono di ritenere che nel rilevato non si possa sviluppare una circolazione sotterranea confinata di entità significativa. Tuttavia cautelativamente nelle verifiche di stabilità si è ipotizzato, in corrispondenza della fossa basale su cui verranno realizzati i rilevati, un livello piezometrico di qualche metro di spessore.

Sono stati calcolati i fattori di sicurezza di oltre 4800 superfici di scivolamento potenziale distribuite sull'intera sezione rappresentativa. I valori dei fattori di sicurezza sono rappresentati nelle fig. 18 e 20 con aree di diverso colore nel quadrato che racchiude i centri dei cerchi di scorrimento. Il cerchio riprodotto è relativo al fattore di sicurezza minimo calcolato con il metodo di Bishop.
I risultati delle verifiche hanno fornito in tutte le superfici esaminate fattori di sicurezza superiori a 1,1. I rilevati previsti dal progetto sono pertanto in grado di garantire le condizioni di sicurezza richieste dalla normativa attualmente in vigore.

I tabulati delle verifiche di stabilità sono riportati in allegato.

2.7 Verifiche alla liquefazione

Le NTC indicano cinque condizioni, manifestandosi almeno una delle quali le verifiche a liquefazione possono essere omesse (§ 7.11.3.4.2).

Delle due circostanze che riguardano le condizioni sismiche, quella relativa all'accelerazione massima attesa è sfavorevole, essendo a_{max} superiore a 0,1 g per lo stato limite SLV. Per quanto riguarda la magnitudo M, Genova non è compresa nelle zone sismogenetiche per le quali vi è una valutazione di magnitudo massima[5]. I valori medi e modali di M calcolati per la città di Genova nel rapporto dell'INGV di Spallarossa *et al.* (2007)[6] risultano rispettivamente pari a 4,99 e 4,75.
Esaminando i dati di disaggregazione di a_g del nodo più vicino al sito delle cave (ID16695, vedi fig. 2) ottenibili dal sito *WebGis* dell'INGV relativo alla pericolosità sismica, il valor medio di M risulta ancora inferiore a 5 (pari a 4,96).

[5] Gruppo di lavoro (2004) *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanaza PCM 3274 del 20 marzo 2003, rapporto conclusivo.* INGV Milano-Roma.

[6] Spallarossa D., Barani S. (2007). *Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D14*. http://esse1.mi.ingv.it/d14.html

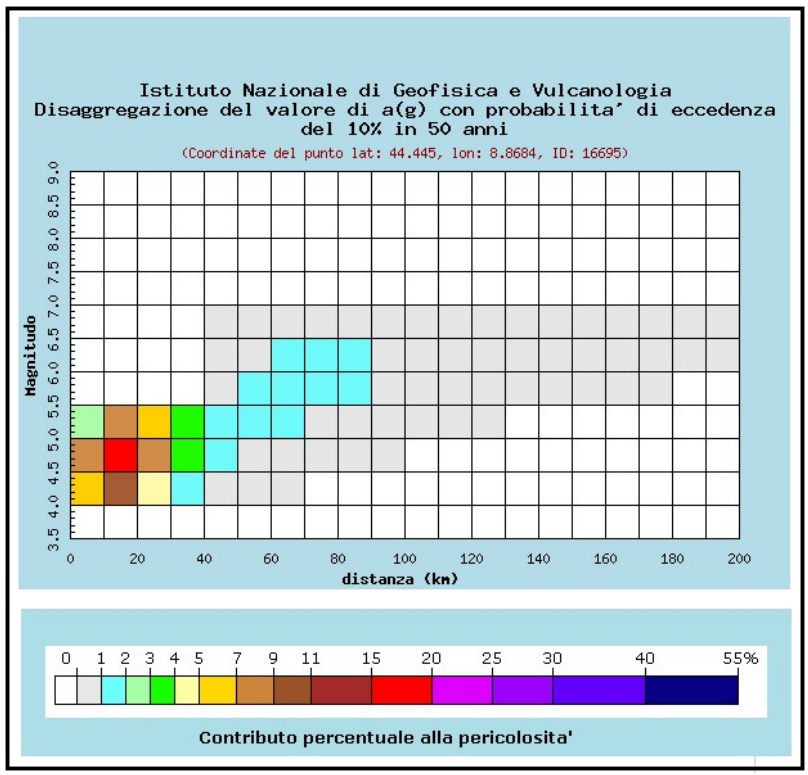


Fig. 16 – Disaggregazione del valore di a_g (rappresentata come magnitudo in funzione della distanza) per il punto di reticolo ID 16695.

La condizione di esclusione basata sulla resistenza dei terreni ricavata da prove penetrometriche non è valutabile, non essendo state eseguite indagini geotecniche in sito, così come la distribuzione granulometrica, per assenza di analisi granulometriche di dettaglio.

Le condizioni idrauliche rappresentano una circostanza globalmente favorevole all'esclusione delle verifiche, potendosi ammettere che la soggiacenza della superficie freatica sia superiore a 15 m dal p.c. per una parte significativa del rilevato, il cui spessore massimo arriva a 55 m.

In conclusione si può ritenere che due delle cinque condizioni per l'esclusione delle verifiche siano sostanzialmente verificate (magnitudo e profondità della falda), consentendo così di omettere le analisi di dettaglio.
A favore della stabilità va ancora tenuto conto del grado elevato di addensamento cui saranno portate le sabbie limose del rilevato, come previsto dal progetto.

