

Ingegnere Marco Berlinghieri

Via Roma 7, Carrara (MS)

340.8330858

berlinghieri.m@gmail.com

linkedin.com/in/marco-berlinghieri/

01375150453

BRLMRC90A17A479Q



P.I.

C.F.

Regione Toscana

Comune di Carrara (MS)

Relazione geomeccanica di stabilità

Cava di marmo n. 64 “La Madonna” – Bacino di Torano

Ditta:

Cave di Sponda S.r.l.

Via Genova, 42

54033 Carrara (MS)

Protocollo:	File:	Formato:	Totale pagine:	Il Tecnico:
0917/BB02/25	Relazione Geomeccanica di Stabilità.doc	Fronte retro A4	64	Ing. Marco Berlinghieri
Allegati:	Allegato A - Valutazione dell'azione sismica Allegato B - Caratteristiche tecniche elementi di rinforzo per il consolidamento Allegato C – Sistema di ventilazione della galleria			

Revisione:	Data:	Descrizione:
0	Settembre 2025	Prima emissione
1		
2		

A termine di legge si riserva la proprietà di questo elaborato con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 2 di 64

Sommario

1.	Premessa.....	3
2.	Rilievo geomeccanico	3
3.	Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso.....	6
	a) Classificazione mediante RMR	6
	b) Determinazione dei parametri di resistenza e deformabilità per l'ammasso roccioso.....	7
	c) Parametri geomeccanici di progetto	8
4.	Analisi di stabilità	11
	a) Verifica dei possibili cinematismi sviluppabili sui fronti in avanzamento	12
	b) Verifica dei possibili blocchi sviluppabili a tetto	22
	c) Verifica degli elementi di sostegno	25
	d) Analisi tensionale e deformativa della porzione di sotterraneo	28
5.	Strumentazione di monitoraggio strutturale.....	47
6.	Conclusioni	49
	Allegato A - Valutazione dell'azione sismica.....	50
	Allegato B - Caratteristiche tecniche elementi di rinforzo per il consolidamento	54
	Allegato C – Sistema di ventilazione della galleria.....	58
	a) Introduzione ed obiettivo della valutazione	59
	b) Dimensionamento del sistema di ventilazione	59

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 3 di 64

1. Premessa

Il presente elaborato è parte integrante del progetto di escavazione redatto per la cava n° 64 "La Madonna" esercitata dalla società "Cave di Sponda S.r.l.".

Il progetto che risulta essere la prosecuzione di quanto sino ad oggi autorizzato, così da consentire il regolare proseguo delle coltivazioni previste per i prossimi anni.

L'analisi di stabilità è stata condotta andando a determinare e verificare i possibili fenomeni di instabilità che si potrebbero venire a creare lungo i fronti di progetto e tetto del cantiere sotterraneo.

I rilievi geomeccanici necessari per la reazione dell'elaborato sono stati eseguiti direttamente nei settori interessati, eseguendo l'aggiornamento della carta delle fratture, redatta con lo scopo di mappare le principali strutture nell'area di cava.

I dati sperimentali raccolti nei rilievi sono stati confrontati con quelli presenti in bibliografia o raccolti durante passate campagne di indagine presso la cava.

2. Rilievo geomeccanico

Sono stati redatti specifici rilievi, condotti nella primavera 2025, finalizzati al controllo dei dati raccolti nel passato e all'aggiornamento dello stato di fratturazione complessivo dell'area della cava n.64 "La Madonna".

I dati ricavati sono stati trattati statisticamente ed esaminati mediante lo stereogramma di Schmidt per valutare le principali famiglie di discontinuità che interessano l'area.

Dopo aver definito i parametri geometrici dell'ammasso roccioso si sono valutate le caratteristiche geomeccaniche, e le resistenze mobilitabili sui giunti.

Sono stati raccolti dati sperimentali mediante saggi condotti mediante il pettine di Barton e martello di Schmidt, su alcune discontinuità individuate durante il rilievo e ritenute più importanti da un punto di vista statico. È stata inoltre valutato l'indice di resistenza mediante alcune prove di punzonamento (point load test) su alcuni campioni di dimensione irregolare raccolti.

Il coefficiente JRC si ottiene confrontandolo i profili tipo riportati nelle raccomandazioni ISRM con quelli ottenuti sperimentalmente, mentre invece il parametro JCS si ottiene dalle letture mediante sclerometro, opportunamente corrette in base alla posizione del martello durante

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 4 di 64

l'esecuzione della prova e poi mediante la formula di seguito riportata (eq n°1) la quale definisce il coefficiente JCS.

$$\log(JCS) = 8,8 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma \cdot R + 1,01 \quad (1)$$

Nella figura seguente si riporta lo stereogramma di Schmidt relativo alle discontinuità rilevate durante gli stendimenti geostrutturali.

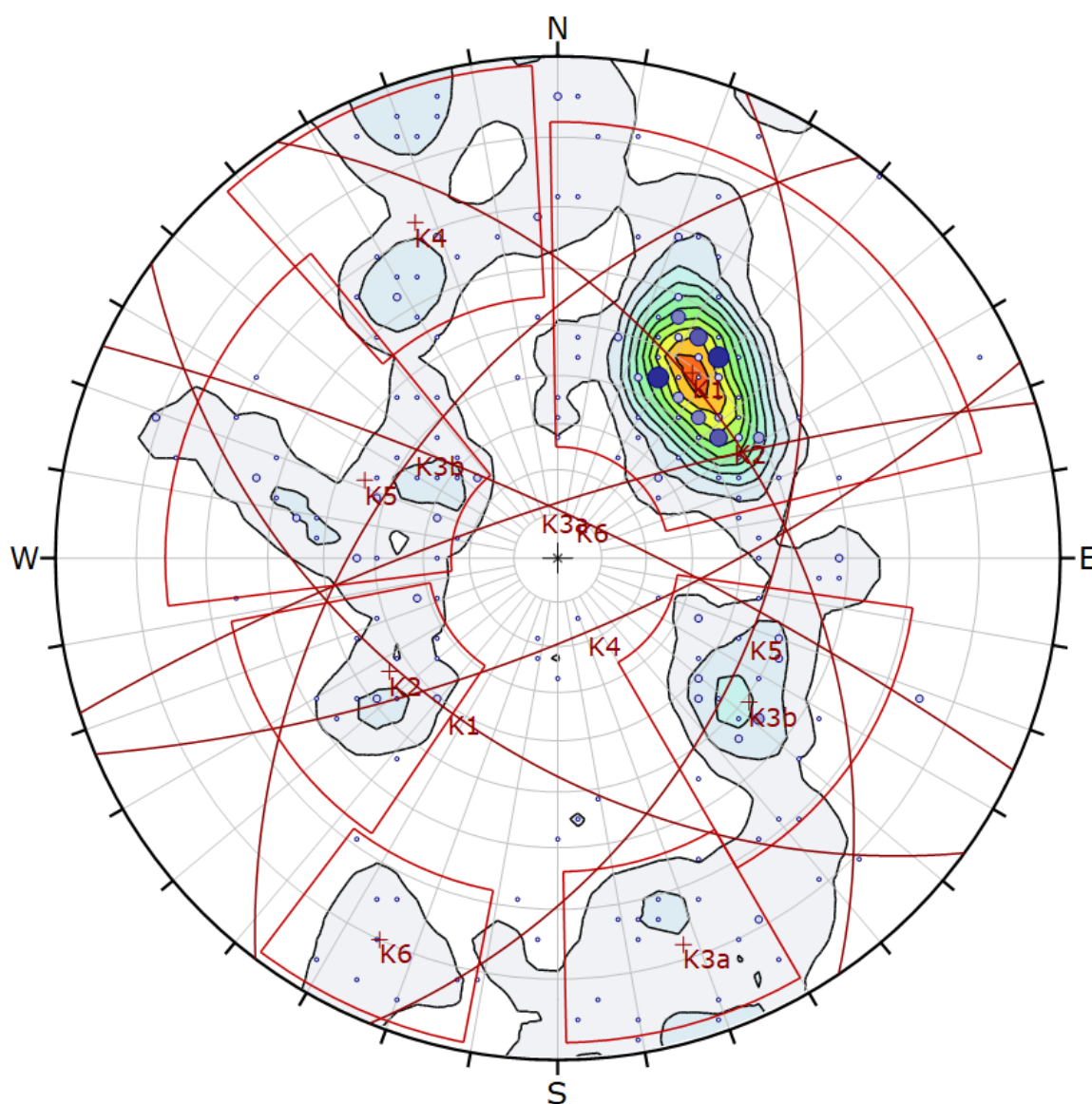


Figura 1 - stereogramma di Schmidt con rappresentazione dei poli delle giaciture rilevate mediante curve isodensità e sovrapposizione delle principali famiglie di discontinuità

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 5 di 64

Le fratture più frequenti risultano essere quelle con immersione verso SudOvest, chiamate K1. Le giacitura della scistosità principale che definisce il verso di macchia coincide con le discontinuità appartenenti alla famiglia K1.

In numero minore risultano le discontinuità con immersione verso NordOvest e le loro antipodali che immergono a SudEst, rispettivamente K3 e K4,K5.

L'elaborazione dei dati riguardanti la giacitura delle discontinuità ha permesso di individuare la densità di frequenza per ogni famiglia di discontinuità, questa è riassunta nella seguente tabella.

Tabella 1 - giacitura delle famiglie individuate

Famiglia di discontinuità	Dip [°]	Dip Dir [°]	f [%]
K1	49	216	37,8
K2	44	056	6,8
K3_a	78	342	6,0
K3_b	51	307	10,8
K4	72	157	7,2
K5	45	112	13,2
K6	80	025	3,2

I parametri geomeccanici caratteristici delle discontinuità che valutati per le singole famiglie di discontinuità sono stati riassunti nella seguente tabella, dove viene riportata spaziatura, continuità, scabrezza, resistenza di parete, apertura, riempimento e presenza d'acqua.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 6 di 64

Tabella 2 – parametri geomeccanici caratteristici delle individuate

Famiglia di discontinuità	Spaziatura	Continuità	Scabrezza [JRC]	Resistenza di parete [JCS]	Apertura	Riempimento	Presenza d' acqua
K1	2 - 6 m	> 20 m	6-8	42	1-5 mm	Mat. Alterato	-
K2	10 - 20 m	3 -10 m	8-10	46	0-1 mm	-	-
K3_a	10 - 20 m	10-20 m	8-10	42	1-5 mm	-	-
K3_b	6 - 10 m	10-20 m	6-8	40	1-5 mm	-	-
K4	10 - 20 m	3 -10 m	4-6	44	0-1 mm	-	-
K5	6 - 10 m	3 -10 m	6-8	40	0-1 mm	-	-
K6	> 20 m	10-20 m	2-4	38	0-1 mm	-	-

3. Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso

Sulla base dei risultati raccolti dai rilievi geostrutturali, si procede alla determinazione dell'indice di classificazione RMR, che rappresenta una stima quantitativa dei parametri che caratterizzano l'ammasso roccioso presente nel versante.

La classificazione è stata fatta applicando formule empiriche che permettono la valutazione dei parametri di resistenza in relazione al valore di alcuni indici di qualità.

a) Classificazione mediante RMR

Il metodo RMR, introdotto da Bieniawski (1973), prevede la definizione di sei parametri:

P1 – resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;

P2 – recupero percentuale modificato RQD;

P3 – spaziatura delle discontinuità;

P4 – condizioni delle discontinuità;

P6 – orientazione delle discontinuità in rapporto alla direzione di scavo.

La somma degli indici associati ai primi cinque parametri fornisce il valore del cosiddetto RMR "di base", caratteristico dell'ammasso analizzato. Al valore dell'RMR di base viene poi

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 7 di 64

sottratto un punteggio legato alla valutazione dell'influenza della giacitura dei sistemi di discontinuità principali sull'opera per la quale si esegue la classificazione.

b) Determinazione dei parametri di resistenza e deformabilità per l'ammasso roccioso

Mediante l'ausilio del codice di calcolo Rocdata (Rocscience, 1991), che consente di interpolare direttamente i dati sperimentali e valori presenti in letteratura con il metodo della regressione lineare o della riflessione semplice, si sono stimati i parametri di resistenza caratteristici della roccia secondo i criteri di Hoek – Brown (σ_{ci} , m_i e σ_t) e di Mohr – Coulomb (c e ϕ). I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

Tabella 3. Valutazione dei parametri per l'indice RMR

P ₁	Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (σ _{ci}) in MPa		100-200
	Coefficiente numerico		12
P ₂	Recupero percentuale modificato (RQD)		90-100
	Coefficiente numerico		20
P ₃	Spaziatura delle discontinuità		0,6-2 m
	Coefficiente numerico		15
P ₄	Condizioni delle discontinuità	Continua	3-10 m
			2
		Aperta	1 - 5 mm
			1
		Scabrezza	Poco scabri
			3
		Riempimento	Soffice
			2
		Alterazione	Debolmente alterati
5			
P ₅	Venute d'acqua		Nessuna venuta d'acqua
	Coefficiente numerico		15
P ₆	Orientazione delle discontinuità		Direzione parallela all'asse della galleria
	Coefficiente numerico		-5
RMR			70

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 8 di 64

In relazione al valore di RMR ottenuto, l'ammasso roccioso viene suddiviso in cinque classi di qualità come indicato nella seguente tabella.

Tabella 4. Classi di qualità dell'ammasso roccioso in base all'indice RMR

Classi	I	II	III	IV	V
Descrizione	Ottima	Buona	Discreta	Scadente	Molto scadente
RMR	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20

Otteniamo un valore di RMR pari a 70 che ci fornisce una qualità della roccia "Buona – Classe II".

c) Parametri geomeccanici di progetto

I dati raccolti nella campagna di caratterizzazione dell'ammasso roccioso hanno permesso di stimare i seguenti parametri geomeccanici:

Tabella 5 - Parametri di deformabilità e resistenza della roccia intatta

Resistenza a compressione σ_{ci} (MPa)	GSI (-)	Parametro resistenza m_i (-)	Fattore disturbo D (-)
100	65	8	0

Per quanto riguarda l'ammasso roccioso ammasso si sono stimati i seguenti parametri geomeccanici:

Tabella 6 - Parametri di deformabilità e resistenza dell'ammasso roccioso

Hoek-Brown Criterion			Mohr-Coulomb Fit		Rock Mass Parameters			
m_b (-)	s (-)	a (-)	c (MPa)	φ (°)	E (MPa)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	σ_{cm} (MPa)
2.292	0.0205	0.502	2.146	54.13	34745	14.197	-0.893	22.525

Per l'ammasso roccioso in esame, caratterizzato da limitate pressioni di confinamento, verrà adoperato il criterio di rottura di Hoek Brown, definito da:

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 9 di 64

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2)$$

dove σ_1 e σ_3 sono rispettivamente la tensione principale massima e minima a rottura, m_b , s e a sono parametri determinate in funzione alle caratteristiche dell'ammasso roccioso.

Per le discontinuità in esame, verrà adoperato il criterio di rottura di Barton-Bandis, definito da:

$$\tau = \sigma \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) + \varphi_b \right] \quad (3)$$

dove τ è la resistenza di taglio (valore di picco), σ lo sforzo normale, JRC il coefficiente di scabrezza, JCS la resistenza a compressione sulla parete del giunto e φ_b l'angolo di attrito di base. I parametri caratteristici utilizzati sono i seguenti:

Tabella 7 - Parametri di deformabilità e resistenza delle superfici di discontinuità

Peso specifico materiale Uwr [t/m3]	Resistenza a compressione sulla parete del giunto JCS [t/m2]	Coefficiente di scabrezza JRC [-]	Angolo di attrito di base φ_b [°]
2,70	11600	7	30,0

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 10 di 64

Major and Minor Principal Stresses

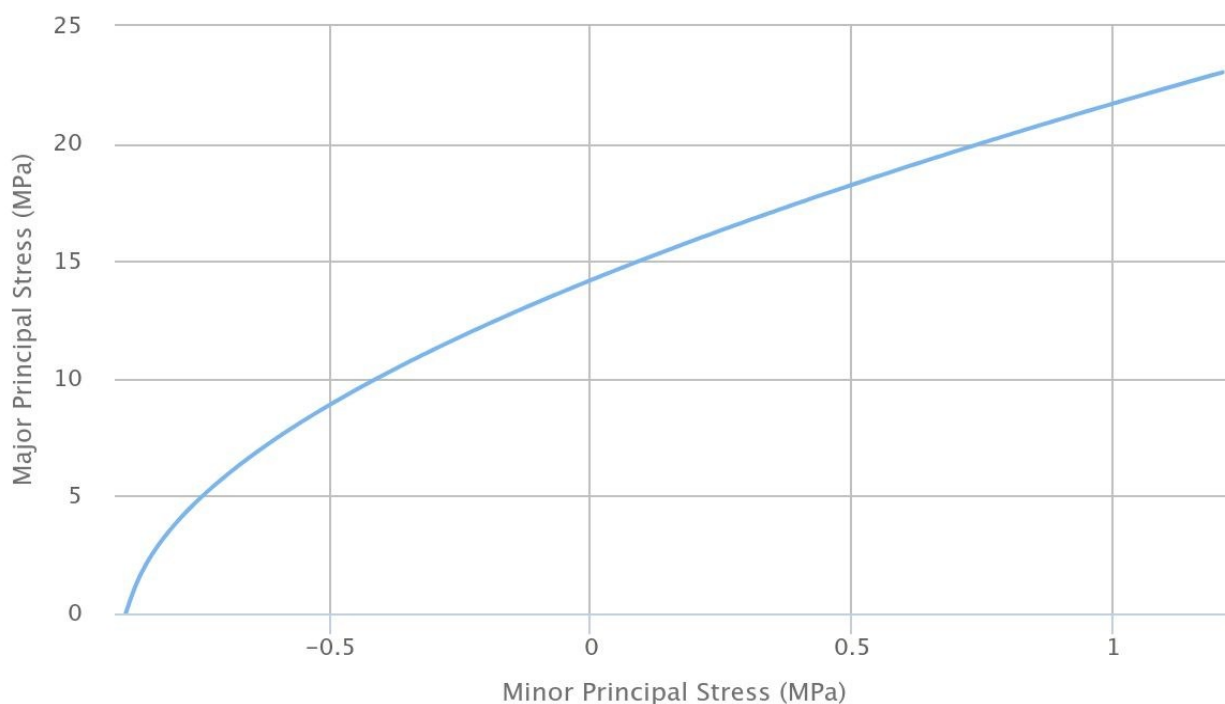


Figura 2 – analisi della resistenza dell'ammasso roccioso – grafico sforzo massimo e minimo criterio di rottura Hoek e Brown

Shear and Normal Stresses

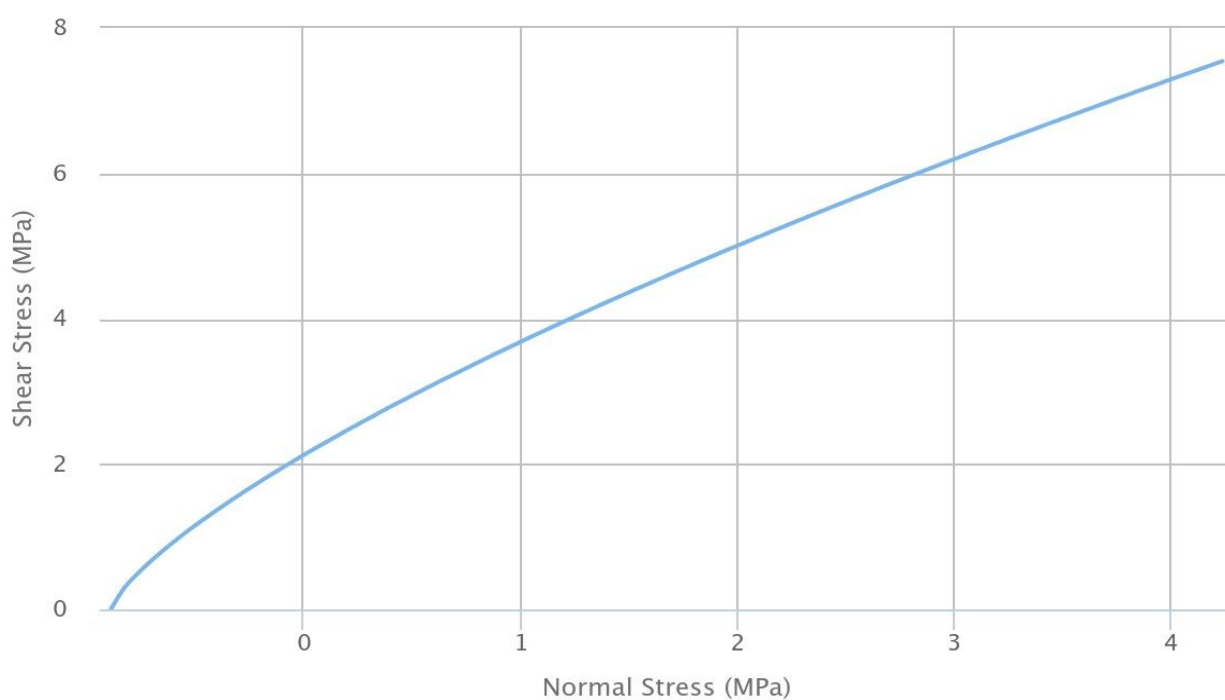


Figura 3 – analisi della resistenza dell'ammasso roccioso – grafico sforzo di taglio e tangenziale criterio di rottura Mohr-Coulomb

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 11 di 64

4. Analisi di stabilità

In seguito alla valutazione dei parametri geometrici e geomeccanici del contesto in esame si riporta nel presente capitolo la descrizione dell'analisi di stabilità condotta nel sito in esame.

Si fa riferimento in questo elaborato alle recenti disposizioni imposte dal Legislatore che prevedono l'applicazione delle "norme tecniche per le costruzioni", nelle quali un capitolo è dedicato alla progettazione geotecnica. Tali disposizioni definiscono l'uso di un metodo semi-probabilistico per la definizione del fattore di sicurezza.

Come noto, tale normativa recepisce i criteri di progettazione contenuti negli Eurocodici e sostanzialmente si basa sull'applicazione del concetto di "stato limite" e non più di "tensione ammissibile".

Le equazioni corrispondenti alla metodologia di calcolo introdotta sono:

$$E_d \leq R_d \quad (4)$$

dove

$$E_d = E \left(\gamma_F \cdot F_K; \frac{X_K}{\gamma_m}; a_d \right) \quad (5)$$

dove $\gamma_F \cdot F_K; \frac{X_K}{\gamma_m}; a_d$ sono parametri di progetto mentre a_d è un coefficiente che definisce la geometria di progetto.

Lo stesso discorso può essere applicato alle "resistenze" ovvero:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left(\gamma_F \cdot F_K; \frac{X_K}{\gamma_R}; a_d \right) \quad (6)$$

dove in questo caso γ_R è un coefficiente di riduzione del parametro.

Il suddetto metodo è anche detto "dei coefficienti parziali"; i relativi indici sono riportati nelle tabelle di seguito. Tali indici sono riduttivi o maggiorativi a seconda dell'azione presa in considerazione. Questi coefficienti vanno in pratica a "coprire" parte delle incertezze sul modello e sui parametri sperimentali adottati durante il calcolo. Di seguito si riportano le tabelle contenenti i coefficienti maggiorativi, presenti nelle NTC'18.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 12 di 64

Tabella 8 - coefficienti parziali per le azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

Tabella 9 - coefficienti parziali per le resistenze (in questo caso parametri geotecnici o geomeccanici)

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Pertanto, dopo aver opportunamente corretto i carichi o i parametri di resistenza dall'equazione 4 oppure 5, si evince l'espressione del F.S., che sarà espresso come segue:

$$F_s \geq 1 \quad (7)$$

Il metodo di calcolo appena descritto è più cautelativo di quello basato sul metodo delle tensioni ammissibili.

Per tale motivo si vuole procedere alla verifica di stabilità di alcune porzioni di roccia potenzialmente rimuovibili e valutarne la condizione statica nelle condizioni di Stato Limite Ultimo (SLU), tenendo conto anche degli effetti dinamici dovuti all'eventuale azione di un sisma. Questi ultimi parametri sono stati desunti dalla specifica normativa e riportati in allegato.

a) Verifica dei possibili cinematismi sviluppabili sui fronti in avanzamento

La valutazione dei possibili cinematismi è stata condotta individuando dapprima la configurazione della fratturazione naturale dell'ammasso roccioso e successivamente esaminando l'interferenza di queste sulla geometria dei fronti esistenti.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 13 di 64

In base al metodo di calcolo denominato del blocco chiave, sviluppata da Goodman e Shi (1985), quali potrebbero essere le tipologie di cinatismi generabili dalla intersezione tra le famiglie di discontinuità desunte dall'analisi statistica e i fronti artificiali generati dalla coltivazione del giacimento. Dopodiché valuteremo singolarmente le condizioni di quei cunei ritenuti potenzialmente rimovibili dalla loro sede in base ai sopralluoghi congiunti tra il Direttore Responsabile e il personale sorvegliante.

