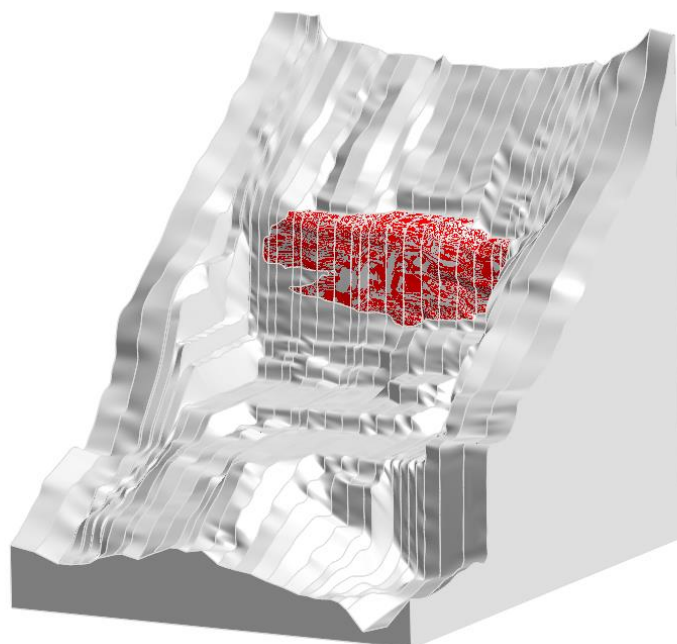


**Studio di modellazione e monitoraggio dell'instabilità di
versante nella Cava "Bort", Foppiano, Formazza (VB)**

Relazione di calcolo dei modelli numerici FEM



Milano, 3 luglio 2023

Direttore Tecnico: Ing. Luca Mancinelli

Presidente: Prof. Giovanni Crosta

Collaboratori: Prof. Paolo Frattini, Ing. Gabriele Frigerio

Sommario

1	Premessa.....	3
2	Descrizione del modello numerico	4
3	Modello geometrico del sito di interesse	5
4	Introduzione dei dati geo-strutturali nella geometria post – evento di crollo	7
5	Modello numerico FEM pre e post evento di crollo	8
5.1	Discretizzazione spaziale ed elementi della modellazione	8
5.2	Condizioni al contorno: vincoli cinematici	9
5.3	Fasi della modellazione numerica e approccio della modellazione.....	10
1.1.1	Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione delle superfici di scorrimento (interfacce bidimensionali)	10
1.1.2	Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione del vincolo laterale dell’ammasso roccioso	11
6	Risultati delle analisi numeriche FEM	14
6.1	Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione delle superfici di scorrimento (interfacce bidimensionali)	14
6.2	Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione del vincolo laterale dell’ammasso roccioso	18
7	Considerazioni finali.....	24

1 Premessa

Nella presente relazione si riportano i risultati dello studio di modellazione dell'instabilità di versante nella Cava "Bort", Foppiano, Formazza (VB), ed in particolare delle analisi numeriche agli elementi finiti in campo non lineare delle pareti rocciose della Cava Bort, presso il comune di Formazza (VB). Le finalità della modellazione, come da incarico, sono quelle di valutare la stabilità della parete sulla base delle conoscenze geologico e geotecniche disponibili. Non sono previste raccomandazioni sulla eventuale messa in sicurezza del sito né sull'utilizzo della cava.

Per quanto riguarda il monitoraggio, si fa riferimento al report di Lisalab srl "SERVIZIO DI MONITORAGGIO DI TIPO "PERIODICAL CHECK" PER IL CONTROLLO DELLE DEFORMAZIONI DELLA CAVA BORT UTILIZZANDO IL SISTEMA GBInSAR LiSALab, Loc. Foppiano, Comune di Formazza (VB).3 Maggio 2023 - 12 Maggio 2023", inviata alla committenza indipendentemente dalla presente.

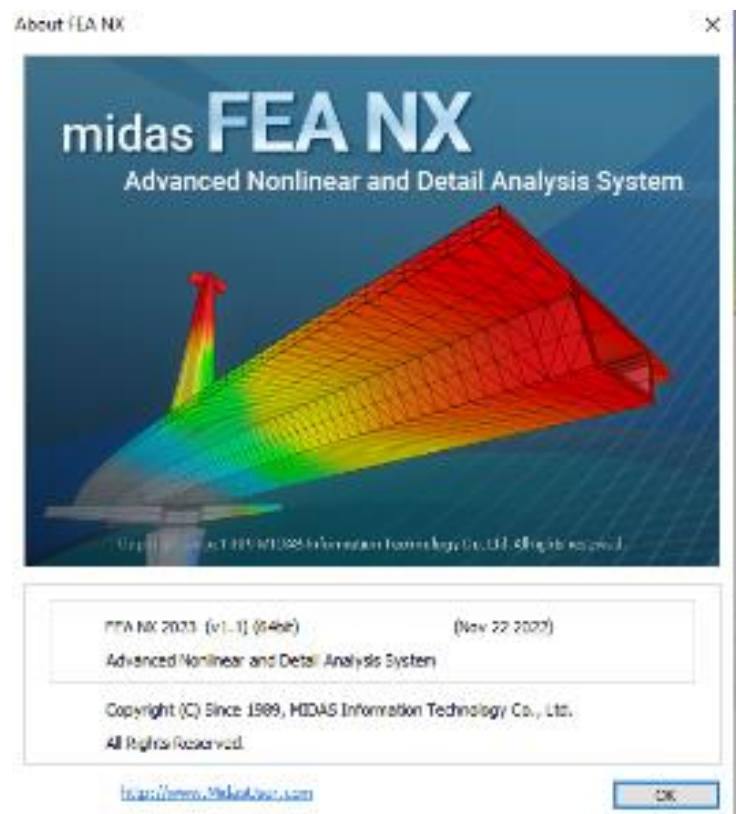
2 Descrizione del modello numerico

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: EZM2Q97WKN01XXXX



3 Modello geometrico del sito di interesse

I dati topografici disponibili derivano da rilievi droni della cava effettuati dal professionista dott. Stefano Crosetto e si riferiscono a diverse condizioni temporali:

- la prima con il rilievo ante crollo dell'aprile 2022,
- la seconda dopo il primo crollo (ma con alcune criticità di georeferenziazione),
- la terza dopo il secondo crollo (aprile 2022),
- la quarta con il rilievo di novembre 2022 al termine dei lavori.

A partire dai questi dati disponibili son state estratte sezioni 3D dalla nuvola di punti, ed è stato possibile ricostruire la geometria tridimensionale del sito oggetto di intervento (Figura 1).

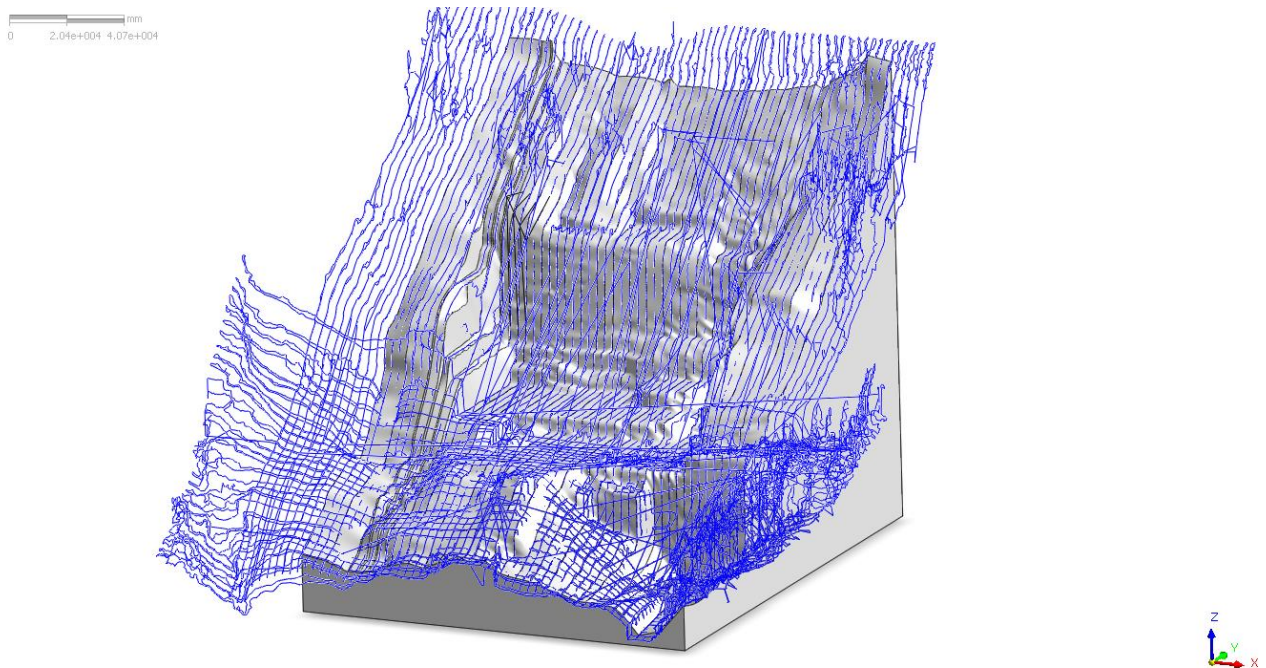


Figura 1: modello geometrico tridimensionale del sito oggetto di studio

Avendo a disposizione diverse nuvole di punti è stato possibile ricostruire il profilo morfologico della cava nelle condizioni precedenti (Figura 2) e successive (Figura 3) all'evento di crollo e di pulizia della parte superiore della cava. I volumi di crollo e di pulizia così individuati sono qui di seguito riportati:

