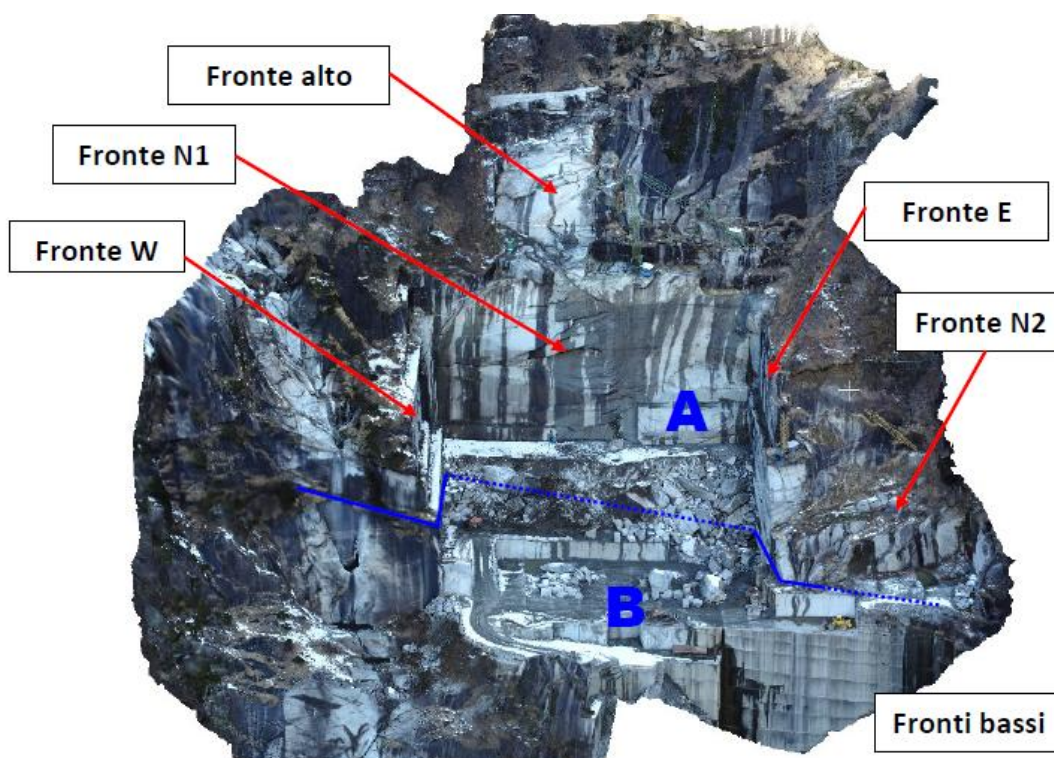




**DOMOGRANITI S.r.l.**

## **STUDIO DI MODELLAZIONE NUMERICA TRIDIMENSIONALE DEL PROGETTO DI COLTIVAZIONE DELLA CAVA BORT, LOCALITA' FORMAZZA (VB)**



Geol. Giovanni Crosta  
Ordine dei geologi della Lombardia ES al N 107

Ing. Gabriele Frigerio

**EG4RISK**  
SCIENCE TO DESIGN BETTER

Via Giotto 36 – 20145 Milano

C.F./P.IVA: 10333370962

mail@eg4risk.com / pec@pec.eg4risk.com

### **Relazione di calcolo comprensiva di verifica di stabilità mediante modellazione numerica 3D agli elementi finiti**

A	EMISSIONE	12/05/2025	G.F.	G.C.	G.C.
REV	DESCRIZIONE	DATA	PREPARATO	VERIFICATO	APPROVATO

## **SOMMARIO**

1	PREMESSA.....	5
2	ELABORATI DI RIFERIMENTO .....	7
3	CODICE DI MODELLAZIONE.....	8
4	MODELLO GEOMETRICO DEL SITO DI INTERESSE .....	9
4.1	Morfologia del sito.....	9
4.2	Dati geo – strutturali.....	18
5	STUDIO NUMERICO FEM 3D: MODELLI, APPROCCI E RISULTATI .....	21
5.1	Modello numerico .....	21
5.2	Condizioni al contorno .....	24
5.3	Legami costitutivi e parametri meccanici impiegati .....	24
5.4	Fasi della modellazione numerica e approccio alla modellazione .....	24
6	STUDIO NUMERICO FEM 3D: RISULTATI .....	27
6.1	Progetto di coltivazione a 5 anni.....	27
6.2	Progetto di coltivazione a 10 anni.....	30
6.3	Progetto di coltivazione a 15 anni.....	33
7	CONCLUSIONI.....	36

## Indice delle figure

Figura 1. Vista dall'alto della cava Bort, località Formazza (VB) .....	5
Figura 2. Vista frontale della cava Bort, località Formazza (VB) .....	6
Figura 3. Curve di livello configurazione stato di fatto (2025) – vista isometrica .....	10
Figura 4. Curve di livello configurazione stato di fatto (2025) – vista planimetrica .....	10
Figura 5. Curve di livello progetto di coltivazione a 5 anni – vista isometrica .....	11
Figura 6. Curve di livello progetto di coltivazione a 5 anni – vista planimetrica .....	11
Figura 7. Curve di livello progetto di coltivazione a 10 anni – vista isometrica .....	12
Figura 8. Curve di livello progetto di coltivazione a 10 anni – vista planimetrica .....	12
Figura 9. Curve di livello progetto di coltivazione a 15 anni – vista isometrica .....	13
Figura 10. Curve di livello progetto di coltivazione a 15 anni – vista planimetrica .....	13
Figura 11. Modello geometrico 3D stato di fatto – vista isometrica .....	14
Figura 12. Modello geometrico 3D stato di fatto – vista planimetrica .....	14
Figura 13. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 5 anni – vista isometrica .....	15
Figura 14. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 5 anni – vista planimetrica .....	15
Figura 15. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 10 anni – vista isometrica .....	16
Figura 16. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 10 anni – vista planimetrica .....	16
Figura 17. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – vista isometrica .....	17
Figura 18. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – vista planimetrica .....	17
Figura 19. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – suddivisione tra settore A e settore B .....	18
Figura 20. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 5 anni – introduzione delle famiglie di discontinuità .....	19
Figura 21. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 10 anni – introduzione delle famiglie di discontinuità .....	20
Figura 22. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – introduzione delle famiglie di discontinuità .....	20
Figura 23. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 5 anni .....	21
Figura 24. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 10 anni .....	22
Figura 25. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 15 anni .....	22
Figura 26. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 15 anni: interfacce 2D tra i singoli blocchi .....	23
Figura 27. Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB) [1] – configurazione pre-evento di crollo 2022 – innescò evento di crollo. ....	26
Figura 28. Progetto di coltivazione a 5 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista isometrica .....	27
Figura 29. Progetto di coltivazione a 5 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista planimetrica .....	28
Figura 30. Progetto di coltivazione a 5 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista cutting plane .....	28
Figura 31. Progetto di coltivazione a 5 anni: curva spostamento – coesione interfaccia .....	29
Figura 32. Progetto di coltivazione a 10 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista isometrica .....	30
Figura 33. Progetto di coltivazione a 10 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista planimetrica .....	30
Figura 34. Progetto di coltivazione a 10 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista cutting plane .....	31
Figura 35. Progetto di coltivazione a 10 anni: curva spostamento – coesione interfaccia .....	32
Figura 36. Progetto di coltivazione a 15 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista isometrica .....	33
Figura 37. Progetto di coltivazione a 15 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista planimetrica .....	33
Figura 38. Progetto di coltivazione a 15 anni: spostamenti totali del cinematiso di rottura individuato – vista cutting plane .....	34
Figura 39. Progetto di coltivazione a 15 anni: curva spostamento – coesione interfaccia .....	35

## **Indice delle tabelle**

Tabella 1. Documenti di riferimento .....	7
Tabella 2: Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB) [1] - parametri a rottura della superficie di scivolamento associato all'evento di crollo 2022	26



## 1 PREMESSA

Oggetto del presente incarico da parte di DOMO GRANITI S.R.L. consiste nello studio di modellazione numerica tridimensionale in campo non lineare, mediante codice di calcolo agli elementi finiti, del progetto di coltivazione della Cava Bort, presso la località Formazza (VB).

La cava Bort è ubicata in Comune di Formazza, nella parte bassa del versante destro della Valle Antigorio / Formazza, poco a valle della località Foppiano (Figura 1). L'ambito esaminato si estende da quota 1000 m s.l.m. fino alle balze rocciose a monte dell'area oggetto di coltivazione (quota  $\approx 1150$  m s.l.m.).

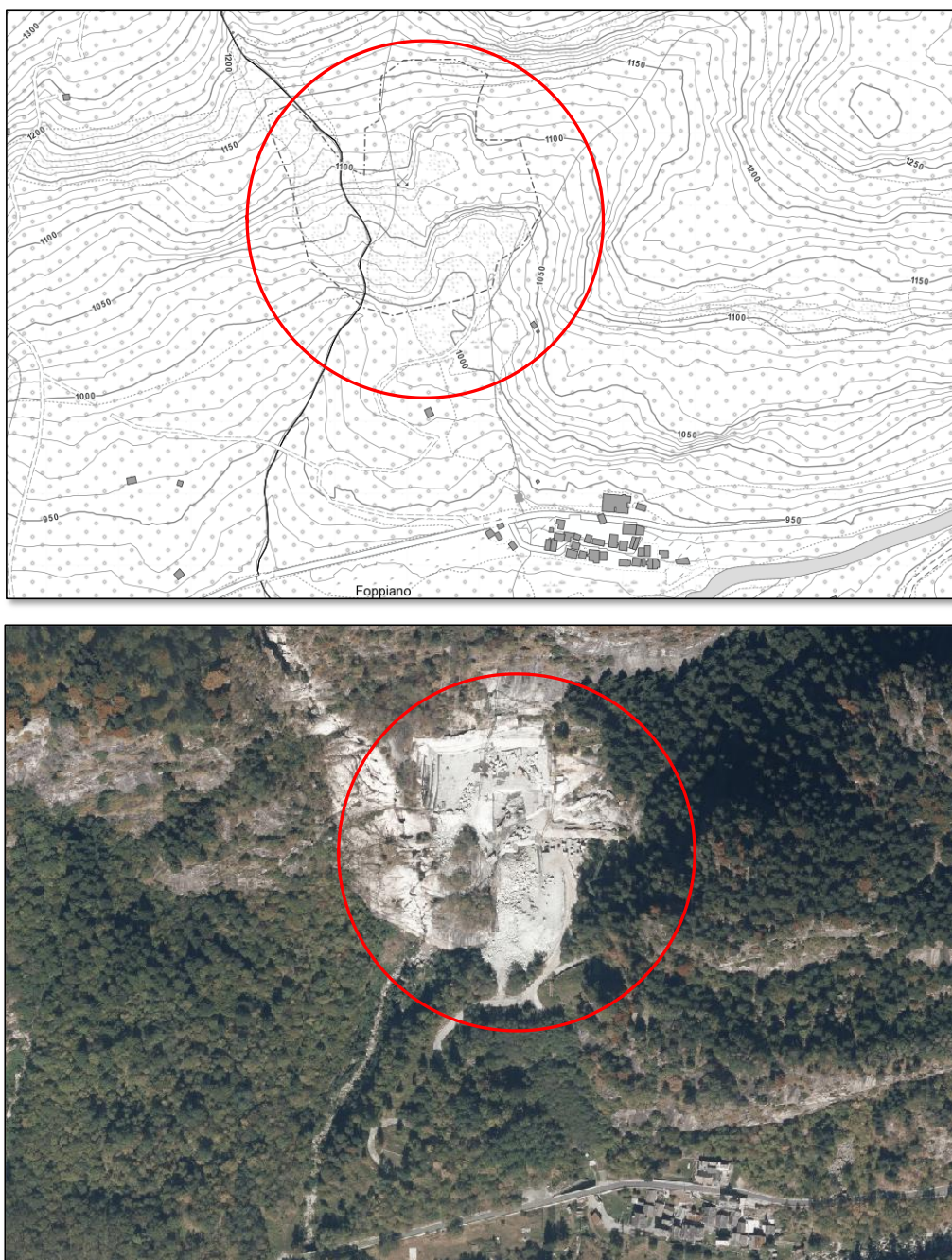
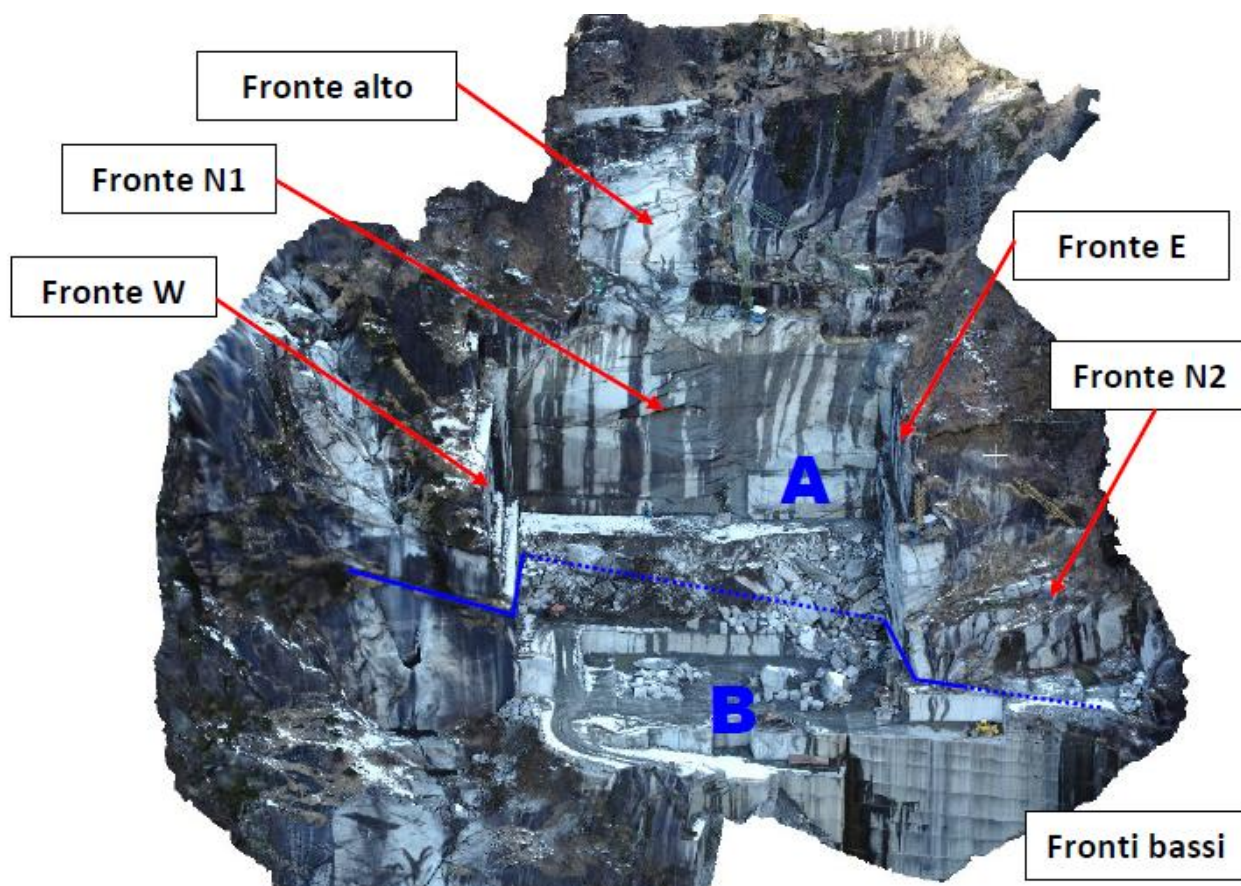


Figura 1. Vista dall'alto della cava Bort, località Formazza (VB)



*Figura 2. Vista frontale della cava Bort, località Formazza (VB)*

La presente relazione illustra e descrive le seguenti attività, previste per l'espletamento dell'incarico:

- Analisi dei dati topografici, geologici e geomeccanici ad oggi disponibili al fine della costruzione di un modello geotecnico 3D;
- Modellazione numerica 3D agli elementi finiti mediante analisi in campo non lineare per la valutazione del comportamento meccanico e delle relative condizioni di stabilità della cava, a partire dalla condizione di stato di fatto, soggetta al progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni.