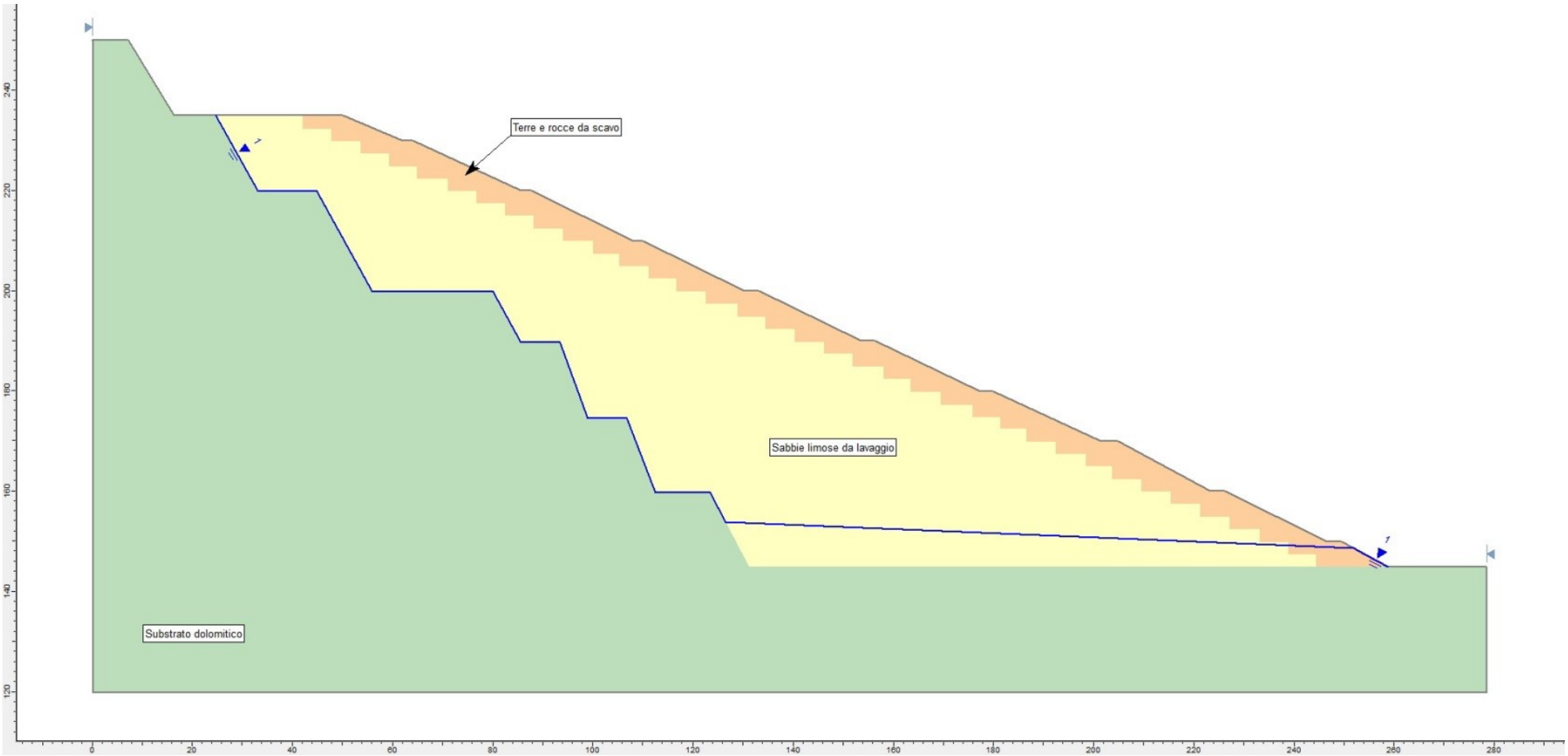


Fig. 17 –Rilevato in sabbie limose e terre e rocce da scavo. Sezione D-D'. Caratteristiche geometriche.