- Volume di crollo (colore rosso in Figura 2): 9500 mc circa
- Volume di pulizia (colore giallo in Figura 2): 2500 mc circa

mm
0 2.04e+004 4.07e+004

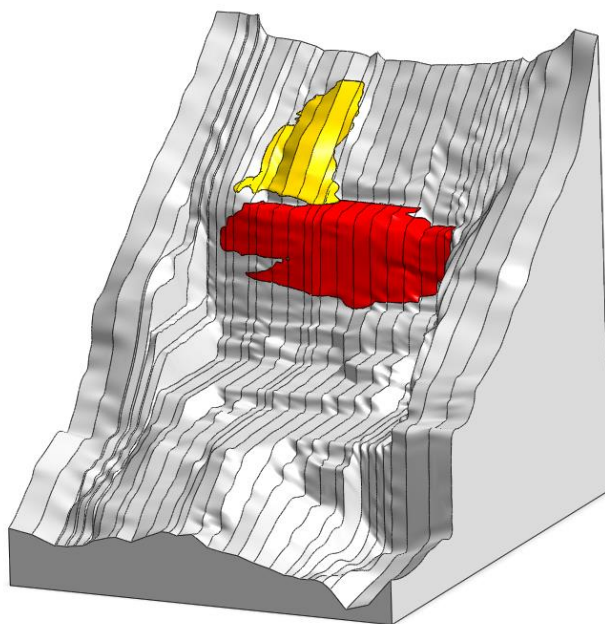


Figura 2: modello geometrico pre-evento di crollo e pulizia

mm
0 2.04e+004 4.07e+004

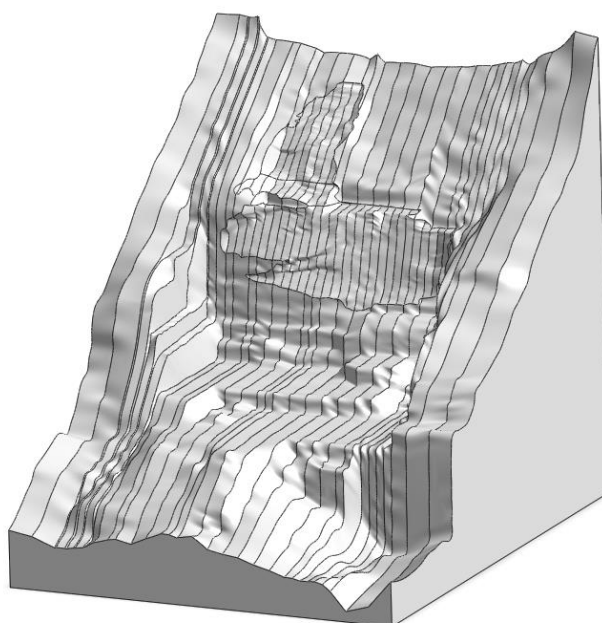


Figura 3: modello geometrico post-evento di crollo e pulizia

4 Introduzione dei dati geo-strutturali nella geometria post – evento di crollo

Al dominio di calcolo tridimensionale concernente il post-evento di crollo sono state introdotte 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 Domogranit srl e realizzato dal dott. Geol. Claudio Gagliardi. In particolare, gli scriventi hanno deciso di considerare nella modellazione le due principali famiglie di discontinuità che definiscono i più evidenti cinematismi osservati durante i sopralluoghi in sito. Le famiglie di discontinuità considerate sono qui di seguito elencate:

- K1 giacitura media 167/50
- K2 giacitura media 240/80

L'introduzione delle discontinuità nel dominio di calcolo conduce alla definizione di tre volumi potenzialmente instabili, come mostrato in Figura 4.

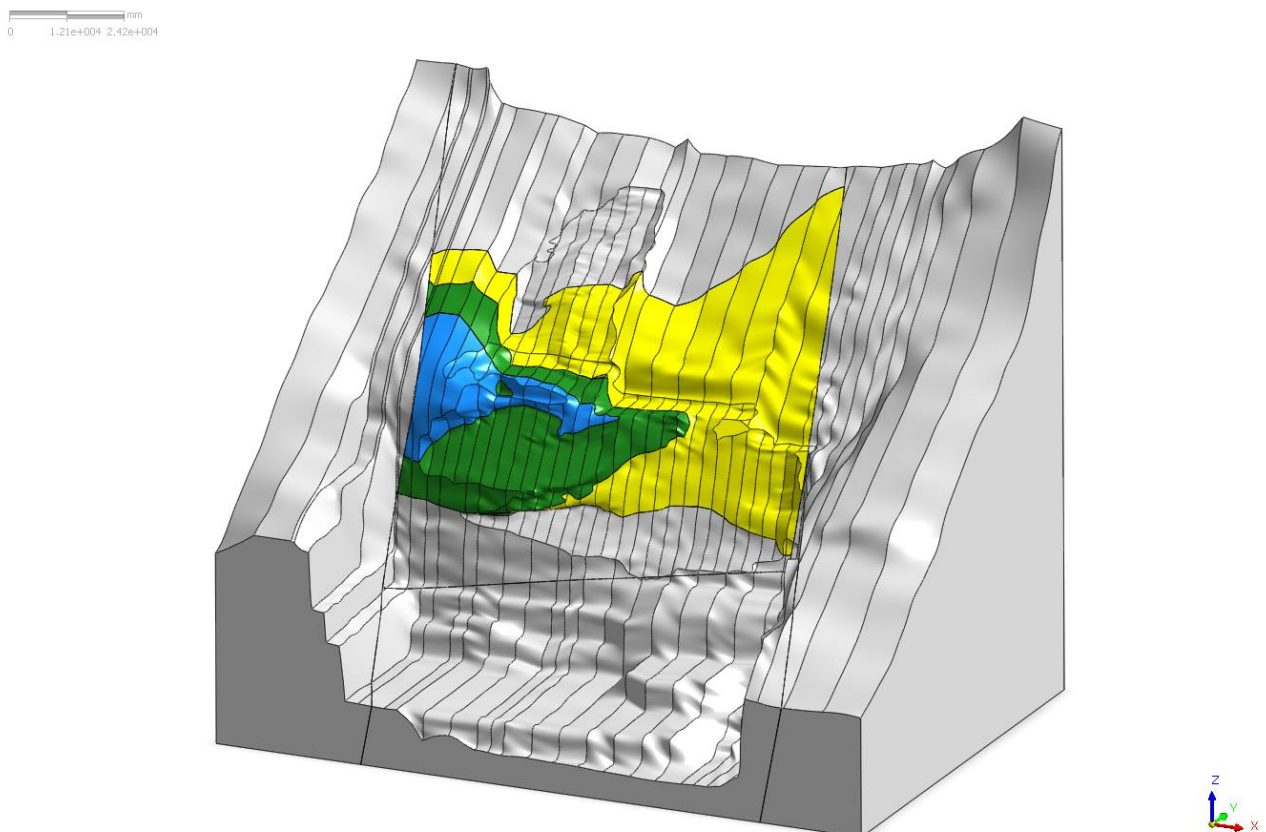


Figura 4: volumi rocciosi potenzialmente instabili della configurazione post evento di crollo

I volumi potenzialmente instabili così determinati sono di seguito descritti:

- Blocco 1 (colore blu in Figura 4): è il volume di coronamento del crollo avvenuto ed è stimato in circa 1500 mc di roccia;
- Blocco 2 (colore verde in Figura 4): stimato in circa 4500 mc di roccia;
- Blocco 3 (colore giallo in Figura 4): stimato in circa 1200 mc di roccia.

5 Modello numerico FEM pre e post evento di crollo

5.1 Discretizzazione spaziale ed elementi della modellazione

Il modello numerico FEM 3D, relativo alla configurazione pre-evento di crollo, è costituito da circa 78000 elementi finiti esaedrici e tetraedrici lineari (Figura 5).

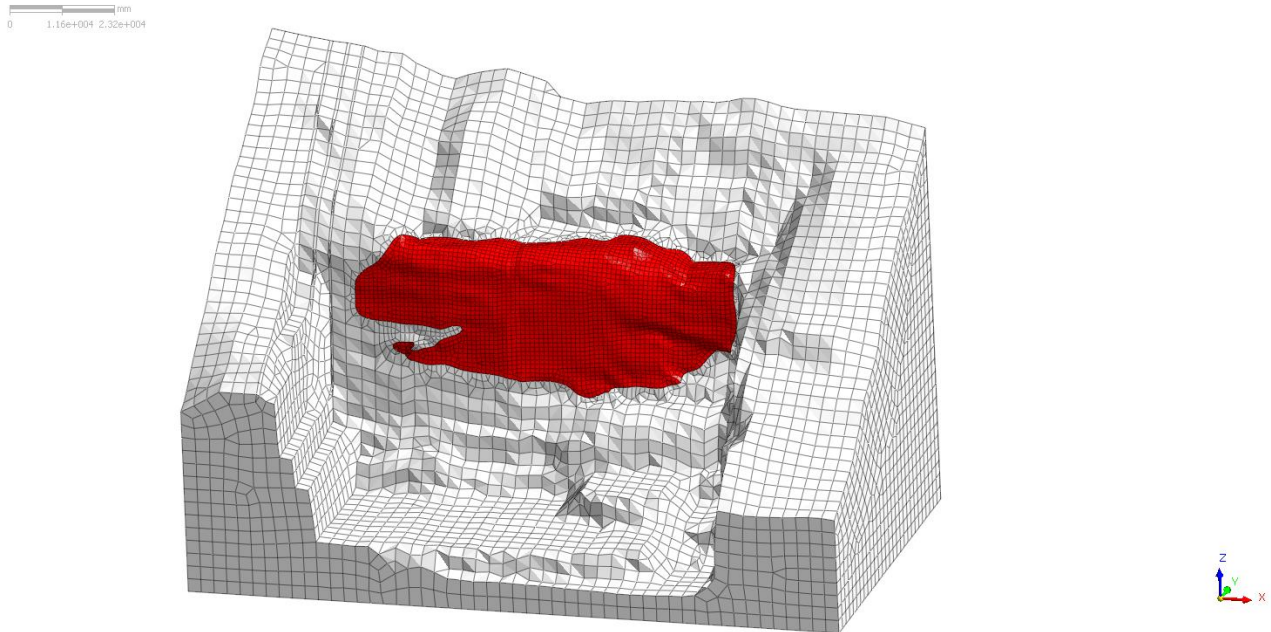


Figura 5: modello numerico FEM 3D pre-evento di crollo

Nel modello mostrato in Figura 5 è possibile osservare la presenza del volume di roccia coinvolto nell'evento di crollo avvenuto nell'aprile 2022 (colore rosso). Il modello numerico FEM 3D, relativo alla configurazione post-evento di crollo, è costituito da circa 105000 elementi finiti esaedrici e tetraedrici lineari (Figura 6).