La presente relazione è stata redatta sotto la supervisione scientifica del Prof. Geol. Giovanni Crosta e del Prof. Geol. Paolo Frattini, Professori Ordinari di Geologia Applicata presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra dell'Università Milano Bicocca.

## 2 ELABORATI DI RIFERIMENTO

I documenti a cui si è fatto riferimento per la redazione della presente relazione sono quelli forniti dalla Committente e di seguito riportati in Tabella 1.

*Tabella 1. Documenti di riferimento*

1	EG4RISK S.r.l.	Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)	Luglio 2023
2	Geologo Claudio Gagliardi	Informazioni geometriche in planimetria e in sezione in formato dwg e dxf	Aprile 2025
3	Geologo Claudio Gagliardi	Caratterizzazione strutturale e dati rilievo geomeccanico 2025	Aprile 2025

Si evidenzia che gli scriventi, in data luglio 2023, hanno redatto la relazione concernente lo studio di modellazione dell'instabilità di versante nella Cava "Bort", presso il comune di Formazza (VB). Le finalità della modellazione, come da incarico, sono state quelle di valutare la stabilità della parete sulla base delle conoscenze geologico e geotecniche disponibili a seguito dell'evento di crollo verificatosi.



### **3 CODICE DI MODELLAZIONE**

Le analisi numeriche, descritte nel presente documento, sono state eseguite mediante il programma di calcolo MIDAS FEA NX 2023 v.1.1. Il programma di calcolo permette di realizzare modelli 2D e 3D complessi eseguendo analisi numeriche geotecniche avanzate agli elementi finiti e nel campo dell'interazione terreno-struttura. Le analisi multidisciplinari accoppiate permettono di trattare svariate applicazioni di progettazione geotecnica. MIDAS FEA NX è attualmente uno dei miglior software per le analisi geotecniche avanzate 3D agli elementi finiti e nel campo dell'interazione terreno-struttura. Le analisi multidisciplinari accoppiate permettono di gestire, in un unico ambiente, l'intera gamma di applicazioni di progettazione geotecnica, in particolare fondazioni, scavi con paratie, tunnel, strutture sotterranee, analisi di filtrazione, consolidamento dei terreni, dighe, analisi sismiche e stabilità dei versanti

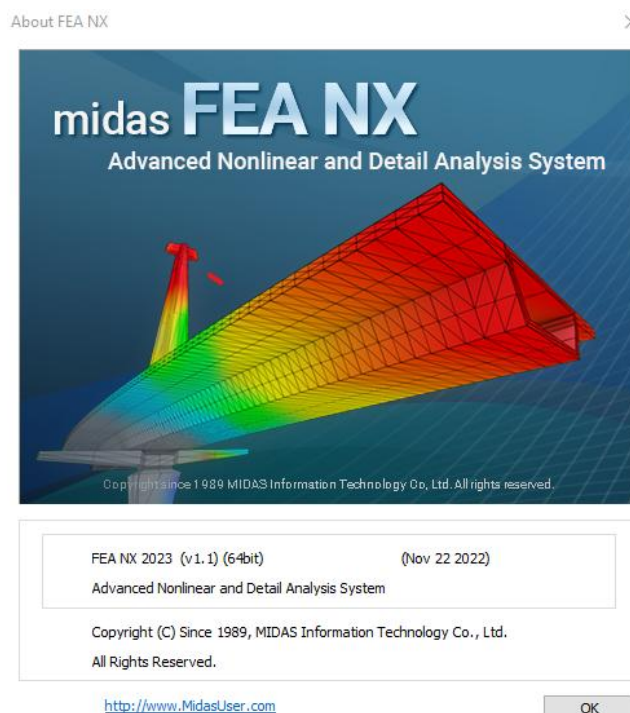
L'interfaccia grafica è semplice e intuitiva e permette di realizzare modelli 2D e 3D complessi con livelli impareggiabili di precisione ed efficienza. Inoltre, grazie all'innovativa piattaforma a 64 bit, FEA NX garantisce eccezionali prestazioni per quanto riguarda la velocità di analisi e la restituzione di output, anche in modelli con milioni di elementi finiti.

MIDAS FEA NX dispone di una vasta libreria di elementi finiti che permette di modellare sia il dominio di terreno che tutte le tipologie di strutture, dagli edifici a tutte le infrastrutture; è collegato direttamente con i software di calcolo strutturale Midas Gen e Midas Civil dai quali è in grado di importare il modello FEM completo.

La piattaforma FEA NX è completata inoltre da un ambiente CAD 3D in grado di creare e gestire funzioni geometriche senza limiti di complessità e di importare geometrie da tutti i principali formati CAD; in particolare con la funzione Terrain Geometry Maker è in grado di importare mappe topografiche satellitari definendo un nuovo standard nella simulazione della realtà. Il potente post processore genera automaticamente contour, diagrammi, grafici e tabelle relative a tutte le tipologie dei risultati che permettono in maniera rapida ed efficiente di identificare i punti critici del progetto che dovranno essere inclusi nella relazione finale.

Licenza d'uso: **1HMLA2IWUT6IXXXX**





## 4 MODELLO GEOMETRICO DEL SITO DI INTERESSE

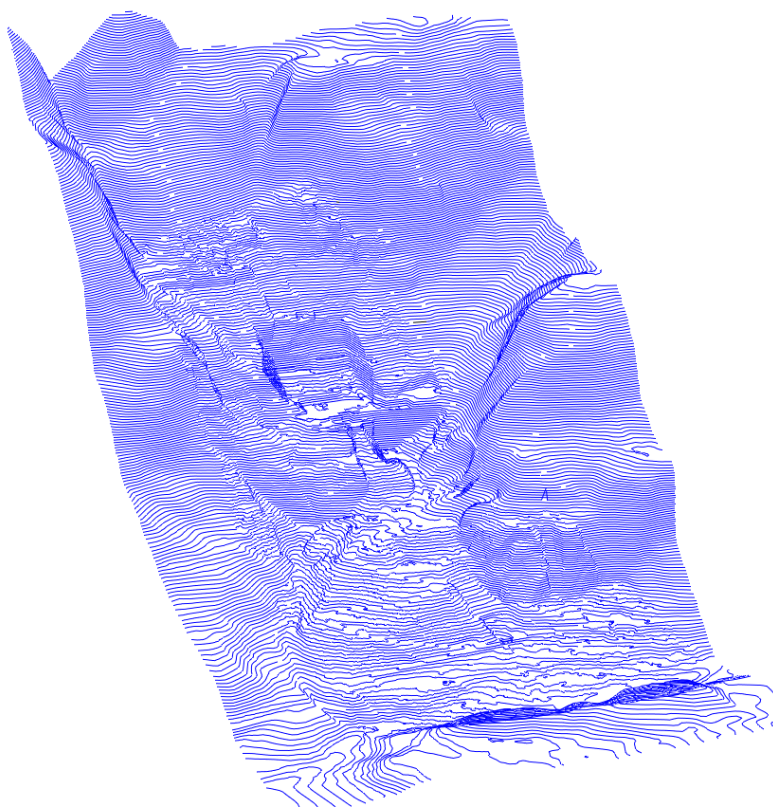
### 4.1 Morfologia del sito

I dati topografici forniti agli scriventi da parte della committenza, costituiti da curve di livello georeferenziate del sito oggetto di interesse (*Informazioni geometriche in planimetria e in sezione in formato dwg e dxf [2]*), sono riferiti a quattro differenti configurazioni geometriche della cava, in particolare:

- Configurazione stato di fatto (2025) (Figura 3 e Figura 4);
- Progetto di coltivazione a 5 anni (Figura 5 e Figura 6);
- Progetto di coltivazione a 10 anni (Figura 7 e Figura 8);
- Progetto di coltivazione a 15 anni (Figura 9 e Figura 10).

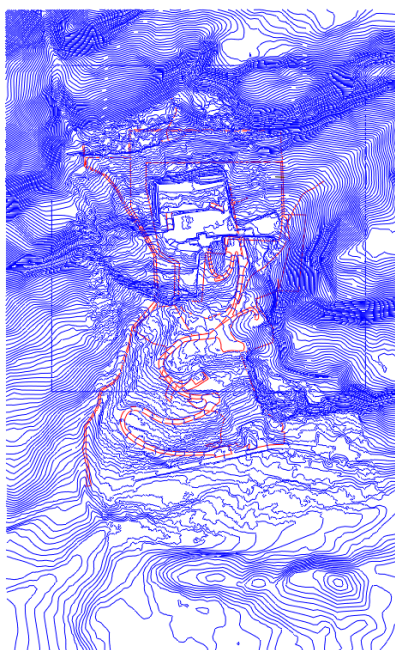
I volumi di coltivazione individuati dal modello geometrico risultano essere pari a circa:

- 223000 m<sup>3</sup> per il progetto di coltivazione a 5 anni;
- Ulteriori 145000 m<sup>3</sup> per il progetto di coltivazione a 10 anni;
- Ulteriori 125000 m<sup>3</sup> per il progetto di coltivazione a 15 anni;

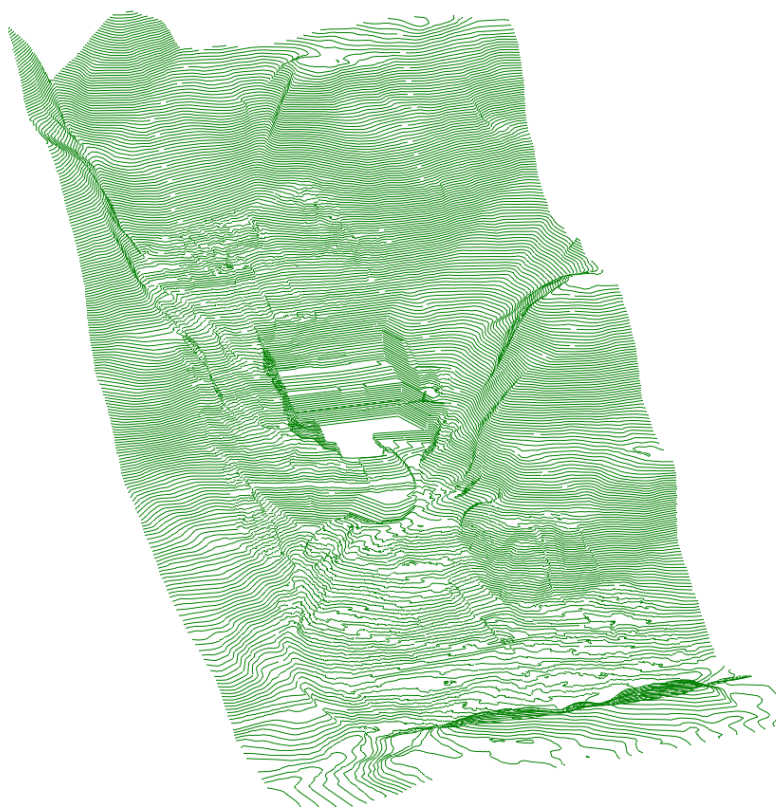


*Figura 3. Curve di livello configurazione stato di fatto (2025) – vista isometrica*

0 65.3 131 m

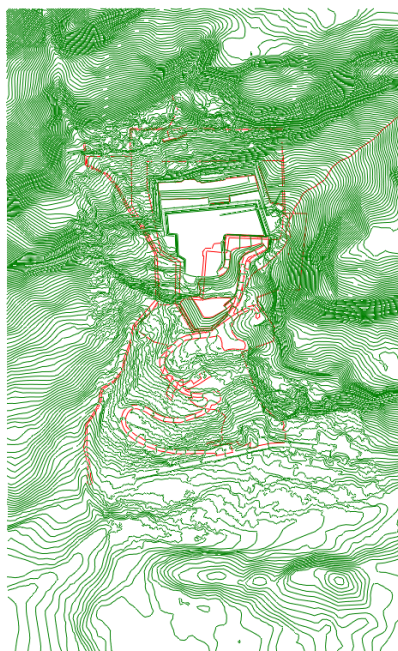


*Figura 4. Curve di livello configurazione stato di fatto (2025) – vista planimetrica*



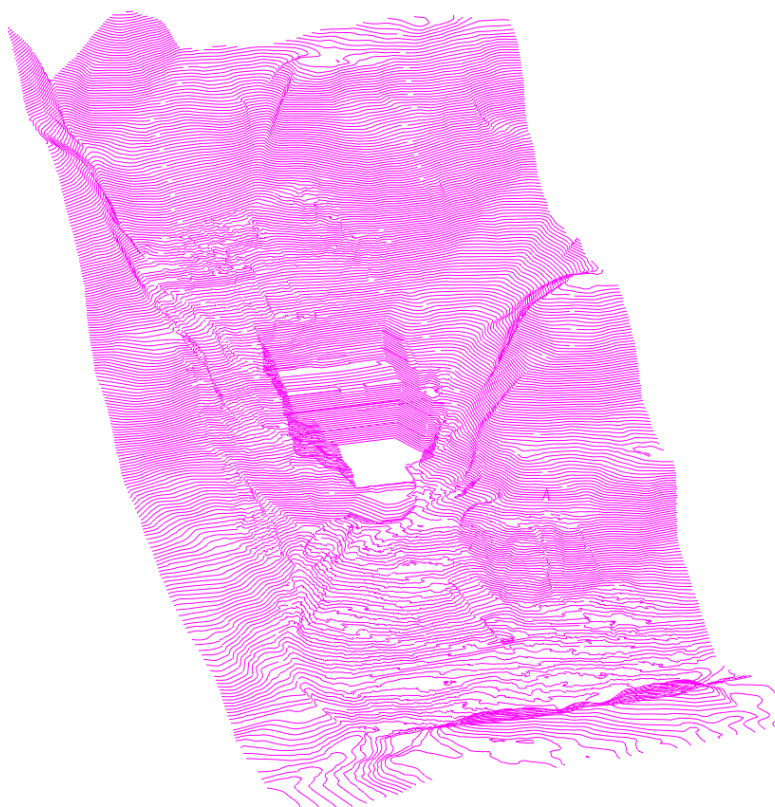
*Figura 5. Curve di livello progetto di coltivazione a 5 anni – vista isometrica*