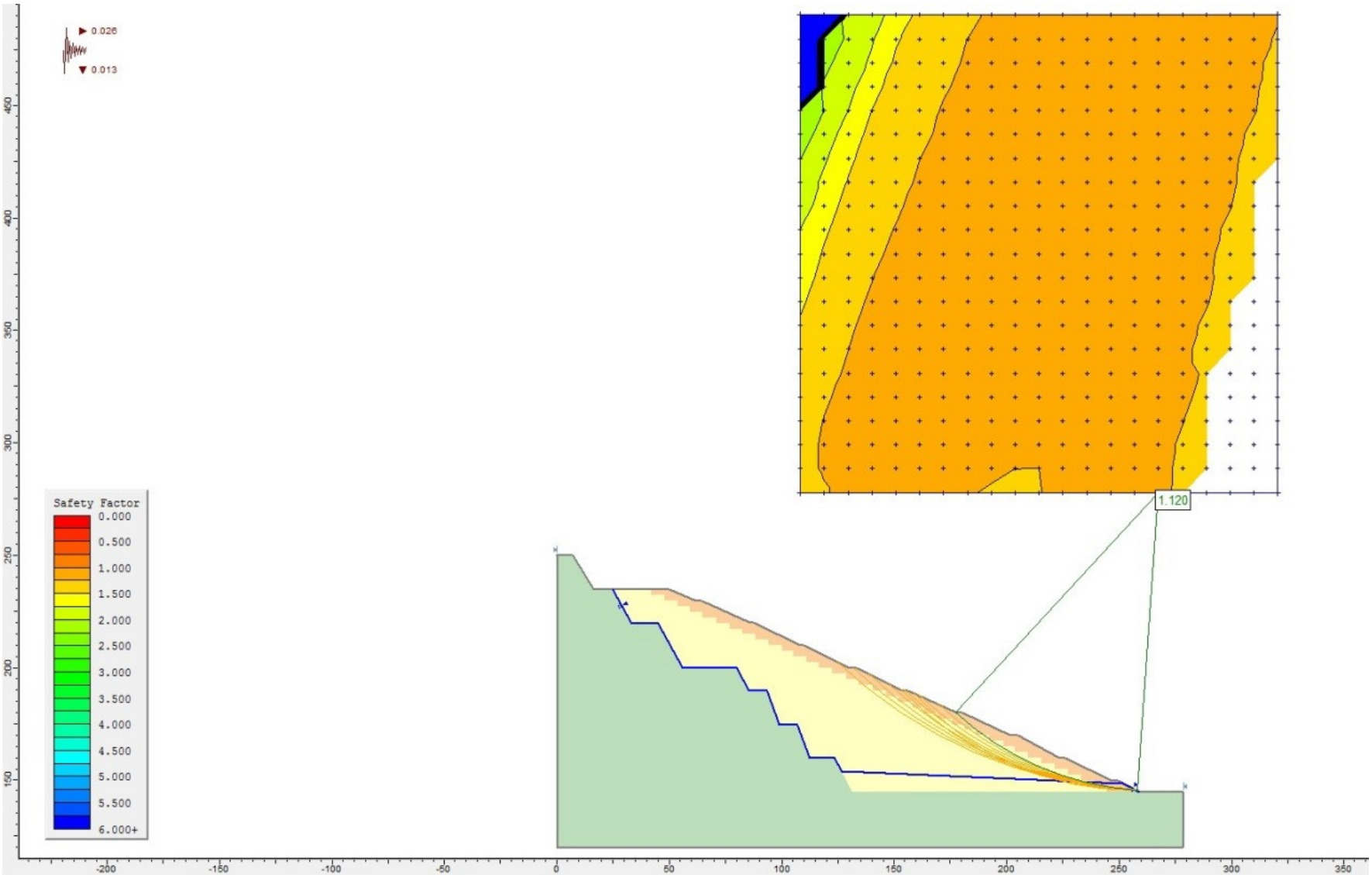


Fig. 18 –Rilevato in sabbie limose e terre e rocce da scavo. Sezione D-D'. Verifiche di stabilità.

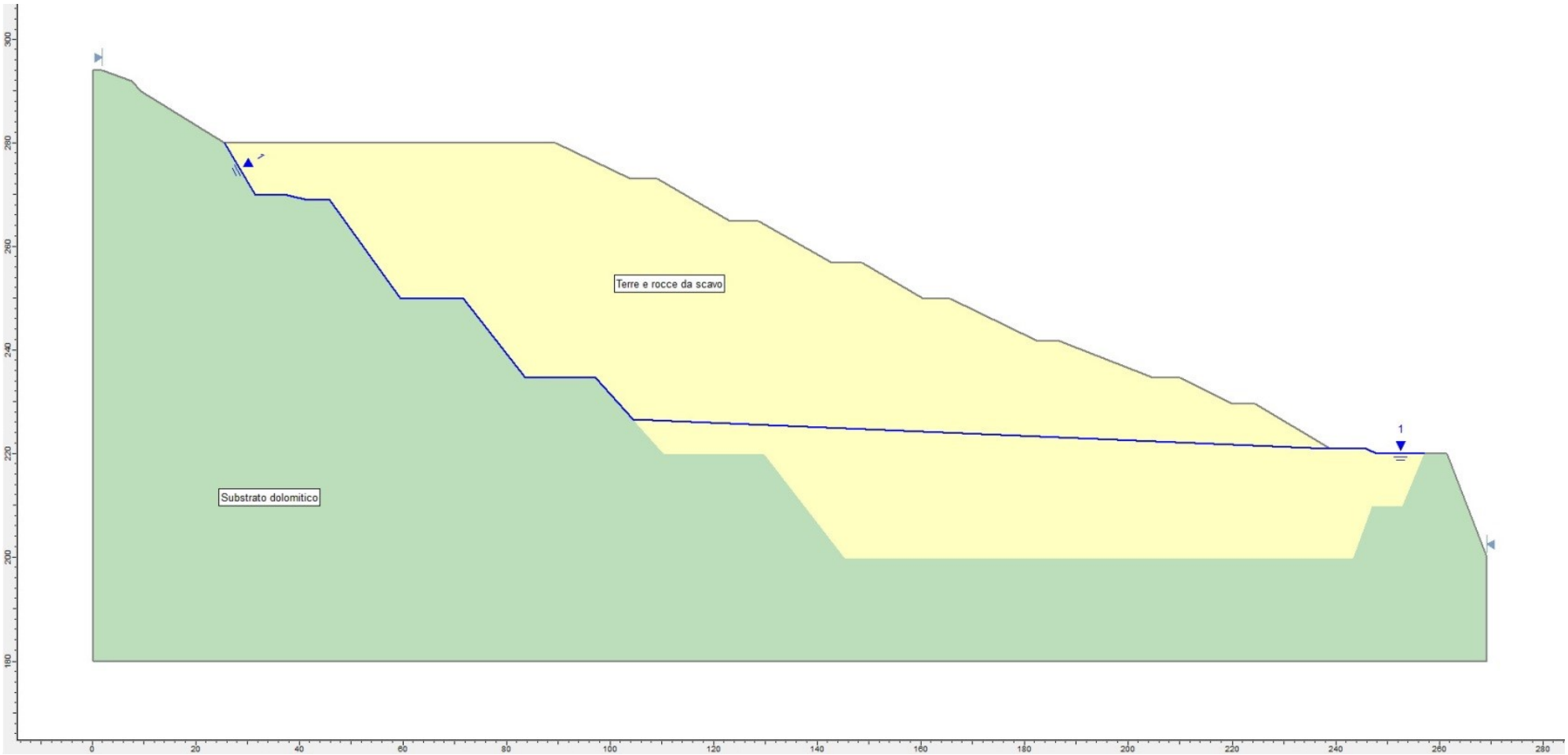


Fig. 19 –Rilevato in terre e rocce da scavo. Sezione E-E'. Caratteristiche geometriche.