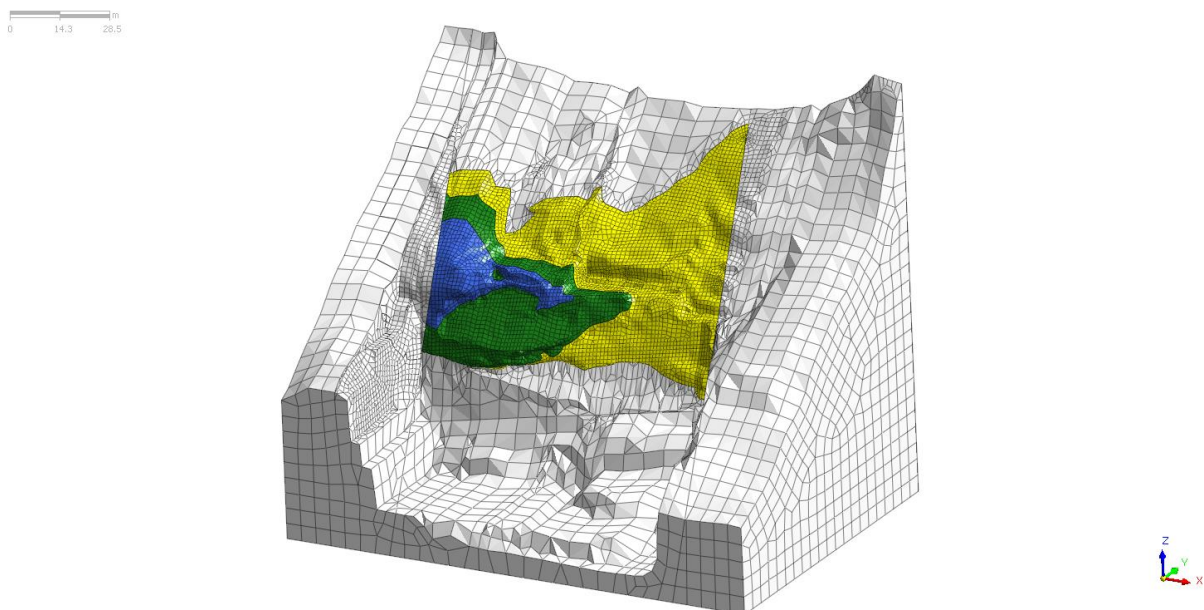


Figura 6: modello numerico FEM 3D post-evento di crollo

Nel modello mostrato in Figura 6 è possibile osservare la presenza dei volumi di roccia potenzialmente instabili già descritti nel Paragrafo 4.

In entrambi i modelli la superficie di rottura è stata modellata mediante una interfaccia bidimensionale al contatto tra il volume di roccia instabile e la roccia intatta sottostante (Figura 7).

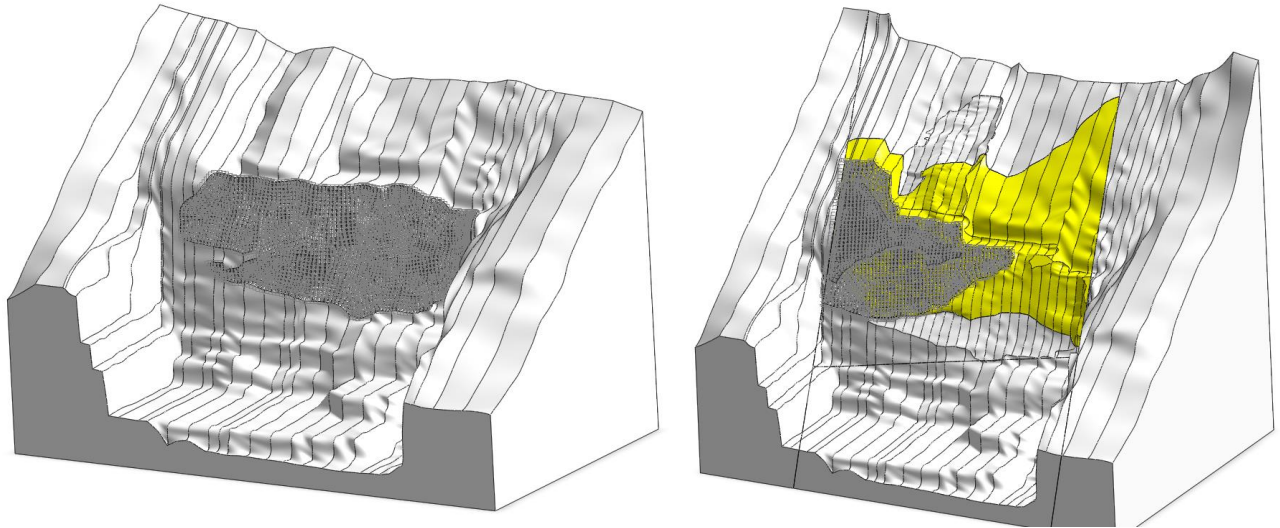


Figura 7: interfaccia bidimensionale che modella la superficie di scorrimento

La discretizzazione spaziale della superficie di rottura e del corpo di frana è pari a 1 metro, mentre ai lati del modello essa aumenta fino a raggiungere i 3 metri.

5.2 Condizioni al contorno: vincoli cinematici

Al modello numerico 3D sono state applicate le seguenti condizioni al contorno:

- lungo le facce laterali dei modelli sono stati impediti gli spostamenti in direzione orizzontale;
- lungo la faccia inferiore del modello sono stati impediti gli spostamenti in direzione verticale e orizzontale;
- non è stata considerata la presenza di un livello di falda o di pressioni agenti a tergo dei blocchi rocciosi definiti dalle superfici di scorrimento.

Le condizioni iniziali imposte al modello di calcolo sono costituite dall'applicazione dello stato di sforzo geostatico, determinato dal peso proprio dei materiali coinvolti.

5.3 Fasi della modellazione numerica e approccio della modellazione

Le fasi di modellazione considerate nelle analisi numeriche sono qui di seguito elencate:

1. *Inizializzazione degli sforzi*: simulazione dello stato di sforzo geostatico naturale del versante;
2. *Analisi di stabilità mediante la tecnica della Shear Strength Reduction*: tale fase di modellazione prevede la riduzione dei parametri meccanici dell'ammasso roccioso (in particolare, della sola superficie di scorrimento), fino al raggiungimento della condizione di rottura.

Il metodo della *Shear Strength Reduction* consiste nella progressiva riduzione dei parametri meccanici di resistenza di un legame costitutivo elastoplastico perfetto con legge di rottura alla Mohr Coulomb.

In particolare, genericamente, l'equazione che esplicita la resistenza al taglio del terreno viene modificata 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 del terreno 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, maggiore sarà la condizione di stabilità del pendio e delle opere ad esso interconnesse. Si vuole evidenziare che l'analisi numerica è in grado di valutare qualsiasi tipologia di meccanismo di rottura associata all'opera in progetto. Il fattore di sicurezza individuato dall'analisi numerica sarà esattamente il valore di SRM associato allo step in cui il sistema raggiunge la sua condizione limite di stabilità.

In particolare, la *Shear Strength Reduction* viene effettuata solamente in corrispondenza della superficie di scivolamento, assumendo per il terreno un legame costitutivo elastoplastico perfetto con legge di rottura alla Mohr-Coulomb (con coesione nulla) e legge di flusso non associata, con angolo di attrito pari a 0°.

1.1.1 Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione delle superfici di scorrimento (interfacce bidimensionali)

Nel caso specifico, i parametri meccanici di rottura sono associati alle superfici di scivolamento che definiscono i volumi rocciosi potenzialmente instabili.

Al fine di valutare l'attuale fattore di sicurezza nei confronti dell'instabilità dei potenziali volumi rocciosi già descritti nel paragrafo 4, si assume (a favore di sicurezza), che i parametri meccanici a rottura ϕ'_{pre} , c'_{pre} , $\sigma_{traz_{pre}}$ (angolo di attrito (mantenuto costante e pari a 36°), coesione e resistenza a trazione (nel caso specifico posta pari a zero)) individuati dall'analisi numerica relativa alla configurazione pre-evento di crollo rappresentino i parametri di progetto del sistema, associati pertanto ad un Fattore di Sicurezza (FS) unitario (incipiente collasso).

La configurazione post-evento di crollo sarà caratterizzata da parametri di rottura (φ'_{post} , c'_{post} , $\sigma_{traz_{post}}$) il cui fattore di sicurezza FS_{post} è valutato mediante la seguente espressione:

$$FS_{post} = \frac{c'_{pre}}{c'_{post}}$$

1.1.2 Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione del vincolo laterale dell'ammasso roccioso

Nel caso specifico, i parametri meccanici di rottura sono associati all'ammasso roccioso del vincolo laterale che sostiene i blocchi potenzialmente instabili. In tale ipotesi di modellazione gli scriventi assumono che la superficie di scorrimento sia aperta e non trasmetta sforzi di taglio; pertanto, la stabilità dei volumi rocciosi dipende dalla resistenza del vincolo laterale, rappresentato dall'area di contatto laterale lungo la discontinuità K2. Facendo riferimento alle figure seguenti, è possibile osservare che il:

- Blocco 1 (colore blu in Figura 8): è il volume di coronamento del crollo avvenuto ed è stimato in circa 1500 mc di roccia. Esso risulta vincolato al lato ovest della cava su una superficie di circa 120 mq mentre può essere considerato aperto sulla sua restante perimetrazione;
- Blocco 2 (colore verde in Figura 9): stimato in circa 4500 mc di roccia. Esso risulta vincolato al lato ovest della cava su una superficie di circa 140 mq mentre può essere considerato aperto sulla sua restante perimetrazione;
- Blocco 3 (colore giallo in Figura 10): stimato in circa 1200 mc di roccia. Esso risulta vincolato ai lati ovest ed est della cava su una superficie complessiva di circa 450 mq mentre può essere considerato aperto sulla sua restante perimetrazione.