0 65.3 131 m



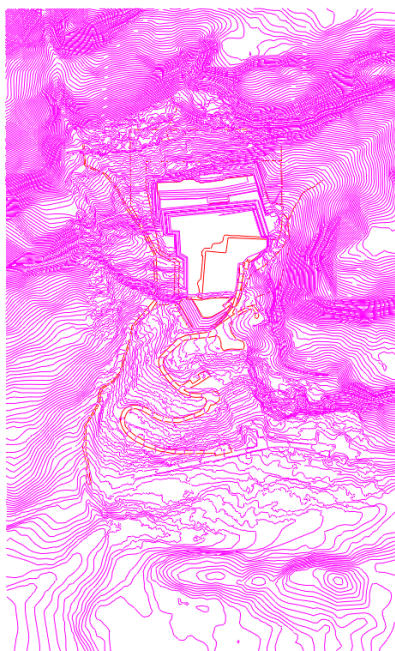
*Figura 6. Curve di livello progetto di coltivazione a 5 anni – vista planimetrica*





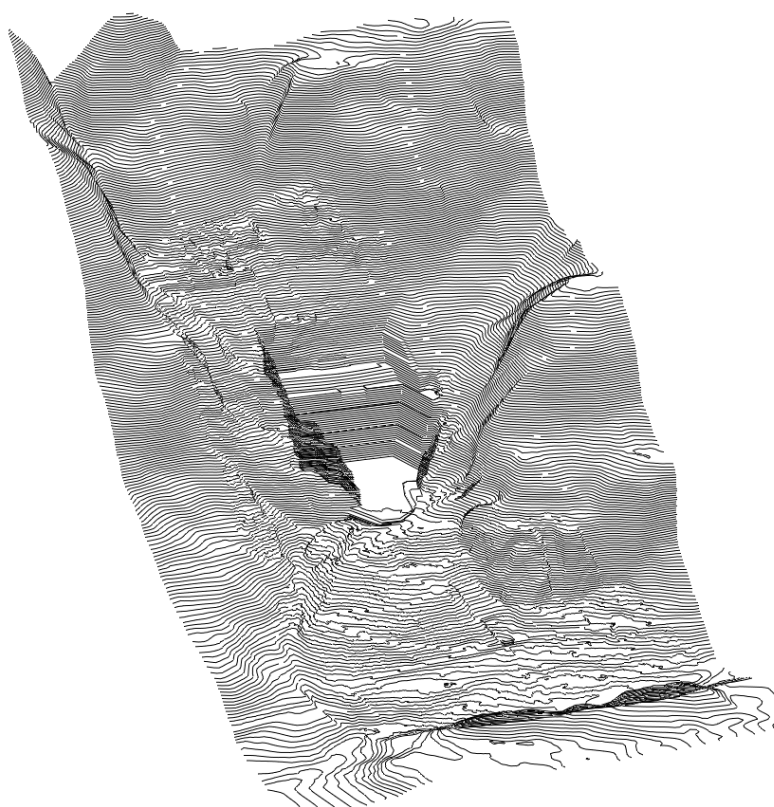
*Figura 7. Curve di livello progetto di coltivazione a 10 anni – vista isometrica*

0 65.3 131 m

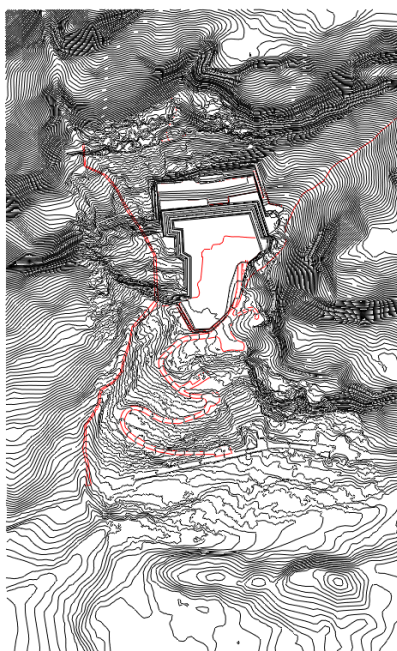


*Figura 8. Curve di livello progetto di coltivazione a 10 anni – vista planimetrica*





*Figura 9. Curve di livello progetto di coltivazione a 15 anni – vista isometrica*



*Figura 10. Curve di livello progetto di coltivazione a 15 anni – vista planimetrica*

A partire dalle informazioni geometriche delle curve di livello sono stati creati i modelli geometrici tridimensionali nelle configurazioni sopra descritte (Figura 11 - Figura 18).

0 36.2 72.3 m

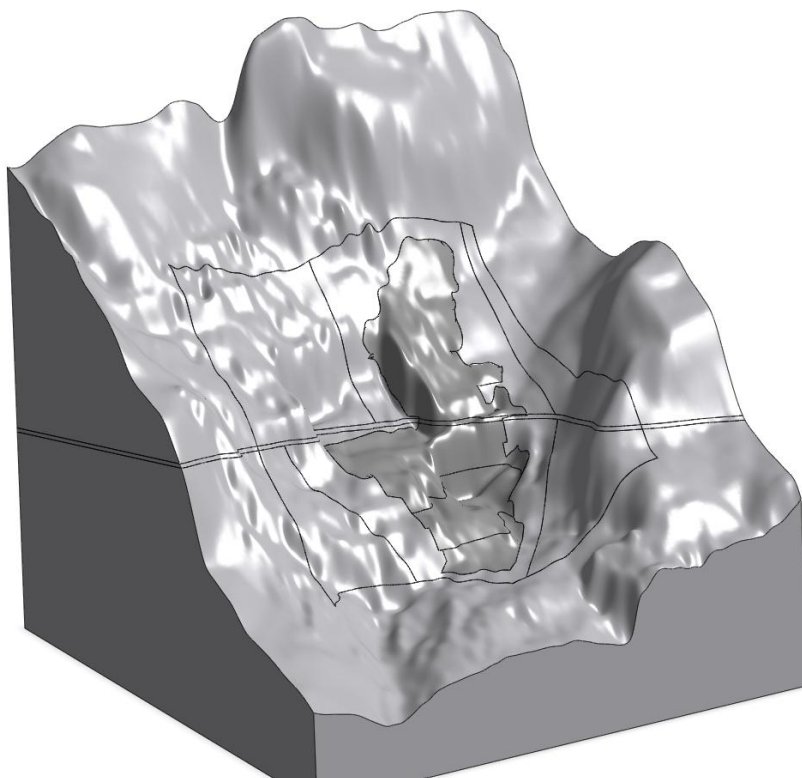


Figura 11. Modello geometrico 3D stato di fatto – vista isometrica

0 31.1 62.3 m

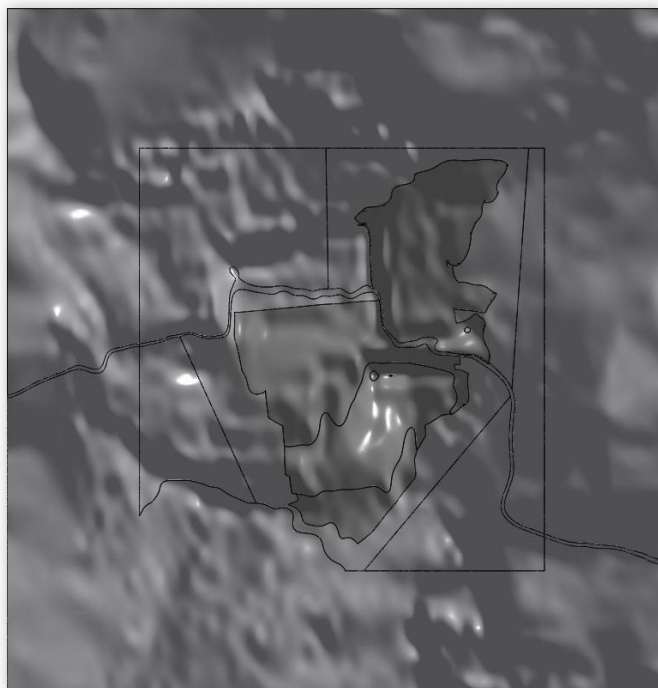
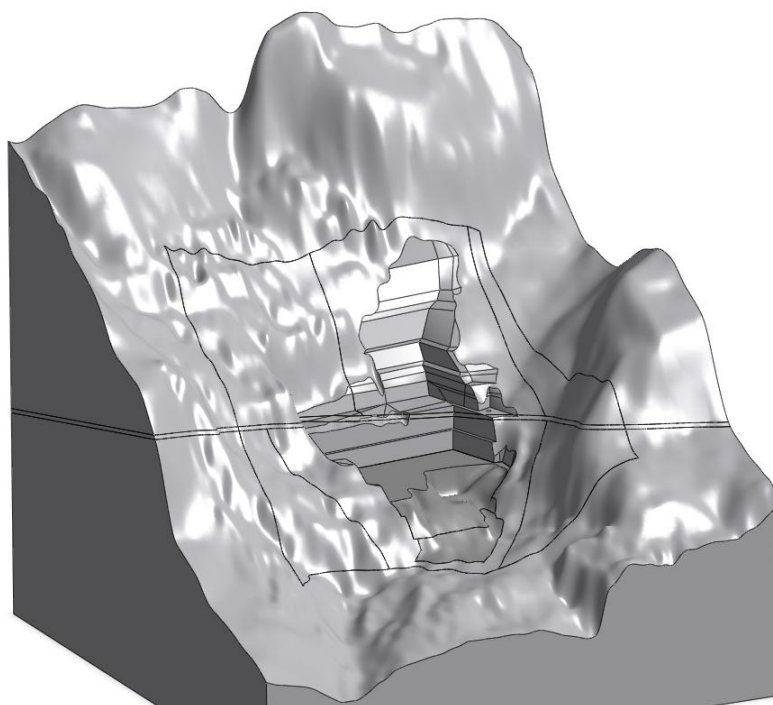


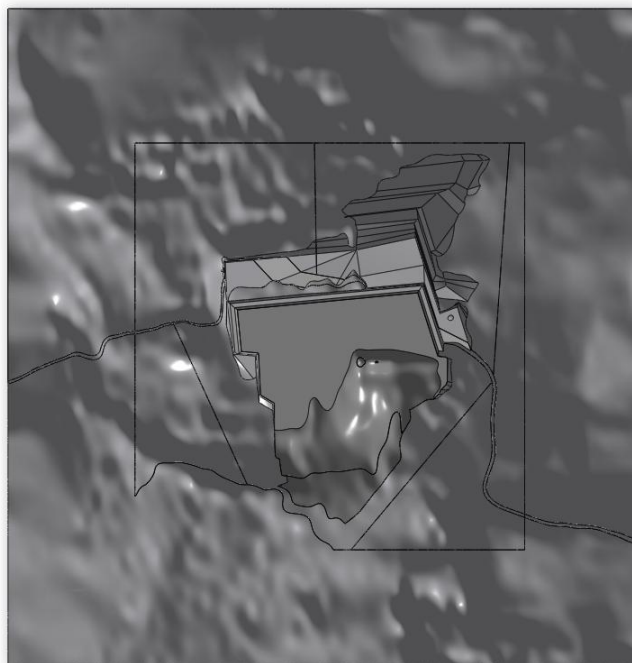
Figura 12. Modello geometrico 3D stato di fatto – vista planimetrica

0 37.9 75.8 m



*Figura 13. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 5 anni – vista isometrica*

0 34 68 m



*Figura 14. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 5 anni – vista planimetrica*

0 37.9 75.8 m

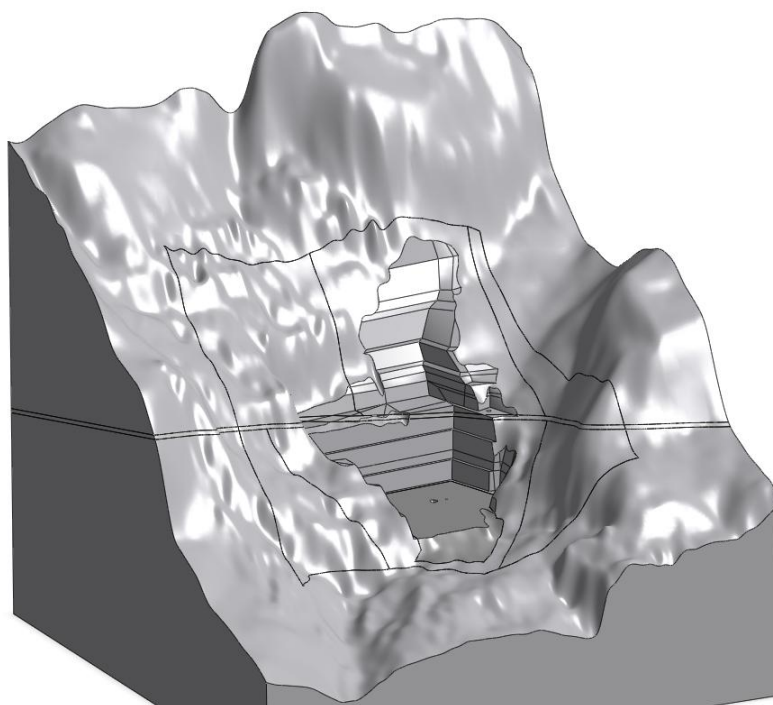


Figura 15. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 10 anni – vista isometrica

0 34 68 m

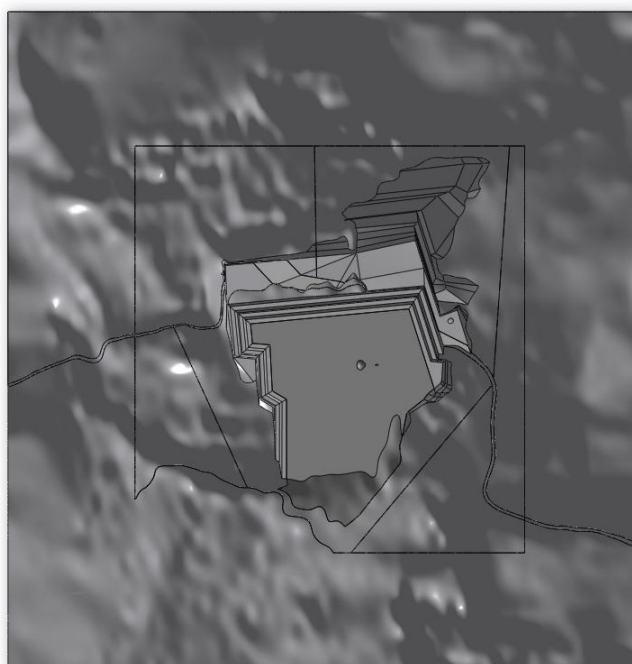


Figura 16. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 10 anni – vista planimetrica