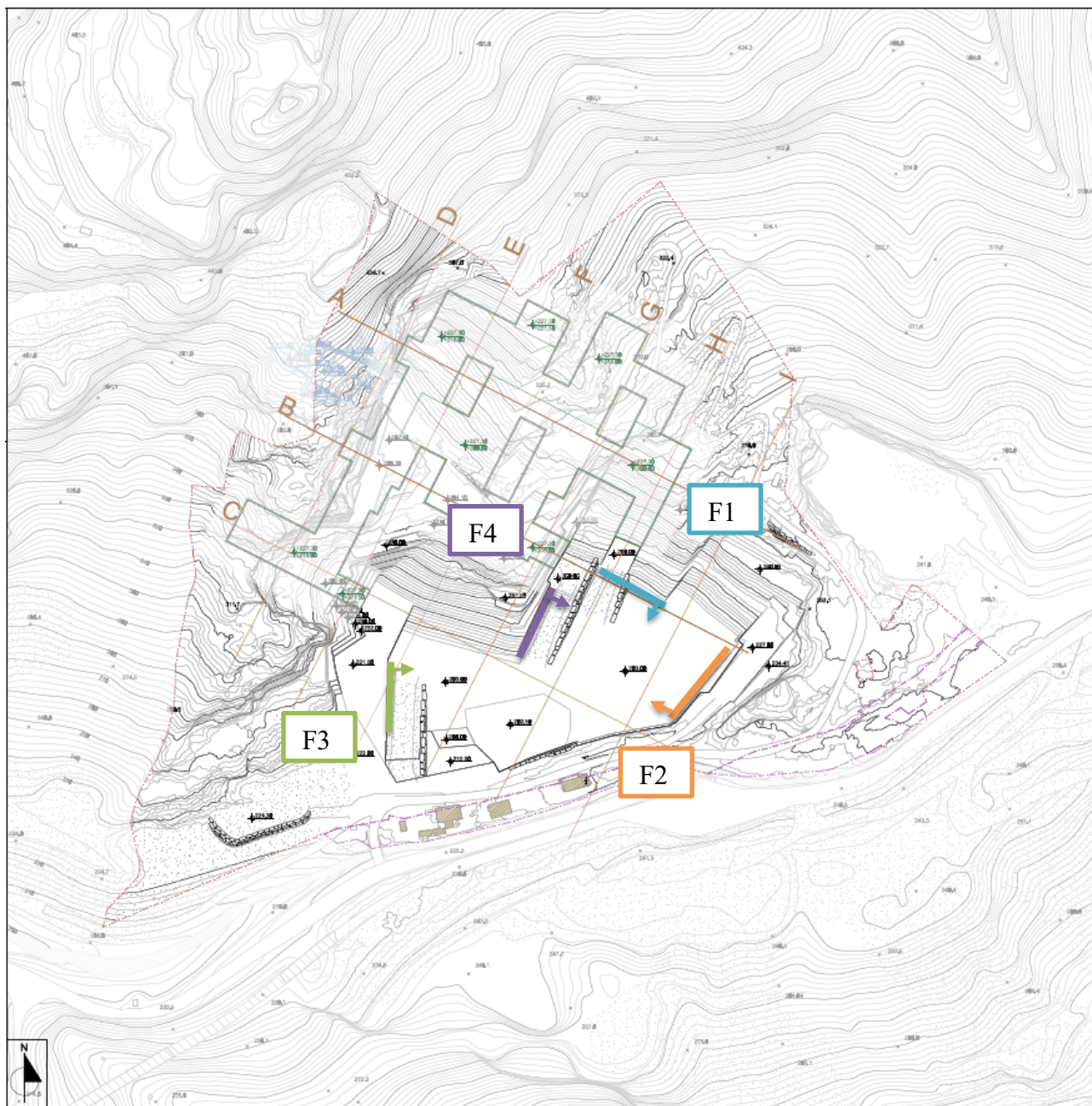


Figura 4 – stralcio della planimetria in progetto della cava n. 64 "La Madonna", con in evidenza i fronti di coltivazione ricorrenti nella coltivazione (F1: azzurro, F2: arancione, F3: verde, F4: viola)

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 14 di 64

La figura precedente mostra un dettaglio della planimetria della cava, dalla quale si può evincere la geometria ricorrente dei fronti di coltivazione F1, F2, F3 e F4, adottati nel cantiere a cielo aperto.

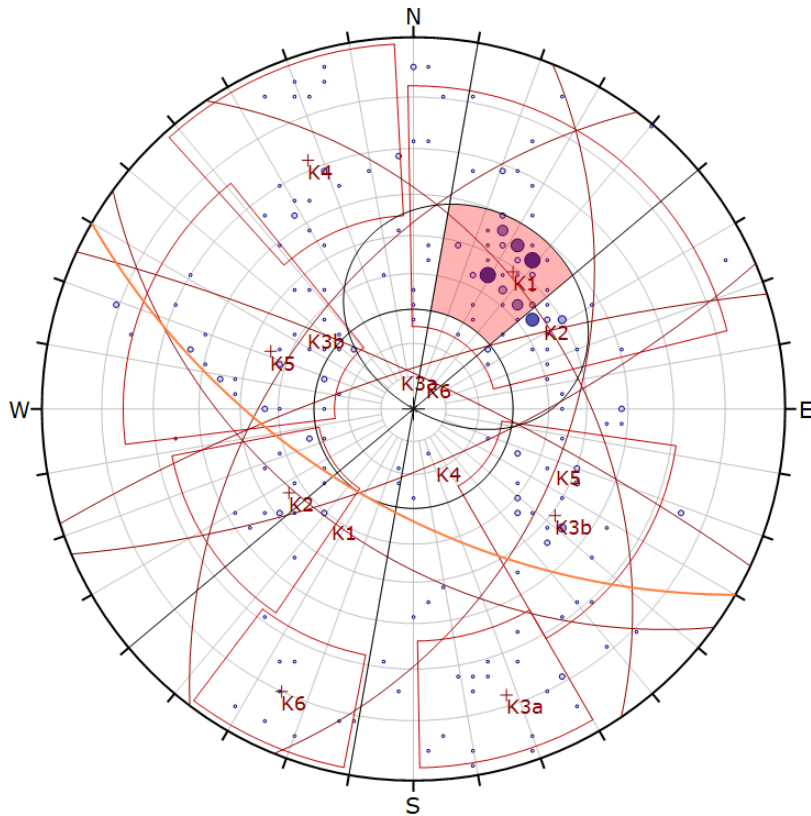
Dai fronti analizzati risultano essere quattro le direzioni principali di avanzamento, così come riassunto in tabella:

Tabella 10 - orientazione fronti di avanzamento principali

	F 1	F 2	F 3	F 4
DIP DIR [°]	210°	310°	095°	120°
DIP [°]	60°	90°	90°	90°

Nelle figure seguenti si riportano gli stereogrammi dei cinematismi individuati sui fronti F1, F2, F3 e F4.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 15 di 64



Symbol	Scatter
•	1 Pole Vectors
•	2 Pole Vectors
•	3 Pole Vectors
•	4 Pole Vectors
•	5 Pole Vectors
•	6 Pole Vectors

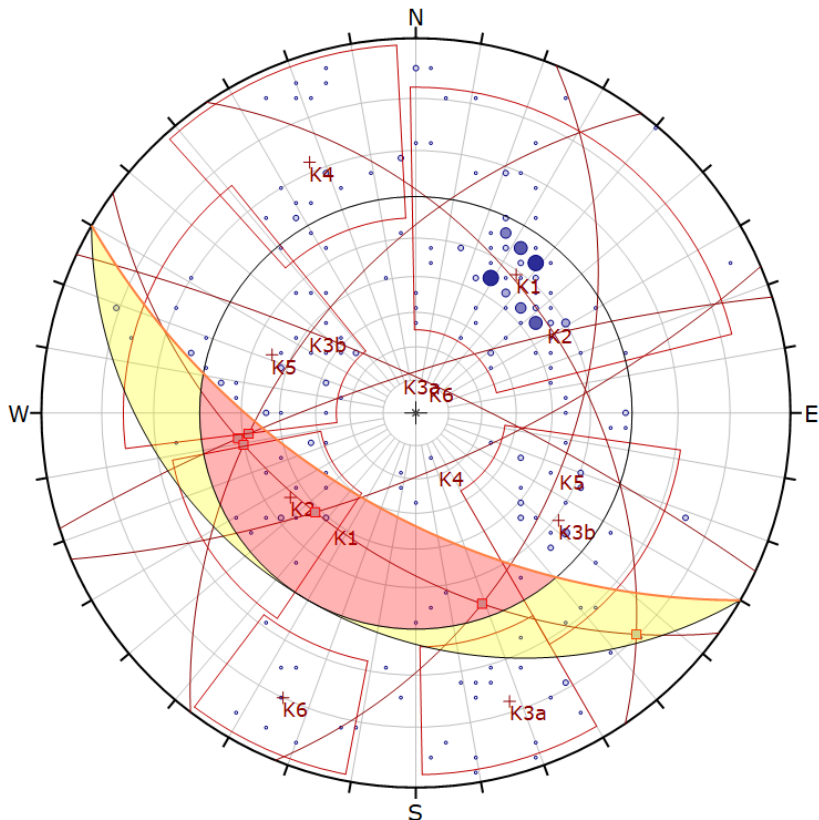
Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	60
Slope Dip Direction	210
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	55	249	22.09%
Planar Sliding (Set 1: K1)	55	94	58.51%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m	■	49	216	K1
2m	■	44	56	K2
3m	■	78	342	K3a
4m	■	51	307	K3b
5m	■	72	157	K4
6m	■	45	112	K5
7m	■	80	25	K6

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	249 (249 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 5 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su un piano lungo la direzione 210°/60°



Symbol	Scatter
•	1 Pole Vectors
•	2 Pole Vectors
•	3 Pole Vectors
•	4 Pole Vectors
•	5 Pole Vectors
•	6 Pole Vectors

Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	60
Slope Dip Direction	210
Friction Angle	30°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	6	21	28.57%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m	■	49	216	K1
2m	■	44	56	K2
3m	■	78	342	K3a
4m	■	51	307	K3b
5m	■	72	157	K4
6m	■	45	112	K5
7m	■	80	25	K6

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	249 (249 Entries)
Intersection Mode	User and Mean Set Planes
Intersections Count	21
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 6 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su due piani lungo la direzione 210°/60°

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 16 di 64

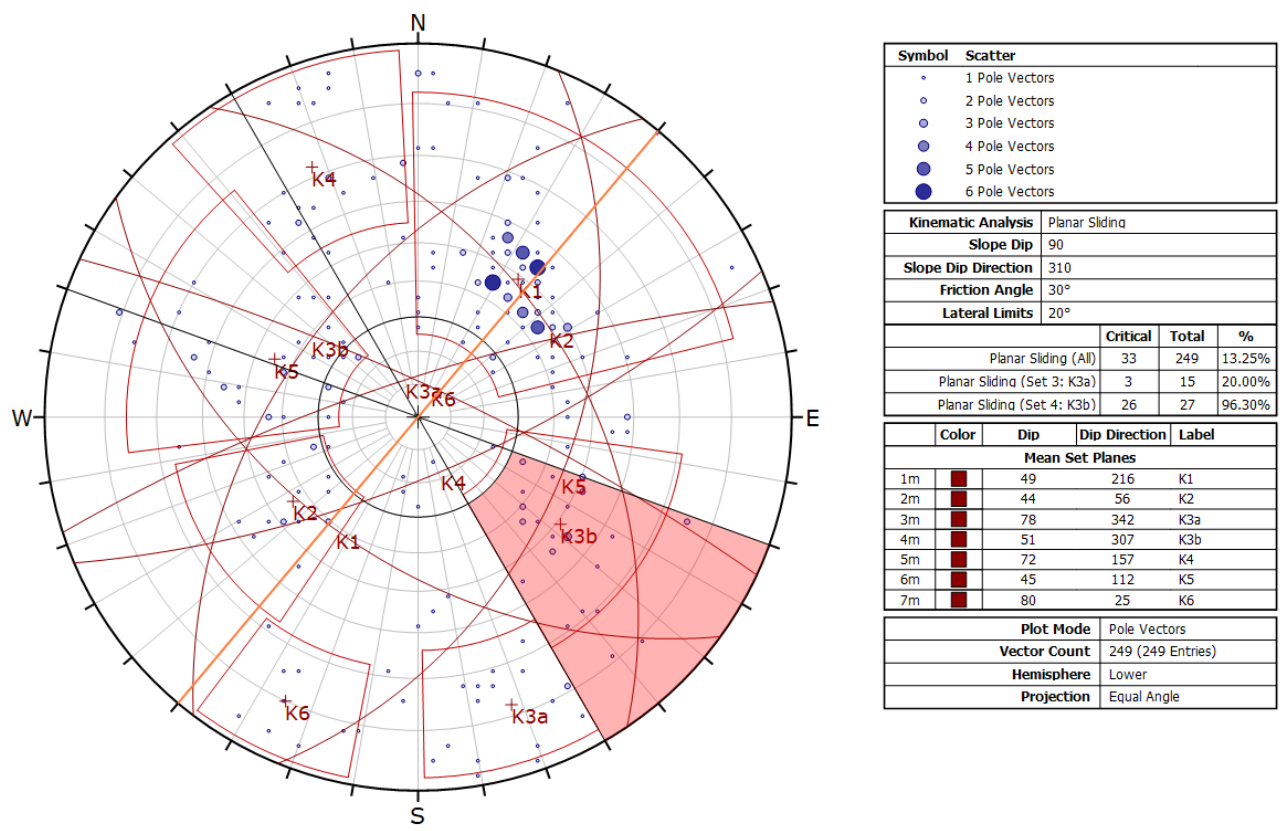


Figura 7 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su un piano lungo la direzione 310°/90°

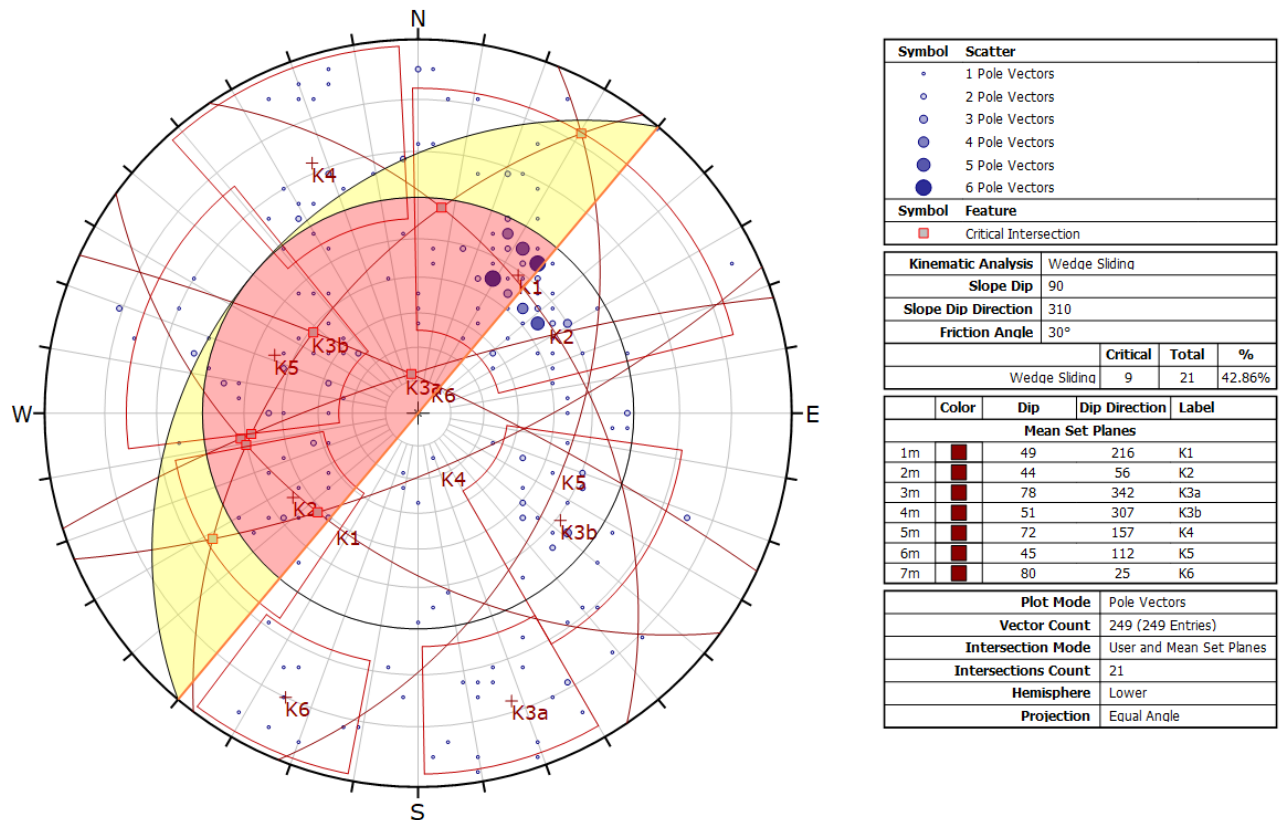


Figura 8 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su due piani lungo la direzione 310°/90°

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 17 di 64

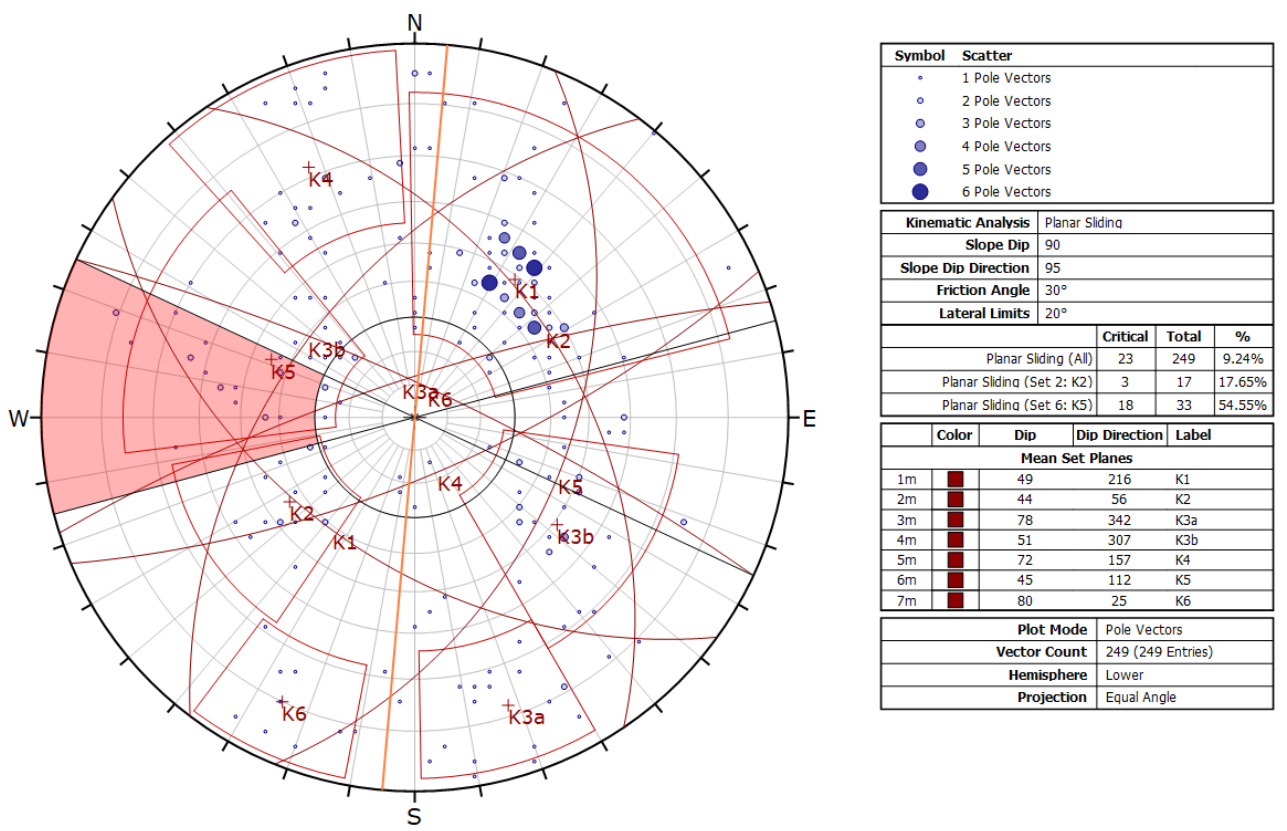


Figura 9 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su un piano lungo la direzione 095°/90°

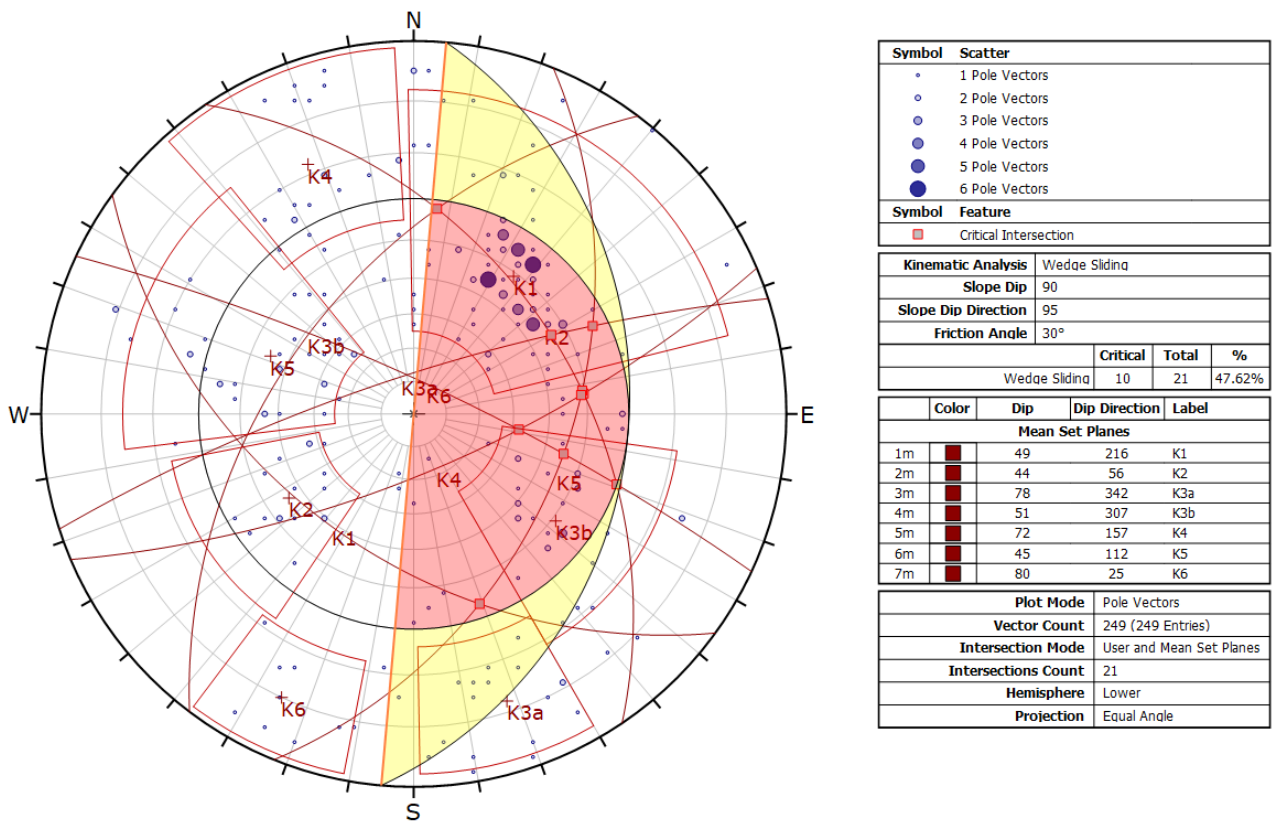


Figura 10 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su due piani lungo la direzione 095°/90°

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 18 di 64

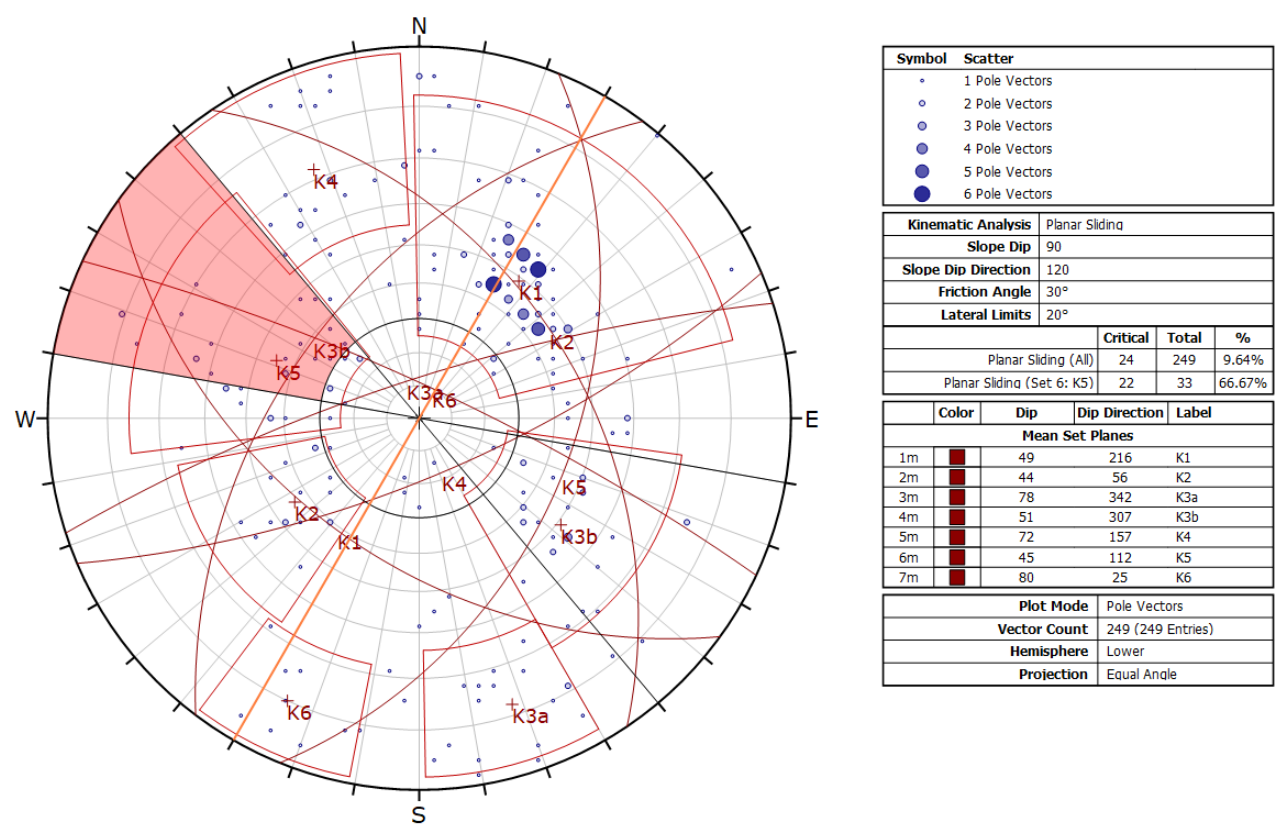


Figura 11 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su un piano lungo la direzione 120°/90°