A titolo di confronto il volume di roccia coinvolto nell'evento di crollo (Figura 11), stimato in circa 9500 mc, risultava vincolato al lato est della cava su una superficie di circa 110 mq mentre poteva essere considerato aperto sulla sua restante perimetrazione.

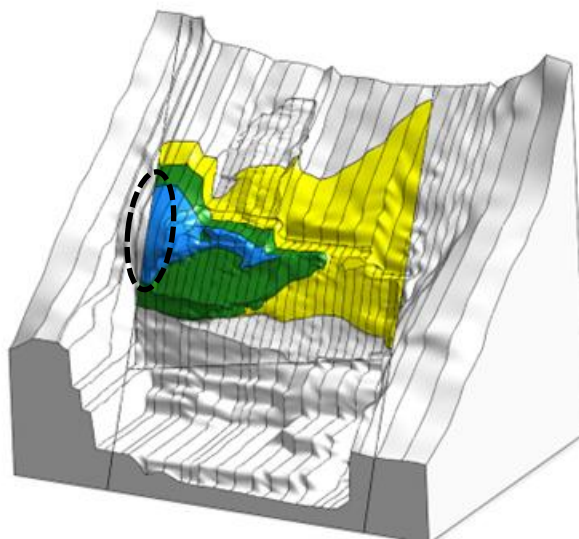


Figura 8: vincolo laterale volume roccioso potenzialmente instabile blocco 1 (colore blu)

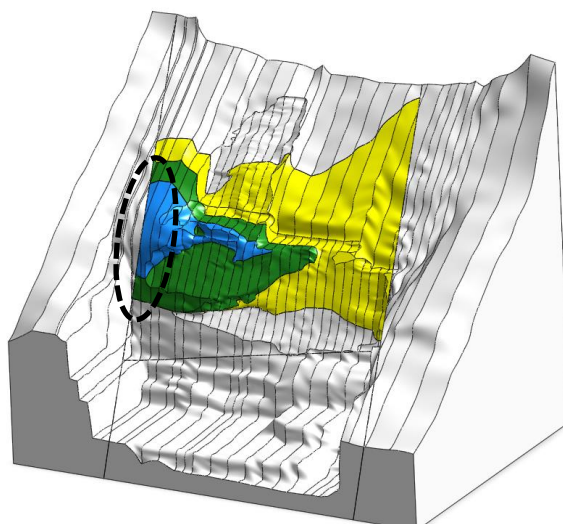


Figura 9: vincolo laterale volume roccioso potenzialmente instabile blocco 2 (colore verde)

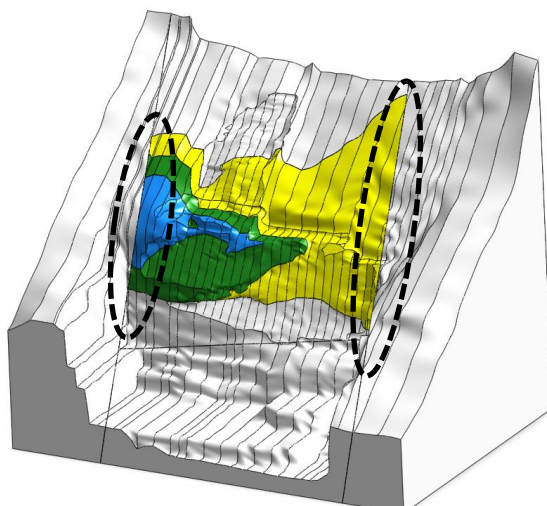


Figura 10: vincolo laterale volume roccioso potenzialmente instabile blocco 3 (colore giallo)

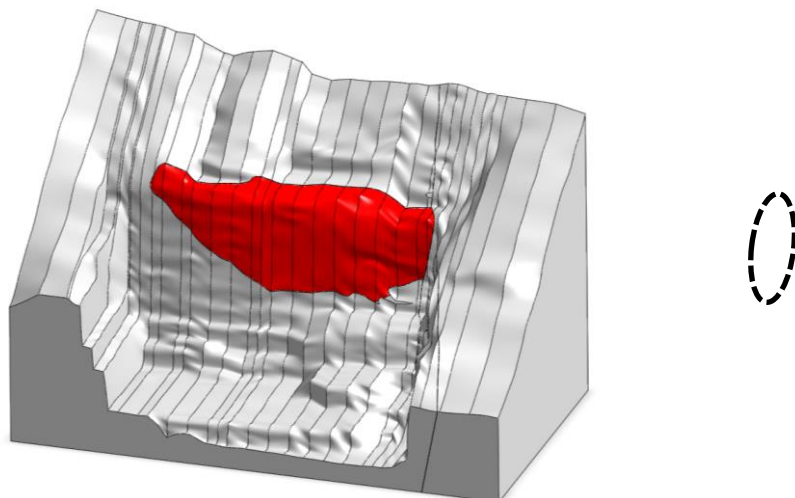


Figura 11: vincolo laterale volume roccioso coinvolto nell'evento di crollo (colore rosso)

Analizzando i volumi e le aree di vincolo appena descritte, risulta evidente che il Blocco 2 e il Blocco 1 possano essere associati, rispettivamente in quest'ordine, ai volumi potenzialmente instabili per un eventuale prossimo meccanismo di distacco, mentre il distacco del Blocco 3 viene identificato come un meccanismo secondario o comunque con bassa % di accadimento, proprio a causa delle ampie aree di vincolo laterale.

Pertanto, le analisi numeriche FEM prenderanno in considerazione solamente il distacco dei Blocchi 1 e 2.

Al fine di valutare l'attuale fattore di sicurezza nei confronti dell'instabilità dei potenziali volumi rocciosi già descritti nel paragrafo 4, si assume (a favore di sicurezza), che i parametri meccanici a rottura ϕ'_{pre} , c'_{pre} , $\sigma_{traz_{pre}}$ (angolo di attrito, coesione e resistenza a trazione) individuati dall'analisi numerica relativa alla configurazione pre-evento di crollo rappresentino i parametri di progetto del sistema, associati pertanto ad un Fattore di Sicurezza (FS) unitario (incipiente collasso).

La configurazione post-evento di crollo sarà caratterizzata da parametri di rottura (ϕ'_{post} , c'_{post} , $\sigma_{traz_{post}}$) il cui fattore di sicurezza FS_{post} è valutato mediante la seguente espressione:

$$FS_{post} = \frac{\tan f'_{pre}}{\tan f'_{post}} = \frac{c'_{pre}}{c'_{post}} = \frac{\sigma_{traz_{pre}}}{\sigma_{traz_{post}}}$$

6 Risultati delle analisi numeriche FEM

6.1 Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione delle superfici di scorrimento (interfacce bidimensionali)

I risultati delle analisi numeriche FEM 3D sono qui di seguito riportati come contour grafici del modello 3D e come curve di spostamento di nodi di controllo posti sui volumi rocciosi in funzione del parametro di riduzione delle proprietà meccaniche (SRM). In particolare, alla progressiva riduzione dei parametri meccanici il corpo di frana tende ad accumulare spostamenti fino al raggiungimento della resistenza limite del sistema: tale condizione, detta di incipiente collasso, determina i parametri meccanici a rottura della superficie di scivolamento. In Figura 12, Figura 13 e Figura 14 è possibile osservare il meccanismo di rottura relativo alla configurazione pre-evento di crollo, mentre in Figura 15, Figura 16 e Figura 17 il meccanismo di rottura relativo alla configurazione post-evento di crollo.

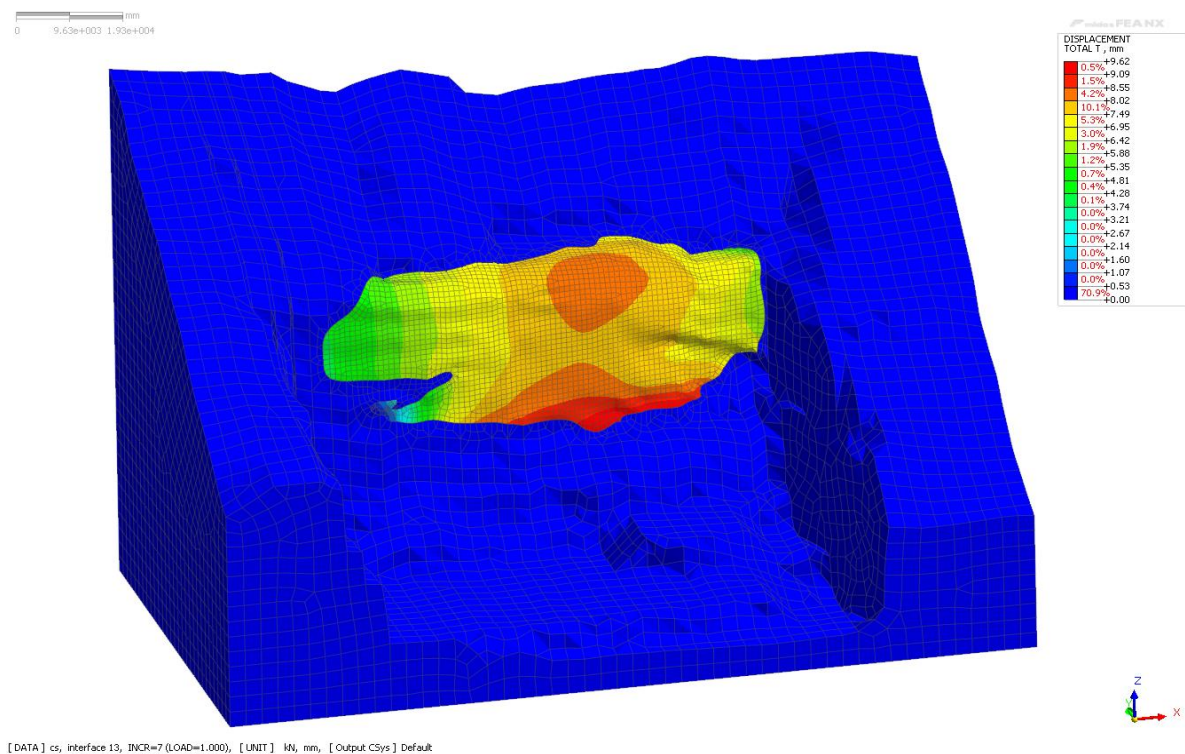


Figura 12: configurazione pre-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso (visuale indeformata)