0 37.9 75.8 m

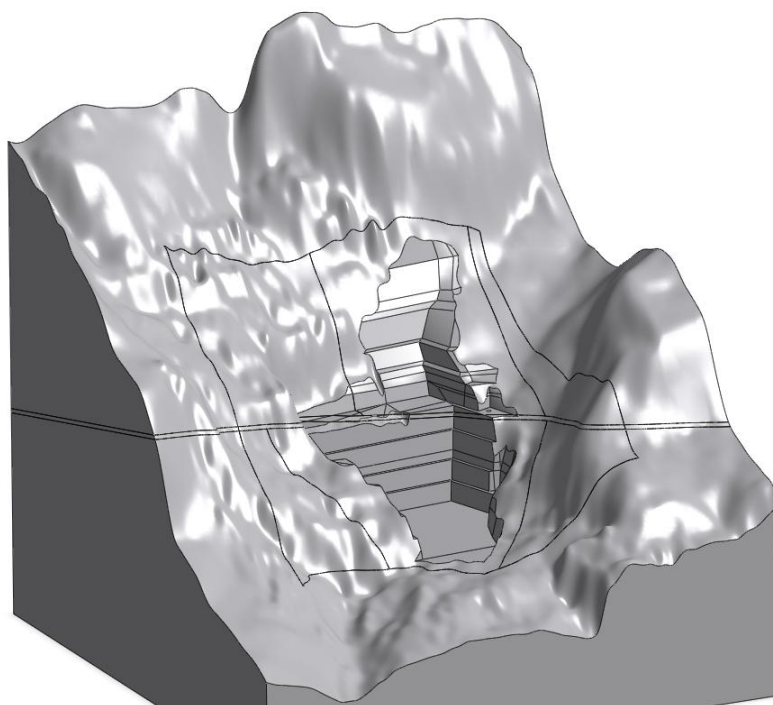


Figura 17. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – vista isometrica

0 34 68 m

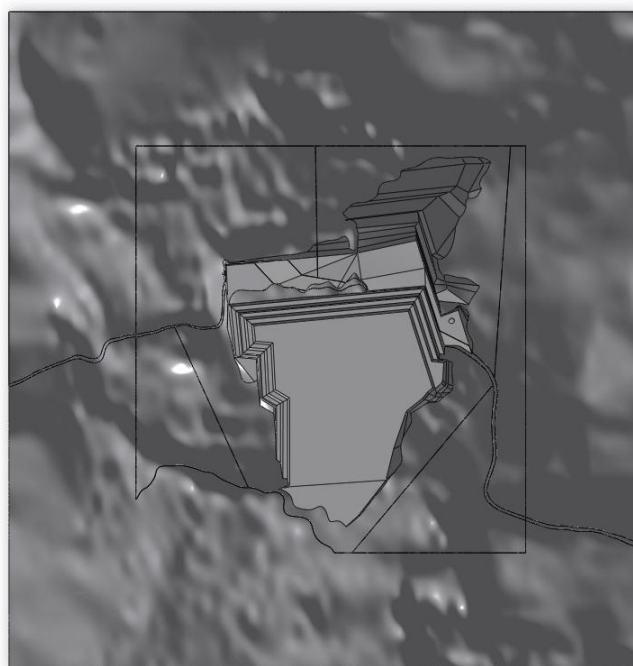


Figura 18. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – vista planimetrica

Nelle immagini sopra riportate è possibile notare la suddivisione del modello geometrico nei settori A e B, così come mostrato in Figura 2 e in Figura 19. Il piano di taglio principale che separa i settori A e B risulta essere debolmente ondulato o piegato: localmente si hanno misure variabili (ad es.

8°/17°, 32°/17°, 17°/20°), ma a grande scala, dall'esame del modello 3D, la giacitura media presenta immersioni fra 25° e 29° ed inclinazioni fra 12° e 14° (valore medio N 027°/13°).

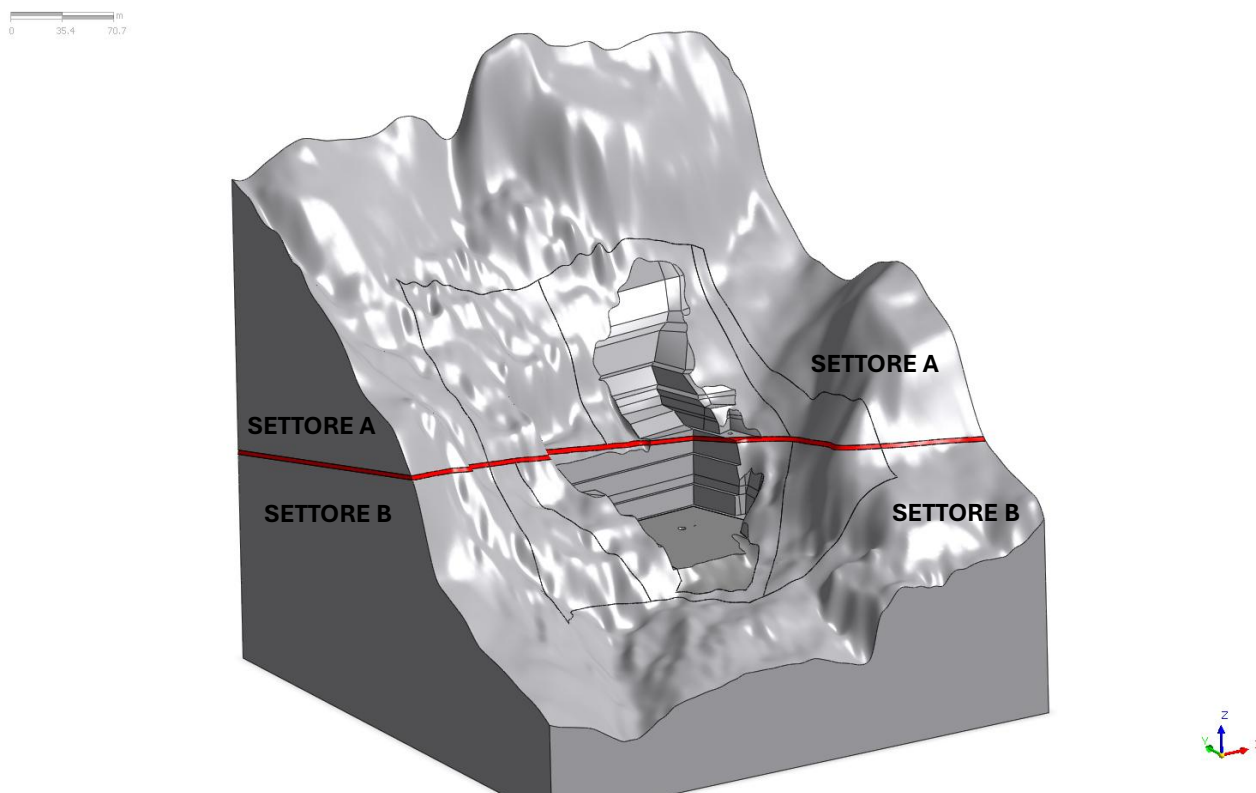


Figura 19. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – suddivisione tra settore A e settore B

## 4.2 Dati geo – strutturali

Ai modelli geometrici mostrati nel paragrafo 4.1 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono state aggiunte le informazioni geo-strutturali rappresentate dalle principali famiglie di discontinuità dell'ammasso roccioso rilevate nell'area di studio. Le informazioni derivano dallo studio geologico fornito da Domo Graniti S.r.l. e realizzato dal dott. Geol. Claudio Gagliardi (*Caratterizzazione strutturale e dati rilievo geomeccanico 2025* [3]).

In particolare, al fine della modellazione numerica (individuazione dei principali cinematismi di instabilità), sono state introdotte le seguenti famiglie di discontinuità:

Per il settore A:

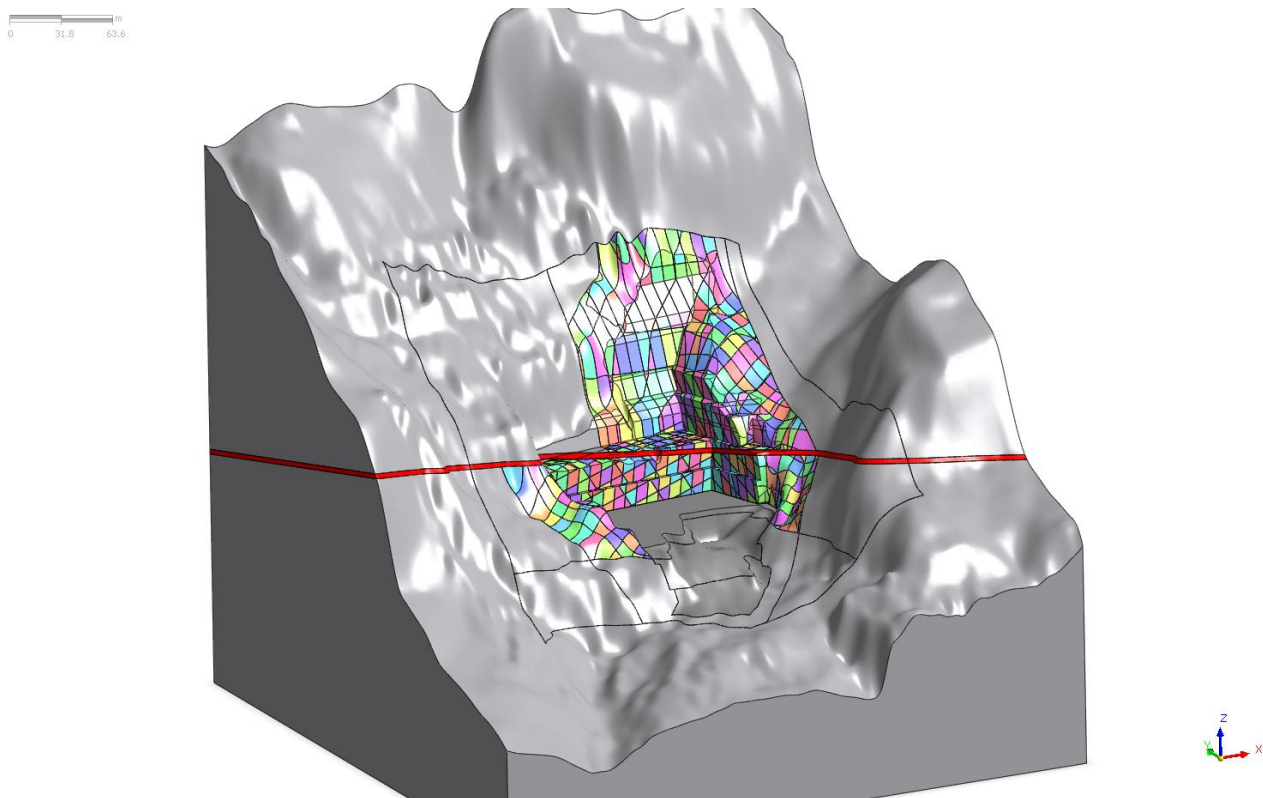
- K1 con immersione 167° e inclinazione 50°
- K1a con immersione 156° e inclinazione 74°
- K2 con immersione 237° e inclinazione 78°

Per il settore B:

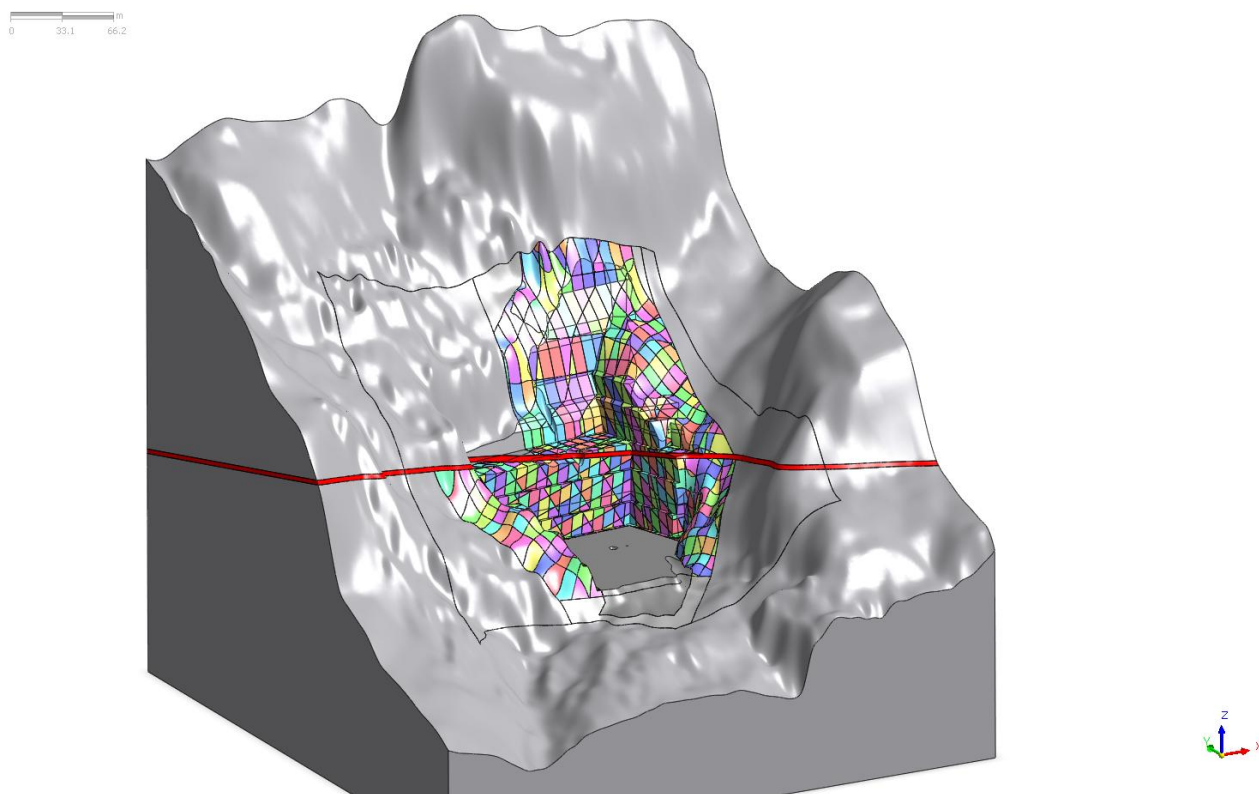
- K3 con immersione 156° e inclinazione 74°
- K2 con immersione 237° e inclinazione 78°
- K4 con immersione 197° e inclinazione 35°

Per tutte le famiglie di discontinuità è stata assunta una spaziatura di 6 metri.