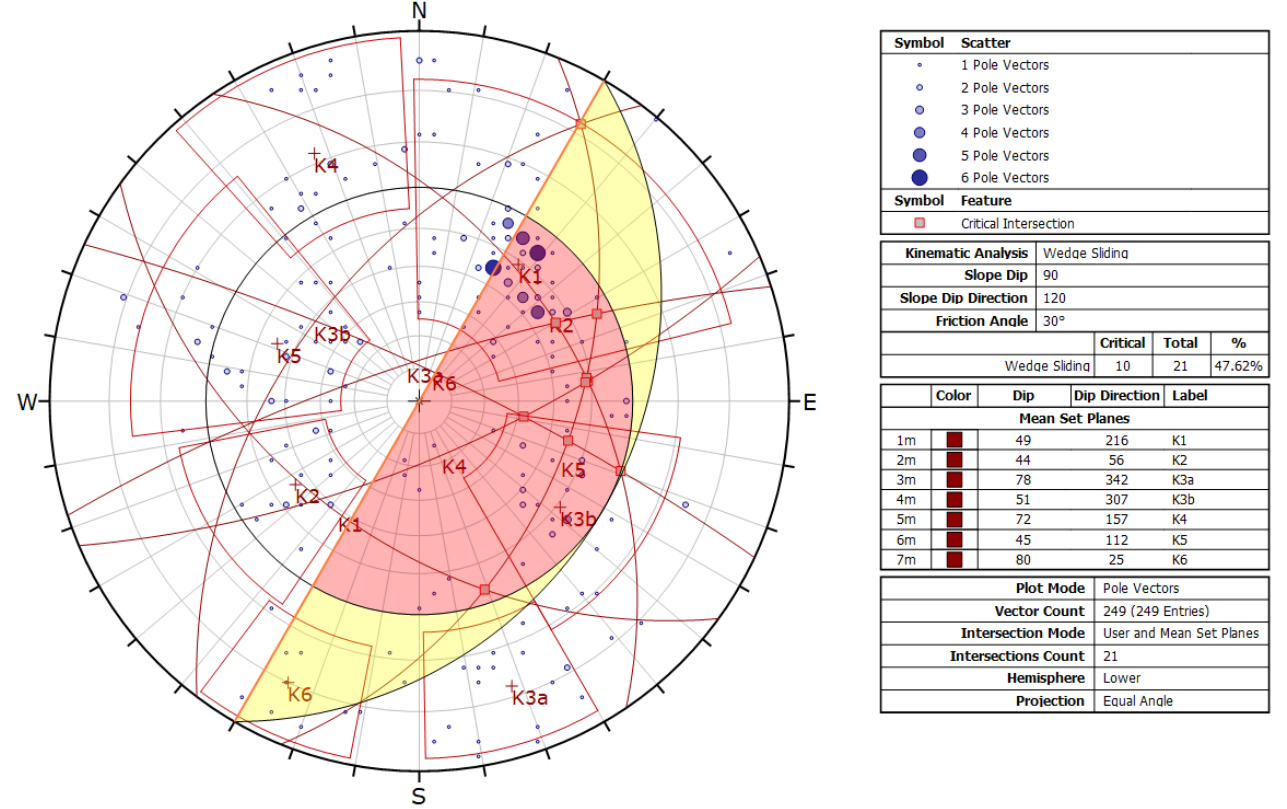


Figura 12 - valutazione della suscettibilità allo scivolamento su due piani lungo la direzione 120°/90°

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 19 di 64

I risultati dell'analisi secondo la teoria dei blocchi (Goodman & Shi, 1985) sono stati riassunti nella seguente tabella, che riepiloga i cinematismi individuati, per ogni direzione analizzata:

Tabella 11 - risultato dell'analisi cinematica

Fronte in esame	N° progressivo cinematismo	Tipo di scivolamento	Piano/linea di scivolamento
Fronte 1 (210°/60°)	01	Scivolamento su un piano	K ₁
	02	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₂
	03	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K _{3a}
	04	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K _{3b}
	05	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₄
	06	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₅
	07	Lungo linea di intersezione	K _{3a} /K _{3b}
Fronte 2 (310°/90°)	08	Scivolamento su un piano	K _{3b}
	09	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K _{3a}
	10	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K _{3b}
	11	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₄
	12	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K _{3b}
	13	Lungo linea di intersezione	K _{3a} /K _{3b}
	14	Lungo linea di intersezione	K _{3a} /K ₆
	15	Lungo linea di intersezione	K _{3b} /K ₄
	16	Lungo linea di intersezione	K _{3b} /K ₅
	17	Lungo linea di intersezione	K _{3b} /K ₆
Fronte 3 (095°/90°)	18	Scivolamento su un piano	K ₅
	19	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₅
	20	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K _{3a}
	21	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K _{3b}
	22	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K ₄
	23	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K ₅
	24	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K ₆
	25	Lungo linea di intersezione	K _{3a} /K ₅
	26	Lungo linea di intersezione	K ₄ /K ₅
	27	Lungo linea di intersezione	K ₄ /K ₆

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 20 di 64

Fronte 4 (120°/90°)	28	Lungo linea di intersezione	K ₅ /K ₆
	29	Scivolamento su un piano	K ₅
	30	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₅
	31	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K _{3a}
	32	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K ₄
	33	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K ₅
	34	Lungo linea di intersezione	K ₂ /K ₆
	35	Lungo linea di intersezione	K _{3a} /K ₅
	36	Lungo linea di intersezione	K _{3b} /K ₅
	37	Lungo linea di intersezione	K ₄ /K ₅
	38	Lungo linea di intersezione	K ₄ /K ₆
	39	Lungo linea di intersezione	K ₅ /K ₆

si andrà di seguito a valutare il F.S. sui cinematismi riportati in tabella 11 mediante uno specifico software di analisi tridimensionale di cinematismi, basato sull'equilibrio limite ma in grado di considerare le azioni di un sisma e la componente coesiva sulle discontinuità generanti un blocco. Le verifiche sono state svolte ipotizzando un'altezza della bancata di 6 m.

Nella tabella 12 si indicano per ciascun cinematismo individuato i rispettivi fattori di sicurezza calcolati mediante la modellazione 3D dei blocchi e tenendo in conto della azione sismica che agisce sugli stessi.

Tabella 12 - risultato dell'analisi cinematica

Fronte in esame	N° cin.	Tipo di scivolamento	Piano/linea di scivolamento	F.S.	Consolidamenti necessari
Fronte 1 (210°/60°)	01	Scivolamento su un piano	K ₁	>10**	-
	02	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₂	5,2	-
	03	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K _{3a}	1,7	-
	04	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K _{3b}	1,8	-
	05	Lungo linea di intersezione	K ₁ /K ₄	1,4	-

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 21 di 64

	06	Lungo linea di intersezione	K_1/K_5	2,0	-
	07	Lungo linea di intersezione	K_{3a}/K_{3b}	8,1	-
Fronte 2 (310°/90°)	08	Scivolamento su un piano	K_{3b}	1,5*	n°1/3ml $\Phi 32$ mm L:3m
	09	Lungo linea di intersezione	K_1/K_{3a}	1,7	-
	10	Lungo linea di intersezione	K_1/K_{3b}	1,2*	n°3 $\Phi 40$ mm L:6m
	11	Lungo linea di intersezione	K_1/K_4	5,1	-
	12	Lungo linea di intersezione	K_2/K_{3b}	1,5	-
	13	Lungo linea di intersezione	K_{3a}/K_{3b}	1,2*	n°3 $\Phi 40$ mm L:6m
	14	Lungo linea di intersezione	K_{3a}/K_6	1,5	-
	15	Lungo linea di intersezione	K_{3b}/K_4	1,4*	n°3 $\Phi 40$ mm L:6m
	16	Lungo linea di intersezione	K_{3b}/K_5	5,6	-
	17	Lungo linea di intersezione	K_{3b}/K_6	1,2*	n°3 $\Phi 40$ mm L:6m
Fronte 3 (095°/90°)	18	Scivolamento su un piano	K_5	1,5*	n°1/3ml $\Phi 32$ mm L:6m
	19	Lungo linea di intersezione	K_1/K_5	1,7*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:6m
	20	Lungo linea di intersezione	K_2/K_{3a}	2,6*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:6m
	21	Lungo linea di intersezione	K_2/K_{3b}	>10**	-
	22	Lungo linea di intersezione	K_2/K_4	1,2	-
	23	Lungo linea di intersezione	K_2/K_5	1,2*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:6m
	24	Lungo linea di intersezione	K_2/K_6	2,7	-
	25	Lungo linea di intersezione	K_{3a}/K_5	1,7	-
	26	Lungo linea di intersezione	K_4/K_5	1,6	-
	27	Lungo linea di intersezione	K_4/K_6	1,5	-

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 22 di 64

	28	Lungo linea di intersezione	K_5/K_6	1,2*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:6m
	29	Scivolamento su un piano	K_5	1,5*	n°1/3ml $\Phi 32$ mm L:6m
	30	Lungo linea di intersezione	K_1/K_5	1,4	-
	31	Lungo linea di intersezione	K_2/K_{3a}	1,4	-
	32	Lungo linea di intersezione	K_2/K_4	1,3	-
	33	Lungo linea di intersezione	K_2/K_5	1,3*	n°2 $\Phi 26,5$ mm L:6m
Fronte 4 (120°/90°)	34	Lungo linea di intersezione	K_2/K_6	2,9	-
	35	Lungo linea di intersezione	K_{3a}/K_5	1,2*	n°2 $\Phi 26,5$ mm L:6m
	36	Lungo linea di intersezione	K_{3b}/K_5	>10**	-
	37	Lungo linea di intersezione	K_4/K_5	1,4*	n°3 $\Phi 32$ mm L:6m
	38	Lungo linea di intersezione	K_4/K_6	1,4	-
	39	Lungo linea di intersezione	K_5/K_6	1,8	-

* *Fattore di sicurezza atteso dopo l'installazione dei sistemi di consolidamenti prescritti*

** *Cuneo particolarmente snello e di ridotte dimensioni, provvedere al disgaggio*

Nel caso il Direttore Responsabile e o il Sorvegliante, durante le operazioni di valutazione deterministica del cinematismo, riscontrassero che il cuneo di roccia presenti dimensioni differenti da quelle ipotizzate, l'analisi dovrà essere verificata ed eventualmente adattata.

b) Verifica dei possibili blocchi sviluppabili a tetto

Di seguito si è valutata la possibilità di formazione di blocchi nelle due direzioni di avanzamento D1 e D2 previste per la coltivazione sotterranea, riportata nella figura successiva.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 23 di 64

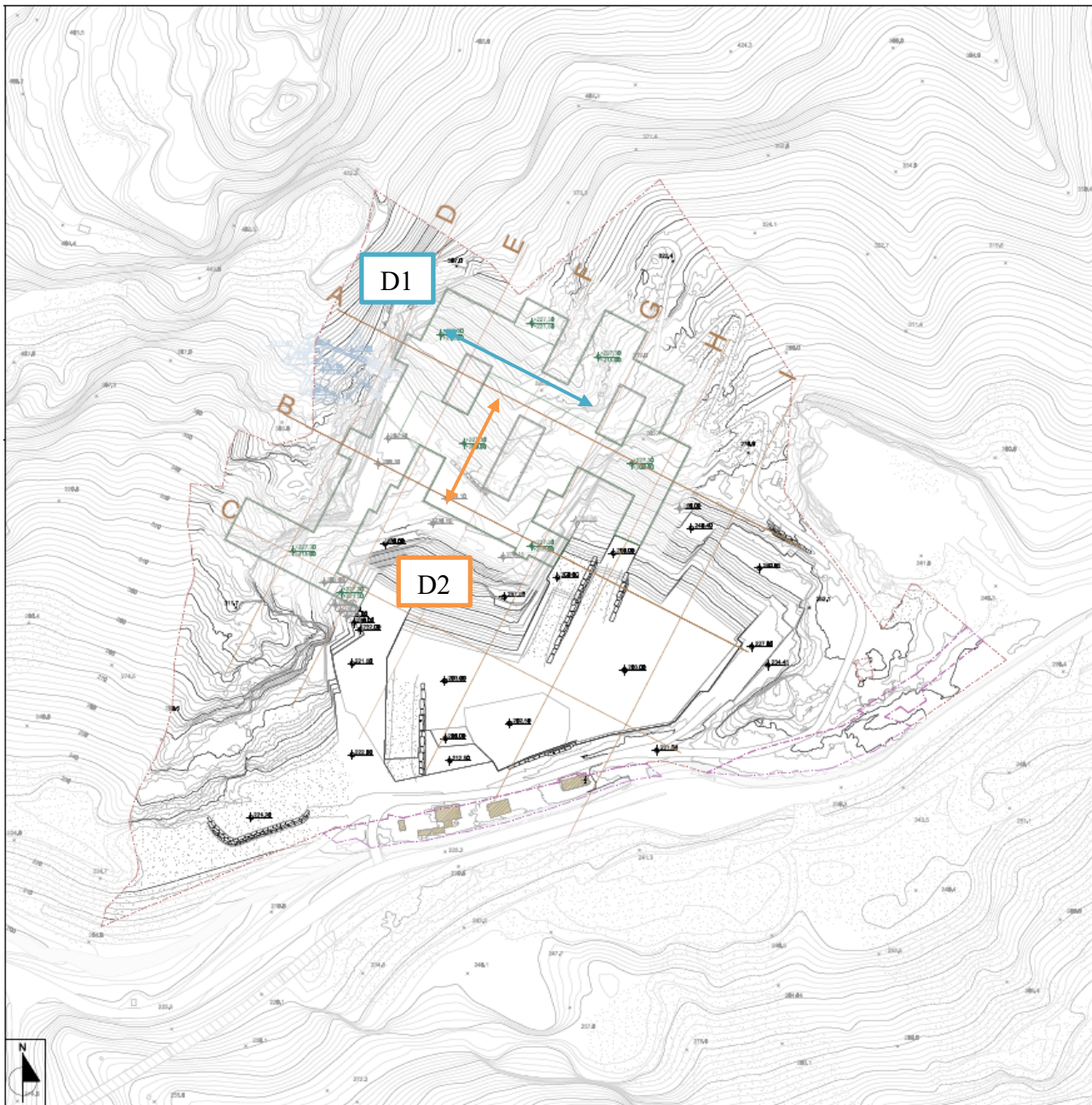


Figura 13 – stralcio della planimetria in progetto, con in evidenza le direzioni di avanzamento previste per la coltivazione sotterranea (D1: azzurro, D2: arancione)

Per ogni cinematico ipotizzato è riportato il fattore di sicurezza associato, ottenuto scalando la dimensione dei blocchi, ipotizzando una spaziatura delle discontinuità di 10 m. È stato utilizzato per questa analisi uno specifico software di analisi tridimensionale di cinematici, basato sull'equilibrio limite ma in grado di considerare le azioni di un sisma e la componente coesiva sulle discontinuità generanti un blocco.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 24 di 64

Le direzioni di avanzamento nella coltivazione sotterranea D1 e D2, hanno la seguente orientazione:

Tabella 13 - orientazione fronti di avanzamento principali

	D 1	D 2
Trend [°]	120°	030°
Plunge [°]	00°	00°

I possibili blocchi formabili a tetto, frutto dell'analisi statistica delle principali discontinuità restano quelli descritti nel dettaglio nella precedente relazione, e vengono riassunti di seguito nella tabella 14, indicando per ciascun cinematismo il rispettivo fattore di sicurezza calcolati mediante la modellazione 3D dei cunei, tenendo in conto della azione sismica che agisce sugli stessi.

Tabella 14 - risultato dell'analisi cinematica mediante la teoria del "blocco chiave"

Direzione in esame	N° cin.	Combinazione	Massa [t]	F.S.	Consolidamenti necessari
Direzione 1 e 2 (120°/00°) e (030°/00°)	01	K ₁ /K _{3a} /K ₅	106,0	1,8*	n°2 Φ26,5 mm L:9 m
	02	K ₂ /K _{3b} /K ₄	63,3	2,3*	n°2 Φ26,5 mm L:6 m
	03	K _{3b} /K ₄ /K ₆	63,0	1,7*	n°1 Φ26,5 mm L:6 m
	04	K ₁ /K ₂ /K _{3b}	22,1	3,3*	n°1 Φ26,5 mm L:6 m
	05	K ₁ /K ₂ /K _{3a}	20,5	3,5*	n°1 Φ26,5 mm L:6 m
	06	K ₁ /K _{3b} /K ₅	14,1	4,6*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	07	K ₁ /K ₅ /K ₆	12,6	5,0*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	08	K ₁ /K ₄ /K ₆	12,2	5,2*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	09	K _{3b} /K ₄ /K ₅	9,2	6,6*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	10	K ₁ /K ₂ /K ₆	5,2	10,7*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	11	K ₁ /K _{3a} /K ₄	5,0	11,3*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	12	K _{3a} /K _{3b} /K ₄	4,1	13,6*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	13	K _{3b} /K ₅ /K ₆	15,7	4,3*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	14	K _{3a} /K ₄ /K ₆	5,6	10,0*	n°1 Φ26,5 mm L:3 m
	15	K _{3a} /K ₅ /K ₆	85,0	1,6*	n°1 Φ26,5 mm L:6 m
	16	K ₂ /K _{3b} /K ₆	86,4	1,9*	n°2 Φ26,5 mm L:6 m

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 25 di 64

17	$K_2/K_{3a}/K_6$	70,1	1,9*	n°2 $\Phi 26,5$ mm L:6 m
18	$K_{3a}/K_{3b}/K_5$	11,4	5,5*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:3 m
19	$K_2/K_{3a}/K_{3b}$	117,5	2,0*	n°3 $\Phi 26,5$ mm L:9 m
20	$K_1/K_{3a}/K_6$	10,4	6,1*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:3 m
21	$K_1/K_{3b}/K_6$	3,1	18,1*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:3 m
22	$K_{3a}/K_{3b}/K_6$	7,1	8,7*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:3 m
23	$K_1/K_2/K_4$	24,0	3,1*	n°1 $\Phi 26,5$ mm L:6 m
24	$K_1/K_4/K_5$	147,3	1,6*	n°3 $\Phi 26,5$ mm L:9 m
25	$K_1/K_2/K_5$	18,1	1,4	-
26	$K_2/K_{3b}/K_5$	11,7	1,5	-
27	$K_2/K_{3a}/K_4$	4,8	1,6	-
28	$K_1/K_{3b}/K_4$	25,2	1,6	-
29	$K_2/K_5/K_6$	10,5	1,7	-
30	$K_2/K_{3a}/K_5$	14,9	1,8	-
31	$K_2/K_4/K_6$	28,6	2,1	-
32	$K_4/K_5/K_6$	21,4	2,1	-
33	$K_{3a}/K_4/K_5$	3,8	3,1	-
34	$K_2/K_4/K_5$	0,1	4,6	-
35	$K_1/K_{3a}/K_{3b}$	0,8	5,0	-

* *Fattore di sicurezza atteso dopo l'installazione dei sistemi di consolidamenti prescritti*

** *Cuneo particolarmente snello e di ridotte dimensioni, provvedere al disaggio*

I risultati delle tabelle sopra riportate sono indicati sotto forma di fattore di sicurezza cioè del rapporto tra la forza resistente e quella mobilitante. Proprio sulla base di questa definizione si possono considerare accettabili e in grado di soddisfare i criteri di sicurezza imposti dalla attuale Normativa tecnica e i vigenti termini di Legge.

Nel caso il Direttore Responsabile e o il Sorvegliante, durante le operazioni di valutazione deterministica del cinematismo, riscontrassero che il cuneo di roccia presenti dimensioni differenti da quelle ipotizzate, l'analisi dovrà essere verificata ed eventualmente adattata.

c) Verifica degli elementi di sostegno

La verifica delle dimensioni degli elementi di sostegno lasciati in posto, è stata fatta definendo l'area di influenza che grava sul singolo pilastro o diaframma, imponendo

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 26 di 64

un'equazione di equilibrio statico, cioè confrontando le sollecitazioni che interesseranno il pilastro con la resistenza dell'ammasso roccioso.

Nel caso più semplice, di una coltivazione per camere e pilastri, caratterizzato da pilastri di dimensioni a e b e luce delle camere pari a c , l'area di influenza di ogni pilastro ha dimensioni in pianta $(a + c)$ e $(b + c)$, per soddisfare l'equazione di equilibrio statico in direzione verticale deve essere verificata la seguente relazione:

$$\sigma_p ab = p_{zz}(a + c)(b + c) \quad (8)$$

Dove σ_p è la sollecitazione agente sul pilastro, p_{zz} è il carico litostatico al di sopra dell'elemento di sostegno, la presente trattazione è stata proposta da Lunder and Pakalnis (1997).

Il valore di resistenza del pilastro è stato calcolato con la formulazione proposta da Hardy e Agapito (1975), in grado di tenere conto del fattore scala.

$$\sigma_r = \sigma_c \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^{0.118} \cdot \left(\frac{w_p}{h_p} \cdot \frac{h_s}{w_s} \right)^{0.833} \quad (9)$$

Dove σ_r è la resistenza attesa del pilastro, σ_c la resistenza monoassiale del provino, v_s e v_p rispettivamente il volume del provino e del pilastro, w_s e w_p rispettivamente il lato equivalente del provino e del pilastro, h_s e h_p rispettivamente l'altezza del provino e del pilastro.

Di seguito vengono individuati gli elementi di supporto presenti nella coltivazione sotterranea.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 27 di 64

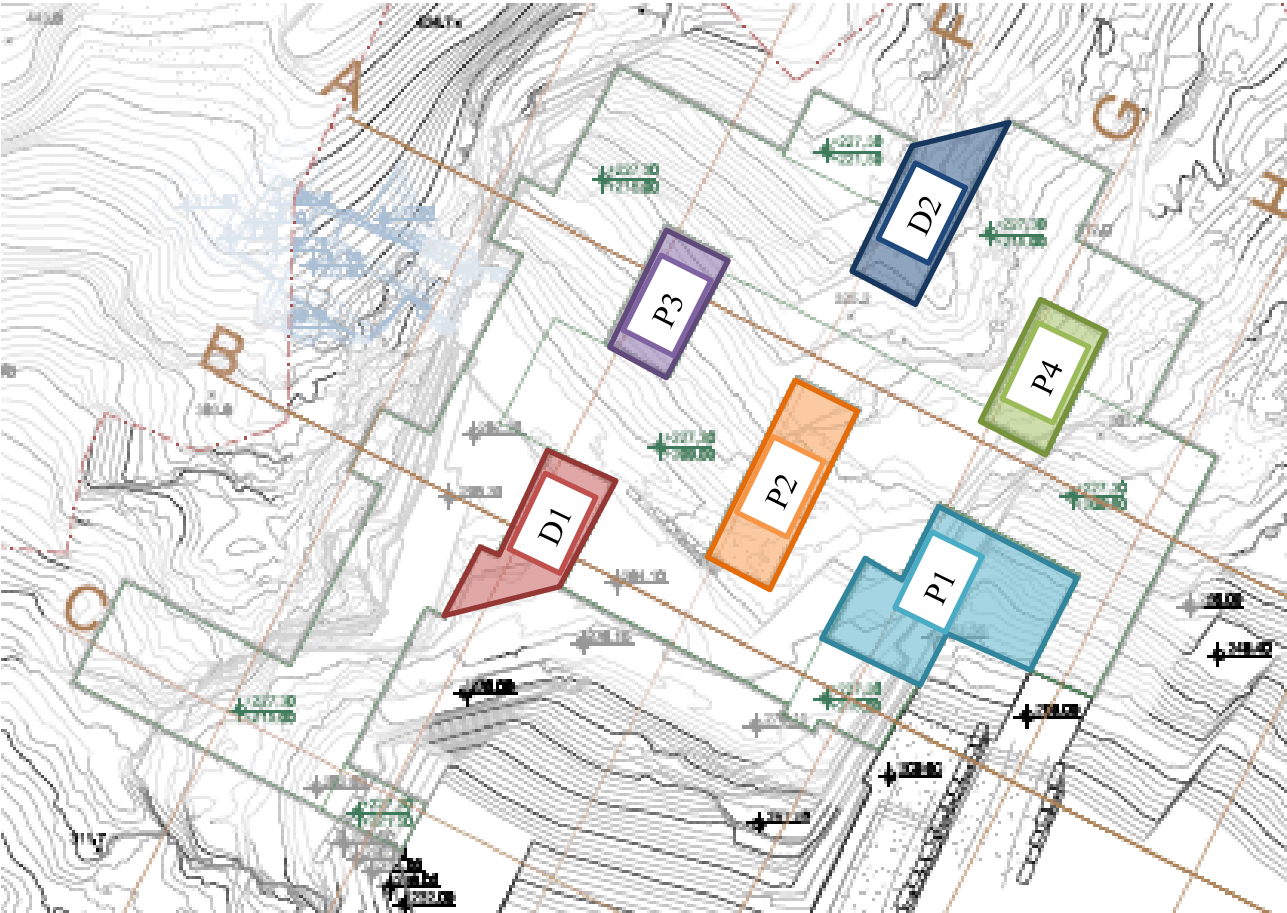


Figura 14 – stralcio della planimetria in progetto, con in evidenziati gli elementi di sostegno della coltivazione sotterranea

Tabella 15 - risultato dell'analisi all'equilibrio statico degli elementi di sostegno

Elemento in esame	Carico litostatico		Elemento di sostegno			Sol.	Res.	F.S.
	<i>z</i> [m]	<i>S_t</i> [m ²]	<i>h_p</i> [m]	<i>w_p</i> [m]	<i>v_p</i> [m ³]	<i>σ_p</i> [MPa]	<i>σ_r</i> [MPa]	
P1	75	1.900	18,0	28,0	14.130	4,9	42,4	8,6
P2	95	1.850	18,0	21,6	8.424	10,1	36,3	3,5
P3	110	1.550	15,0	17,7	4.680	14,8	38,3	2,5
P4	95	1.200	15,0	17,7	4.680	9,9	38,3	3,8
D1	75	1.450	15,0	19,7	5.850	7,5	40,9	5,4
D2	110	1.500	12,0	19,9	4.470	11,3	50,8	4,5

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 28 di 64

I risultati della tabella sopra riportata sono indicati sotto forma di fattore di sicurezza cioè del rapporto tra la forza resistente e quella mobilitante. Proprio sulla base di questa definizione si possono considerare accettabili e in grado di soddisfare i criteri di sicurezza imposti dalla attuale Normativa tecnica e i vigenti termini di Legge.

d) Analisi tensionale e deformativa della porzione di sotterraneo

L'analisi tenso-deformativa al contorno dello scavo è stata realizzata mediante i metodi numerici, applicando un codice di calcolo basato sugli elementi finiti FEM in grado di simulare, con un elevato grado di precisione, sia la morfologia del versante sia la geometria del vuoto sotterraneo.

È stata effettuata una modellazione bidimensionale, analizzando tre sezioni lungo due direzioni ortogonali, con l'obiettivo di valutare l'incremento tensionale sugli elementi di sostegno previsti dal progetto. Questo tipo di studio presenta alcuni limiti dovuti alla rappresentazione del modello geotecnico in 2D, considerati superabili in relazione alla geometria regolare del sotterraneo.