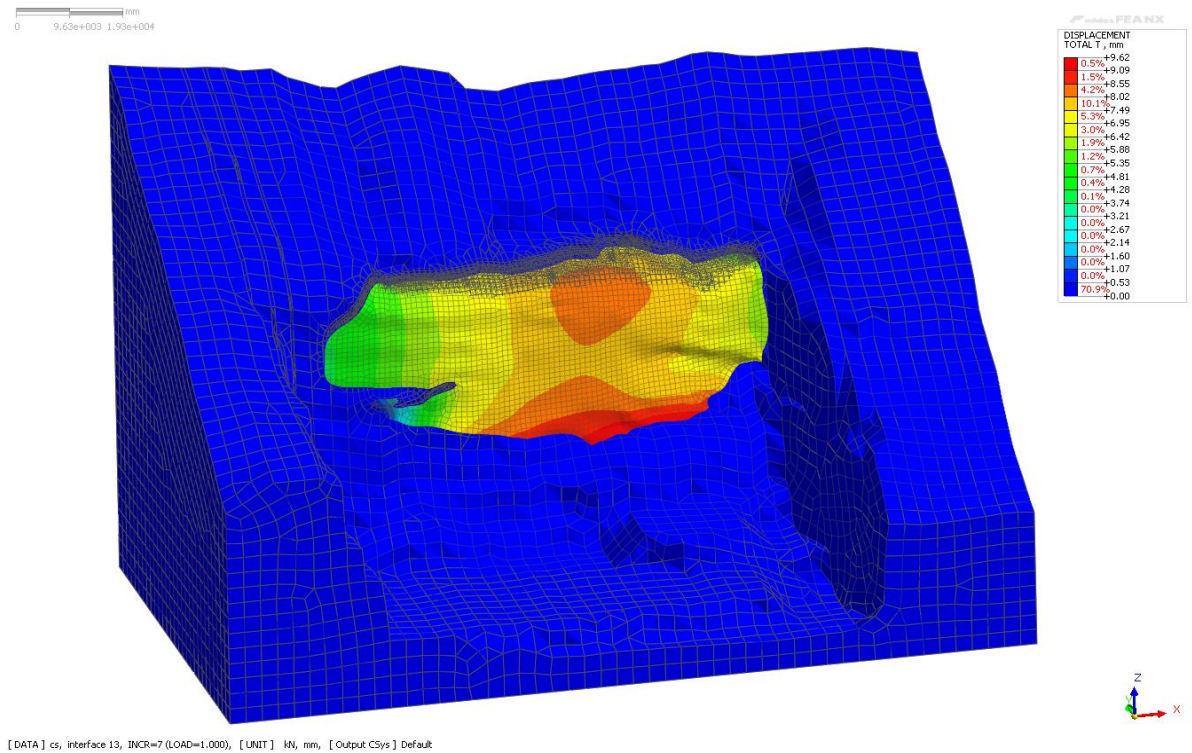


Figura 13: configurazione pre-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso (visuale deformata)

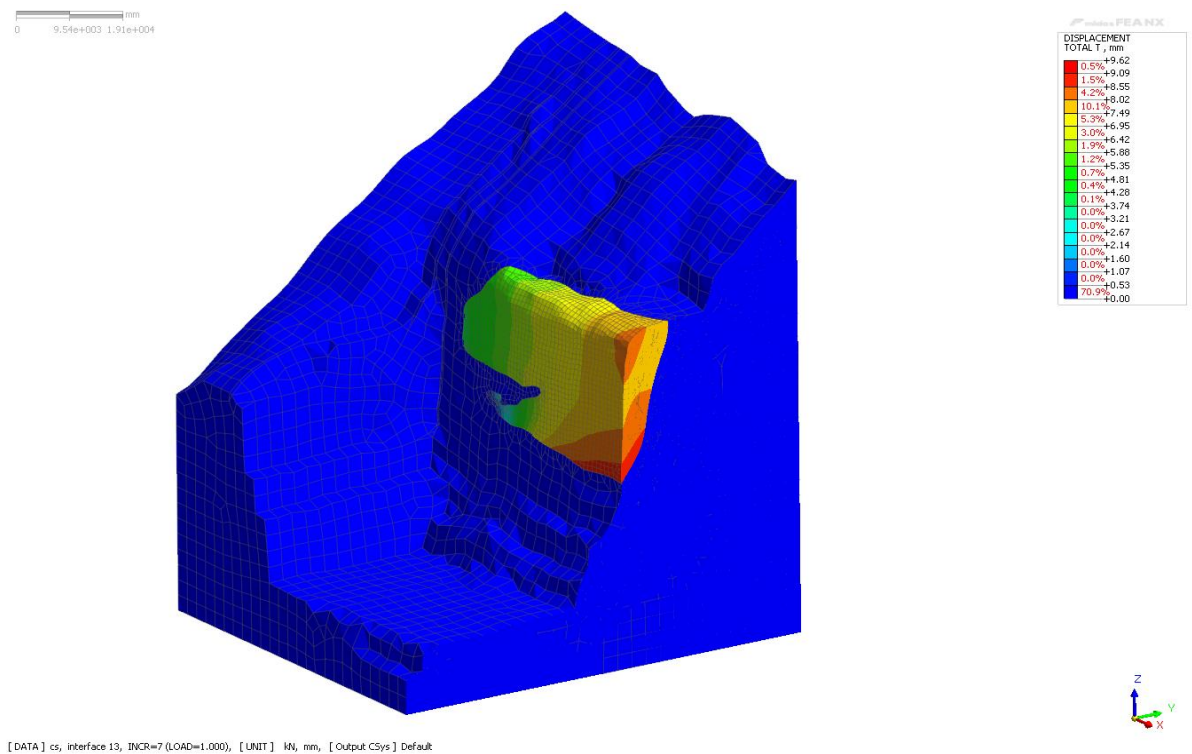


Figura 14: configurazione pre-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso (visuale in sezione)

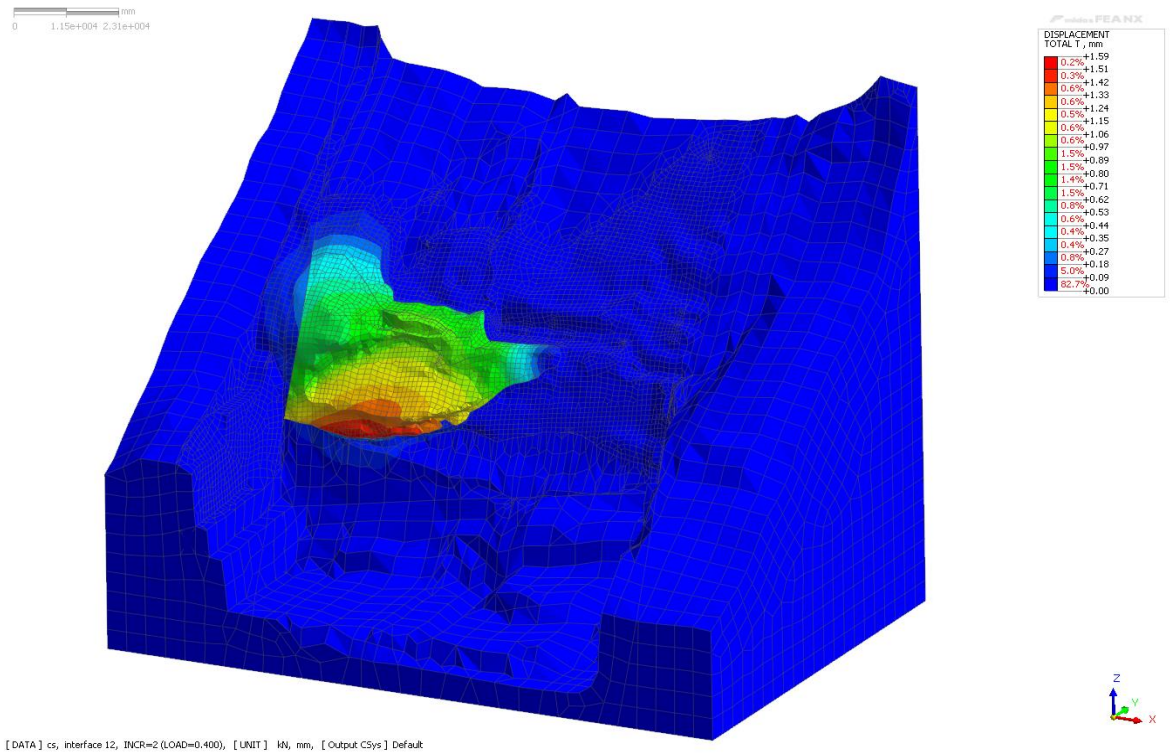


Figura 15: configurazione post-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso Blocco 2 (visuale indeformata)