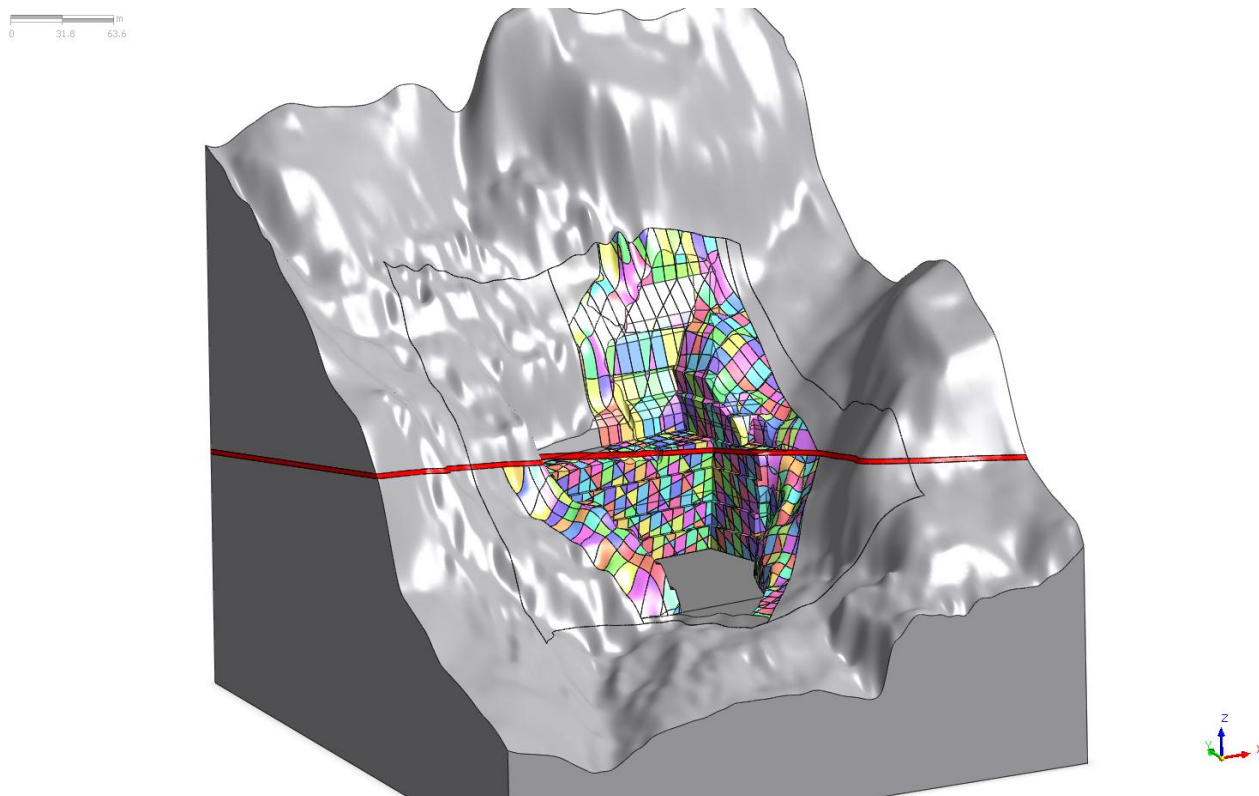
Come è possibile osservare in Figura 20, Figura 21 e Figura 22, l'introduzione delle famiglie di discontinuità è stata effettuata solamente nelle porzioni di ammasso roccioso interessate dal progetto di coltivazione, per spessori compresi tra i 20 e i 50 metri.



*Figura 20. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 5 anni – introduzione delle famiglie di discontinuità*



*Figura 21. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 10 anni – introduzione delle famiglie di discontinuità*



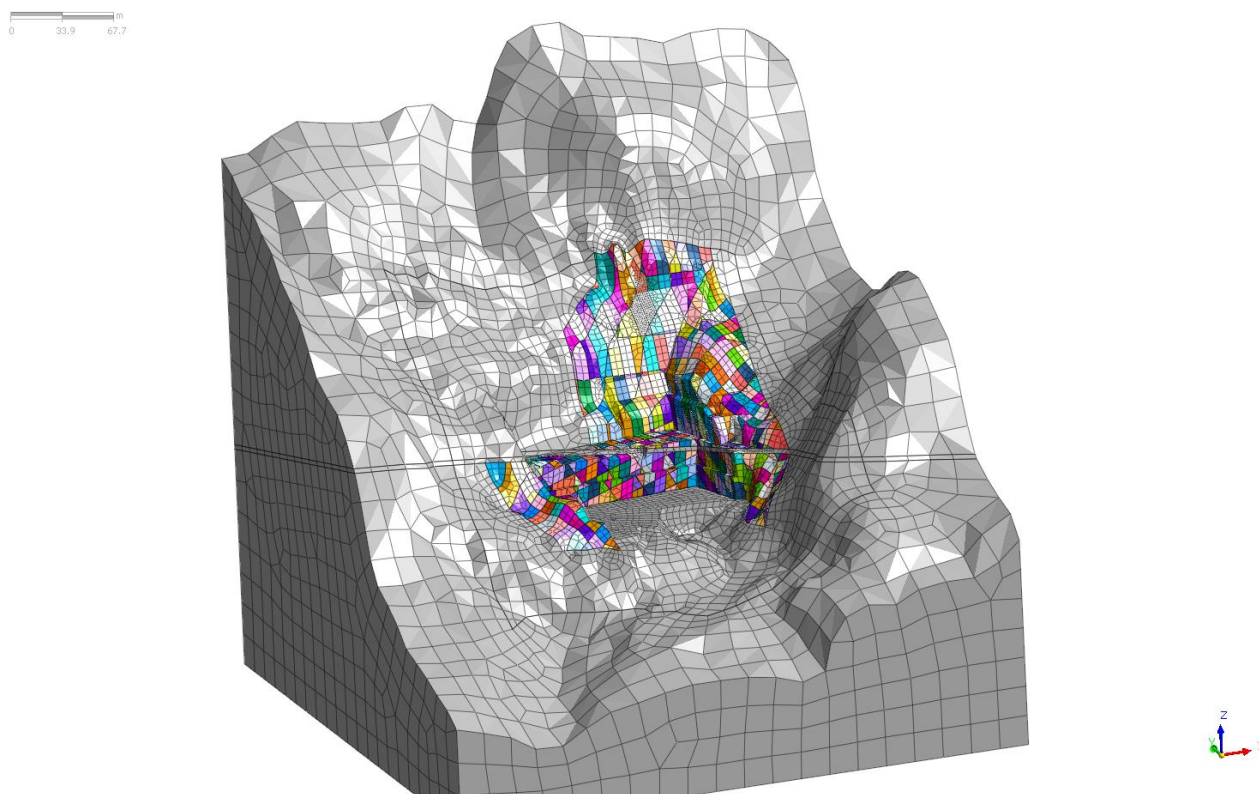
*Figura 22. Modello geometrico 3D progetto di coltivazione a 15 anni – introduzione delle famiglie di discontinuità*



## **5 STUDIO NUMERICO FEM 3D: MODELLI, APPROCCI E RISULTATI**

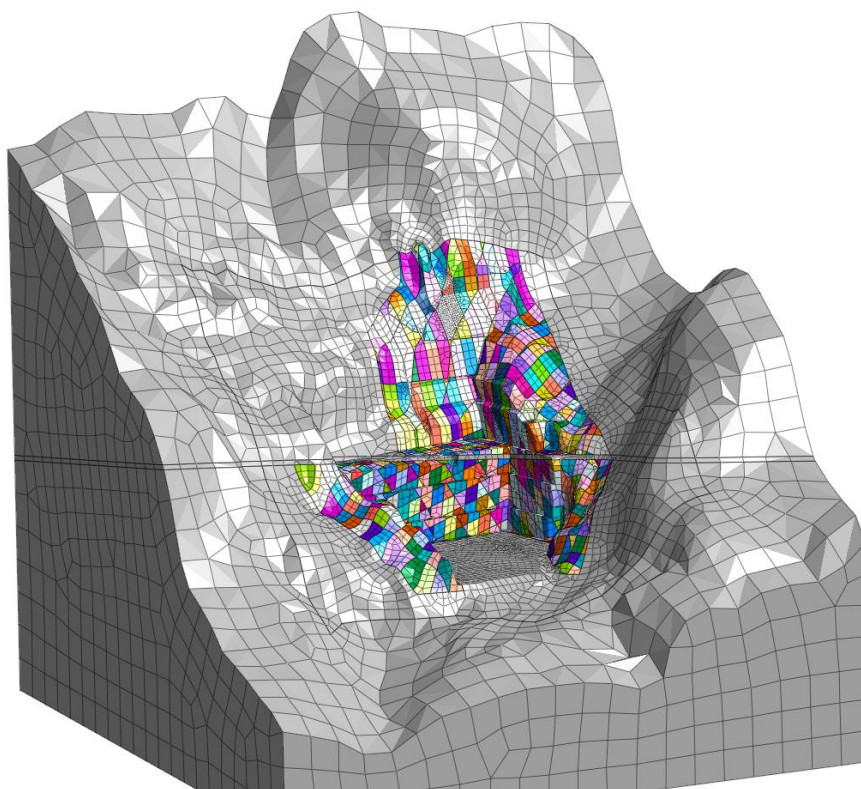
### **5.1 Modello numerico**

A partire dai modelli geometrici descritti nel paragrafo 4, sono stati realizzati i relativi modelli numerici, qui di seguito illustrati in Figura 23, Figura 24 e Figura 25.



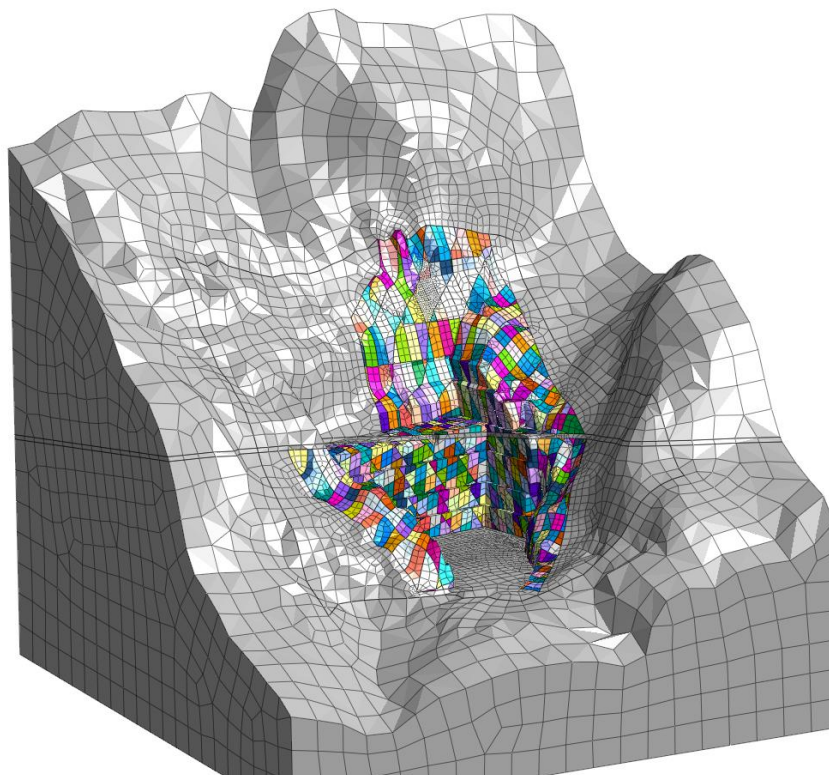
*Figura 23. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 5 anni*

0 32.1 64.1 m



*Figura 24. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 10 anni*

0 33.8 67.6 m



*Figura 25. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 15 anni*

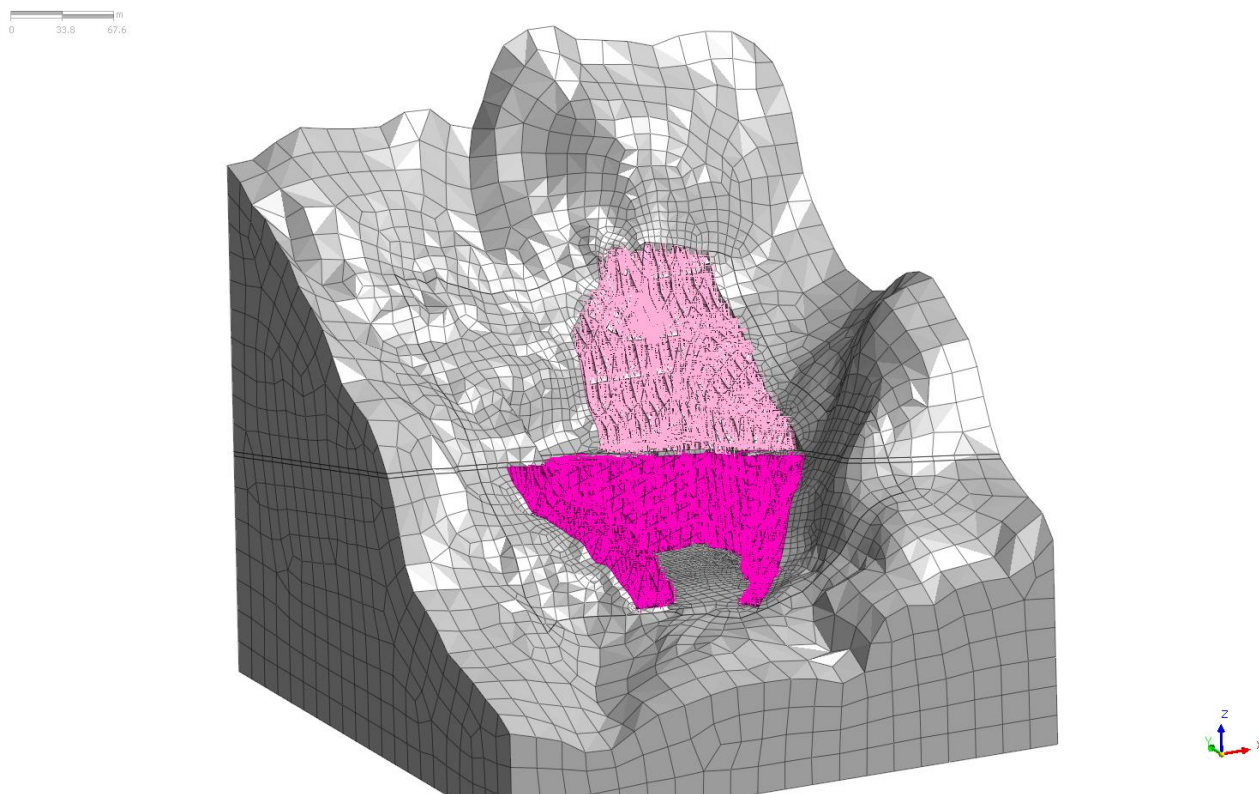
I modelli numerici riferiti alle configurazioni di progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni sono costituiti rispettivamente da 115.000, 160.000 e 170.000 elementi finiti esaedrici e tetraedrici di ordine lineare.

Il dominio spaziale è stato discretizzato mediante elementi finiti di dimensioni pari a:

- 4 metri per le pareti di ammasso roccioso interessate dal progetto di coltivazione (in cui sono state introdotte le famiglie di discontinuità);
- 15 metri al contorno e alla base del modello.

La discretizzazione spaziale varia gradualmente a partire dalle pareti dell'ammasso roccioso interessate dalla coltivazione fino al contorno del dominio di calcolo.

Il comportamento meccanico tra i singoli blocchi risultanti dall'introduzione delle famiglie di discontinuità è stato modellato attraverso l'utilizzo di interfacce 2D, come mostrato in Figura 26.