Nell metodo agli elementi finiti FEM (Finite Element Method), il dominio del problema è suddiviso convenientemente in elementi discreti che forniscono una forma approssimata della continuità dello stato tensionale e deformativo dell'ammasso roccioso. Le equazioni in forma algebrica sono scritte relativamente ai nodi della discretizzazione.

Tali equazioni mettono in relazione gli spostamenti nodali alle forze attraverso una matrice, detta di rigidità.

Il metodo FEM è particolarmente efficiente nella simulazione di scavi e/o costruzioni, e si può prevedere anche l'inserimento di elementi di sostegno e di rinforzo.

La principale criticità del metodo - come degli altri metodi differenziali - sta nella definizione arbitraria dei contorni esterni del problema. I contorni fittizi dovrebbero essere collocati a distanza convenientemente elevata, ma ciò non garantisce che le condizioni richieste siano soddisfatte. Pertanto, sono indispensabili in questi casi studi di sensitività della soluzione al tipo di condizioni imposte sul contorno, mediante per esempio l'ausilio di misure sperimentali di stato di sforzo.

Nella formulazione riportata di seguito, si farà riferimento ad un materiale generico, senza operare distinzione tra tensioni efficaci e tensioni totali. Alla base del metodo FEM sussiste

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 29 di 64

una equazione di minimizzazione dell'energia potenziale π di un sistema continuo di volume V e che può esprimersi nella forma:

$$\pi = \frac{1}{2} \int_V \sigma^T \varepsilon dV - \int_V \delta^T p dV - \int_V \delta^T q dS \quad (10)$$

dove p sono le forze di massa per unità di volume, q le forze di superficie, δ è il vettore colonna degli spostamenti globali, σ la matrice delle tensioni e ε il vettore delle deformazioni. In particolare, risulta $\sigma^T = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}\}$ e $\varepsilon^T = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}\}$.

Con riferimento ad un problema bidimensionale, discretizzando il dominio in elementi finiti, per il generico elemento e sussiste la seguente relazione tra lo spostamento δ in un punto interno all'elemento e gli spostamenti δ_i e dei nodi:

$$\delta = N \delta^e = \sum_{i=1}^n N_i \delta_i \quad (11)$$

dove n è il numero di nodi dell'elemento e N_i le cosiddette funzioni di forma. Le deformazioni all'interno di ciascun elemento si ottengono per derivazione degli spostamenti nodali:

$$\varepsilon = B \delta^e = \sum_{i=1}^n B_i \delta_i \quad (12)$$

dove B è la matrice delle deformazioni:

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial N}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N}{\partial y} \\ \frac{\partial N}{\partial y} & \frac{\partial N}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Lo stato tensionale si ricava tramite la relazione tensioni-deformazioni:

$$\sigma = D \varepsilon \quad (14)$$

dove D è la matrice di rigidità che, per il caso di deformazione piana per un mezzo isotropo lineare elastico (ILE), è pari a:

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 30 di 64

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{(1-\nu)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

con E , ν le costanti elastiche del materiale.

La figura seguente mostra una planimetria della cava con la posizione delle sezioni analizzate.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 31 di 64

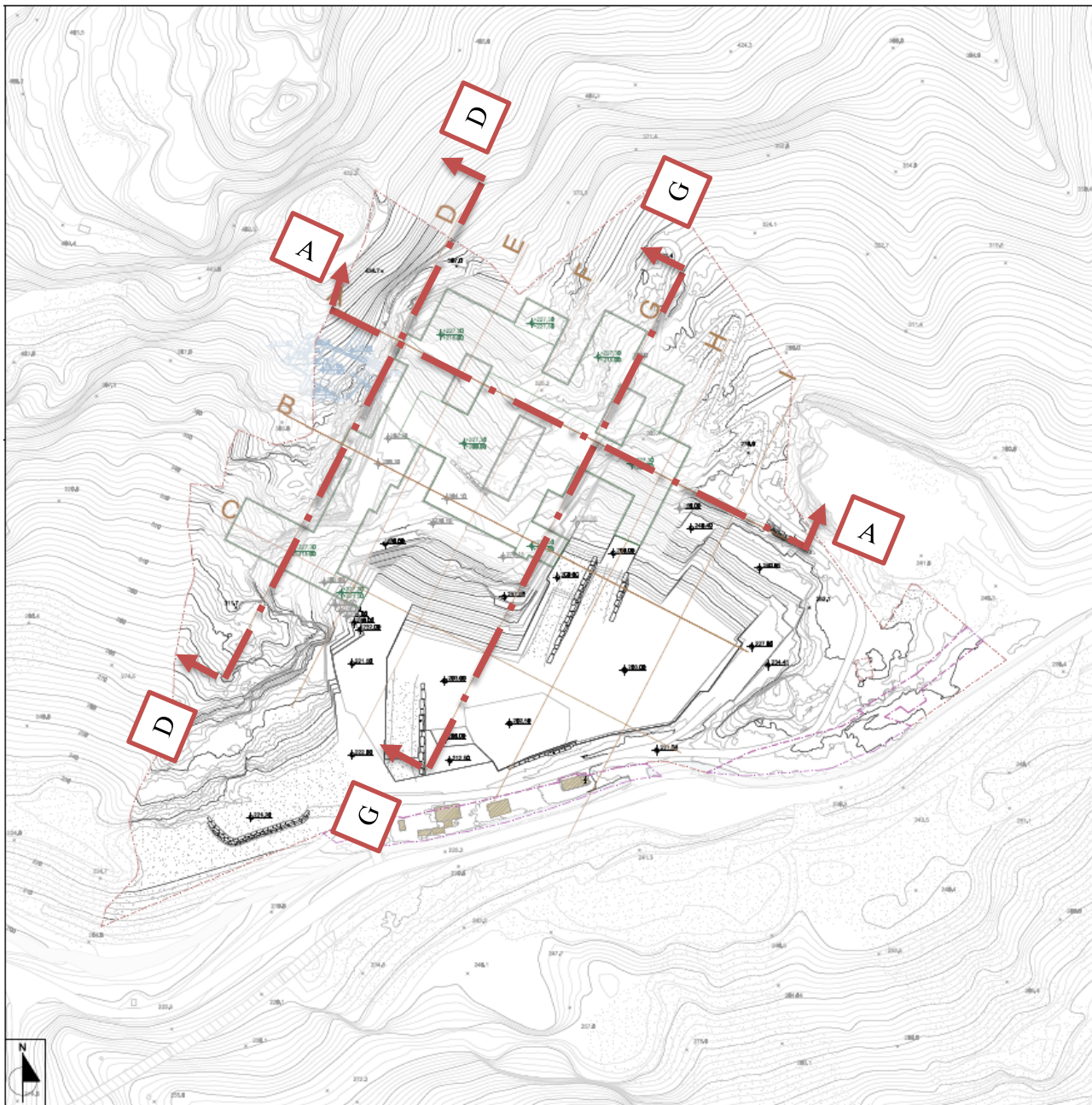


Figura 15 – stralcio della planimetria in progetto, con in evidenziate le tre sezioni analizzate nell'analisi numerica FEM

Di seguito sono riportate le immagini delle tre sezioni discretizzate, e con applicati i vincoli laterali, utilizzati per l'analisi numerica.

La sezione A è stata discretizzata in 25.994 elementi triangolari, la sezione D in 22.844, mentre la sezione G in 22.834.

I vincoli laterali del modello sono stati schematizzati mediante l'utilizzo di "carrelli", per impedire gli spostamenti orizzontali sull'asse Y e concedere gli abbassamenti, mentre alla

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 32 di 64

base il modello è stato vincolato mediante “cerniere”, per impedire gli spostamenti orizzontali sull’asse X e Y.

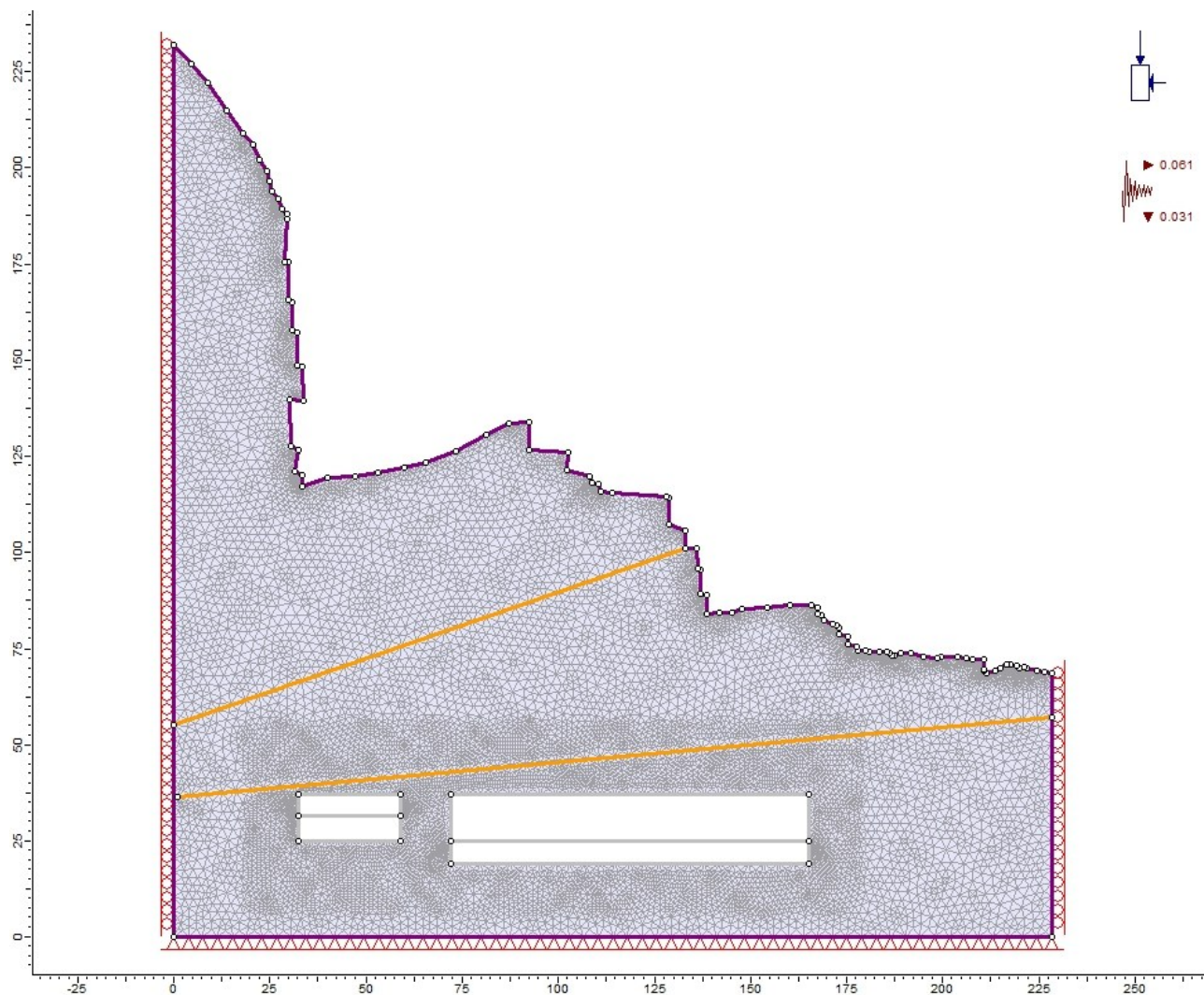


Figura 16 – sezione strutturale A, utilizzata per la modellazione FEM

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 33 di 64

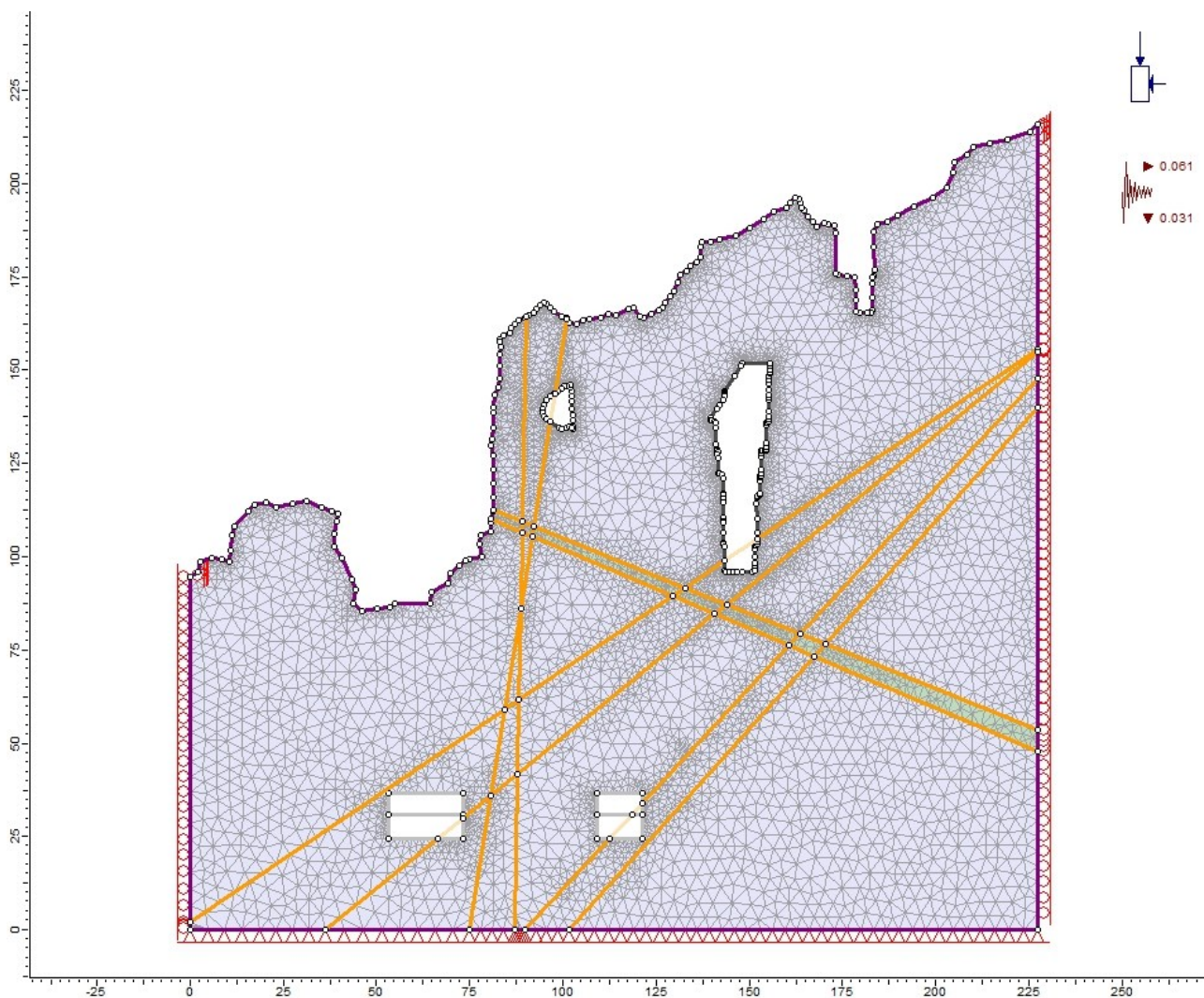


Figura 17 – sezione strutturale D, utilizzata per la modellazione FEM

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 34 di 64

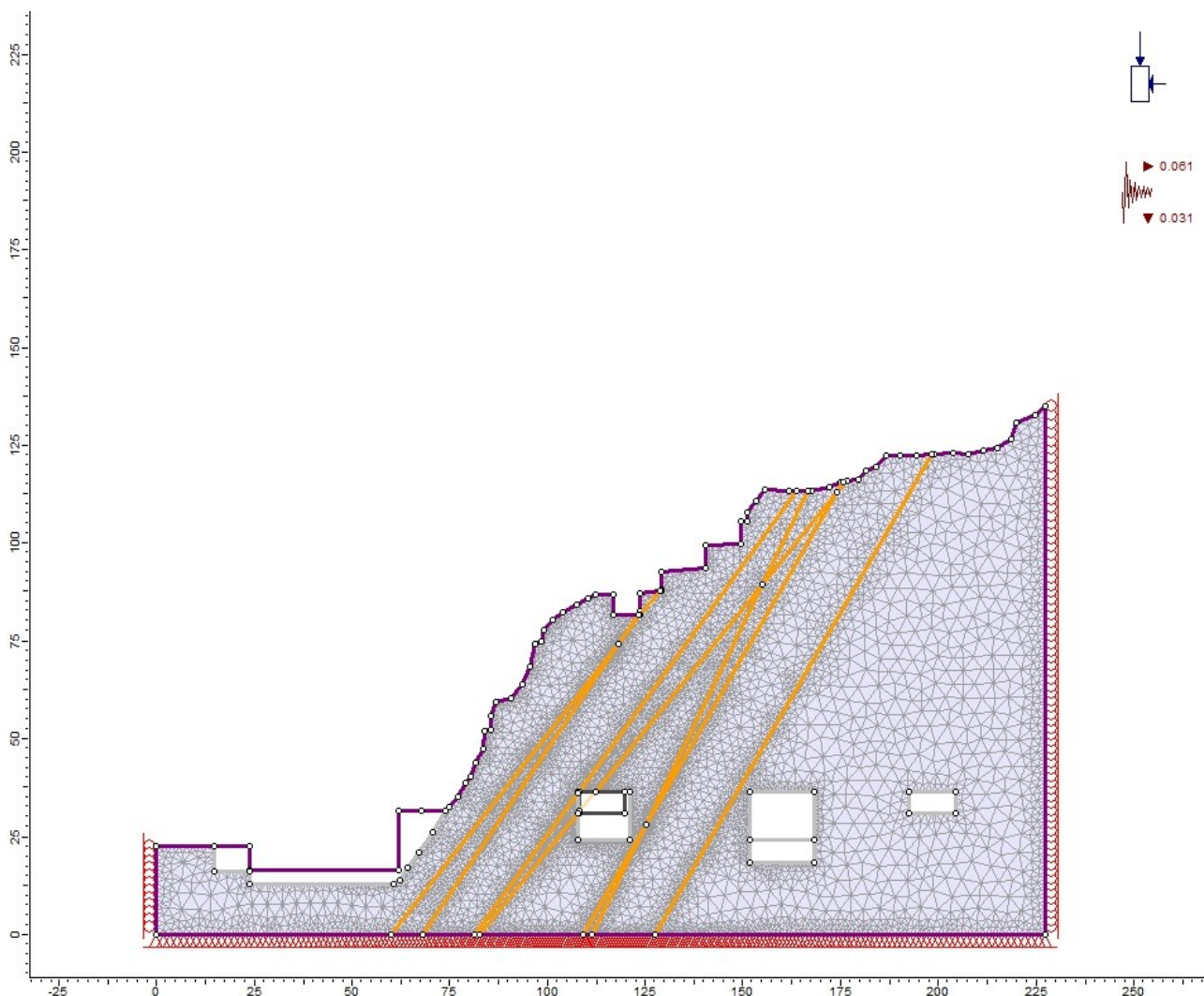


Figura 18 – sezione strutturale G, utilizzata per la modellazione FEM

Si riportano le immagini relative ai risultati dell'elaborazione tramite modello 2D, illustrando l'andamento del campo di sforzi al contorno dello scavo, allo stato attuale, alla fase intermedia e alla fase finale del progetto, per le tre sezioni A, D e G analizzate.

In particolare, sono rappresentate la componente principale massima e minima (rispettivamente σ_1 e σ_3), la componente verticale (σ_{zz}) e la componente deviatorica (σ_{1-3}) del tensore degli sforzi, in questo modo si può fornire un'indicazione dell'andamento medio delle sollecitazioni al contorno dello scavo.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 35 di 64

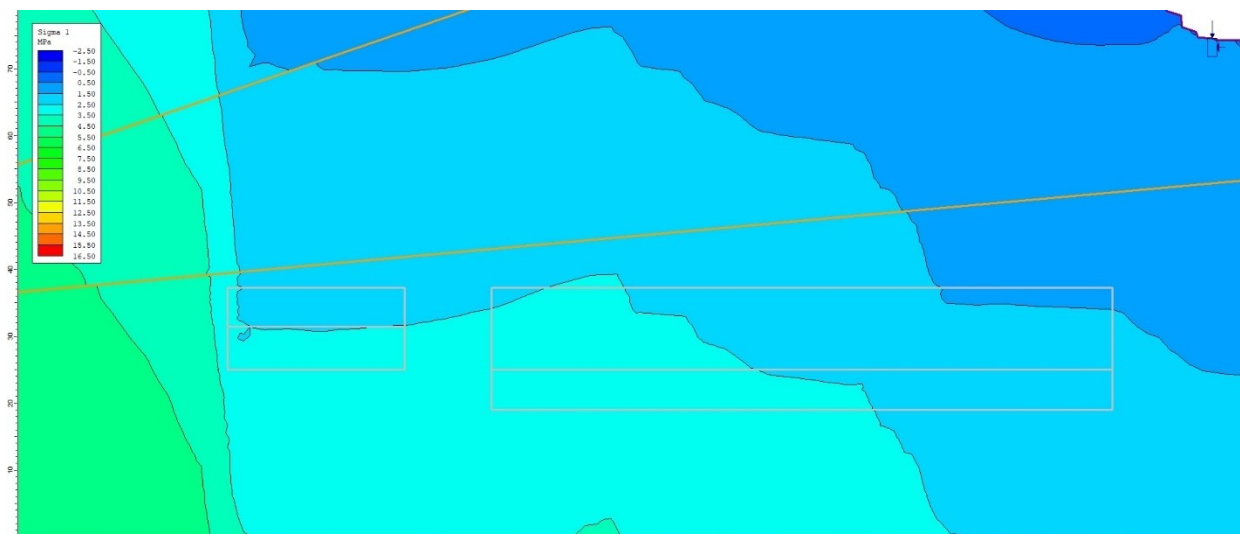


Figura 19 – Sezione A: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato attuale

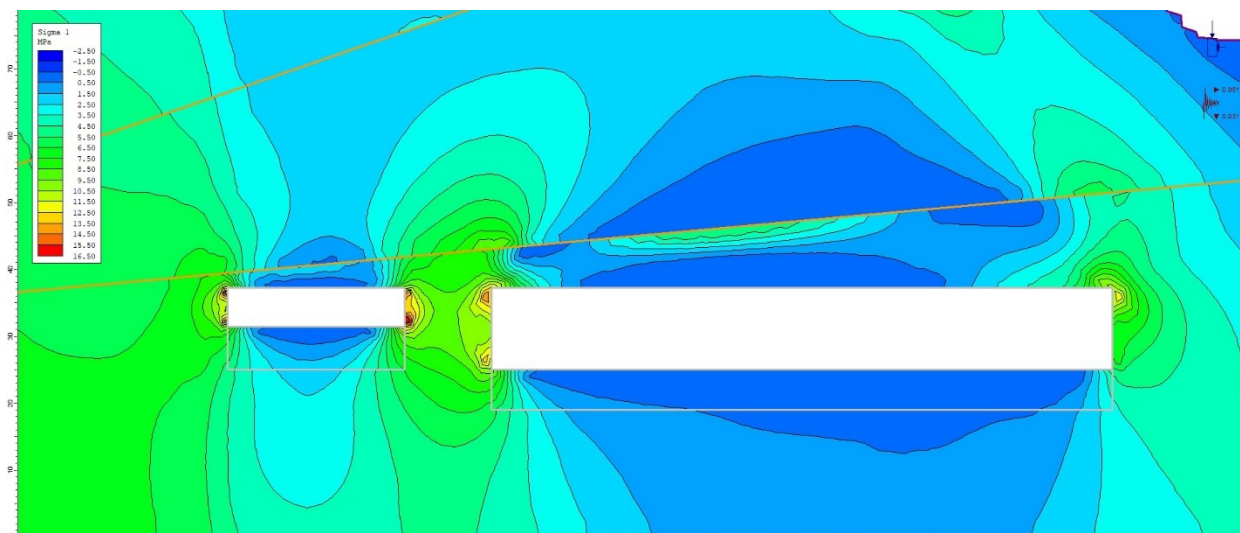


Figura 20 – Sezione A: componente principale massima del tensore degli sforzi(σ_1), stato intermedio

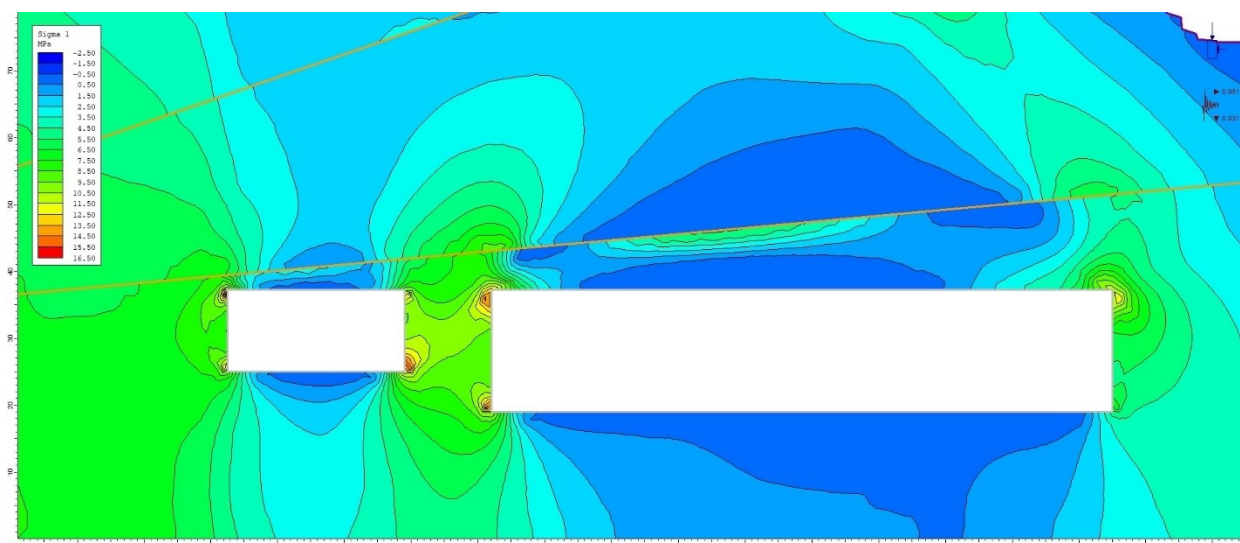


Figura 21 – Sezione A: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 36 di 64