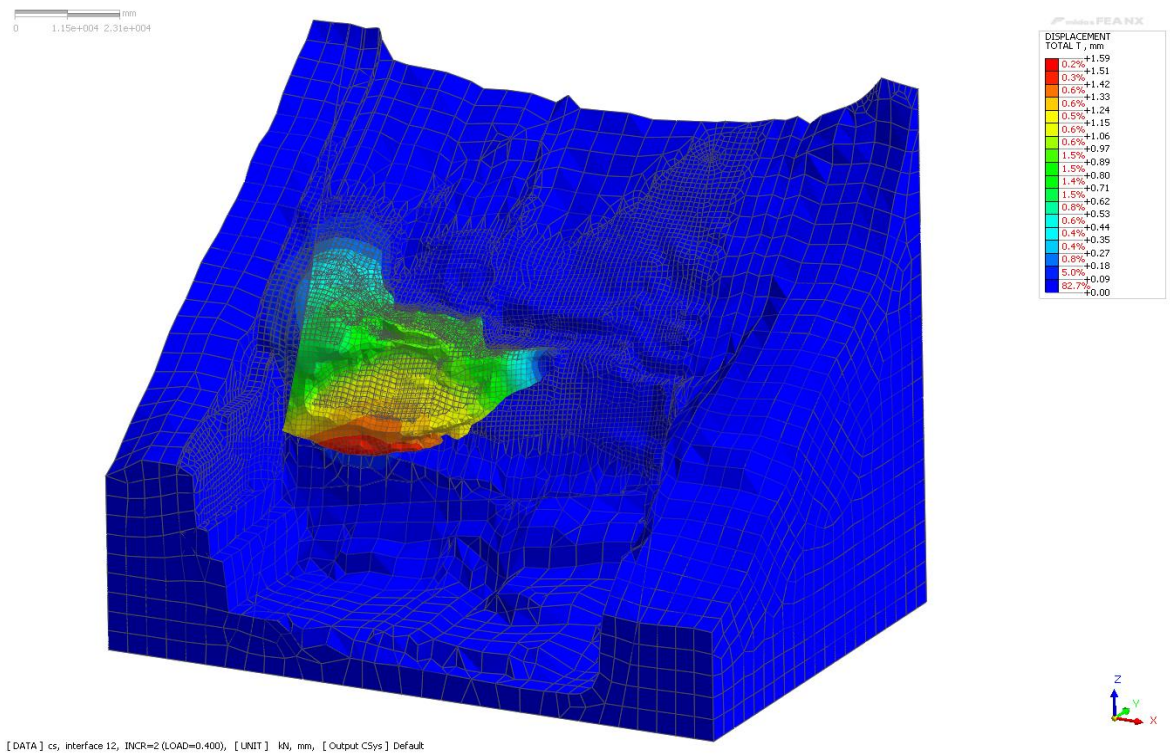


Figura 16: configurazione post-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso Blocco 2 (visuale deformata)

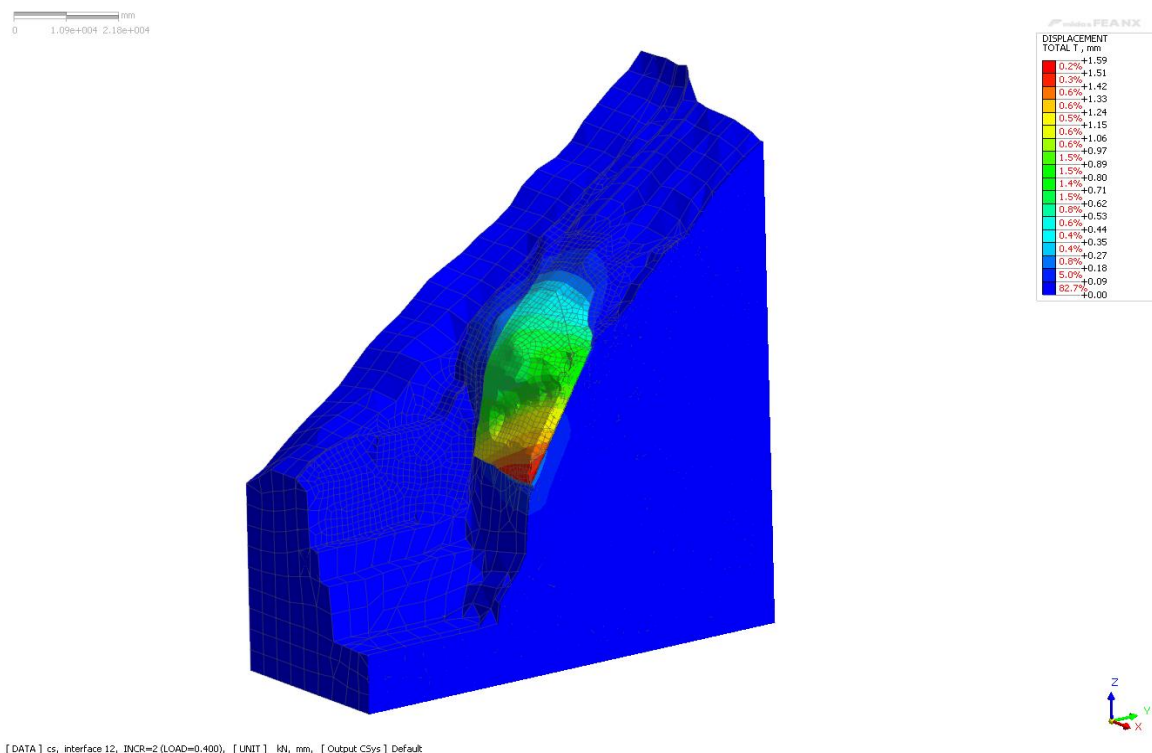


Figura 17: configurazione post-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso Blocco 2 (visuale in sezione)

I parametri meccanici a rottura della superficie di scivolamento che determinano il collasso e i relativi fattori di sicurezza sono riportati in Tabella 1, mentre in Figura 18 sono riportate le curve di spostamento di un nodo di controllo posto sul versante, in cui sono evidenziati (con cerchio rosso) i valori definiti come angoli di attrito ultimi a rottura.

configurazione	Coesione a rottura [kPA]	FS
PRE CROLLO	55	
POST CROLLO – BLOCCO 2	32.5	1.69
POST CROLLO – BLOCCO 1	25	2.20

Tabella 1: parametri a rottura della superficie di scivolamento (modellazione mediante interfacce)

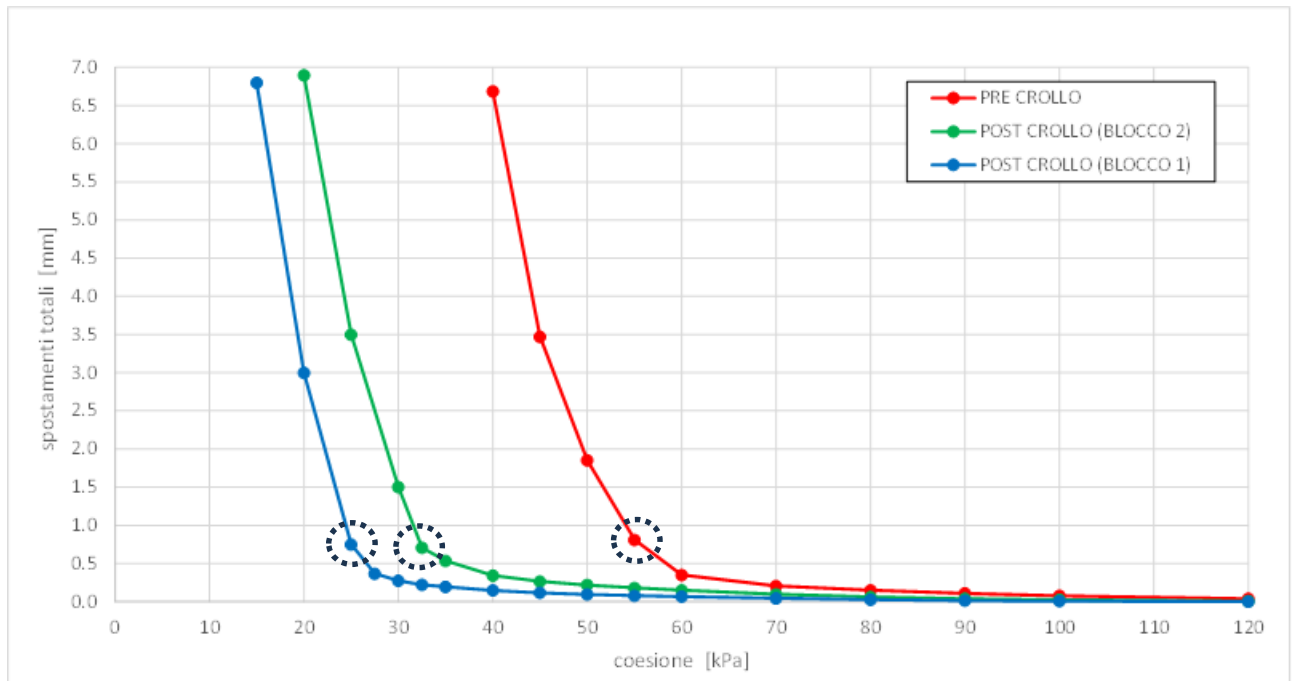


Figura 18: spostamento di un nodo di controllo posto sul blocco di roccia in funzione della riduzione della coesione

Si mette in evidenza il fatto che tutti i nodi di controllo indagati posti sul versante di interesse sono caratterizzati dalla medesima curva di spostamento.

6.2 Valutazione del fattore di sicurezza mediante modellazione del vincolo laterale dell'ammasso roccioso

Analogamente a quanto riportato per il caso precedente, in Figura 19, Figura 20 e Figura 21 è possibile osservare il meccanismo di rottura relativo alla configurazione pre-evento di crollo, mentre in Figura 22, Figura 23 e Figura 24 il meccanismo di rottura relativo alla configurazione post-evento di crollo.