*Figura 26. Modello numerico 3D progetto di coltivazione a 15 anni: interfacce 2D tra i singoli blocchi*

## 5.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno utilizzate nelle analisi numeriche sono qui di seguito elencate:

- Vincolo alla traslazione verticale e orizzontale imposto ai nodi di base del modello numerico
- Vincolo alla traslazione orizzontale in direzione normale imposto ai nodi posti sulle facce laterali del modello numerico.

Nella modellazione numerica non è stata presa in considerazione la presenza di una falda acquifera.

## 5.3 Legami costitutivi e parametri meccanici impiegati

Per quanto riguarda l'ammasso roccioso è stato assunto un legame costitutivo elastico lineare, mentre per il comportamento di interfaccia delle discontinuità è stato assunto un legame costitutivo elastico perfettamente plastico con legge di rottura alla Mohr-Coulomb, con parametri di coesione e angolo di attrito e legge di flusso non associata.

Per quanto concerne il comportamento a rottura delle interfacce 2D tra i singoli blocchi, si farà riferimento ai risultati dello *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)* [1]. In tale studio, redatto dagli scriventi in data luglio 2023, è stato possibile individuare i parametri a rottura del comportamento di interfaccia tra i blocchi del settore A mediante calibrazione con “*back analysis*” dell'evento di crollo avvenuto nell'anno 2022.

## 5.4 Fasi della modellazione numerica e approccio alla modellazione

Le fasi della modellazione numerica sono qui di seguito elencate:

1. Inizializzazione degli sforzi geostatici – annullamento degli spostamenti;
2. Attivazione del comportamento di interfaccia per le discontinuità;
3. Verifica di stabilità in condizione statica.

L'analisi di stabilità per la valutazione del fattore di sicurezza è basata sulla tecnica della SRM (*Shear Strength Reduction*), che prevede la riduzione dei parametri meccanici dell'ammasso roccioso, fino al raggiungimento della condizione di rottura. In particolare, la resistenza al taglio dell'ammasso roccioso è progressivamente ridotta come qui di seguito riportato:

$$\frac{\tau}{SRM} = \frac{c'}{SRM} + \frac{\tan \phi'}{SRM}$$

All'aumentare del valore di SRM, la resistenza a taglio dell'ammasso roccioso tende a diminuire, fino al raggiungimento della condizione limite, per cui tende a svilupparsi un meccanismo di rottura.

Pertanto, maggiore sarà il valore di SRM ottenuto, più stabile sarà il versante e le opere realizzate. Il fattore di sicurezza coinciderà con il valore di SRM associato allo step in cui si perde la convergenza numerica.



Nel caso di studio specifico in oggetto, i parametri meccanici di rottura sono associati alle superfici di scivolamento che definiscono i volumi rocciosi potenzialmente instabili. Al fine di valutare i fattori di sicurezza nei confronti dell'instabilità di volumi rocciosi riferite alle configurazioni di progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni, si assume che i parametri meccanici a rottura di riferimento siano quelli determinati dallo *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)* [1], individuati dall'analisi numerica relativa alla configurazione pre-evento di crollo avvenuto nell'anno 2022. Tali parametri rappresentano i parametri di progetto del sistema, associati pertanto ad un Fattore di Sicurezza (FS) unitario (incipiente collasso).

Considerato che nel precedente studio:

- l'angolo di attrito di interfaccia è stato mantenuto costante (pari a 36°);
- la resistenza a trazione è stata posta nulla;
- la progressiva riduzione dei parametri meccanici ha interessato solamente il parametro di coesione (intesa come contributo dei ponti di roccia tra i singoli blocchi)

i fattori di sicurezza FS riferiti alle configurazioni di progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni saranno valutati mediante la seguente espressione:

$$FS_{colt\ X\ anni} = \frac{c'_{rott\ rif\ 2022}}{c'_{rott\ colt\ X\ anni}}$$

In cui:

- $FS_{colt\ X\ anni}$  rappresenta il fattore di sicurezza del progetto di coltivazione a X anni;
- $c'_{rott\ rif\ 2022}$  rappresenta il valore della coesione a rottura individuato dall'analisi numerica riferita all'evento di crollo avvenuto nel settore A nell'anno 2022.
- $c'_{rott\ colt\ X\ anni}$  rappresenta il valore della coesione del cinematismo di instabilità più probabile riferito al progetto di coltivazione a X anni;

In particolare, il valore di coesione dell'interfaccia 2D associato all'attivazione del cinematismo di crollo simulato è risultato essere pari a 55 kPa, come riportato dagli estratti dello *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)* [1] in Figura 26 e in Tabella 2.

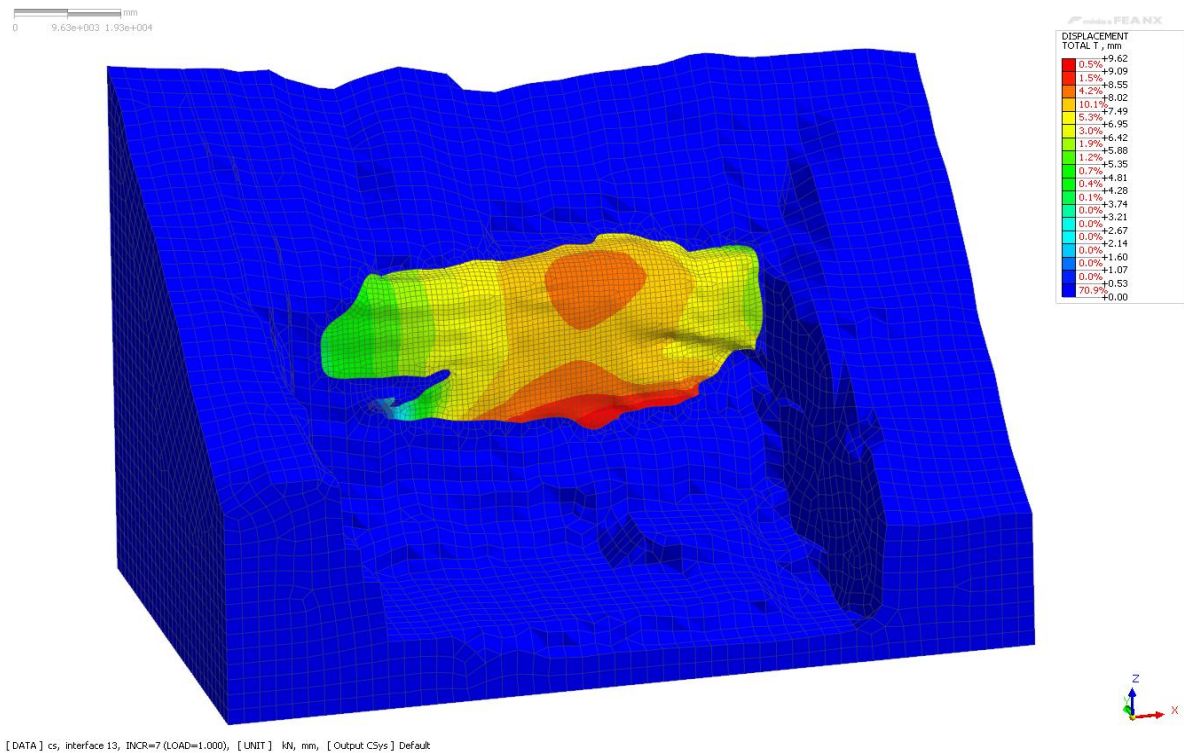


Figura 27. Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB) [1] – configurazione pre-evento di crollo 2022 – innesco evento di crollo.

Tabella 2: Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB) [1] - parametri a rottura della superficie di scivolamento associato all'evento di crollo 2022

configurazione	Coesione a rottura [kPA]	FS
PRE CROLLO 2022	55	1

## 6 STUDIO NUMERICO FEM 3D: RISULTATI

Nel seguente Paragrafo sono illustrati i risultati delle analisi di stabilità eseguite in condizioni statiche per le configurazioni di progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni. I risultati sono mostrati mediante immagini del contour di spostamento totale all'ultimo step dell'analisi di stabilità, ovvero appena prima della condizione di incipiente collasso. Tali immagini forniscono l'indicazione precisa del volume dell'ammasso roccioso che tende a mobilitarsi a seguito della formazione del meccanismo di rottura (condizione di instabilità).

### 6.1 Progetto di coltivazione a 5 anni

I risultati della configurazione geometrica associata al progetto di coltivazione a 5 anni sono mostrati in Figura 28 - Figura 30 in termini di spostamento totale che individua il primo cinematismo di rottura individuato. Esso è rappresentato dal movimento di un volume di blocchi di circa 3.000 m<sup>3</sup> dal fronte N1 del settore A.

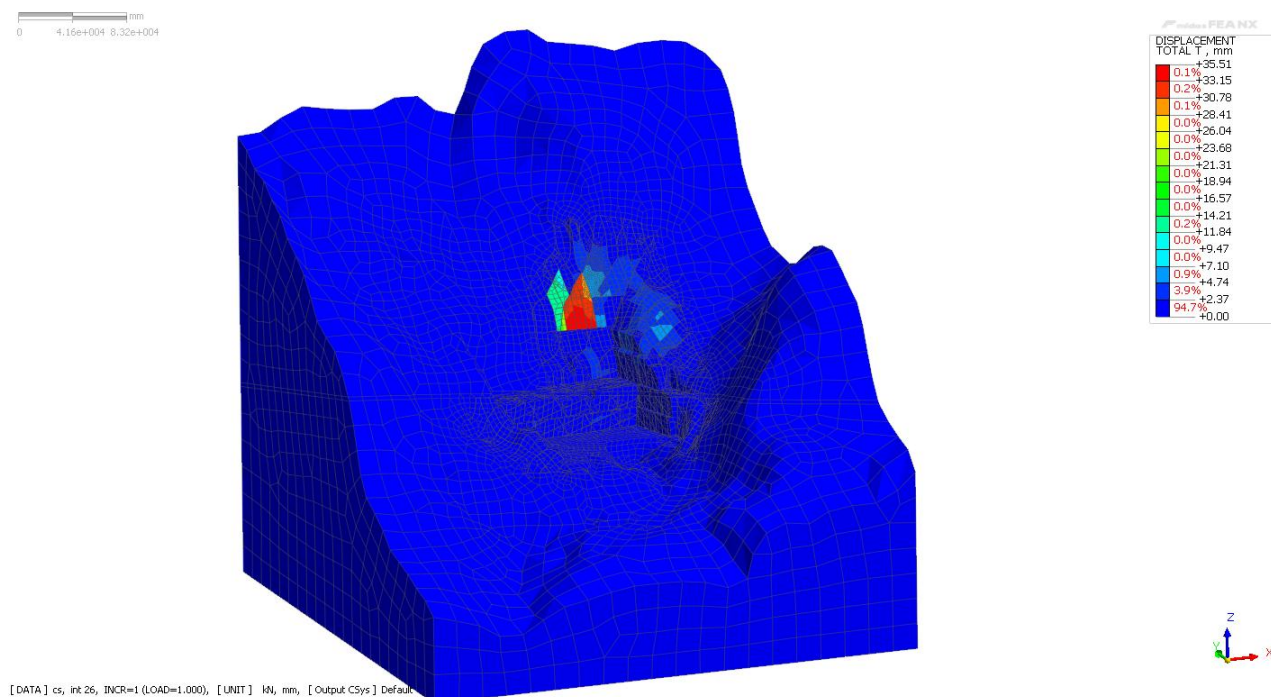


Figura 28. Progetto di coltivazione a 5 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista isometrica

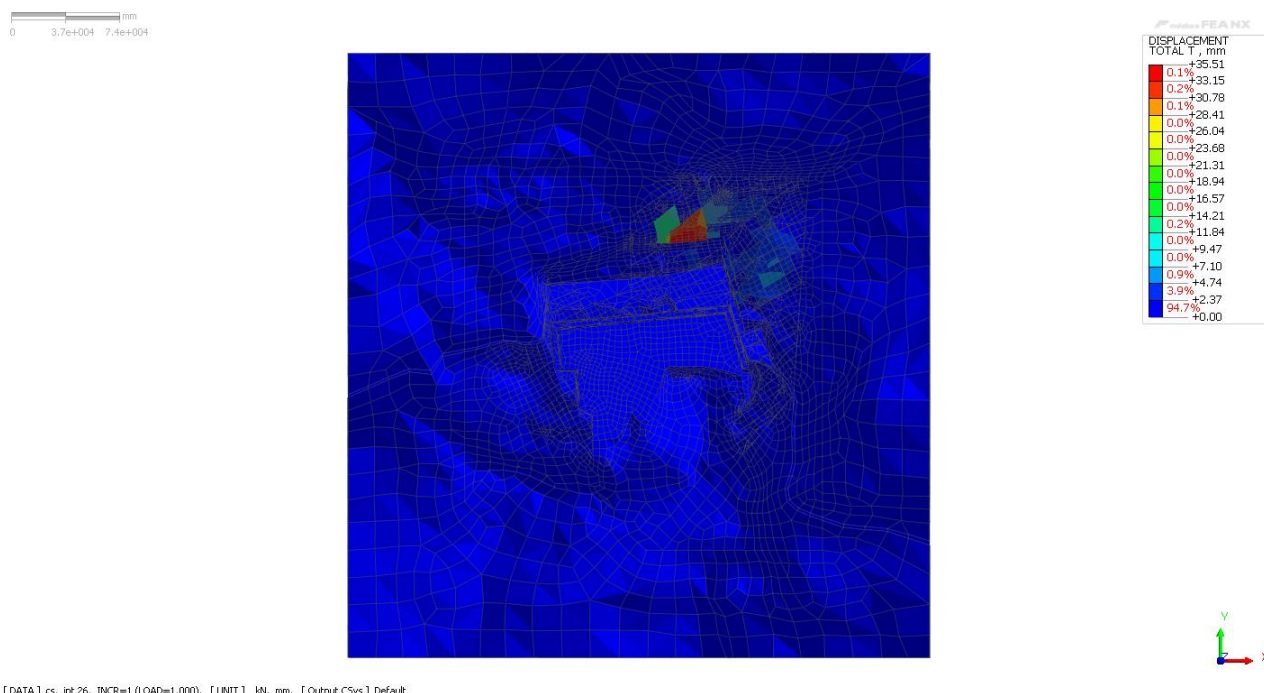


Figura 29. Progetto di coltivazione a 5 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista planimetrica