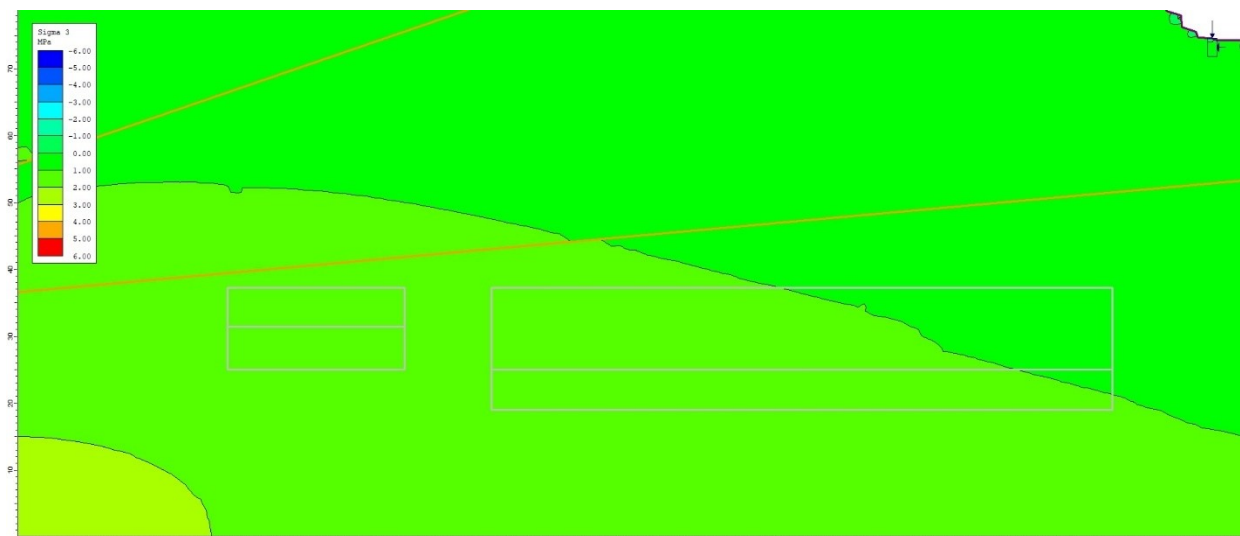


Figura 22 – Sezione A: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato attuale

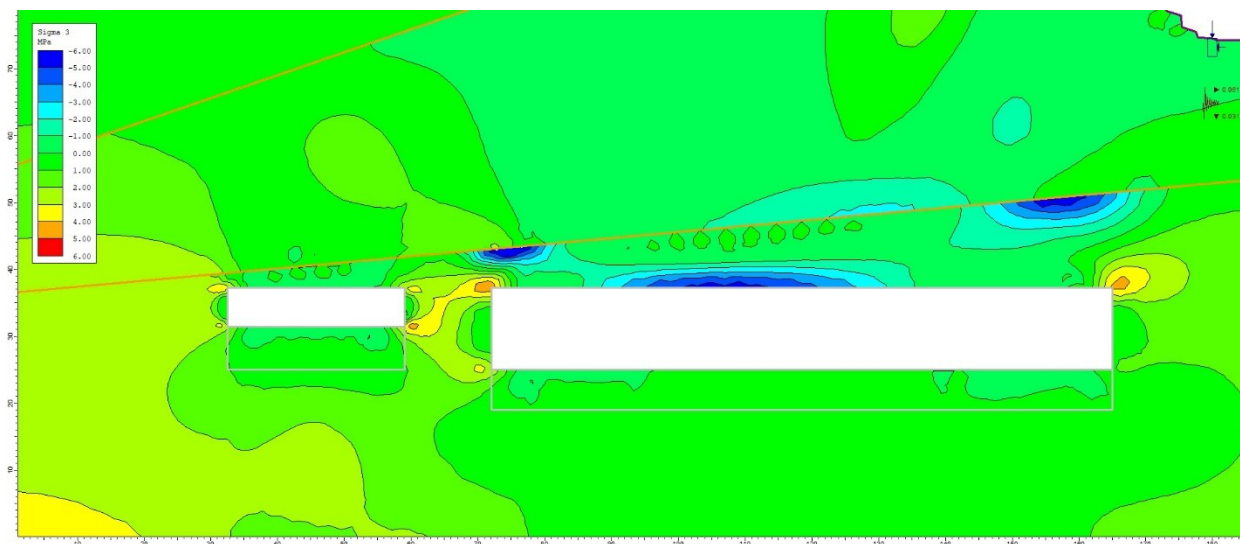


Figura 23 – Sezione A: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato intermedio

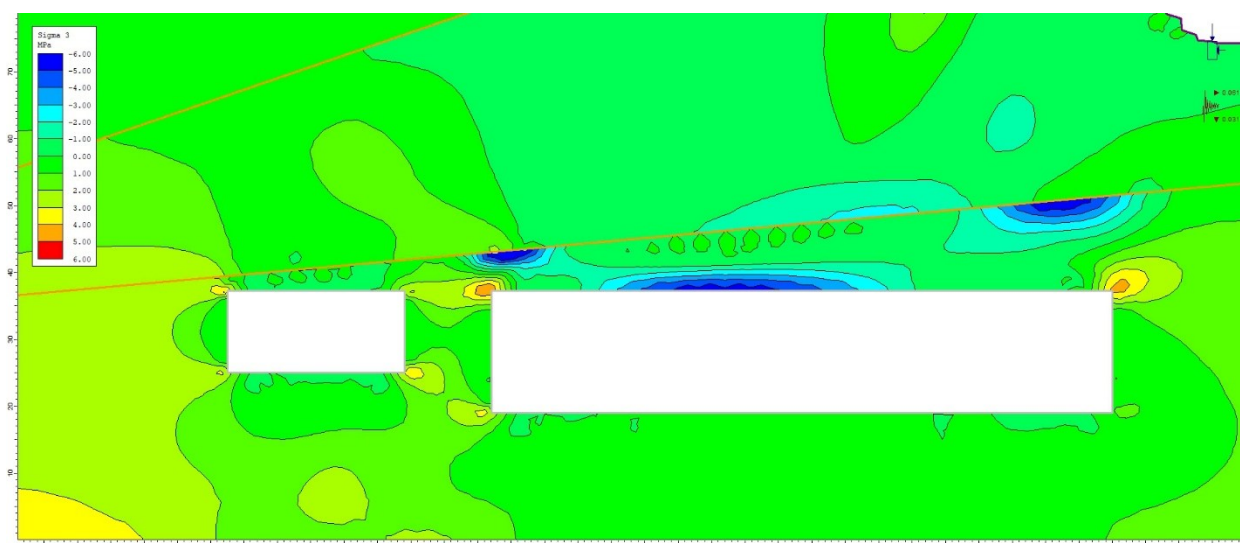


Figura 24 – Sezione A: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 37 di 64

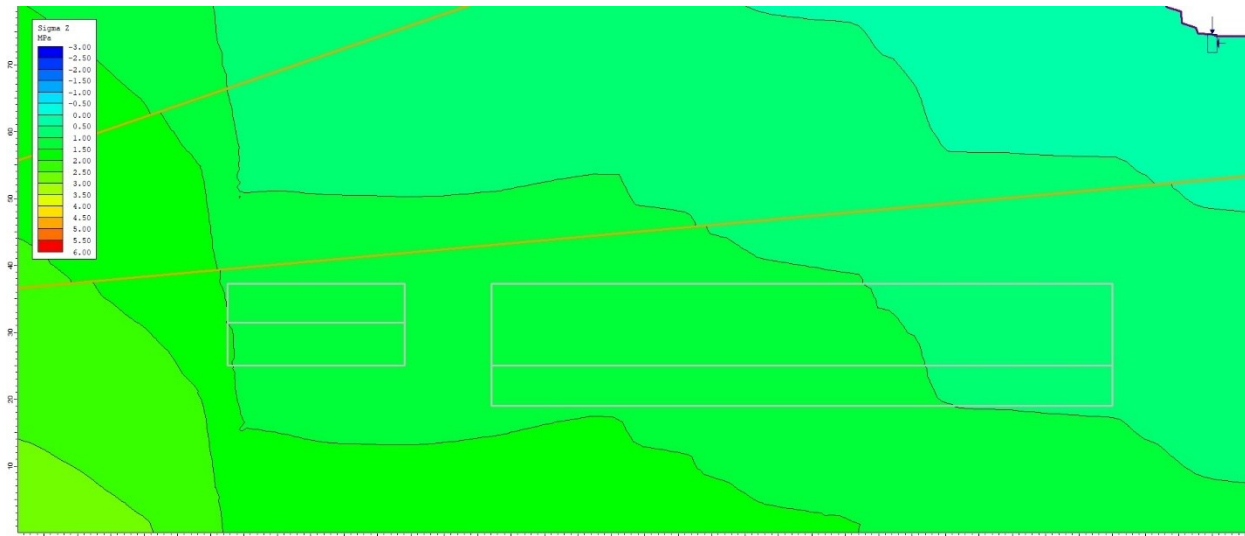


Figura 25 – Sezione A: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato attuale

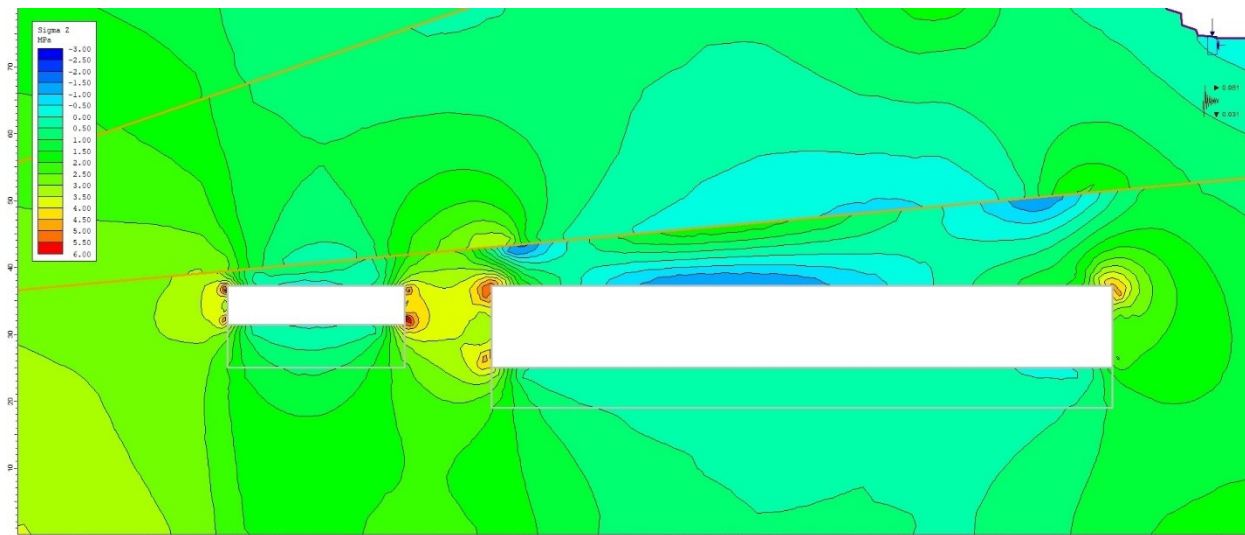


Figura 26 – Sezione A: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato intermedio

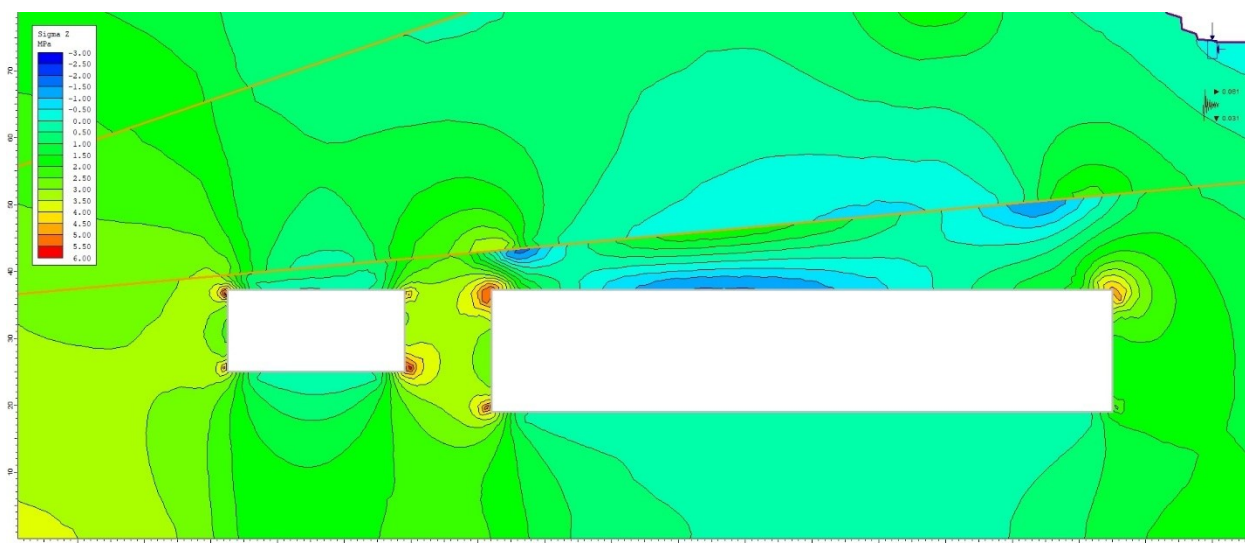


Figura 27 – Sezione A: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 38 di 64

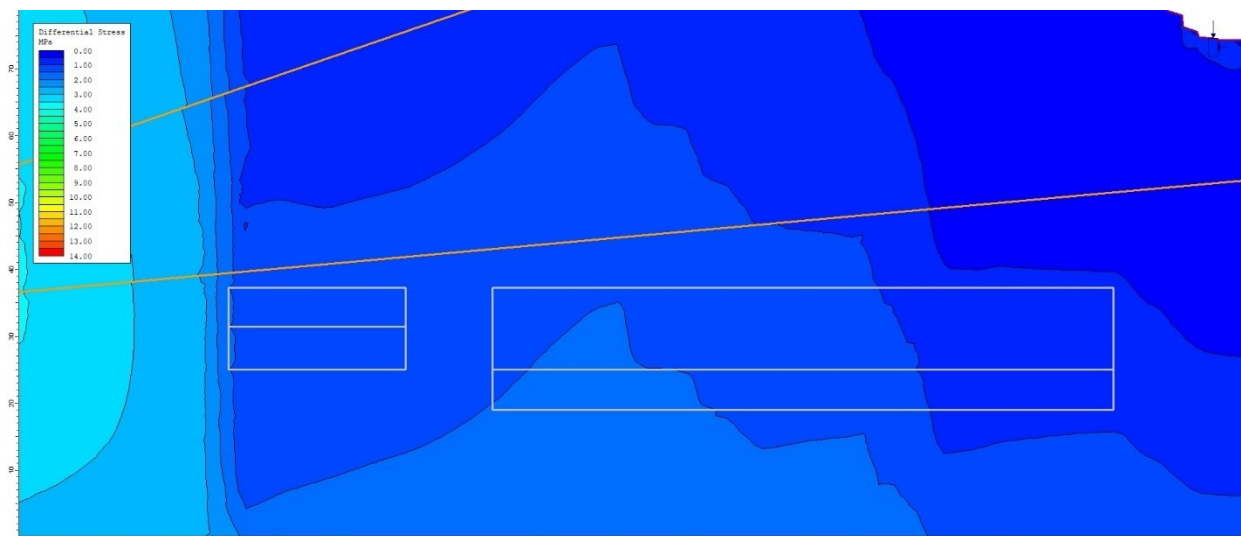


Figura 28 – Sezione A: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato attuale

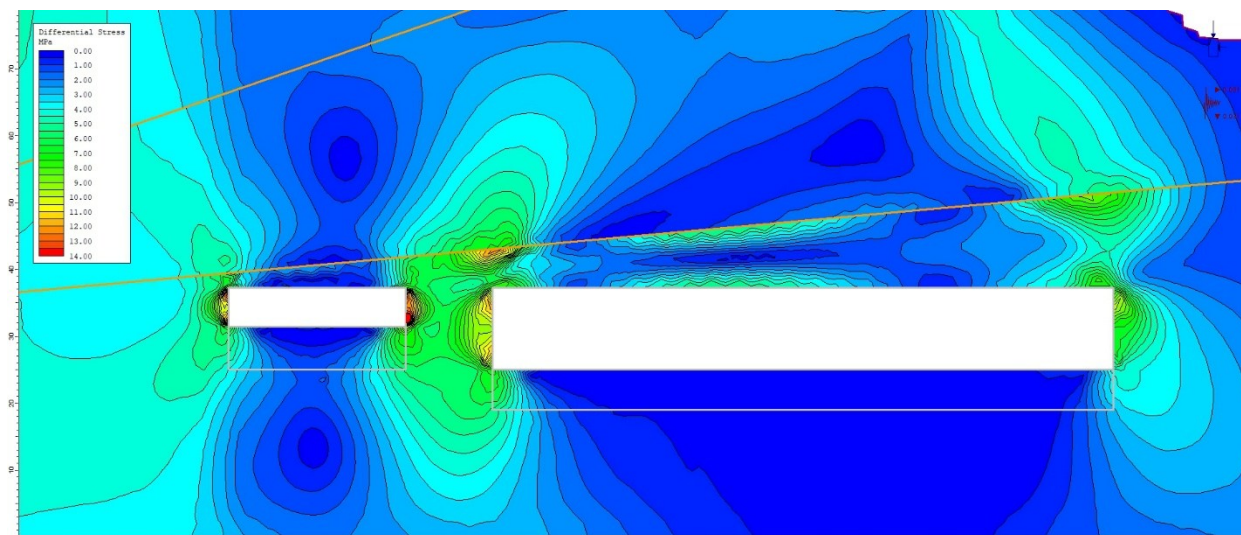


Figura 29 – Sezione A: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato intermedio

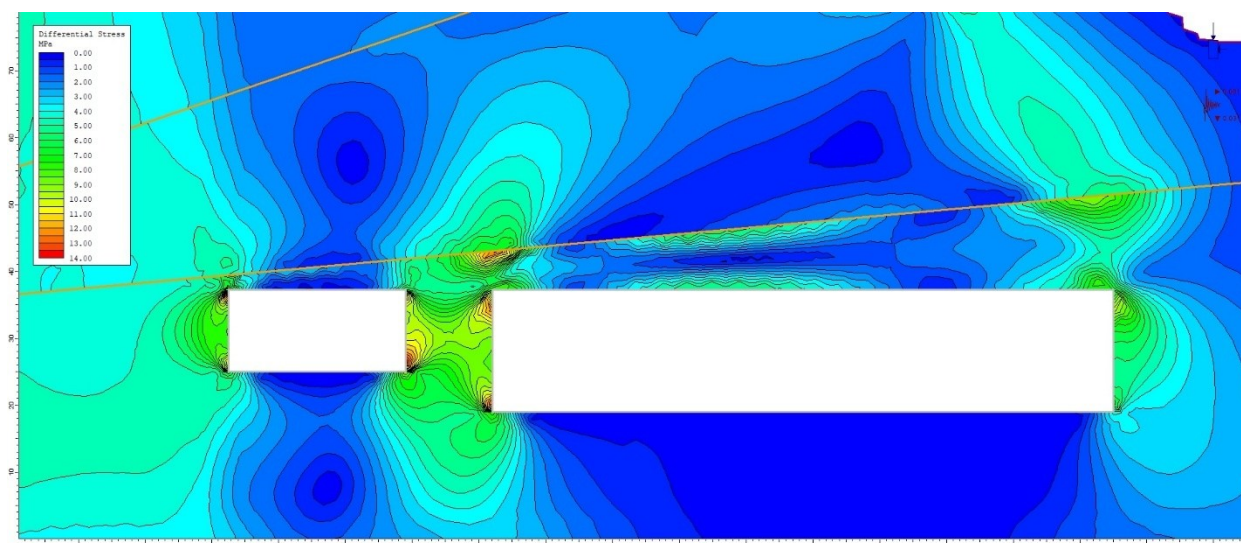


Figura 30 – Sezione A: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 39 di 64

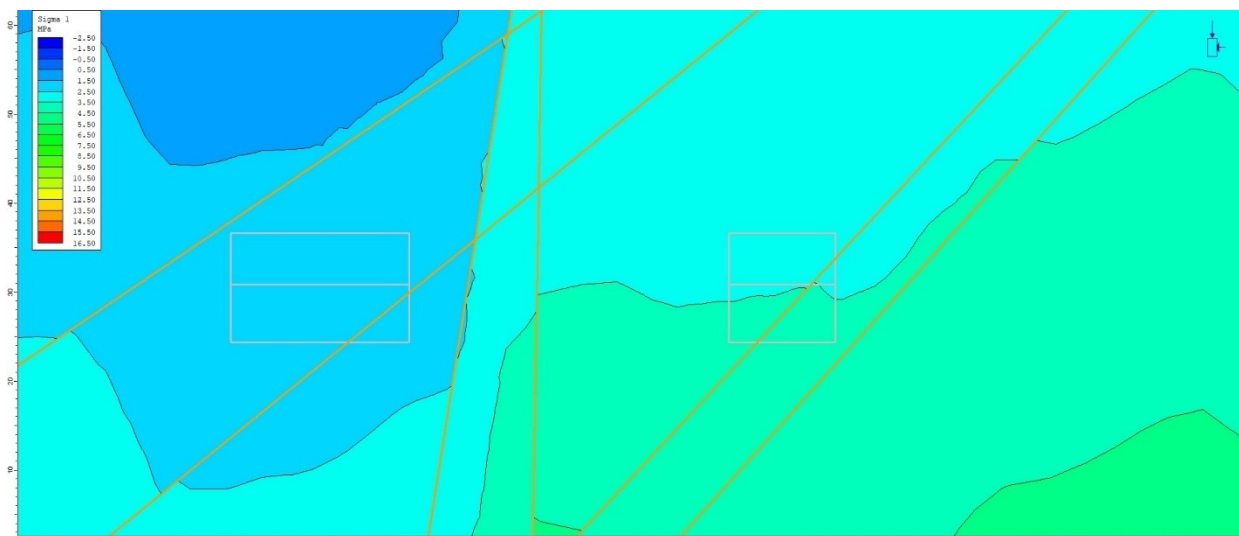


Figura 31 – Sezione D: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato attuale

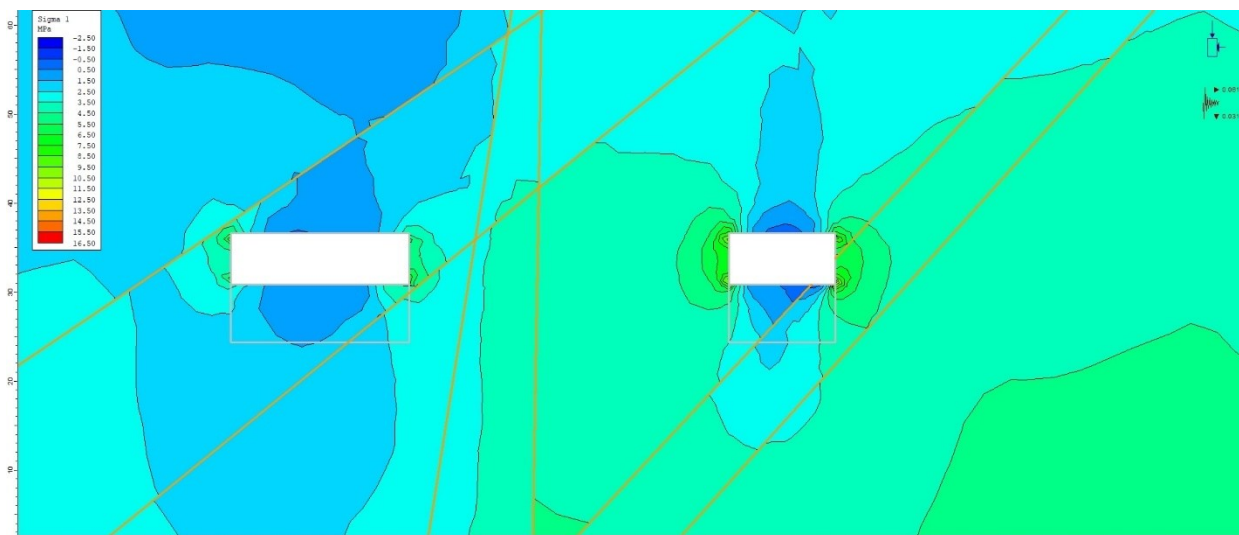


Figura 32 – Sezione D: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato intermedio

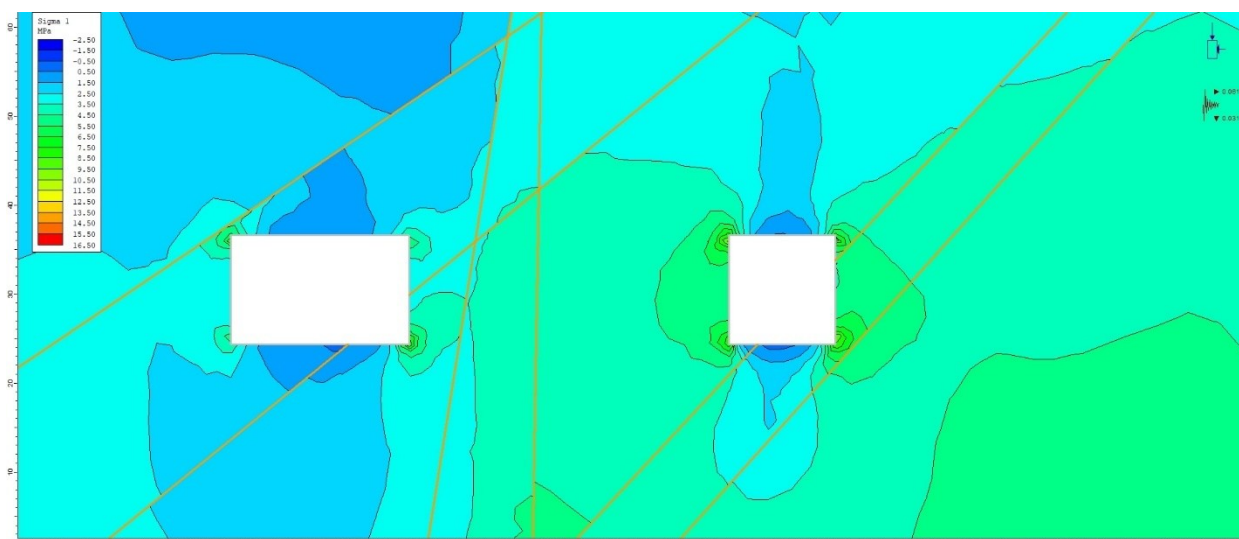


Figura 33 – Sezione D: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 40 di 64