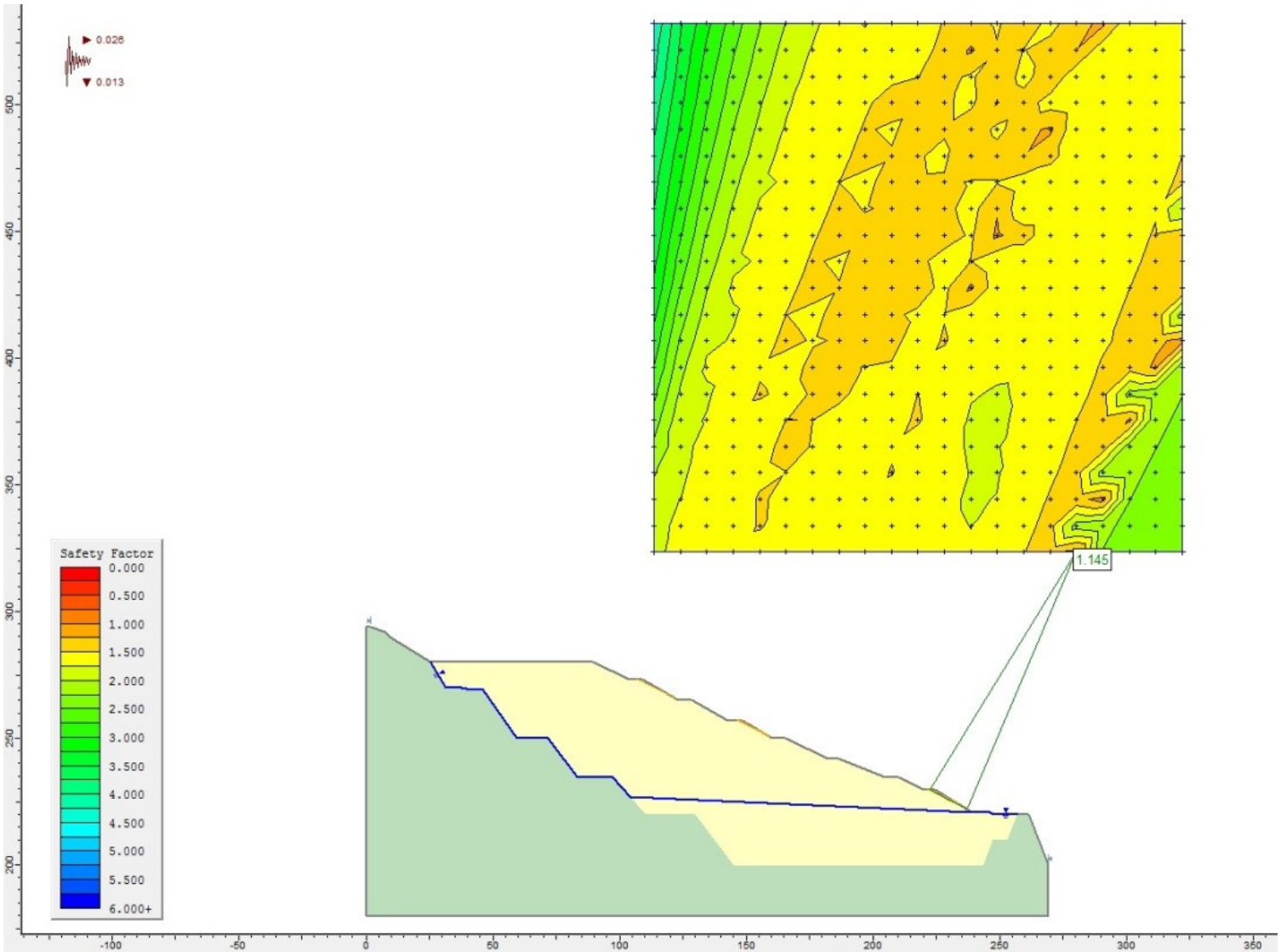


Fig. 20 – Rilevato in terre e rocce da scavo.. Sezione E-E′. Verifiche di stabilità.