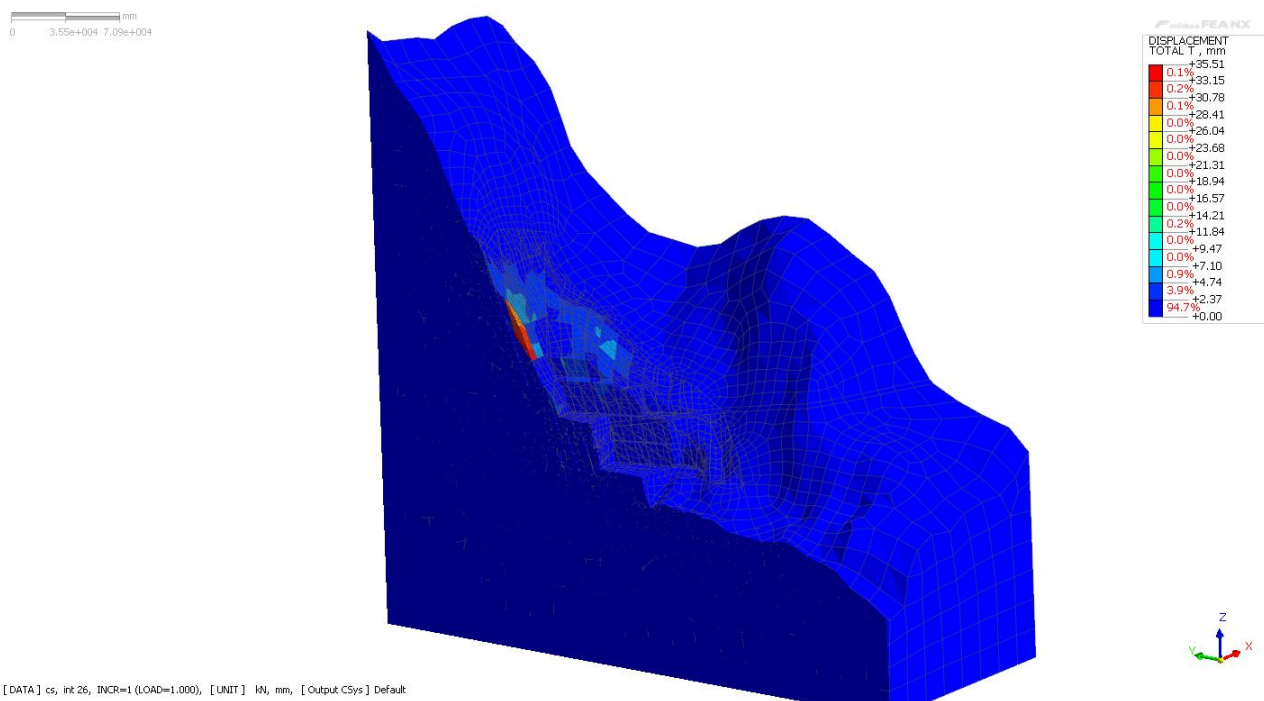
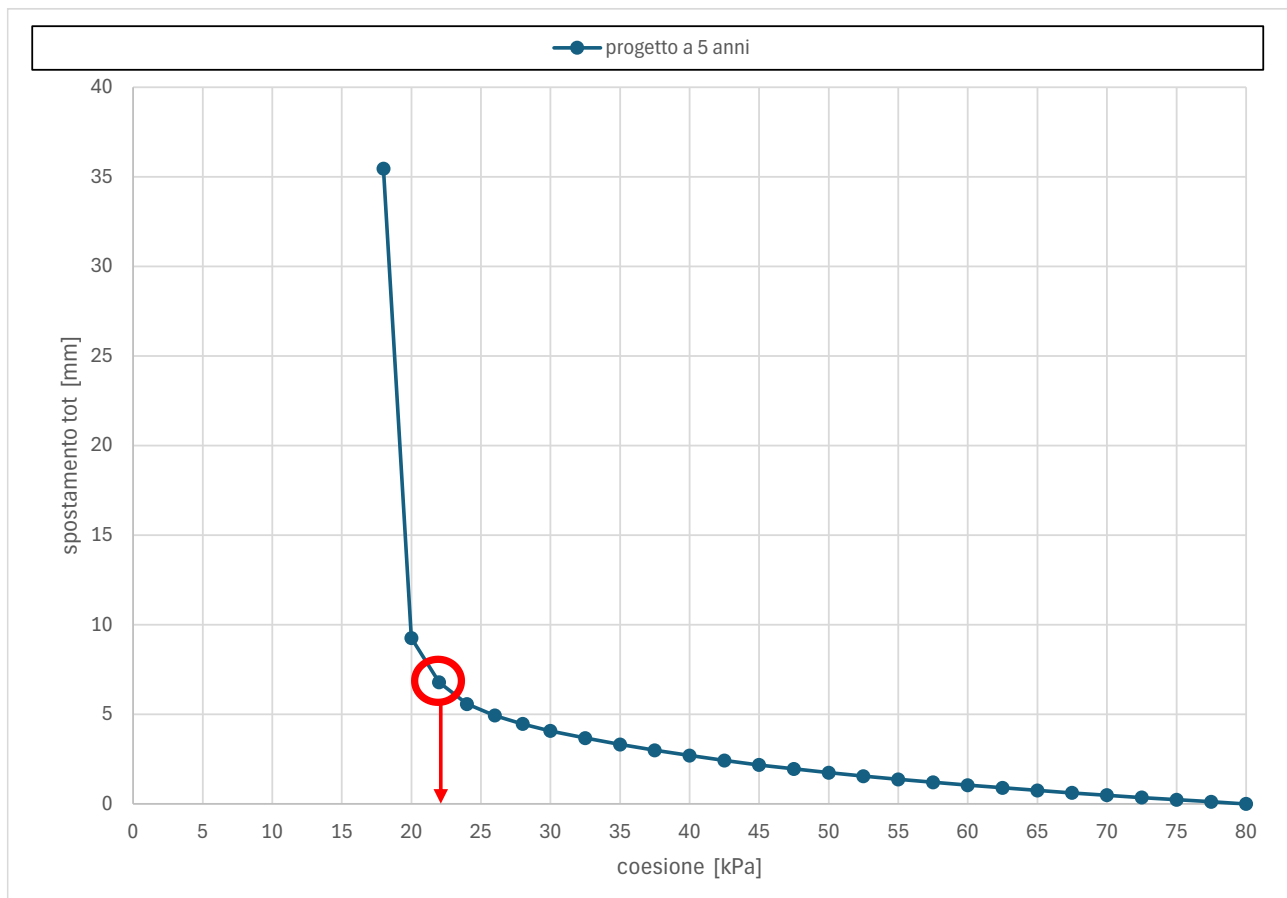


Figura 30. Progetto di coltivazione a 5 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista cutting plane

In Figura 31 è riportata la curva spostamento – coesione di interfaccia di un nodo appartenente al blocco che tende a mobilitarsi a seguito dell'innesco del cinematismo di rottura individuato dall'analisi numerica. Coerentemente a quanto effettuato dagli scriventi nello *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)* [1], il valore di



coesione a rottura viene identificato dall'ultimo valore di coesione appartenente al tratto pseudo-lineare della curva riportata in Figura 31.



*Figura 31. Progetto di coltivazione a 5 anni: curva spostamento – coesione interfaccia*

Il valore di coesione a rottura associato alla configurazione di progetto di coltivazione a 5 anni è risultato pari a 22 kPa. Pertanto, il Fattore di Sicurezza risulta essere pari a 2,50.

I risultati della configurazione geometrica associata al progetto di coltivazione a 10 anni sono mostrati in Figura 32 - Figura 34 in termini di spostamento totale che individua il primo cinematismo di rottura individuato. Esso è rappresentato dal movimento di un volume di blocchi di circa 3.000 m<sup>3</sup> dal fronte N1 del settore A.



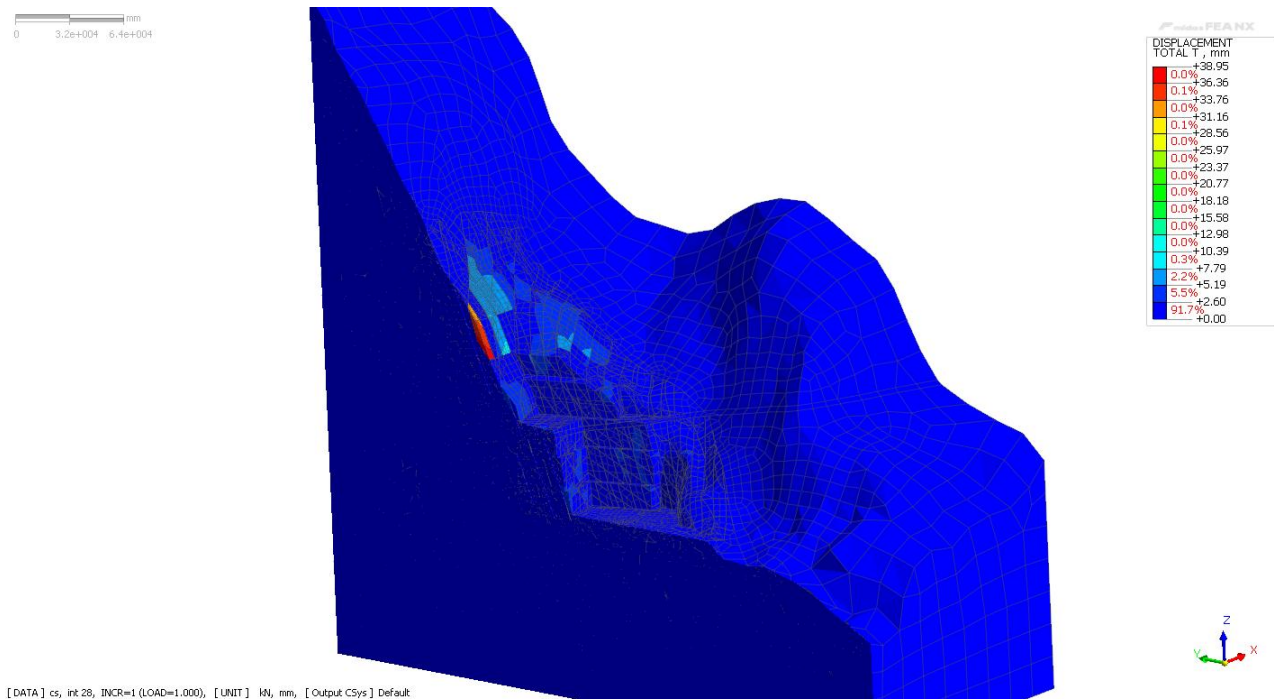
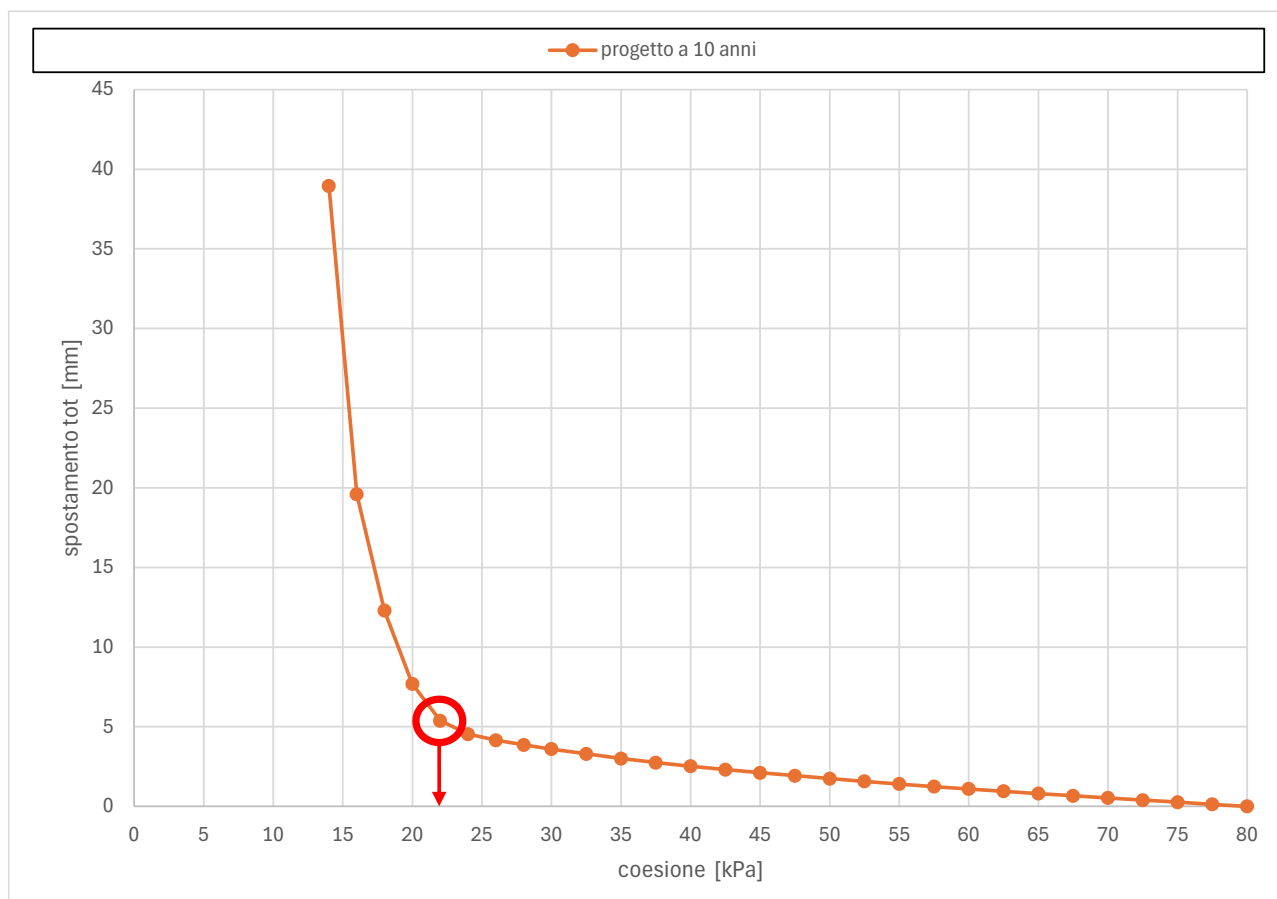


Figura 34. Progetto di coltivazione a 10 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista cutting plane

In Figura 35 è riportata la curva spostamento – coesione di interfaccia di un nodo appartenente al blocco che tende a mobilitarsi a seguito dell'innesco del cinematismo di rottura individuato dall'analisi numerica. Coerentemente a quanto effettuato dagli scriventi nello *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)* [1], il valore di coesione a rottura viene identificato dall'ultimo valore di coesione appartenente al tratto pseudo-lineare della curva riportata in Figura 35.



*Figura 35. Progetto di coltivazione a 10 anni: curva spostamento – coesione interfaccia*

Il valore di coesione a rottura associato alla configurazione di progetto di coltivazione a 10 anni è risultato pari a 22 kPa. Pertanto, il Fattore di Sicurezza risulta essere pari a 2,50.



### 6.3 Progetto di coltivazione a 15 anni

I risultati della configurazione geometrica associata al progetto di coltivazione a 15 anni sono mostrati in Figura 36 - Figura 38 in termini di spostamento totale che individua il primo cinematismo di rottura individuato. Esso è rappresentato dal movimento di un volume di blocchi di circa 3.000 m<sup>3</sup> dal fronte N1 del settore A.