Figura 34 – Sezione D: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato attuale

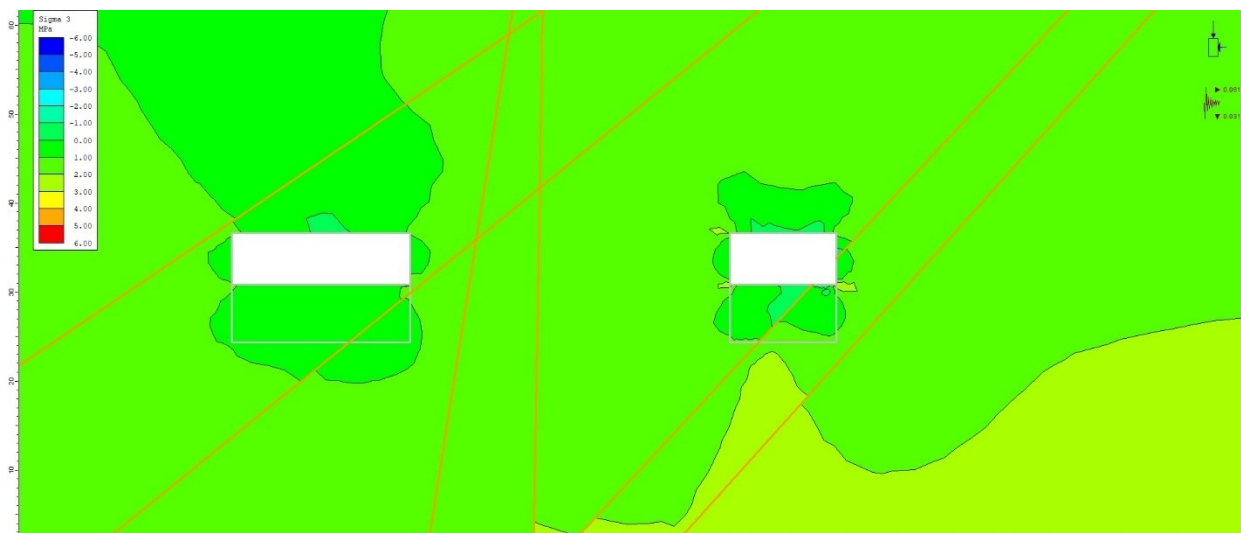


Figura 35 – Sezione D: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato intermedio



Figura 36 – Sezione D: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 41 di 64

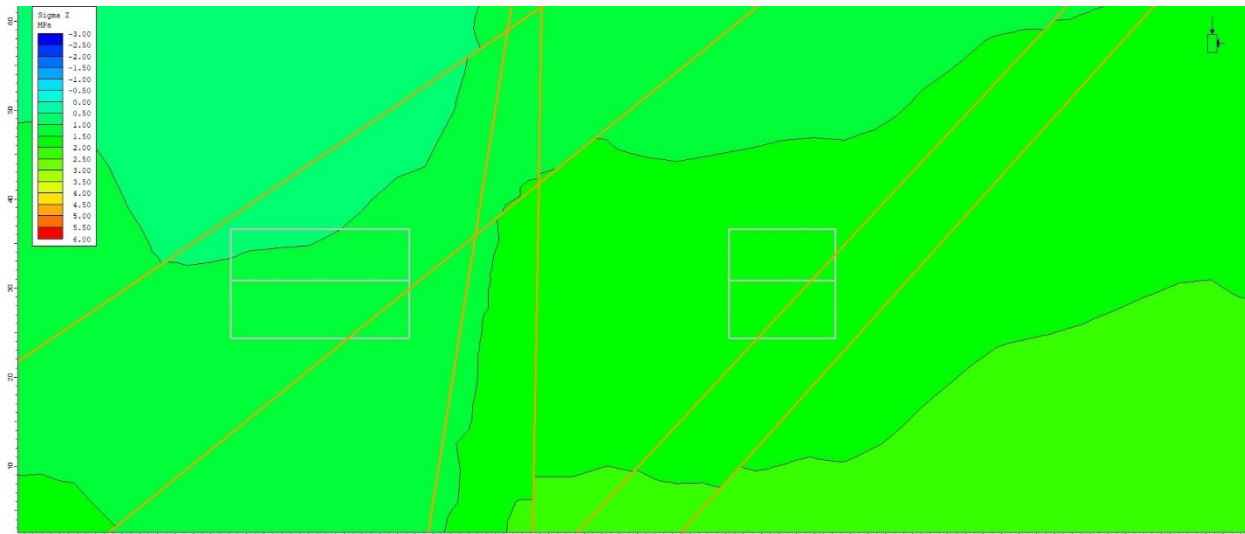


Figura 37 – Sezione D: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato attuale

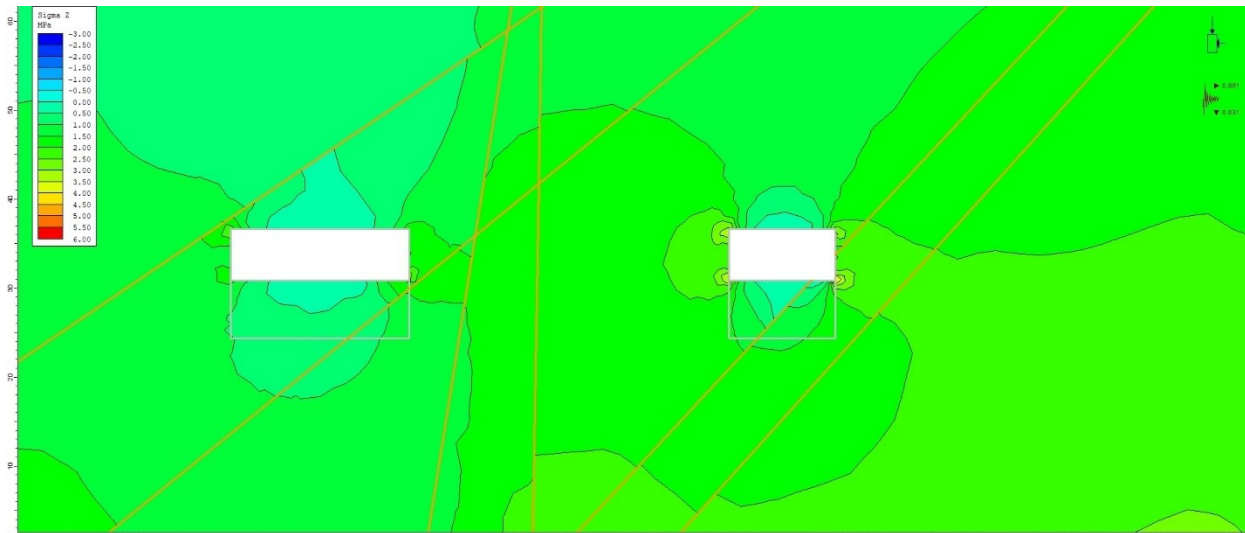


Figura 38 – Sezione D: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato intermedio

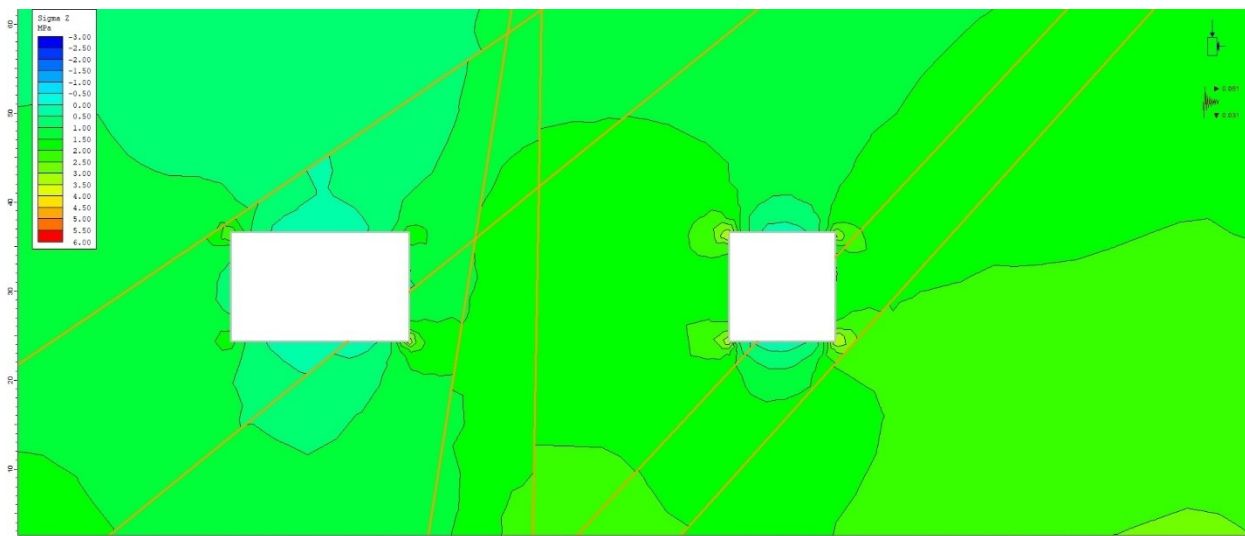


Figura 39 – Sezione D: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 42 di 64

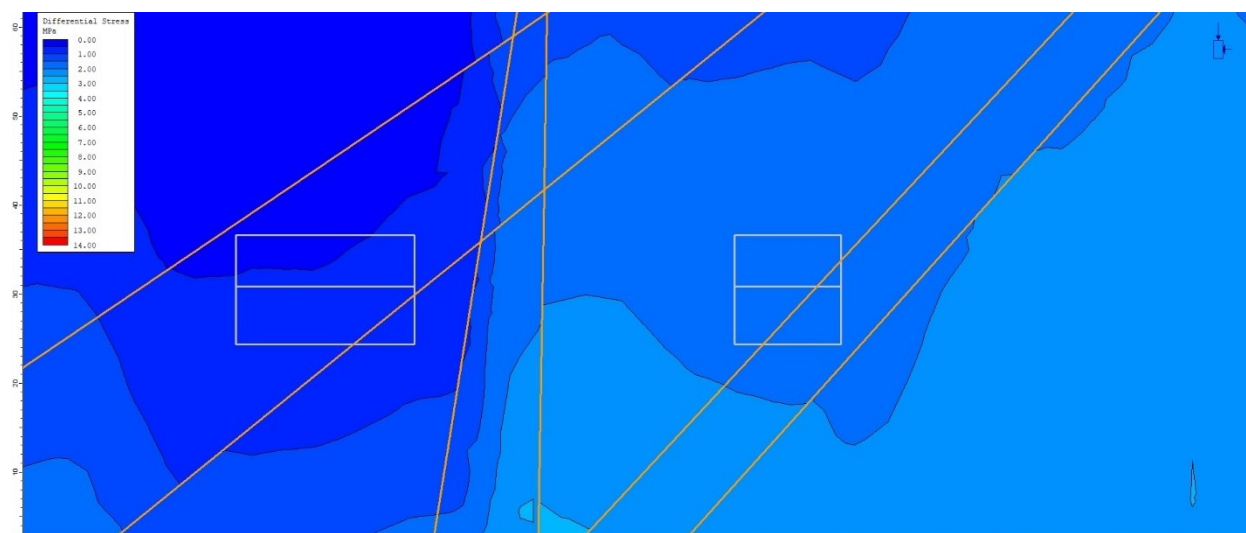


Figura 40 – Sezione D: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato attuale

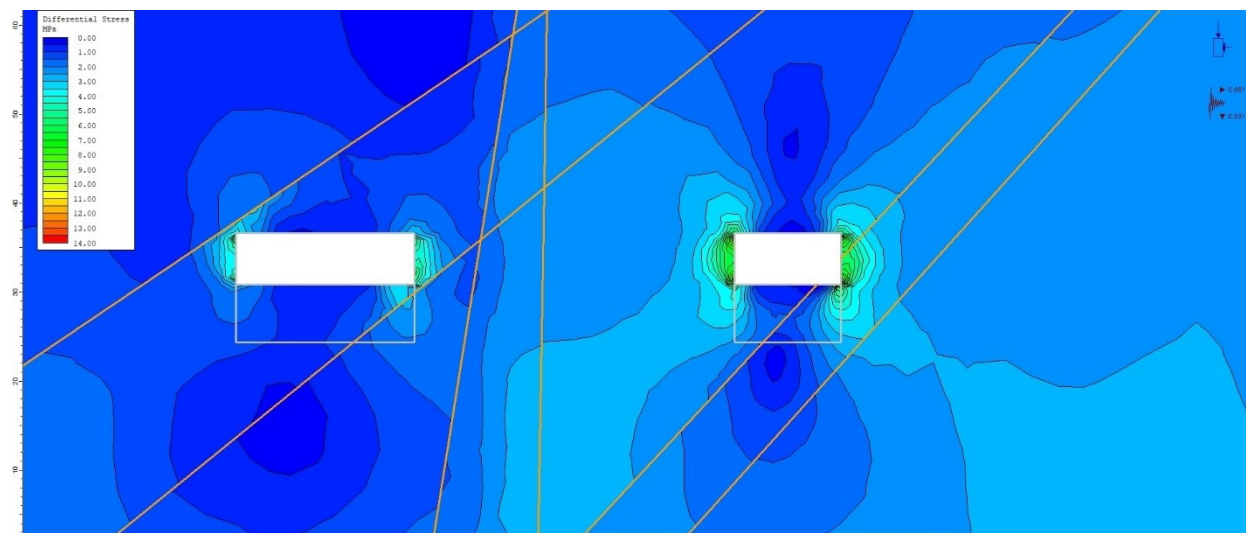


Figura 41 – Sezione D: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato intermedio

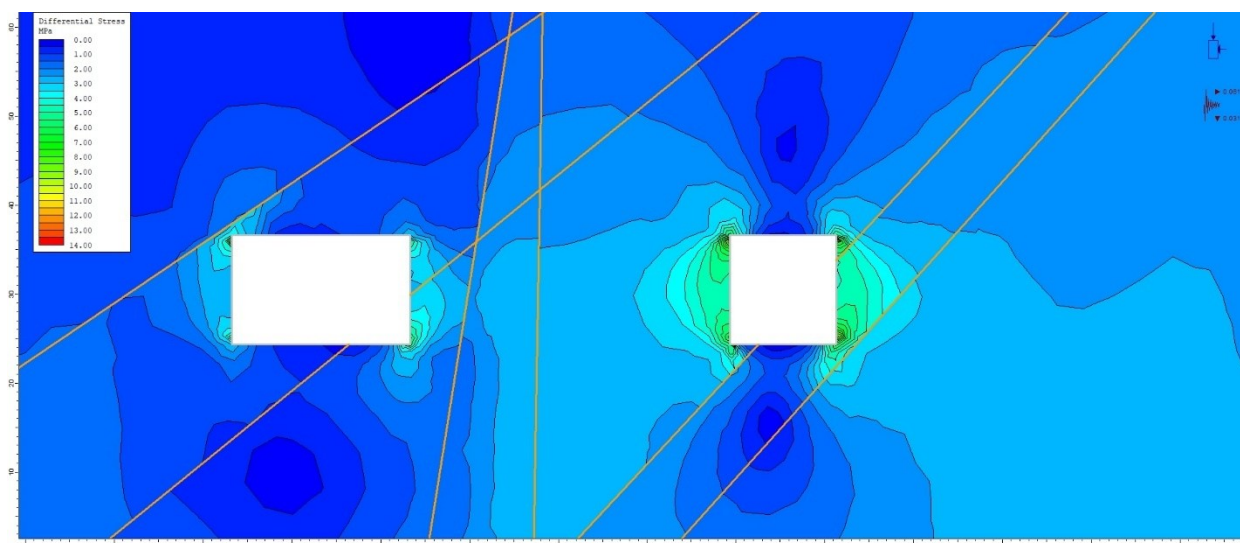


Figura 42 – Sezione D: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 43 di 64

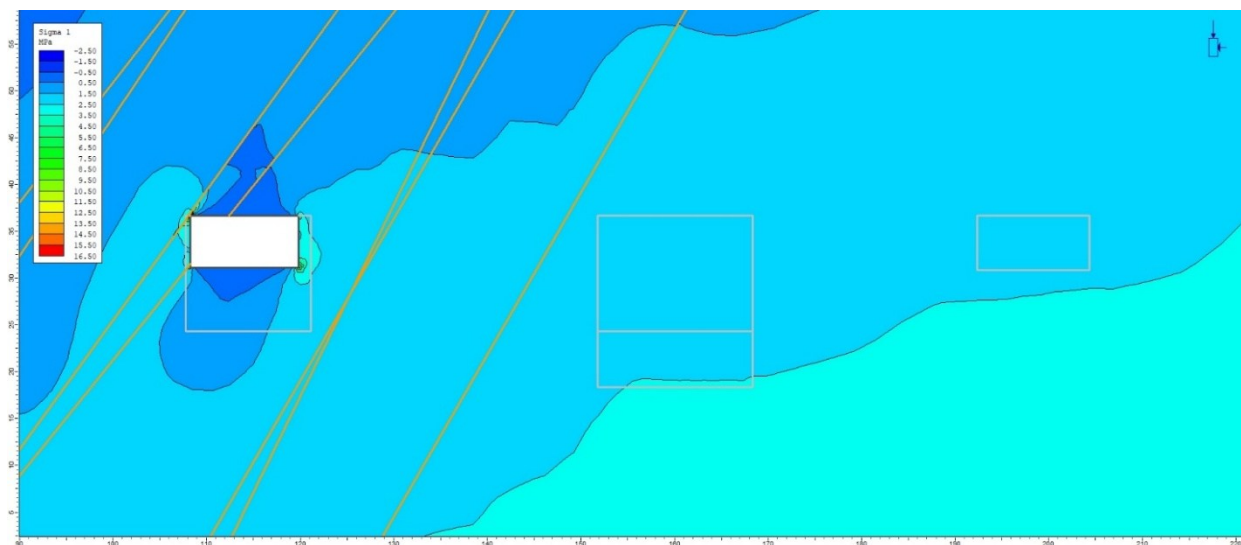


Figura 43 – Sezione G: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato attuale

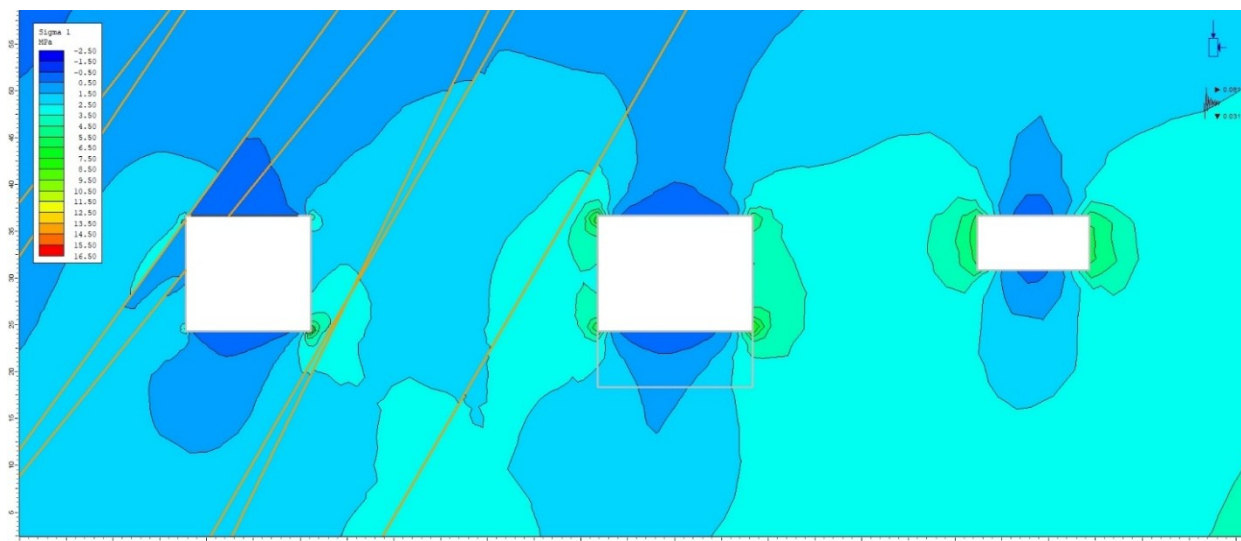


Figura 44 – Sezione G: componente principale massima del tensore degli sforzi(σ_1), stato intermedio

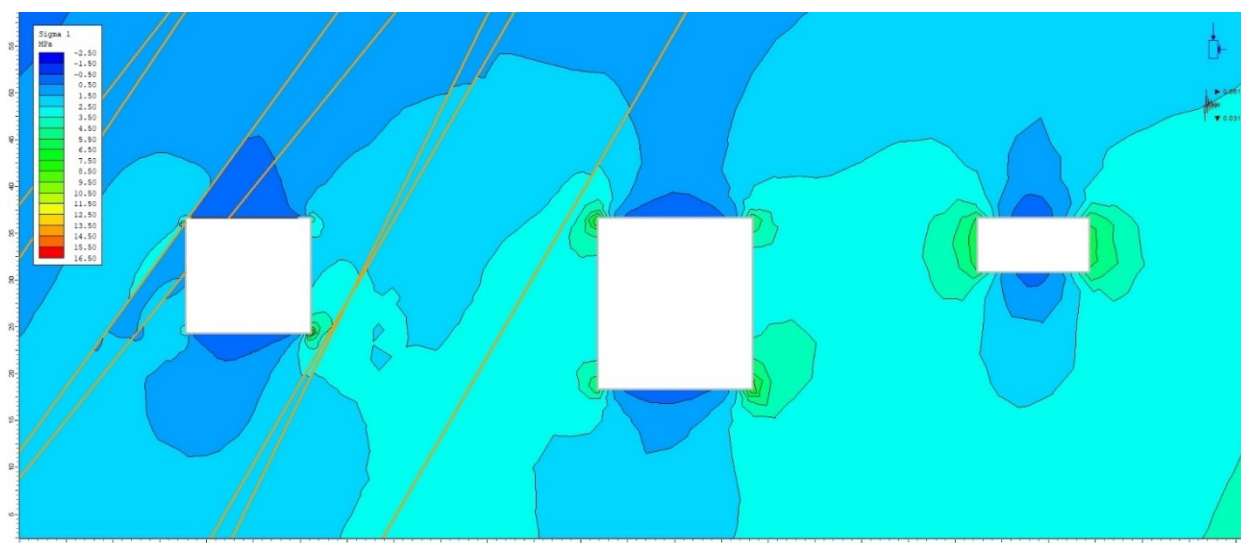


Figura 45 – Sezione G: componente principale massima del tensore degli sforzi (σ_1), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 44 di 64

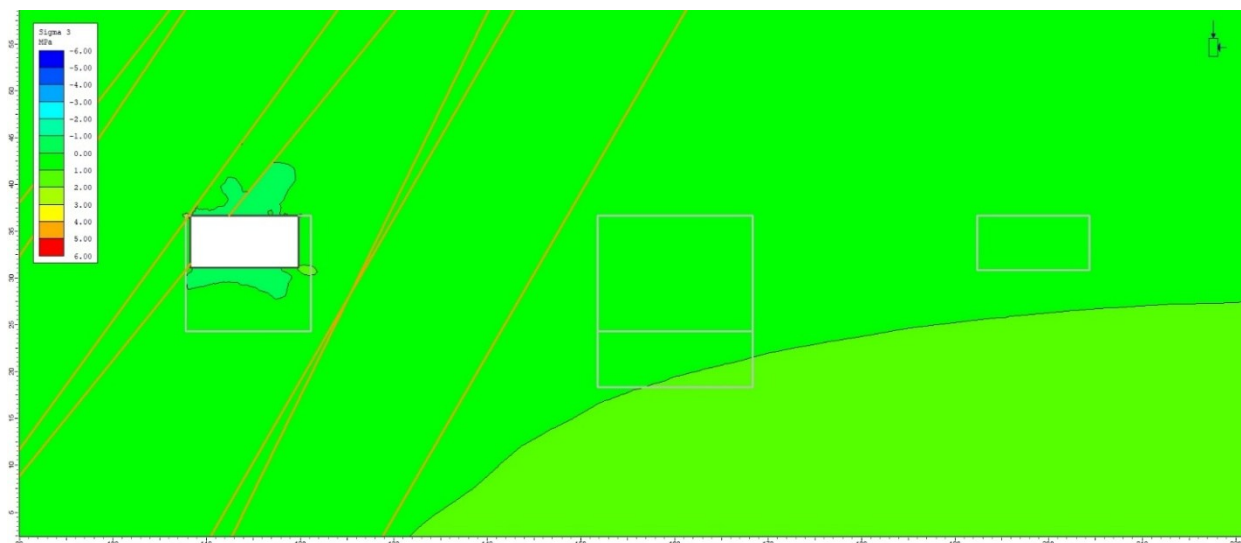


Figura 46 – Sezione G: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato attuale

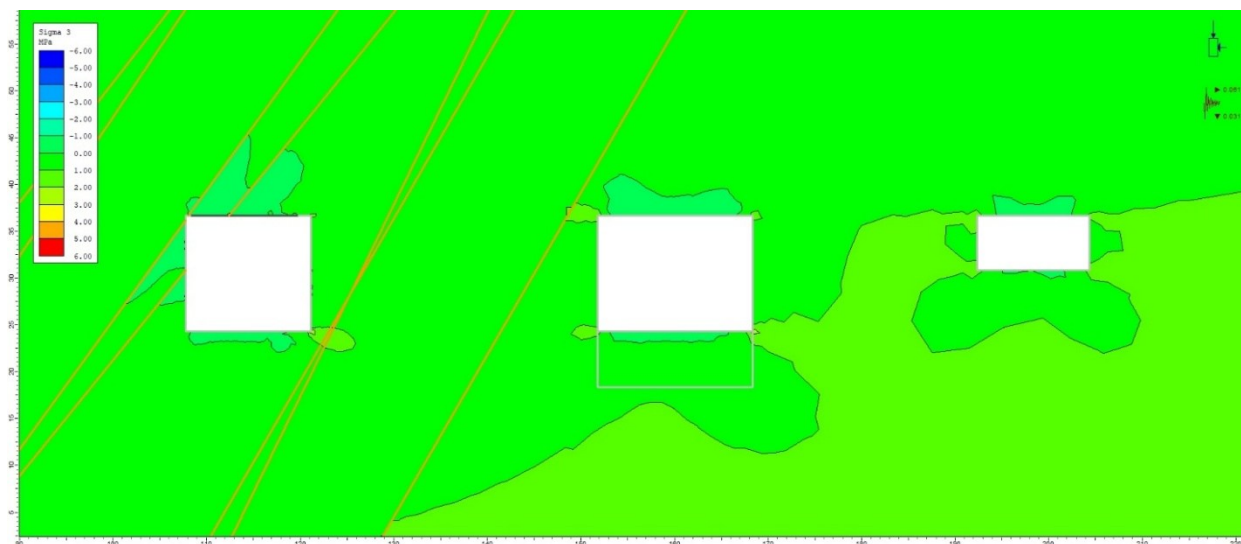


Figura 47 – Sezione G: componente principale minima del tensore degli sforzi(σ_3), stato intermedio