ALLEGATI

Tabulati di calcolo

Gradone 70°
Scivolamento su F1

RocPlane - Planar Wedge Stability Analysis

Analysis Results

- Analysis Type - Deterministic

Normal Force	506.951 kN/m
Driving Force	774.764 kN/m
Resisting Force	463.586 kN/m
Factor of Safety	0.598357

Geometry

Slope Height	15 m
Wedge Weight	925.792 kN/m
Wedge Volume	34.9356 m^3/m
Wedge Height	15 m
Unit Weight	26.5 kN/m3
Slope Angle	70 °
Failure Plane Angle	56 °
Upper Face Angle	0 °
Bench Width	8 m
Wedge Height	15 m
Waviness	3 °
Intersection Point (B) of slope and upper face	(5.45955 , 15)
Intersection point (C) of failure plane and upper face	(10.1176 , 15)
Upper face length (B --> C)	4.65807 m
Failure plane length (Origin --> C)	18.0933 m
Wedge Slope length (Origin --> B)	15.9627 m
Tension Crack	Not Present

Strength

Shear Strength Model	Barton-Bandis

JRC	5
JCS	75000 kN/m2
Residual Friction Angle (phir)	30 °
Shear Strength	24.1536 kN/m2
Shear Resistance	437.017 kN/m

Seismic Force

Direction	Horizontal
Seismic Coefficient	0.014
Seismic Force	12.9611 kN/m

Design Standard

- Selected Type: Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1
Bolt tensile capacity	1.1
Seismic Coefficient	1
Water Pressure	1

Fronte 150°
Cuneo K1/K4

SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis

Analysis Results

- Analysis type - Deterministic

Safety Factor	100
Wedge height (on slope) [m]	50
Bench width (on upper face) [m]	20.782
Wedge volume [m3]	3347.44
Wedge weight [MN]	87.0334
Wedge area (joint1) [m2]	896.972
Wedge area (joint2) [m2]	528.854
Wedge area (slope) [m2]	630.8
Wedge area (upper face) [m2]	200.846

Seismic Force

Seismic force [MN] 1.21847

Failure Mode

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
37.949	138.096	81.307

Trace Lengths

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	65.706	29.390
Joint 2	66.323	20.833

Persistence

Joint 1 [m]	81.307
Joint 2 [m]	81.307

Intersection Angles

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	16.828	41.000
Joint 1 & Crest	83.396	45.000
Joint 2 & Crest	79.776	94.000

Dip and Dip Direction

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	55.000	195.000
Joint Set 2	80.000	56.000
Slope	50.000	150.000
Upper Face	0.000	150.000

Joint Set 1 Data

Cohesion [MPa]	60
Friction Angle [deg]	25
Waviness Angle [deg]	0

Joint Set 2 Data

Cohesion [MPa]	60
Friction Angle [deg]	25
Waviness Angle [deg]	0

Slope Data

Slope height [m]	50
Rock unit weight [MN/m3]:	0.026
Water pressures in the slope	NO
Overhanging slope face	NO
Externally applied force	YES
Tension crack	NO

Seismic Data

Direction:	line of intersection J1&J2 but horizontal
Seismic coefficient:	0.014
Trend [deg]:	138.096
Plunge [deg]:	-0

Wedge Vertices

- Coordinates in Easting,Northing,Up Format
- 1=Joint1, 2=Joint2, 3=Upper Face, 4=Slope

Point	East	North	Up
124	0.000	0.000	0.000
134	-14.433	40.113	50.000
234	-31.172	30.448	50.000
123	-42.822	47.719	50.000

Gradone 150°
Cuneo K1/K4

SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis

Analysis Results

- Analysis type - Deterministic

Safety Factor	1.46994
Wedge height (on slope) [m]	15
Bench width (on upper face) [m]	13.3616
Wedge volume [m3]	415.118
Unfactored wedge weight [m]	11.0006
Wedge weight design factor (permanent unfavourable load)	1
Factored wedge weight [MN]	11.0006
Wedge area (joint1) [m2]	173.009
Wedge area (joint2) [m2]	102.006
Wedge area (slope) [m2]	99.1858
Wedge area (upper face) [m2]	83.0235

Seismic Force

Seismic Design Factor	1
Factored Seismic force [MN]	0.154009

Failure Mode

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
37.949	138.096	24.392

Trace Lengths

	Slope Face [m]	Upper Face [m]

Joint 1	18.522	18.896
Joint 2	16.248	13.394

Persistence

Joint 1 [m]	24.3921
Joint 2 [m]	24.3921

Intersection Angles

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	41.236	41.000
Joint 1 & Crest	59.523	45.000
Joint 2 & Crest	79.241	94.000

Dip and Dip Direction

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	55.000	195.000
Joint Set 2	80.000	56.000
Slope	70.000	150.000
Upper Face	0.000	150.000

Joint Set 1 Data

JRC	2.8
JCS [MPa]	72
Phir [deg]	30
Shear Strength Design Factor	1.25
Waviness Angle [deg]	0
Waviness Angle Design Factor	1.25
Factored Waviness Angle [deg]	0

Joint Set 2 Data

JRC	1.8
JCS [MPa]	67
Phir [deg]	30
Shear Strength Design Factor	1.25
Waviness Angle [deg]	0
Waviness Angle Design Factor	1.25
Factored Waviness Angle [deg]	0

Slope Data

Slope height [m]	15
Bench width [m]	21.07
Unfactored rock unit weight [MN/m3]:	0.0265
Rock unit weight design factor:	1
Factored rock unit weight [MN/m3]:	0.0265
Water pressures in the slope	NO
Overhanging slope face	NO
Externally applied force	YES
Tension crack	NO

Seismic Data

Direction:	line of intersection J1&J2 but horizontal
Seismic coefficient:	0.014
Trend [deg]:	138.096
Plunge [deg]:	-0
Seismic Design Factor:	1
Factored Seismic coefficient:	0.014

Design Standard

- Selected Type: Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3

Variable Actions: Favourable	0
Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1
Bolt tensile capacity	1.1
Seismic Coefficient	1
Water Pressure	1
Shotcrete Shear Strength	1

Wedge Vertices

- Coordinates in Easting,Northing,Up Format
- 1=Joint1, 2=Joint2, 3=Upper Face, 4=Slope