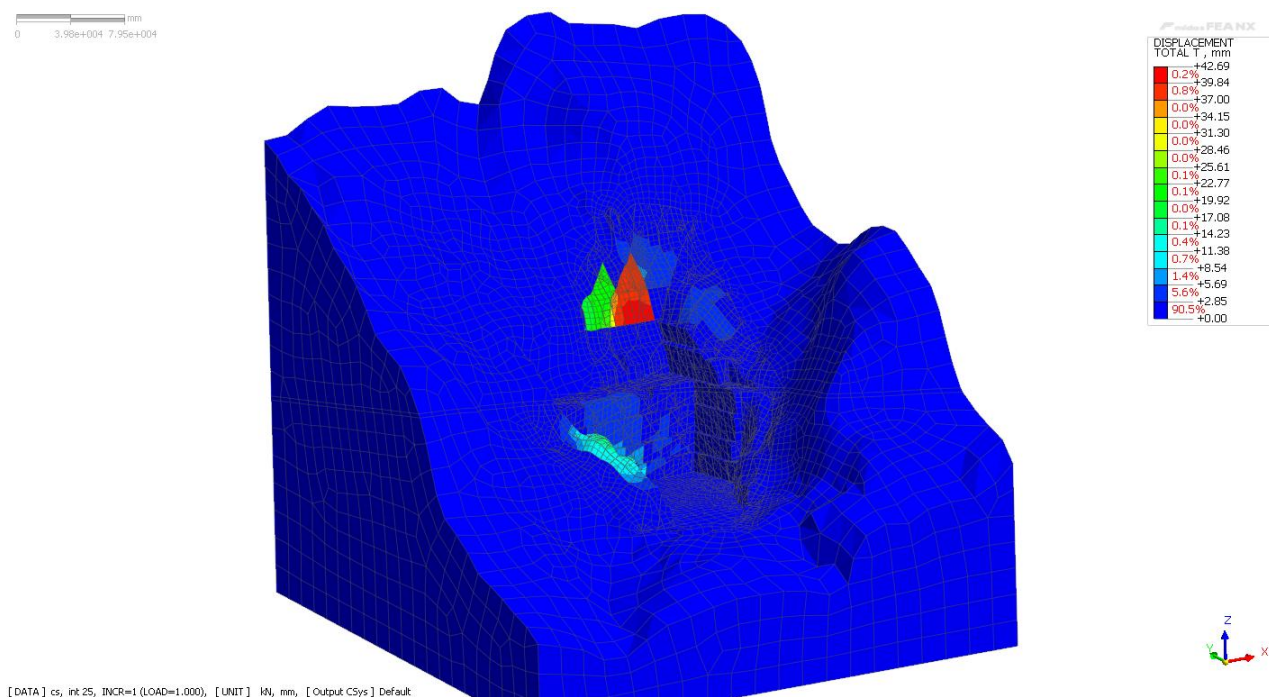


Figura 36. Progetto di coltivazione a 15 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista isometrica

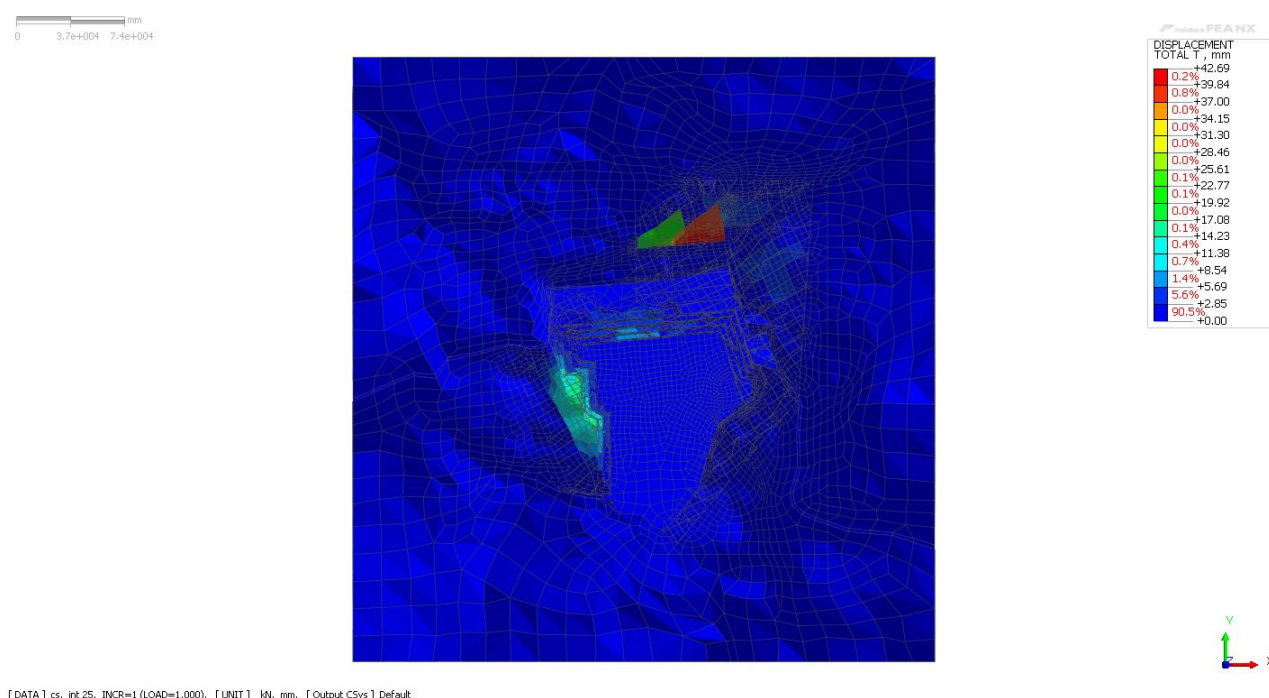
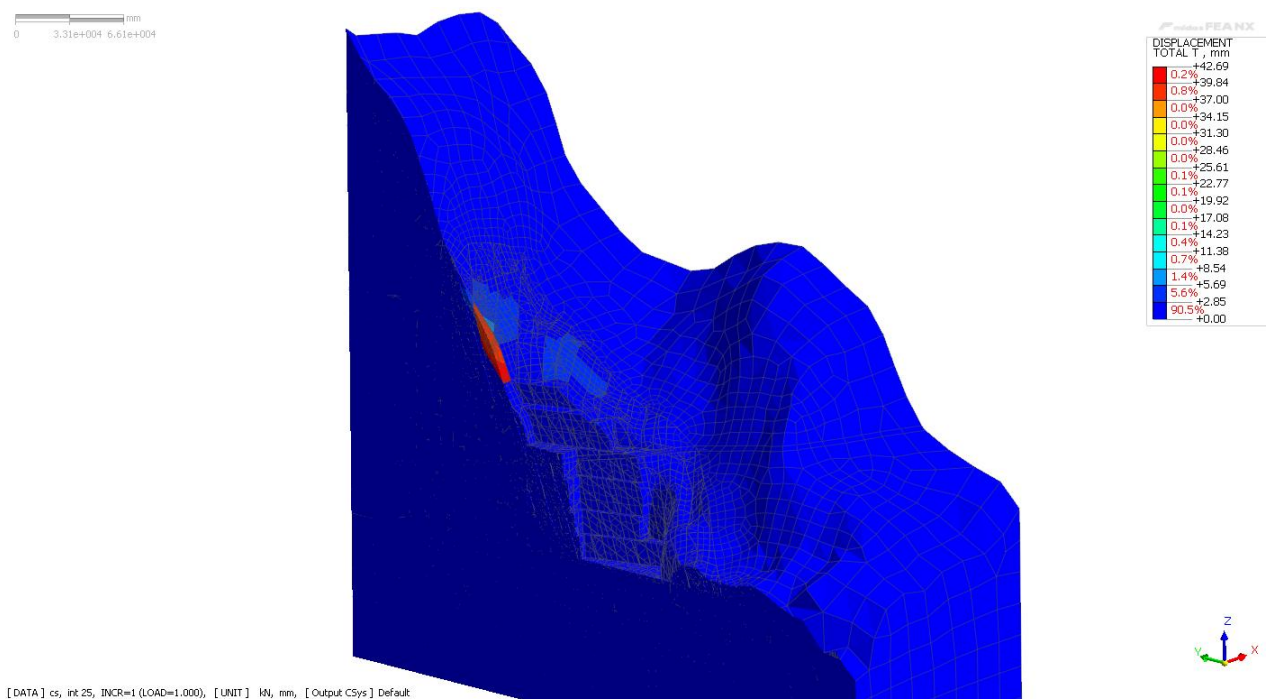
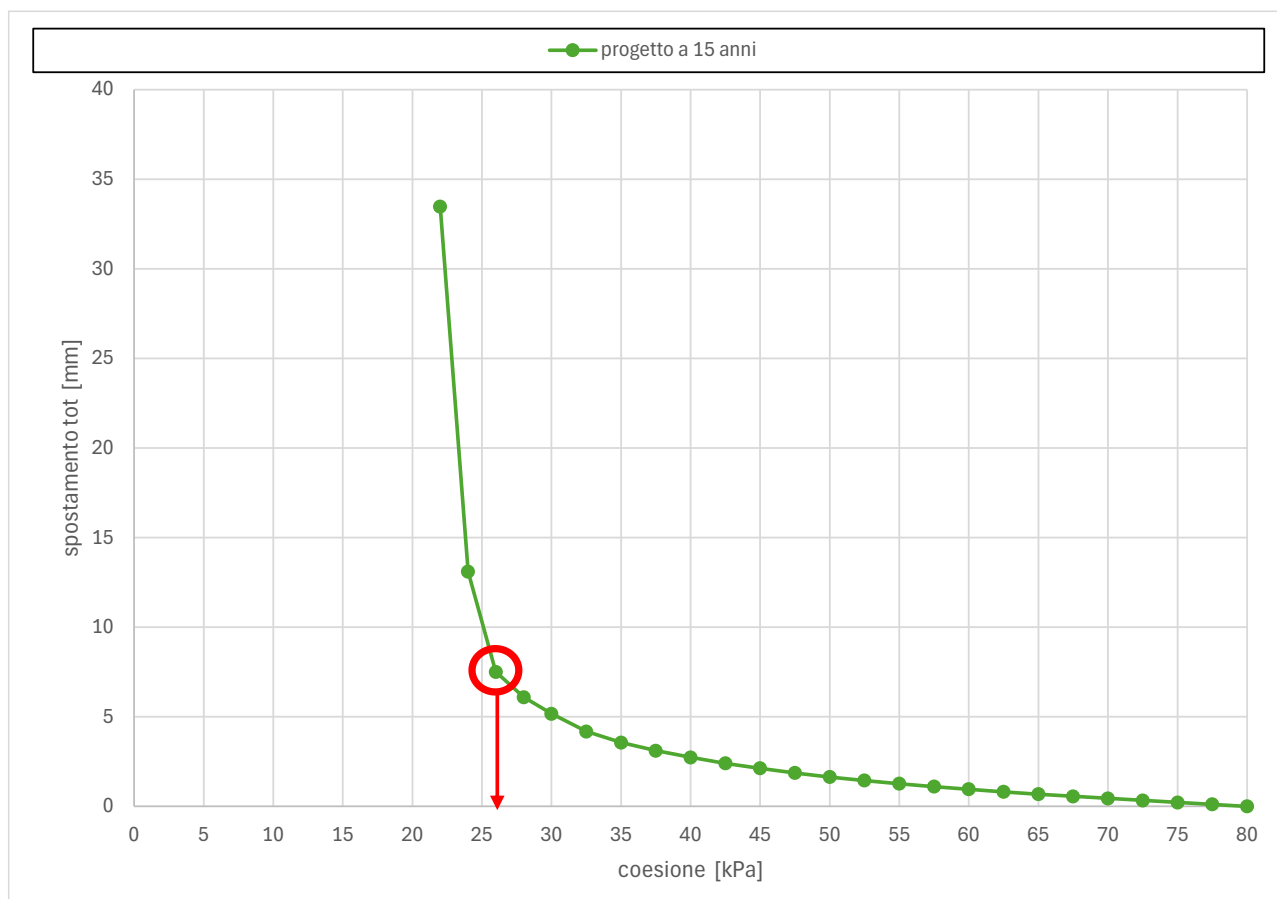


Figura 37. Progetto di coltivazione a 15 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista planimetrica



*Figura 38. Progetto di coltivazione a 15 anni: spostamenti totali del cinematismo di rottura individuato – vista cutting plane*

In Figura 39 è riportata la curva spostamento – coesione di interfaccia di un nodo appartenente al blocco che tende a mobilitarsi a seguito dell'innesco del cinematismo di rottura individuato dall'analisi numerica. Coerentemente a quanto effettuato dagli scriventi nello *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB)* [1], il valore di coesione a rottura viene identificato dall'ultimo valore di coesione appartenente al tratto pseudo-lineare della curva riportata in Figura 39.



*Figura 39. Progetto di coltivazione a 15 anni: curva spostamento – coesione interfaccia*

Il valore di coesione a rottura associato alla configurazione di progetto di coltivazione a 15 anni è risultato pari a 26 kPa. Pertanto, il Fattore di Sicurezza risulta essere pari a 2,12.

## 7 CONCLUSIONI

La presente relazione ha illustrato i risultati dello studio numerico FEM tridimensionale concernete le condizioni di stabilità della Cava Bort presso la località Formazza (VB) in relazione alle configurazioni di progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni.

- Sono state ricostruite le configurazioni geometriche dei progetti di coltivazione a 5, 10 e 15 anni;
- Sono state recepite le informazioni geo-strutturali dell'ammasso roccioso, realizzando un modello geometrico in cui sono state introdotte le tre principali famiglie di discontinuità;
- È stato realizzato un modello numerico in cui il comportamento meccanico tra i singoli blocchi definiti dalle famiglie di discontinuità è simulato mediante interfacce 2D caratterizzate da un legame costitutivo elastoplastico perfetto con legge di rottura alla Mohr-Coulomb;
- Al fine di valutare i fattori di sicurezza nei confronti dell'instabilità di volumi rocciosi riferite alle configurazioni di progetto di coltivazione a 5, 10 e 15 anni, è stato assunto che i parametri meccanici a rottura di riferimento siano quelli determinati dallo *Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di versante nella cava Bort, Foppiano, Formazza (VB) [1]*, individuati dall'analisi numerica relativa alla configurazione pre-evento di crollo avvenuto nell'anno 2022;
- Il primo cinematismo di rottura individuato dall'analisi numerica, che avviene per le configurazioni di progetto a 5, 10 e 15 anni, è identificato dal distacco di un volume di blocchi di circa 3.000 m<sup>3</sup> dal fronte N1 del settore A; La stima di tale volume è influenzata dalla spaziatura delle famiglie di discontinuità assunta dagli scriventi nella modellazione;
- Tale cinematismo rimane quello dominante per tutte le fasi di coltivazione;
- Tale cinematismo è associato ad un fattore di sicurezza pari a 2,5 per le configurazioni di progetto a 5 e 10 anni, e ad un fattore di sicurezza pari a 2,12 per la configurazione di progetto a 15 anni;
- I risultati delle analisi numeriche indicano che le verifiche di stabilità sono soddisfatte, tuttavia si suggerisce un attento controllo, durante le fasi della coltivazione, nei confronti della formazione/svincolo di volumi rocciosi caratterizzati da diversi piani di discontinuità rispetto a quelli considerati nel presente studio.

Milano, 12 maggio 2025

Prof. Geol. Giovanni Crosta