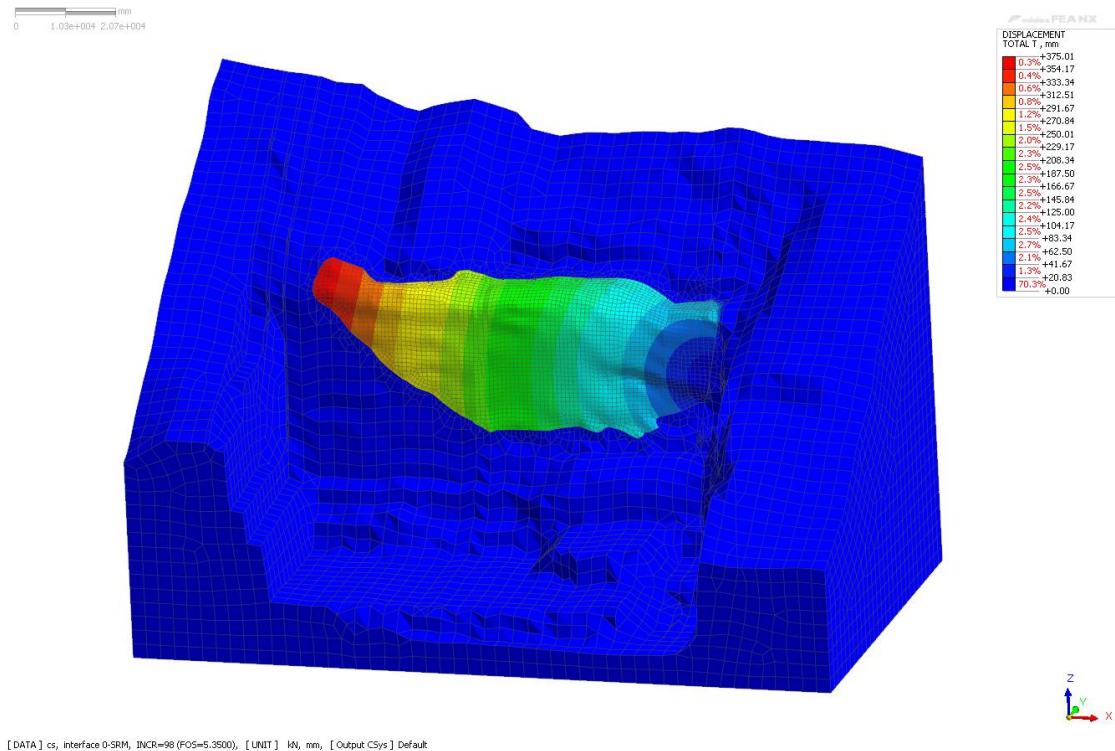


Figura 19: configurazione pre-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso (visuale indeformata)

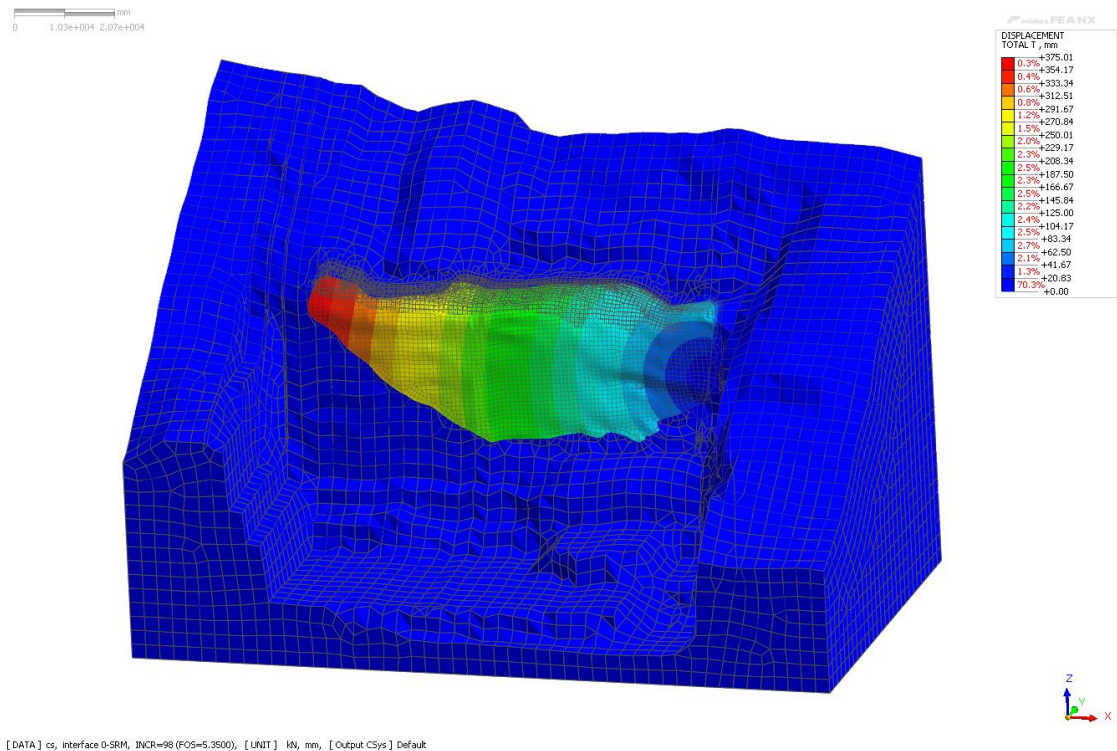


Figura 20: configurazione pre-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso (visuale deformata)

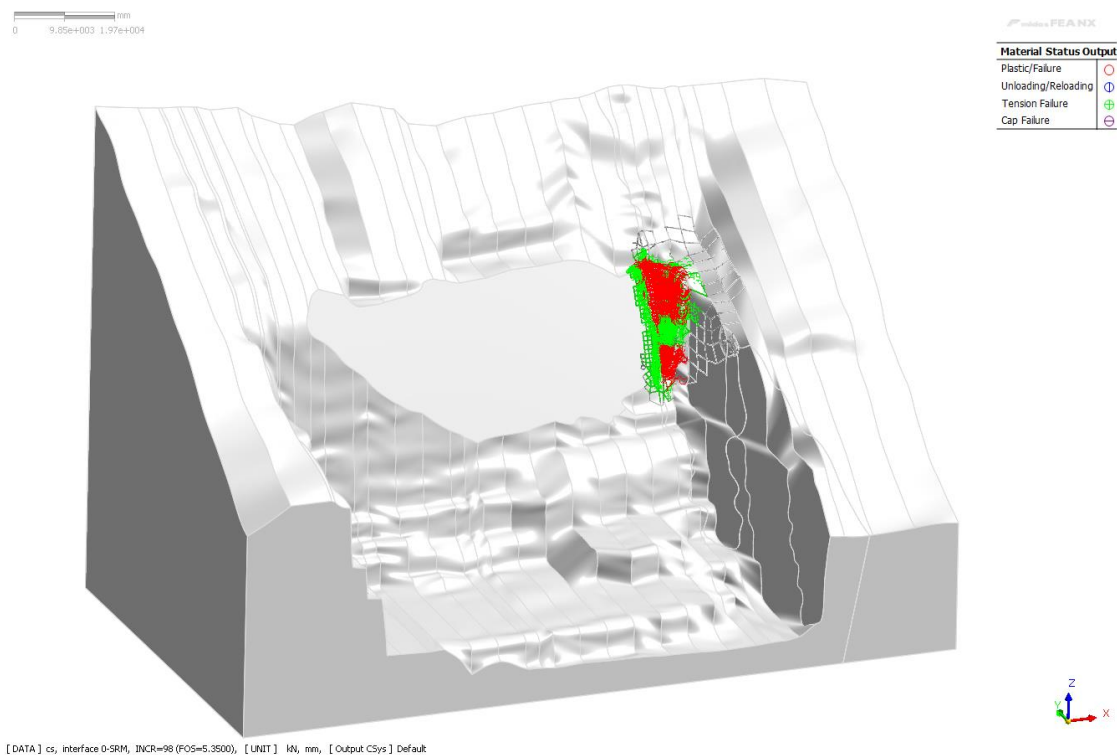


Figura 21: configurazione pre-evento di crollo: punti plastici

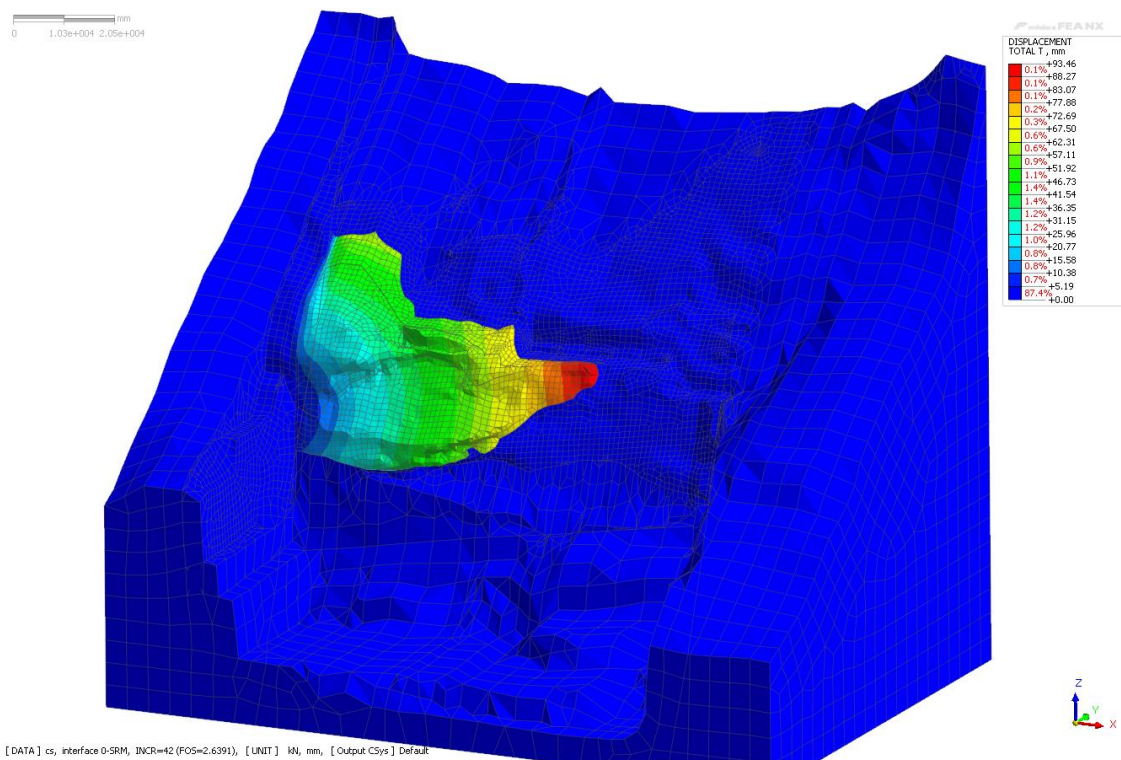


Figura 22: configurazione post-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso Blocco 2 (visuale indeformata)