Point	East	North	Up
124	0.000	0.000	0.000
134	5.406	9.425	15.000
234	-5.357	3.212	15.000
123	-12.846	14.316	15.000

Gradone 150°
Cuneo S/K1

SWEDGE - Surface Wedge Stability Analysis

Analysis Results

- Wedge is scaled, scale factor: 0.1620
- Analysis type - Deterministic

Safety Factor	0.509033
Wedge height (on slope) [m]	2.42957
Bench width (on upper face) [m]	0.327636
Wedge volume [m3]	0.0884791
Unfactored wedge weight [m]	0.0023447
Wedge weight design factor (permanent unfavourable load)	1
Factored wedge weight [MN]	0.0023447
Wedge area (joint1) [m2]	0.573043
Wedge area (joint2) [m2]	0.687136
Wedge area (slope) [m2]	0.862152
Wedge area (upper face) [m2]	0.109253

Seismic Force

Seismic Design Factor	1
Factored Seismic force [MN]	3.28257e-005

Failure Mode

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
54.999	194.572	2.966

Trace Lengths

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.723	0.472
Joint 2	3.000	0.463

Persistence

Joint 1 [m]	2.96599
Joint 2 [m]	3

Intersection Angles

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	12.185	91.000
Joint 1 & Crest	108.292	44.000
Joint 2 & Crest	59.523	45.000

Dip and Dip Direction

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	89.000	106.000
Joint Set 2	55.000	195.000
Slope	70.000	150.000
Upper Face	0.000	150.000

Joint Set 1 Data

JRC	4.6
JCS [MPa]	28
Phir [deg]	30
Shear Strength Design Factor	1.25
Waviness Angle [deg]	0
Waviness Angle Design Factor	1.25
Factored Waviness Angle [deg]	0

Joint Set 2 Data

JRC	2.8
JCS [MPa]	72
Phir [deg]	30
Shear Strength Design Factor	1.25
Waviness Angle [deg]	0
Waviness Angle Design Factor	1.25
Factored Waviness Angle [deg]	0

Slope Data

Slope height [m]	15
Unfactored rock unit weight [MN/m3]:	0.0265
Rock unit weight design factor:	1
Factored rock unit weight [MN/m3]:	0.0265
Water pressures in the slope	NO
Overhanging slope face	NO
Externally applied force	YES
Tension crack	NO

Seismic Data

Direction:	line of intersection J1&J2 but horizontal
Seismic coefficient:	0.014
Trend [deg]:	194.572
Plunge [deg]:	-0
Seismic Design Factor:	1
Factored Seismic coefficient:	0.014

Design Standard

- Selected Type: Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2

Type	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1
Permanent Actions: Favourable	1
Variable Actions: Unfavourable	1.3
Variable Actions: Favourable	0

Effective cohesion	1.25
Coefficient of shearing resistance	1.25
Weight density	1
Shear strength (other models)	1.25
Earth resistance	1
Bolt tensile capacity	1.1
Seismic Coefficient	1
Water Pressure	1
Shotcrete Shear Strength	1

Wedge Vertices

- Coordinates in Easting,Northing,Up Format
- 1=Joint1, 2=Joint2, 3=Upper Face, 4=Slope

Point	East	North	Up
124	0.000	0.000	0.000
134	0.298	1.193	2.430
234	0.876	1.527	2.430
123	0.428	1.647	2.430

Scaling

Trace Lengths	
Joint 1 Scaling	16.8122 m
Joint 2 Scaling	3 m

Sezione D-D'

Slide Analysis Information

Analysis Methods

Analysis Methods used:
Bishop simplified
GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine
Lowe-Karafiath
Spencer

Number of slices: 25
Tolerance: 0.005
Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular
Search Method: Grid Search
Radius increment: 10
Composite Surfaces: Disabled
Reverse Curvature: Create Tension Crack
Minimum Elevation: Not Defined
Minimum Depth: 1

Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.026
Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.013

Material Properties

Material: limi lavaggio
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 16.4 kN/m3
Cohesion: 0 kPa
Friction Angle: 26.6 degrees
Water Surface: Piezometric Line 1
Custom Hu value: 1

Material: substrato dolomitico
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 26.5 kN/m3
Cohesion: 250 kPa
Friction Angle: 30 degrees
Water Surface: None

Material: terre e rocce scavo
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 17 kN/m3
Cohesion: 0 kPa
Friction Angle: 32.9 degrees

Water Surface: Piezometric Line 1
Custom Hu value: 1

Global Minimums

Method: bishop simplified
FS: 1.119920
Center: 267.432, 277.890
Radius: 133.056
Left Slip Surface Endpoint: 177.346, 179.968
Right Slip Surface Endpoint: 258.207, 145.154
Resisting Moment=511831 kN-m
Driving Moment=457025 kN-m

Method: spencer
FS: 1.119840
Center: 267.432, 277.890
Radius: 133.056
Left Slip Surface Endpoint: 177.346, 179.968
Right Slip Surface Endpoint: 258.207, 145.154
Resisting Moment=511795 kN-m
Driving Moment=457025 kN-m
Resisting Horizontal Force=3499.69 kN
Driving Horizontal Force=3125.17 kN

Method: lowe-karafiath
FS: 1.118460
Center: 267.432, 277.890
Radius: 133.056
Left Slip Surface Endpoint: 177.346, 179.968
Right Slip Surface Endpoint: 258.207, 145.154
Resisting Horizontal Force=3495.57 kN
Driving Horizontal Force=3125.35 kN