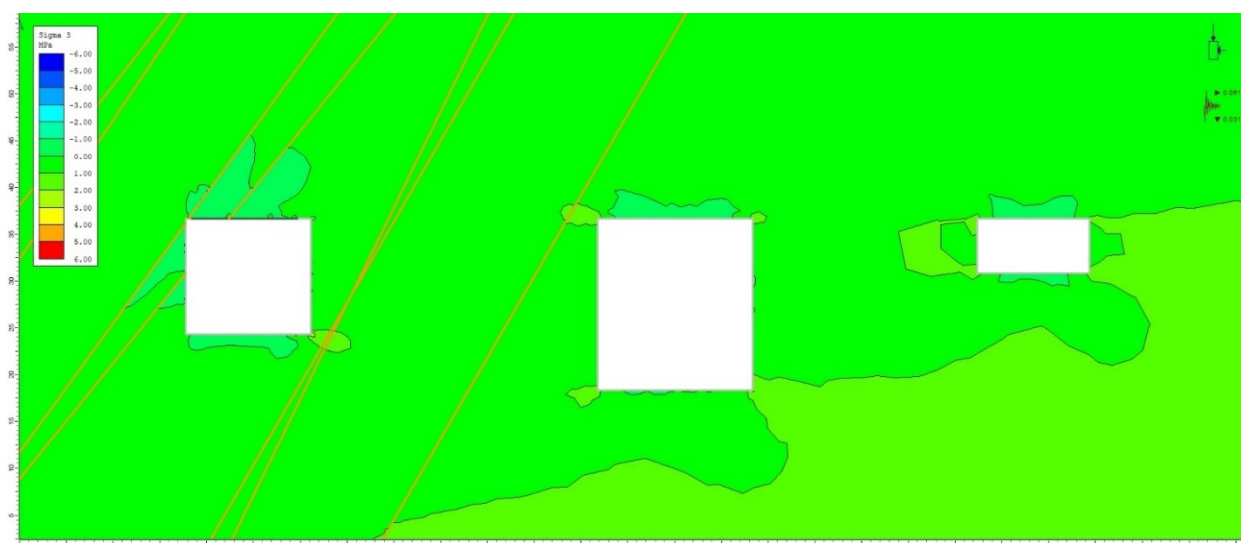


Figura 48 – Sezione G: componente principale minima del tensore degli sforzi (σ_3), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 45 di 64



Figura 49 – Sezione G: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato attuale

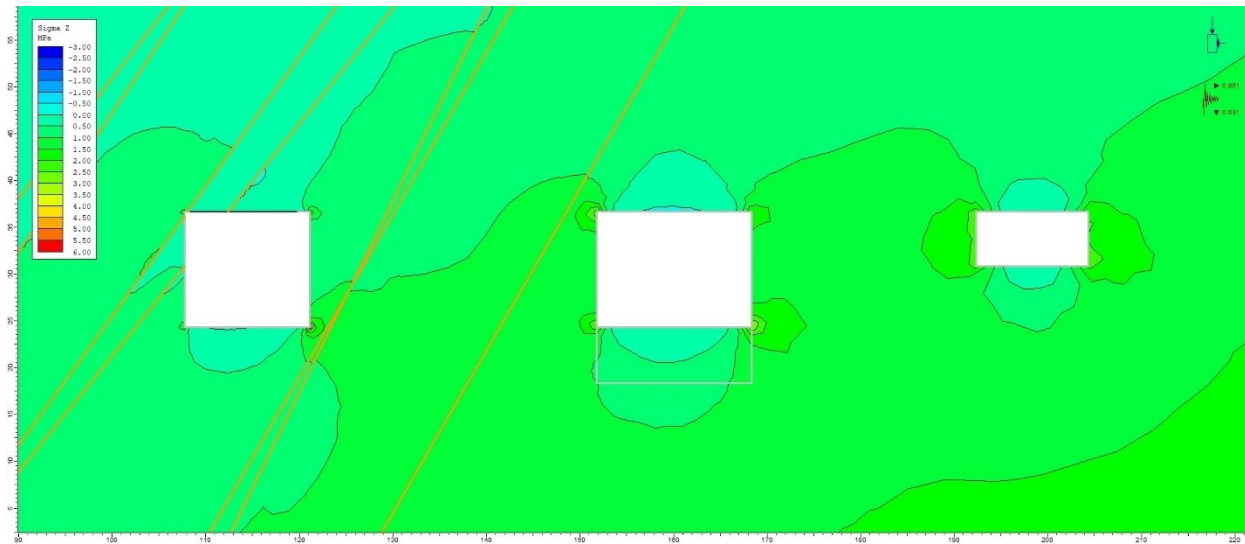


Figura 50 – Sezione G: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato intermedio

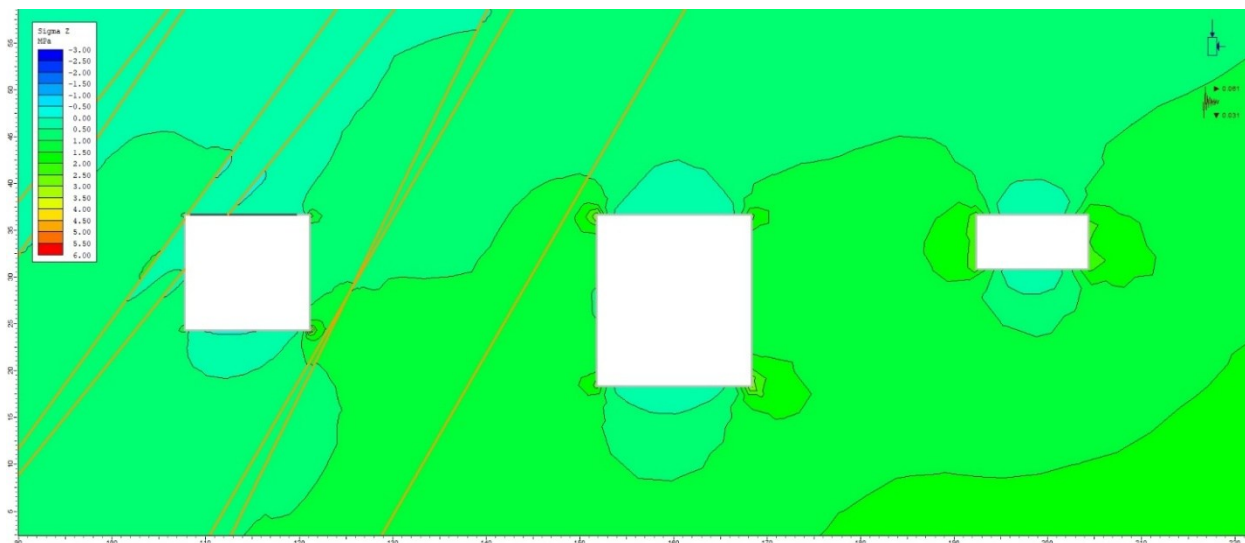


Figura 51 – Sezione G: componente verticale del tensore degli sforzi (σ_{zz}), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 46 di 64

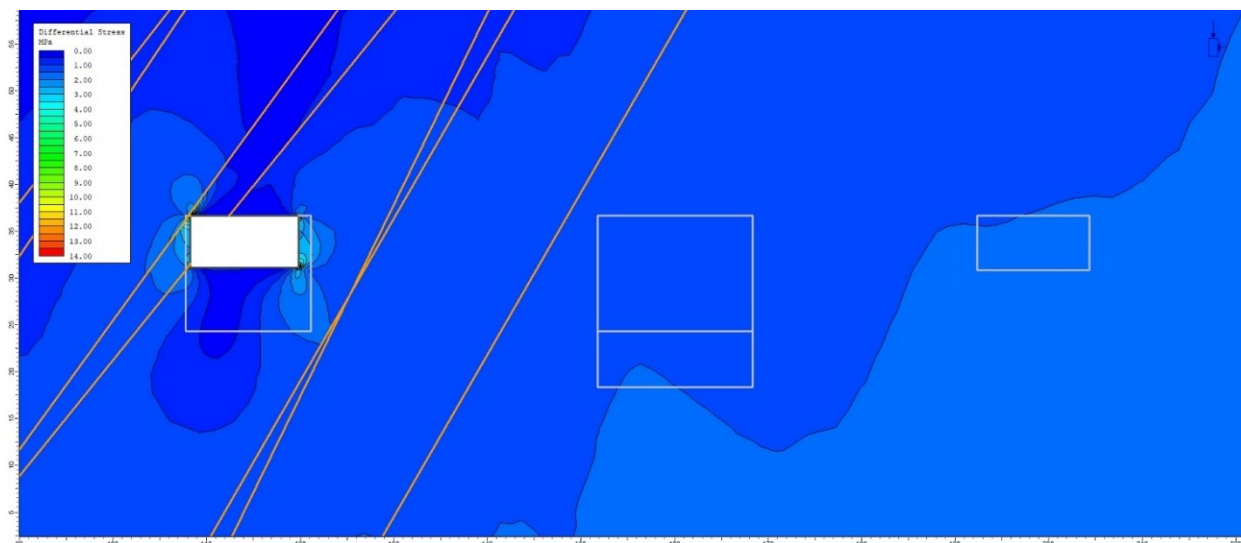


Figura 52 – Sezione G: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato attuale

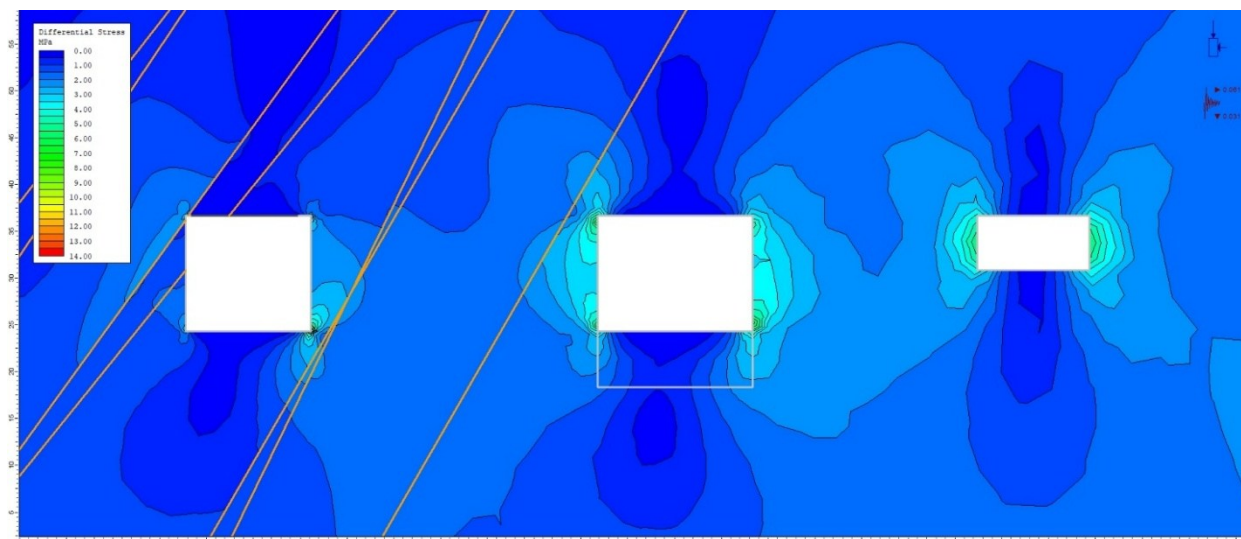


Figura 53 – Sezione G: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato intermedio

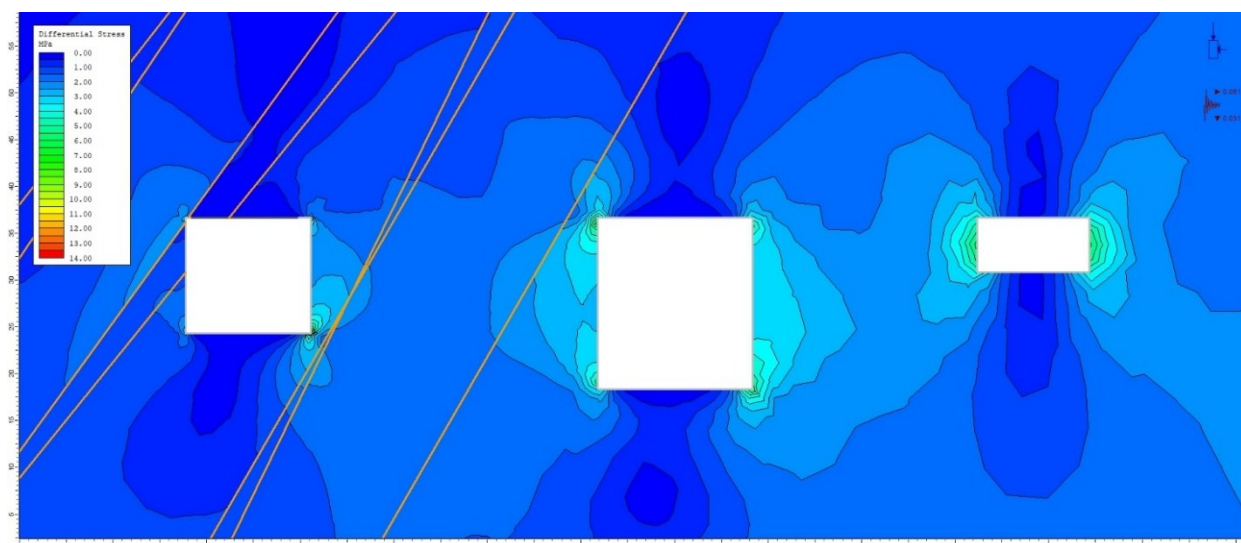


Figura 54 – Sezione G: componente deviatorica del tensore degli sforzi (σ_{1-3}), stato finale

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 47 di 64

In prossimità del contorno di scavo, il modello numerico ha fornito valori di trazione compresi fra -0,11 e -0,18 Mpa, inferiori al valore limite di trazione ottenuto dalla caratterizzazione geotecnica della cava di -0,98 MPa. Le tensioni di compressione massima hanno mostrato alcuni valori di picco localizzato di 13 Mpa, con valori normalmente compresi fra 8-10 MPa. Lo sforzo deviatorico ricavato dalla modellazione ha mostrato alcuni valori di picco localizzato di 13 Mpa, con valori normalmente compresi fra 7-9 MPa.

In generale si può concludere che lo stato tensionale al contorno dello scavo non sembra manifestare o potenzialmente indurre criticità statiche al contorno dello stesso.

5. Strumentazione di monitoraggio strutturale

Il sistema di monitoraggio geostrutturale per il cantiere sotterraneo, è stato pensato in modo da poter controllare alcune porzioni di ammasso roccioso ritenute strutturalmente importanti. Si prevede di effettuare una misurazione dello stato tensionale tridimensionale, mediante tecnica CSIRO HiCell, in corrispondenza della porzione centrale del futuro pilastro (P3) prima che esso venga isolato. Nella prosecuzione del medesimo foro pilota, verranno installati tre stress meter monoassiali, ruotati di 45° rispetto l'asse del foro (BS0, BS45, BS90), in modo da poter ricostruire lo stato di stress piano agente nel pilastro.

Si monitoreranno gli spostamenti delle principali discontinuità attraversanti i pilastri di progetto, prevedendo per ciascun sostegno l'installazione di un estensimetro multibase in foro (numero di basi variabile in funzione dello stato di fratturazione realmente riscontrato). Per il pilastro di imbocco (P1) è prevista l'installazione di una cella di carico (Cc01) su uno dei tiranti passanti che verranno collocati nella parete destra della galleria di imbocco, come riassunto in figura, per valutare la variazione del precarico applicato alle barre filettate.

Ulteriori valutazioni andranno condotte con il proseguo della coltivazione per valutare l'esigenza di installare ulteriori strumenti in posizioni ora non accessibili.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 48 di 64

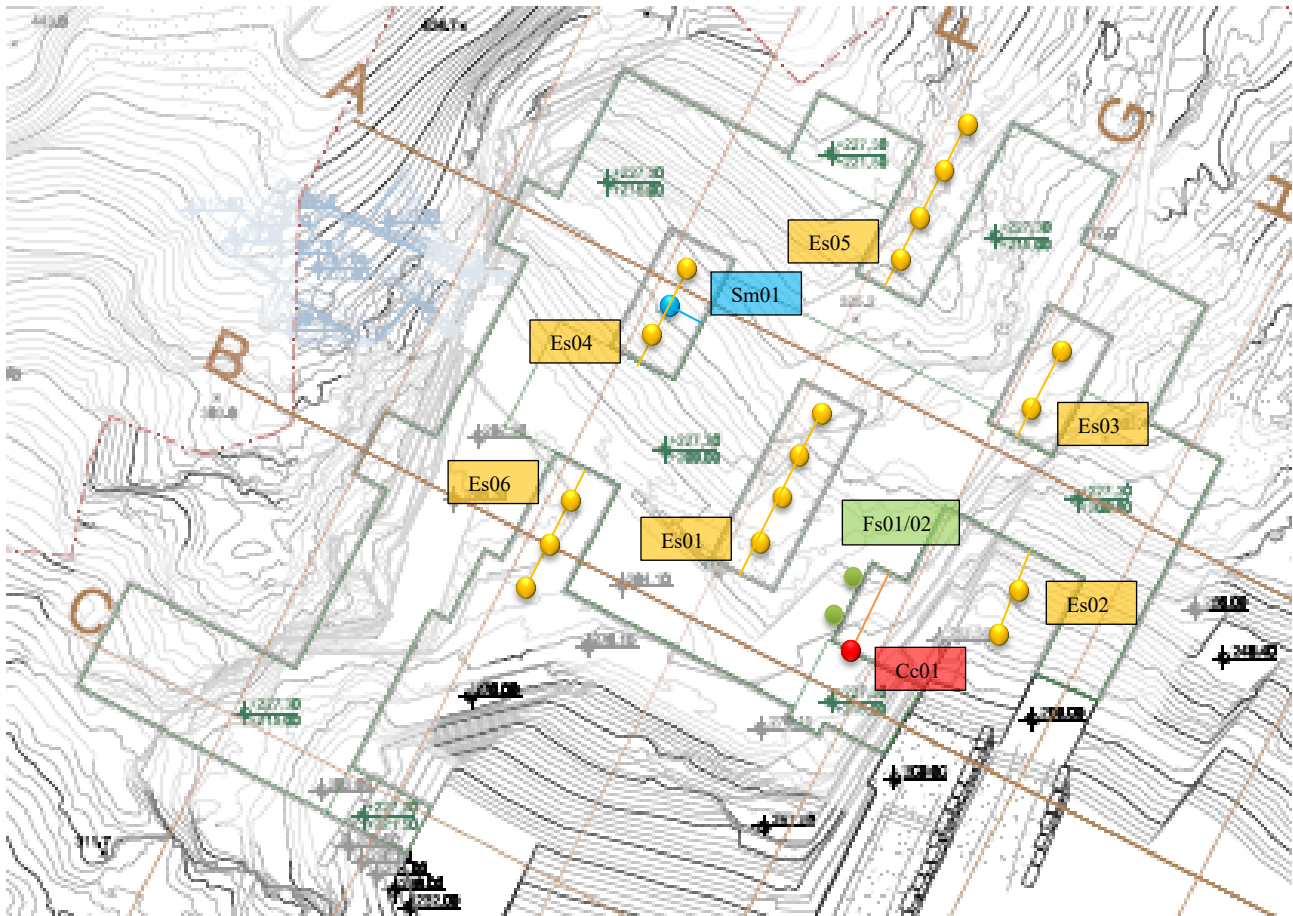


Figura 55 – stralcio della planimetria in progetto, con posizione della strumentazione di monitoraggio (St: Stress metter, Es: Estensimetro multibase in foro, Cc: cella di carico, Fs: Fessurimetro elettrico)

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 49 di 64

6. Conclusioni

Nel rapporto si descrive l'analisi geomeccanica di stabilità della cava n.64 "La Madonna" oggetto del presente progetto di escavazione. Per eseguire la valutazione tecnica sono stati condotti sopralluoghi congiunti tra il Direttore Responsabile e il personale sorvegliante, ed eseguiti dei rilievi geostrutturali volti alla determinazione delle caratteristiche principali dell'ammasso roccioso. Da tali rilievi, e dal successivo trattamento statistico dei dati, sono stati valutati i parametri geomeccanici attribuibili alle discontinuità presenti nell'ammasso in esame.

I dati utilizzati per le valutazioni analitiche sono stati trattati secondo la vigente Normativa tecnica, contenuta del D.M. 17/01/2018, che impone l'uso del metodo semi-probabilistico denominato "dei coefficienti parziali" che prevede l'uso del criterio di verifica agli stati limite. Le verifiche condotte hanno interessato i cinematismi generabili dall'intersezione delle n famiglie di discontinuità riconosciute nell'ammasso roccioso con i fronti ricorrenti di avanzamento a del cantiere a cielo aperto, i cunei di roccia generabili a tetto del cantiere sotterraneo, la verifica degli elementi di sostegno della coltivazione sotterranea e la verifica tenso-deformativa al contorno dello scavo.

I calcoli sono stati eseguiti mediante differenti codici numerici basati sia sul metodo dell'equilibrio limite che sul metodo agli elementi i finiti, in grado di considerare l'effetto sismico e la resistenza di coesione mobilitabile sui giunti.

Dove i cinematismi analizzati hanno mostrato un fattore di sicurezza insufficiente è stato proposto l'intervento necessario per ristabilire adeguate condizioni di sicurezza, laddove le valutazioni specifiche mostrassero caratteristiche differenti da quelle ipotizzate nell'analisi il Direttore Responsabile prevedrà una nuova verifica deterministica.

Ing. Marco Berlinghieri

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 50 di 64

Regione Toscana

Comune di Carrara (MS)

Relazione geomeccanica di stabilità

Cava di marmo n. 64 "La Madonna" – Bacino di Torano

Ditta:	<u>Cave di Sponda S.r.l.</u> Via Genova, 42 54033 Carrara (MS)
--------	--

Allegato A - Valutazione dell'azione sismica

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 51 di 64

Nell'analisi dei possibili cinematismi, come previsto dalle NTC '18, sono state tenute in considerazione le azioni sismiche, valutandole con metodi pseudostatici, cioè mediante i metodi dell'equilibrio limite (l'azione sismica è rappresentata da una forza statica equivalente pari al prodotto delle forze di gravità per un opportuno coefficiente sismico).

I coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v possono essere valutati mediante le espressioni:

$$k_h = \beta_m \cdot a_{max} / g \quad (16)$$

$$k_v = \pm 0,5 k_h \quad (17)$$

Ai fini dell'individuazione dell'azione sismica di progetto, utilizzando le seguenti tabelle (Tabella 3.2.II e Tabella 3.2.V NTC'18) è stata scelta la categoria di sottosuolo a cui riferirsi, e ricavati i coefficienti di amplificazione stratigrafica S_s e C_c , che per sottosuoli di categoria A valgono 1.

Tabella 16 - categorie di sottosuolo

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 52 di 64

Tabella 17 - espressioni di S_s e di C_c

Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Nella valutazione del coefficiente di amplificazione topografica, si è adottata la classificazione proposta in normativa, che per la configurazione in esame S_s assume valore unitario (Tabella 3.2.IV e Tabella 3.2.VI NTC'18).

Tabella 18 - categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie piana, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ < i < 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tabella 19 - valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Per quel che riguarda la applicazione dei carichi dinamici si è fatto riferimento alla condizione di Stato Limite al Collasso (SLC) reperendo i parametri caratteristici, definiti sul territorio nazionale e classificati a seconda della località in esame, dalla specifica normativa.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 53 di 64

Tabella 20 - parametri sismici per il sito in esame, periodo di riferimento dell'azione sismica 50 anni

Stato Limite	Tr [anni]	a_g [g]	Fo	Tc* [s]
Operatività (SLO)	30	0,050	2,454	0,237
Danno (SLD)	50	0,064	2,469	0,254
Salvaguardia della vita (SLV)	475	0,159	2,394	0,289
Prevenzione collasso (SLC)	975	0,204	2,382	0,295

L'accelerazione orizzontale massima al sito, è così ottenuta

$$a_{max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g = 1 \cdot 1,4 \cdot 0,159 = 2,185 \text{ m/s}^2$$

Definiti i parametri caratteristici della zona di progetto, si è potuto definire il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa del sito (Tabella 7.11.I NTC'08).

Tabella 21 - coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g \text{ (g)} \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g \text{ (g)} \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g \text{ (g)} \leq 0,1$	0,20	0,20

I coefficienti sismici orizzontale k_h e verticale k_v risultano quindi:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{max}/g = 0,060$$

$$k_v = \pm 0,5 k_h = \pm 0,030 \text{ m/s}^2$$

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 54 di 64

Regione Toscana

Comune di Carrara (MS)

Relazione geomeccanica di stabilità

Cava di marmo n. 64 "La Madonna" – Bacino di Torano

Ditta:

Cave di Sponda S.r.l.
Via Genova, 42
54033 Carrara (MS)

**Allegato B - Caratteristiche tecniche elementi di rinforzo per il
consolidamento**

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 55 di 64

Allegato B-01: caratteristiche tecniche elementi di rinforzo per il consolidamento

Tiranti a barre DYWIDAG a filettatura continua

Concetto Base

I tiranti in barre a filettatura continua DYWIDAG costituiscono un sistema attivo secondo le norme DIN 4125 e EN 1537. Il tensionamento attivo produce deformazioni anticipate del sistema, e deformazioni strutturali minime o nulle. Il sistema è applicabile sia per strutture provvisorie (ad es. stabilizzazioni provvisorie di scavi) che per usi definitivi quali i tiranti di banchina.