Method: gle/morgenstern-price
FS: 1.120240
Center: 256.815, 277.890
Radius: 132.723
Left Slip Surface Endpoint: 158.247, 189.009
Right Slip Surface Endpoint: 258.170, 145.174
Resisting Moment=879786 kN-m
Driving Moment=785354 kN-m
Resisting Horizontal Force=6039.92 kN
Driving Horizontal Force=5391.63 kN

Valid / Invalid Surfaces

Method: bishop simplified
Number of Valid Surfaces: 4421
Number of Invalid Surfaces: 430
Error Codes:
Error Code -103 reported for 6 surfaces
Error Code -105 reported for 1 surface
Error Code -106 reported for 21 surfaces
Error Code -115 reported for 72 surfaces
Error Code -1000 reported for 330 surfaces

Method: spencer
Number of Valid Surfaces: 4334
Number of Invalid Surfaces: 517
Error Codes:
Error Code -103 reported for 6 surfaces
Error Code -105 reported for 1 surface
Error Code -106 reported for 21 surfaces
Error Code -108 reported for 31 surfaces
Error Code -111 reported for 56 surfaces
Error Code -115 reported for 72 surfaces
Error Code -1000 reported for 330 surfaces

Method: lowe-karafiath
Number of Valid Surfaces: 4225
Number of Invalid Surfaces: 626
Error Codes:
Error Code -103 reported for 6 surfaces
Error Code -105 reported for 1 surface
Error Code -106 reported for 21 surfaces
Error Code -108 reported for 147 surfaces
Error Code -111 reported for 49 surfaces
Error Code -115 reported for 72 surfaces
Error Code -1000 reported for 330 surfaces

Method: gle/morgenstern-price
Number of Valid Surfaces: 4336
Number of Invalid Surfaces: 515
Error Codes:
Error Code -103 reported for 6 surfaces
Error Code -105 reported for 1 surface
Error Code -106 reported for 21 surfaces
Error Code -108 reported for 31 surfaces
Error Code -111 reported for 54 surfaces
Error Code -115 reported for 72 surfaces
Error Code -1000 reported for 330 surfaces

Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

-103 = Two surface / slope intersections,
but one or more surface / nonslope external polygon
intersections lie between them. This usually occurs
when the slip surface extends past the bottom of the
soil region, but may also occur on a benched
slope model with two sets of Slope Limits.

-105 = More than two surface / slope
intersections with no valid slip surface.

-106 = Average slice width is less than
0.0001 * (maximum horizontal extent of soil region).
This limitation is imposed to avoid numerical errors
which may result from too many slices, or too
small a slip region.

-108 = Total driving moment

or total driving force < 0.1. This is to limit the calculation of extremely high safety factors if the driving force is very small (0.1 is an arbitrary number).

-111 = safety factor equation did not converge

-115 = Surface too shallow, below the minimum depth.

-1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

List of All Coordinates

Search Grid

108.177	277.890
320.516	277.890
320.516	490.230
108.177	490.230

Material Boundary

131.218	144.815
236.841	144.839
244.506	144.841
258.783	144.844

Material Boundary

24.566	234.943
27.357	230.022
33.146	219.812
44.862	219.812
55.972	199.725
80.010	199.725
85.565	189.632
93.443	189.632
98.898	174.592
106.776	174.592
112.533	159.653
123.340	159.653
131.218	144.815

Material Boundary

42.043	234.951
42.043	232.248
47.862	232.248
47.862	229.805
53.609	229.805
53.609	227.291
59.284	227.291
59.284	224.777
64.888	224.777
64.888	222.334
71.066	222.334
71.066	219.820
76.814	219.820
76.814	217.305

82.561	217.305
82.561	214.863
88.236	214.863
88.236	212.348
94.055	212.420
94.055	209.834
100.090	209.834
100.090	207.319
105.334	207.319
105.334	204.805
111.154	204.805
111.154	202.362
116.757	202.362
116.757	199.776
122.648	199.776
122.648	197.333
128.898	197.333
128.922	194.763
134.430	194.763
134.430	192.288
140.417	192.368
140.417	189.734
146.244	189.734
146.244	187.339
151.832	187.339
151.832	184.785
158.058	184.785
158.058	182.311
163.406	182.311
163.406	179.756
169.552	179.756
169.552	177.122
175.858	177.122
175.858	174.727
181.366	174.727
181.366	172.333
186.635	172.413
186.635	169.778
192.541	169.858
192.541	167.304
198.528	167.304
198.528	164.829
203.797	164.829
203.797	162.355
209.624	162.355
209.624	159.800
215.531	159.800
215.531	157.326
221.278	157.326
221.278	154.772
227.185	154.772
227.185	152.377
233.172	152.377
233.172	149.822
238.999	149.822
238.999	147.268
244.506	147.268

244.506	144.841

External Boundary

0.186	119.797
278.459	119.797
278.478	144.854
258.783	144.844
249.447	149.864
246.547	149.864
226.241	160.022
223.365	160.022
204.796	169.908
201.449	169.908
179.954	179.943
177.400	179.943
156.252	189.953
153.550	189.953
133.233	199.855
130.188	199.855
109.989	209.874
108.006	209.874
87.700	219.909
85.667	219.909
64.148	229.894
61.891	229.894
49.991	234.954
42.043	234.951
24.566	234.943
16.363	234.940
7.228	249.965
0.099	249.965

Piezo Line

24.566	234.943
33.146	219.812
44.862	219.812
55.972	199.725
80.010	199.725
85.565	189.632
93.443	189.632
98.898	174.592
106.776	174.592
112.533	159.653
123.340	159.653
126.474	153.750
251.904	148.543
254.229	147.293
258.783	144.844

Sezione E-E'

Slide Analysis Information

Analysis Methods

Analysis Methods used:
Bishop simplified
GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine
Lowe-Karafiath
Spencer

Number of slices: 25
Tolerance: 0.005
Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular
Search Method: Grid Search
Radius increment: 10
Composite Surfaces: Disabled
Reverse Curvature: Create Tension Crack
Minimum Elevation: Not Defined
Minimum Depth: 1

Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.026
Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.013

Material Properties

Material: terre e rocce scavo
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 17 kN/m3
Cohesion: 0 kPa
Friction Angle: 32.9 degrees
Water Surface: Piezometric Line 1
Custom Hu value: 1

Material: substrato dolomitico
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 27 kN/m3
Cohesion: 250 kPa
Friction Angle: 30 degrees
Water Surface: None

Global Minimums

Method: bishop simplified
FS: 1.144920
Center: 280.249, 323.406
Radius: 110.154
Left Slip Surface Endpoint: 222.349, 229.697

Right Slip Surface Endpoint: 237.159, 222.030
Resisting Moment=12602.7 kN-m
Driving Moment=11007.4 kN-m

Method: spencer
FS: 1.144280
Center: 280.249, 323.406
Radius: 110.154
Left Slip Surface Endpoint: 222.349, 229.697
Right Slip Surface Endpoint: 237.159, 222.030
Resisting Moment=12595.6 kN-m
Driving Moment=11007.4 kN-m
Resisting Horizontal Force=100.948 kN
Driving Horizontal Force=88.2196 kN

Method: lowe-karafiath
FS: 1.145100
Center: 280.249, 323.406
Radius: 110.154
Left Slip Surface Endpoint: 222.349, 229.697
Right Slip Surface Endpoint: 237.159, 222.030
Resisting Horizontal Force=100.965 kN
Driving Horizontal Force=88.1714 kN

Method: gle/morgenstern-price
FS: 1.144330
Center: 280.249, 323.406
Radius: 110.154
Left Slip Surface Endpoint: 222.349, 229.697
Right Slip Surface Endpoint: 237.159, 222.030
Resisting Moment=12596.2 kN-m
Driving Moment=11007.4 kN-m
Resisting Horizontal Force=100.949 kN
Driving Horizontal Force=88.2163 kN

Valid / Invalid Surfaces

Method: bishop simplified
Number of Valid Surfaces: 4708
Number of Invalid Surfaces: 143
Error Codes:
Error Code -103 reported for 12 surfaces
Error Code -106 reported for 6 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces

Method: spencer
Number of Valid Surfaces: 4698
Number of Invalid Surfaces: 153
Error Codes:
Error Code -103 reported for 12 surfaces
Error Code -106 reported for 6 surfaces
Error Code -108 reported for 1 surface
Error Code -111 reported for 9 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces

Method: lowe-karafiath
Number of Valid Surfaces: 4653

Number of Invalid Surfaces: 198
Error Codes:
Error Code -103 reported for 12 surfaces
Error Code -106 reported for 6 surfaces
Error Code -108 reported for 38 surfaces
Error Code -111 reported for 17 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces

Method: gle/morgenstern-price
Number of Valid Surfaces: 4697
Number of Invalid Surfaces: 154
Error Codes:
Error Code -103 reported for 12 surfaces
Error Code -106 reported for 6 surfaces
Error Code -108 reported for 1 surface
Error Code -111 reported for 10 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces

Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

-103 = Two surface / slope intersections,
but one or more surface / nonslope external polygon
intersections lie between them. This usually occurs
when the slip surface extends past the bottom of the
soil region, but may also occur on a benched
slope model with two sets of Slope Limits.

-106 = Average slice width is less than
0.0001 * (maximum horizontal extent of soil region).
This limitation is imposed to avoid numerical errors
which may result from too many slices, or too
small a slip region.

-108 = Total driving moment
or total driving force < 0.1. This is to
limit the calculation of extremely high safety
factors if the driving force is very small
(0.1 is an arbitrary number).

-111 = safety factor equation did not converge

-115 = Surface too shallow, below the minimum depth.

List of All Coordinates

Search Grid

113.539	323.406
321.926	323.406
321.926	531.793
113.539	531.793

Material Boundary

25.527	279.960
31.522	269.993

37.630	269.993
41.550	268.958
45.919	268.974
59.589	249.907
71.660	249.907
83.585	234.770
97.110	234.770
110.399	219.881
129.801	219.881
145.392	199.692
243.411	199.983
247.039	209.878
252.864	209.881
257.051	219.996

External Boundary

0.267	180.018
85.058	179.901
269.134	179.917
269.124	200.124
261.532	219.995
257.051	219.996
247.974	219.999
245.882	220.930
238.962	220.937
224.509	229.697
220.071	229.697
210.026	234.723
204.862	234.719
186.785	241.854
182.116	241.862
165.645	249.919
160.451	249.907
148.593	256.932
142.871	256.932
128.694	264.916
123.143	264.916
109.069	273.069
103.858	273.069
89.511	279.960
25.527	279.960
9.522	289.917
7.625	292.000
2.019	294.104
0.267	294.104

Piezo Line

25.527	279.960
31.522	269.993
37.630	269.993
41.550	268.958
45.919	268.974
59.589	249.907
71.660	249.907
83.585	234.770
97.110	234.770
104.326	226.685

238.962	220.937
245.882	220.930
247.974	219.999
257.051	219.996