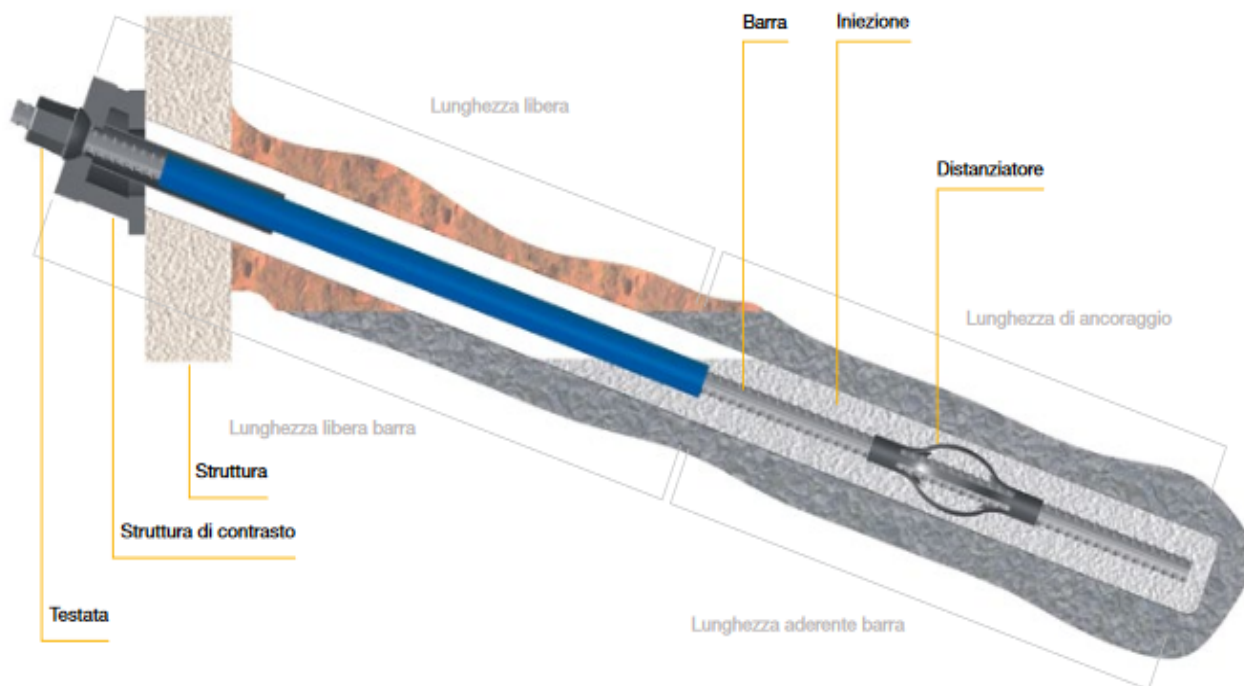
Per definizione un tirante si compone di tre parti principali:

- **Lunghezza di ancoraggio:** Il tirante è connesso nella perforazione con boiacca di cemento e può trasmettere la forza al terreno portante per aderenza e attrito.
- **Lunghezza libera:** La barra non è connessa alla perforazione essendo dotata di un tubo (guaina) liscio che permette il libero allungamento del tratto libero. In questo modo il sistema può essere messo in tensione.
- **Testata di ancoraggio:** La testata trasferisce la forza alla struttura di contrasto e quindi alla struttura da ancorare.

Una volta indurita la boiacca d'iniezione, la capacità portante di ogni tirante è provata mediante un test di collaudo.

Se richiesto i tiranti possono essere ritrabili o rilasciabili. Il controllo permanente delle forze può essere eseguito con celle di carico. In alternativa si può utilizzare il sistema DYNA Force® da posizionarsi oltre la testata o all'interno del foro. Il sistema è stato sviluppato in collaborazione con DSI.

Tirante a barre



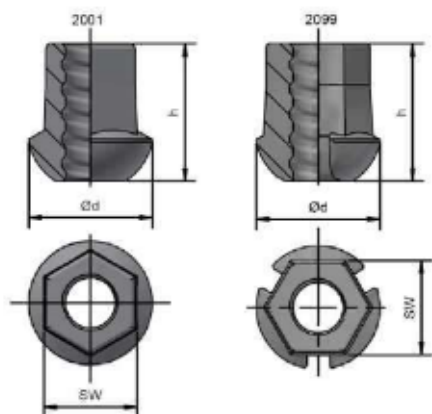
Campi d'impiego

- Costruzioni urbane
- Scavi (deformazione controllata)
- Tiranti di banchina
- Stabilizzazione di pareti rocciose e pendii
- Controllo sottosplinta
- Posizionamento stabile
- Costruzione dighe
- Tiranti verso l'alto

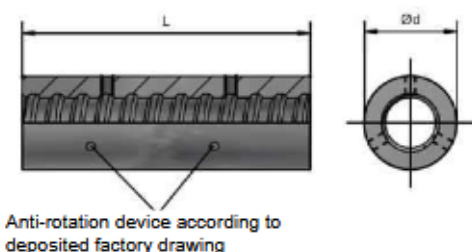
Caratteristiche chiave

- Barre a filettatura continua con filetto grossolano robusto lungo l'intera lunghezza; aggiustamento della lunghezza in cantiere possibile
- Varie qualità di acciaio
 - Barre di elevate qualità per un buon rapporto forza / perforazione
 - Robusta, saldabile Barra GEWI®
 - Barre GEWI® Plus per prestazioni più elevate
- Progetti variabili delle testate e delle compensazioni angolari
- Facilità di impiego: tesatura o rilascio con bloccaggio a vite
- Facile installazione a soffitto – ad esempio in caverna – con barre rigide

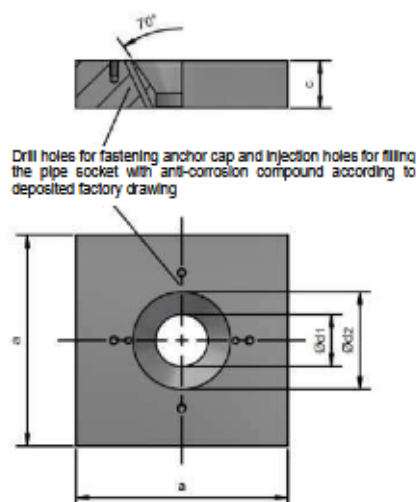
Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 56 di 64



Domed nut (domed nut with grouting slots 2099 according to ETA 05/0123)				
Nominal diameter	Material	SW	Ø d	h
mm	-	mm	mm	mm
Ø 26.5	DIN EN 10025-2 - S355J2 / E295	50	72	75
Ø 32	DIN EN 10025-2 - S355J2 / E295	60	80	90
Ø 36	DIN EN 10025-2 - S355J2 / E295	65	90	100
Ø 40	DIN EN 10293 — G34CrMo4	70	100	115



Coupler (coupler 3003 according to ETA 05/0123)			
Nominal diameter	Material	Ø d	L
mm	-	mm	mm
Ø 26.5	DIN EN ISO 683-1-C45	50	170
Ø 32	DIN EN ISO 683-1-C45	60	200
Ø 36	DIN EN ISO 683-1-C45	68	210
Ø 40	DIN EN 10220-20MnVS6	70	245



Anchor plate (Square solid plate 2011 according to ETA 05/0123)					
Nominal diameter	Material	a	C	Ø d1	Ø d2
mm	-	mm	mm	mm	mm
Ø 26.5	DIN EN 10025-2 -S235JR	150	35	39	72
Ø 32	DIN EN 10025-2-S235JR	180	40	45	82
Ø 36	DIN EN 10025-2-S235JR	200	45	49	92
Ø 40	DIN EN 10025-2-S235JR	220	45	54	100

DYWIDAG permanent anchor (single bar anchor) for soil and rock with steel tendons made of: St 950/1050 Ø 26.5 mm, Ø 32.0 mm, Ø 36.0 mm and Ø 40.0 mm

Components according to ETA-05/0123: Stressing anchor (anchor plate, domed nut) and coupler

Annex 3

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 57 di 64

Nominal diameter	Steel grade	Ultimate strength	Yield strength	Cross-sectional area	Diameter over threads	Thread pitch	Weight
[mm]	[N/mm ²]	[kN]	[kN]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[kg/m]
15	900/1100	195	159	177	17	10	2.00
20	900/1100	345	283	314	23	10	2.56
26.5	950/1050	579	525	551	30	13	4.48
32	950/1050	845	760	804	36	16	6.53
36	950/1050	1,070	960	1,020	40	18	8.27
40	950/1050	1,320	1,190	1,257	45	20	10.21
47	950/1050	1,822	1,650	1,735	52	21	14.10
57	835/1035	2,671	2,155	2,581	64	21	20.95
65	835/1035	3,447	2,780	3,331	71	23	27.10
75	835/1035	4,572	3,690	4,418	82	24	35.90

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 58 di 64

Regione Toscana

Comune di Carrara (MS)

Relazione geomeccanica di stabilità

Cava di marmo n. 64 "La Madonna" – Bacino di Torano

Ditta:

Cave di Sponda S.r.l.
Via Genova, 42
54033 Carrara (MS)

Allegato C – Sistema di ventilazione della galleria

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 59 di 64

a) Introduzione ed obiettivo della valutazione

Il presente addendum è parte integrante del progetto di coltivazione della cava n.64 "La Madonna", e va a fornire un dimensionamento del sistema di ventilazione attiva per fornire l'ordinario fabbisogno d'aria nel cantiere sotterraneo.

L'impianto dovrà garantire un ricambio d'aria idoneo, nelle zone di lavorazione della cava, mediante l'immissione di aria pulita, mediante un apposito ventilatore dedicato e ad un condotto flessibile in PVC.

b) Dimensionamento del sistema di ventilazione

Occorre anzitutto procedere alla definizione del layout generale dell'impianto, si adotterà uno schema di ventilazione biflusso di tipo premente. Il sistema è strutturato in modo da portare l'area di lavoro in sovrappressione rispetto al punto di aspirazione dell'aria. Lo schema è riassunto nell'immagine seguente.

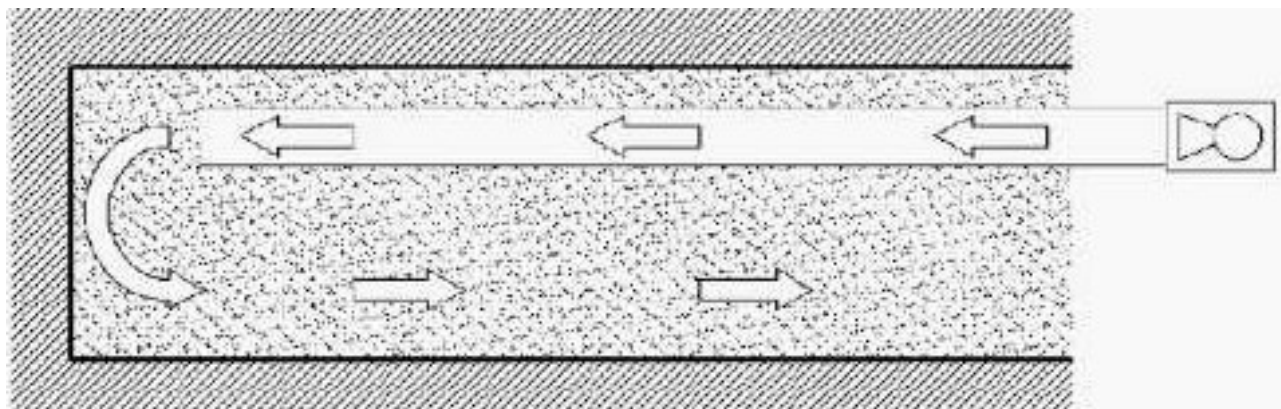


Figura 56 – Schema di ventilazione adottato

Per la definizione della portata d'aria in ingresso ci si avvale di relazioni empiriche che legano la portata d'aria richiesta alle portate installate, tenuti in conto i coefficienti di contemporaneità.

La portata d'aria richiesta in funzione del numero di lavoratori nella galleria è determinata in accordo con gli standard della normativa tedesca BGV C22, che prevede $2 \text{ m}^3/\text{min}$ di aria fresca ogni lavoratore.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 60 di 64

Tabella 22 – calcolo della portata richiesta per i lavoratori impiegati in galleria - normativa tedesca BGV C22

Numero di lavoratori in galleria	Q_W ($m^3/min/lavoratore$)	$Q_W\ tot$ (m^3/min)	$Q_W\ tot$ (m^3/s)
3	2	6	0,1

La portata d'aria richiesta in funzione dei mezzi meccanici alimentati a diesel in funzione nella galleria è determinata in accordo con gli standard della normativa svizzera SIA 196, che prevede $4\ m^3/min$ di aria fresca per ogni chilowatt di potenza del macchinario.

Tabella 23 – calcolo della portata richiesta per i mezzi meccanici impiegati in galleria – standard sicurezza SIA 196

Numero di lavoratori in galleria	Potenza (kW)	Q_{Op} ($m^3/min/kW$)	Coef. contemporaneità	$Q_{Op}\ tot$ (m^3/min)	$Q_{Op}\ tot$ (m^3/s)
Pala gommata Volvo L350F	394	4	0,7	1.103,2	18,4
Mini pala Caterpillar 232B	50	4	0,1	20,0	0,3
Escavatore Hitachi ZX690	348	4	0,1	139,2	2,3
Escavatore Hitachi ZX210	128	4	0,1	51,2	0,9
				1.313,6	21,9

Il quantitativo di aria fresca durante le fasi di sgombero e trasporto all'esterno del materiale estratto è ottenuto sommando le due portate valutate precedentemente:

$$Q_{tot} = Q_{W\ tot} + Q_{Op\ tot} = 22,00\ m^3/s \quad (18)$$

La velocità minima dell'aria per trasportare le particelle inquinanti, in accordo con i regolamenti minerari deve essere di $0,10\ m/s$. Essendo prevista una sezione del cantiere

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 61 di 64

media di 180 m^2 , il valore minimo in m^3/s della portata per soddisfare tale condizione sarebbe:

$$Q_{min} = A_t \cdot u_{min} = 18 \text{ m}^3/\text{s} \quad (19)$$

con la sezione del cantiere media $A_t = 180 \text{ m}^2$ e $u_{min} = 0,10 \text{ m/s}$.

La potenza teoricamente necessaria ad attivare la ventilazione si ottiene moltiplicando la totale caduta di pressione nel percorso dell'aria per la portata. Nel caso consideriamo la sola caduta di pressione relativa al percorso in tubo; questa caduta di pressione ("perdita di carico") è calcolata come somma di tre termini:

- perdita distribuita, proporzionale alla lunghezza;
- perdite localizzate, dovute ai cambiamenti di direzione (gomiti);
- perdite dovute alla variazione di velocità, dal valore esterno (praticamente nullo) a quello della corrente che circola nel tubo.

Si ipotizza di realizzare il condotto con tubo in plastica o analogo materiale, del diametro di 1,25 m.

Nelle condizioni più gravose la lunghezza raggiunge 200 m. Si ammette che possano trovarsi lungo il percorso 4 cambiamenti di direzione. Si esegue il calcolo per la portata massima richiesta, $22,00 \text{ m}^3/\text{s}$.

La caduta pressione è calcolata in mmH_2O ($1 \text{ mmH}_2\text{O} = 1 \text{ kgf/m}^3 \cong 10 \text{ MP}$).

La sezione del tubo risulta $1,23 \text{ m}^2$, il perimetro risulta 3,93 m.

La velocità del flusso d'aria all'interno della tubazione di mandata, nelle condizioni più gravose, risulta di:

$$v = \frac{Q}{S} = 17,88 \text{ m/s} \quad (20)$$

con portata nel tubo $Q = 22,00 \text{ m}^3/\text{s}$ e sezione del tubo $S = 1,23 \text{ m}^2$.

La perdita di carico distribuita h_1 , nel percorso di 200 m dal cantiere da aerare all'esterno, è calcolata in mmH_2O come:

$$h_1 = \alpha \cdot \frac{P \cdot L \cdot v^2}{S} = 61,3 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (21)$$

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 62 di 64

con coefficiente di resistenza $\alpha = 0,0003$, perimetro $P = 3,93 \text{ m}$, velocità del flusso d'aria all'interno della tubazione di mandata $v = 17,88 \text{ m/s}$, lunghezza del tubo $L = 200 \text{ m}$ e sezione del tubo $S = 1,23 \text{ m}^2$.

Le perdite di carico localizzate h_2 , dovute alle variazioni di direzione lungo il percorso, sono calcolate in mmH_2O come:

$$h_2 = n \cdot 0,061 \cdot v^2 \cdot r = 39,0 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (22)$$

con numero cambiamenti di direzione $n = 4$, velocità del flusso d'aria all'interno della tubazione di mandata $v = 17,88 \text{ m/s}$ e coefficiente dipendente dal tipo di raccordo $r = 0,5$. Il termine dovuto alla variazione di velocità, h_3 assunta paria a zero quella iniziale, è calcolato in mmH_2O come:

$$h_3 = \rho_o \cdot \frac{v^2}{2g} = 19,6 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (23)$$

con la massa volumica dell'aria $\rho_o = 1,2 \text{ kg/m}^3$, velocità del flusso d'aria all'interno della tubazione di mandata $v = 17,88 \text{ m/s}$ e l'accelerazione di gravità $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

La totale caduta di pressione risulta la sommatoria dei precedenti contributi:

$$\Delta p = h_1 + h_2 + h_3 = 119,9 \text{ mmH}_2\text{O} \quad (24)$$

La potenza teorica necessaria, è calcolata in $\text{kgf} \cdot \text{m/s}$ come:

$$W_t = Q \cdot \Delta p = 2.637,8 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} \quad (25)$$

con portata nel tubo $Q = 22,00 \text{ m}^3/\text{s}$ e caduta di pressione totale $\Delta p = 119,9 \text{ mmH}_2\text{O}$.

Per valutare la potenza effettiva necessaria, il valore di potenza teorica W_t deve essere diviso per il rendimento del macchinario:

$$W_e = \frac{W_t}{(r_m \cdot r_t \cdot r_v)} = 3.629,6 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} \quad (26)$$

con potenza teorica W_t , rendimento del motore $r_m = 0,9$, rendimento della trasmissione $r_t = 0,95$ e rendimento del ventilatore $r_v = 0,85$.

Nelle condizioni più gravose, il ventilatore fa circolare $22,00 \text{ m}^3/\text{s}$ ($79.200 \text{ m}^3/\text{h}$) d'aria in un condotto lungo 200 m , con una prevalenza di $119,9 \text{ mmH}_2\text{O}$, assorbendo una potenza di $3.629,6 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$ che corrispondono a $35,6 \text{ kW}$.

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 63 di 64

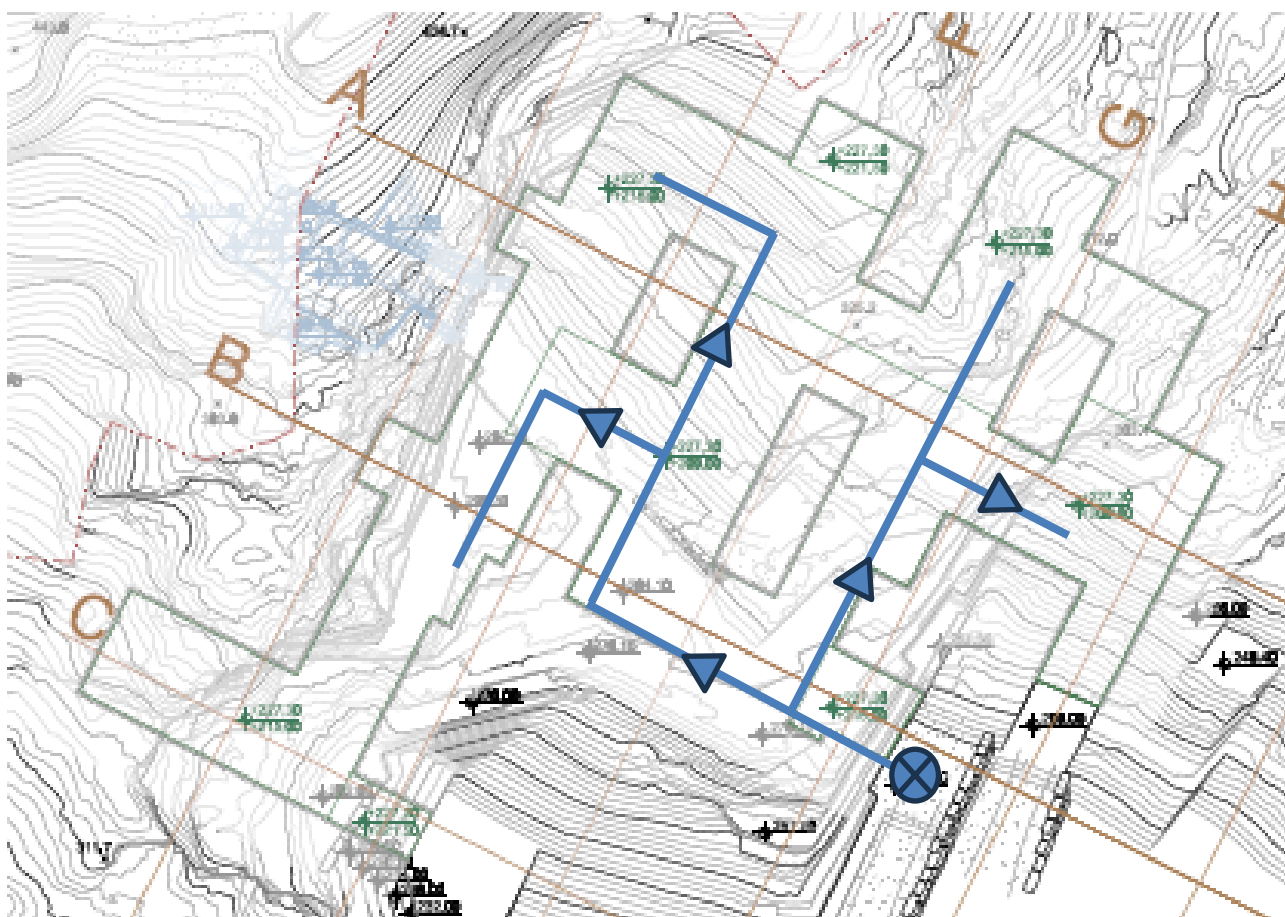


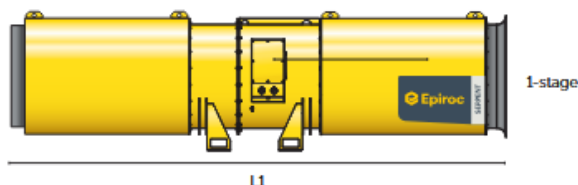
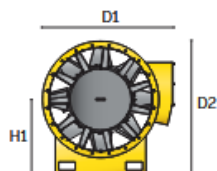
Figura 57 – Ipotesi progettuale dello schema di ventilazione adottato

Incarico: Piano di Coltivazione della cava n.64 "La Madonna"	Documento: Relazione geomeccanica di stabilità	Redattore: Ing. Marco Berlinghieri
Committente: Cave di Sponda S.r.l.	Prot.: 0917/BB02/25 Data: settembre 2025	Foglio: 64 di 64

Allegato C-01: caratteristiche tecniche del sistema di ventilazione tipo [Epiroc *Serpent*]

Technical specifications

● - Standard ○ - Option



Technical specifications

Main components

Fan station
Silencers
Flexible ducting
Starters
Installation accessories

Accessories

Vibration guard
Roof hanging kit
Foot
Starters

Dimensions

	AVH63	AVH71	AVH80	AVH90	AVM 90	AVH100	AVM 112	AVH125	AVH140	AVH160	AVH180	AVH224
L1 Length (mm/Inch)	3 398/133.8	3 504/138.0	4 686/184.5	4 084/160.8	4 084/160.8	4 189/164.9	4 926/193.9	6 000/236.2	6 000/236.2	7 200/283.5	7 303/287.5	8 470/333.5
Inner diameter (mm/Inch)	630/24.8	710/28	800/31.4	900/35.4	900/35.4	1000/39.4	1120/44.1	1250/49.2	1400/55.1	1600/63	1800/70.9	2 240/88.2
D1 Diameter (mm/Inch)	871/34.3	955/37.6	1 035/40.7	1172/46.1	1172/46.1	1 275/50.2	1 420/55.9	1 543/60.7	1 728/68.0	1 941/76.4	2 144/84.4	2 595/102.2
D2 Diameter (mm/Inch)	904/35.6	980/38.6	1 140/44.8	1155/45.5	1155/45.5	1 255/49.4	800/31.5	1 578/62.1	1 815/71.5	1 985/78.1	2 229/87.8	2 590/102.0
H1 Height, from bottom to fan center point (mm/Inch)	440/17.3	470/18.5	709/27.9	551/21.7	551/21.7	581/22.9	1 438/56.6	794/31.3	956/37.6	1 026/40.4	1 170/46.1	1 315/51.8
Weight, fan unit (depending on motor) (kg)	approx. 360	approx. 500	approx. 800	approx. 1 000	approx. 1 000	approx. 1 250	approx. 1 400	approx. 1 500	approx. 1 460	approx. 2 100	approx. 3 550	approx. 5 800

Technical data

	AVM 90"	AVM 112"	AVH63	AVH71	AVH80"	AVH90	AVH100	AVH125	AVH140	AVH160	AVH180	AVH224
Approximate flow rate (m³/s)	8-22	13-32	3-9	4-13	6-20	8-22	10-24	14-42	20-48	22-70	40-120	<200
Approximate flow rate (ft³/min)	16 951-46 615	27 545-67 804	6 357-19 071	8 476-27 547	12 713-42 377	16 952-46 618	21 190-50 856	29 666-88 998	42 380-101 712	46 618-148 330	84 760-254 280	<423 800
1-stage (kPa/Inch H2O)*	4.3-4.1	2-1.01	13-22/5.2-8.8	13-23/5.2-9.2	13-2.0	3.5-4.3/14.0-17.3	3.8-4.4/15.3-17.7	15-2.6/6.0-10.4	12-2.2/4.8-8.8	13-2.2/5.2-8.8	15-3.5/6.0-14.1	10-2.0/4.0-8.0
Nominal power (50Hz) (kW)	30-37	5.5-30	5.5-30	7.5-37	30-55	37-110	37-110	37-110	37-132	37-200	132-500	110-400
Impeller blades (pcs)	8	8	8	8	8	8	8	8	8	10	10	10/12

*The numbers for the fans are specified for 50 Hz but the fans are also available up to 60 Hz

** Theoretical data