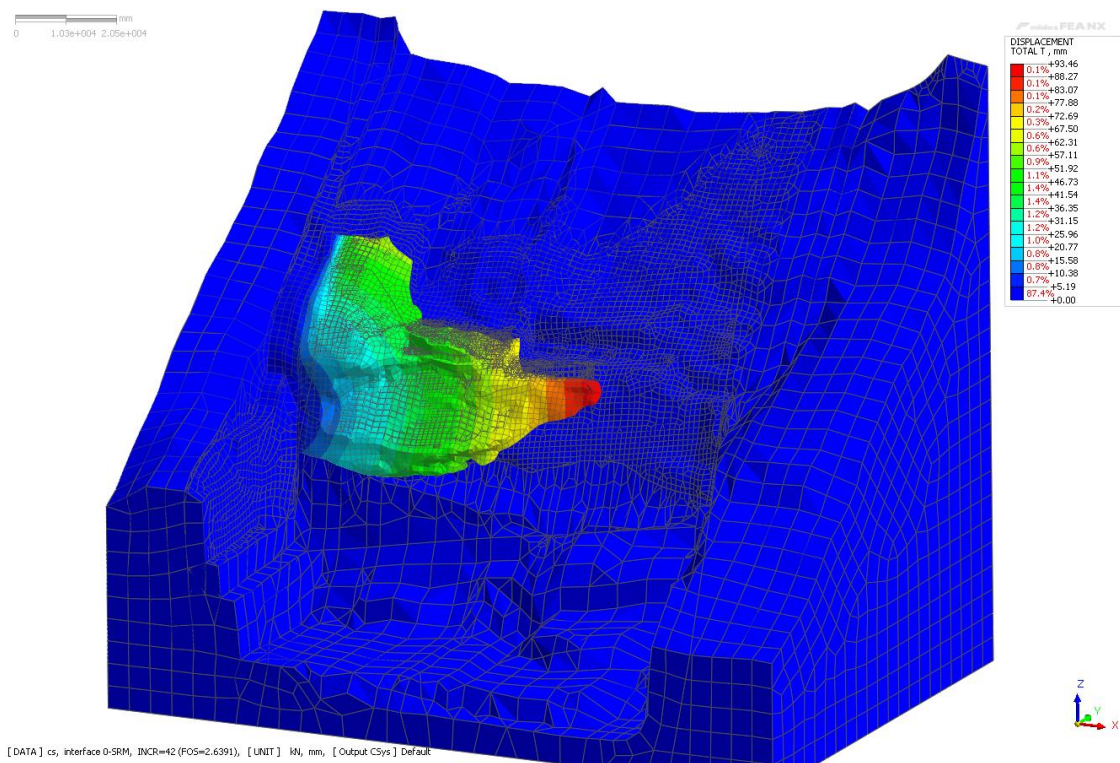


Figura 23: configurazione post-evento di crollo: spostamenti del volume roccioso Blocco 2 (visuale deformata)

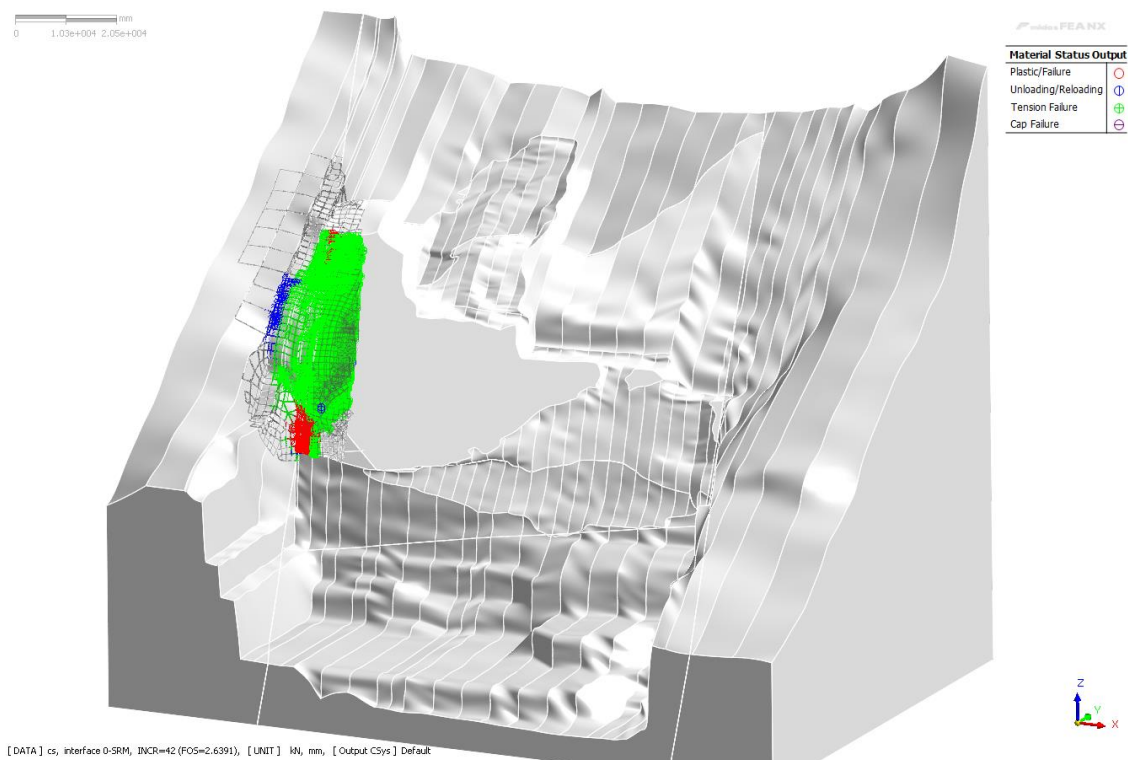


Figura 24: configurazione post-evento di crollo: punti plastici

I parametri meccanici a rottura della superficie di scivolamento che determinano il collasso e i relativi fattori di sicurezza sono riportati in Tabella 2, mentre in Figura 25 sono riportate le curve di spostamento di un nodo di controllo posto sul versante, in cui sono riportati i tratti tangenti la parte finale delle curve che, intersecando l'asse delle ascisse, determina i parametri a rottura.

configurazione	Coesione a rottura [kPa]	FS
PRE CROLLO	7500	
POST CROLLO – BLOCCO 2	3000	2.50
POST CROLLO – BLOCCO 1	1200	6.25

Tabella 2: parametri a rottura della superficie di scivolamento (modellazione mediante vincolo laterale)

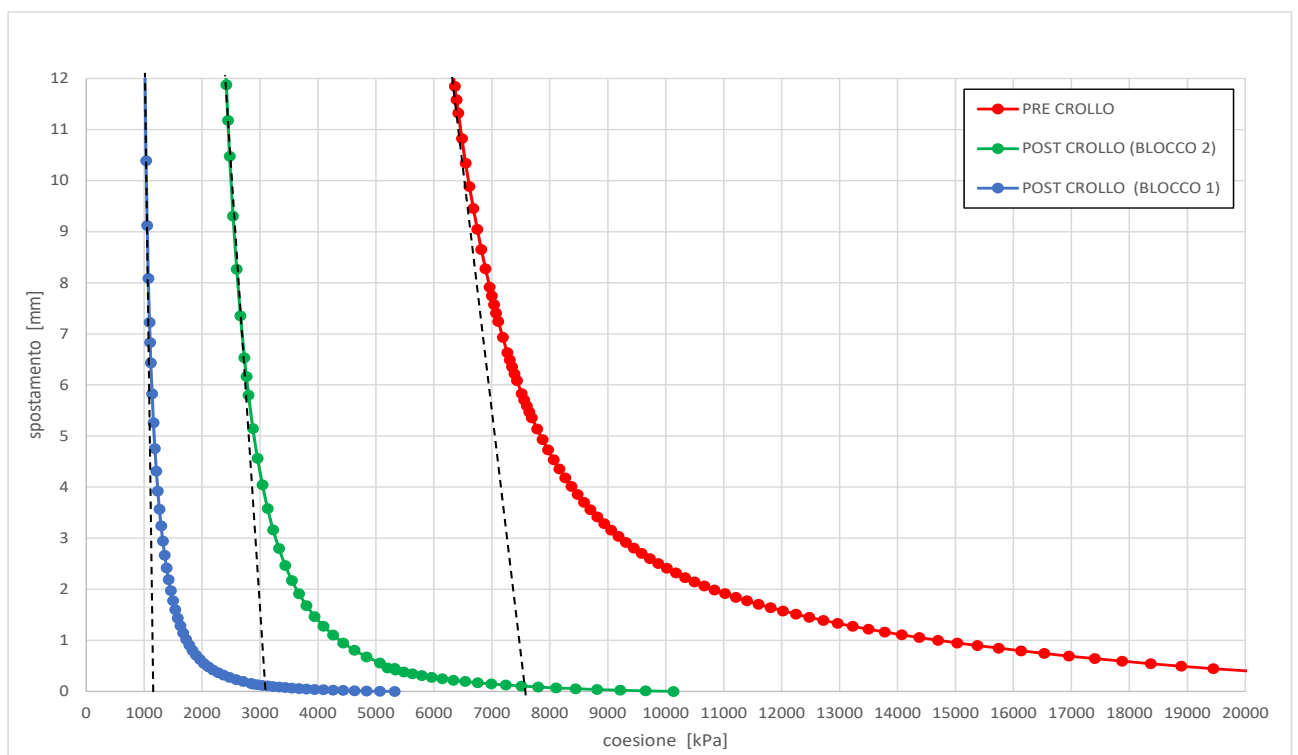


Figura 25: spostamento di un nodo di controllo posto sul blocco di roccia in funzione della riduzione della coesione

Considerando che la tipologia di meccanismo che viene a instaurarsi è di tipo rotazionale, proprio per il fatto che il vincolo laterale determina una tipologia di struttura a mensola, gli spostamenti dei nodi di controllo riportati in Figura 25 sono stati estratti a circa 3 metri dal vincolo laterale dell'ammasso roccioso.

I parametri meccanici iniziali dell'ammasso roccioso sono stati valutati mediante l'approccio alla Hoek-Brown, considerando la tipologia di roccia presente in cava e la sua resistenza a compressione monoassiale (Figura 26).

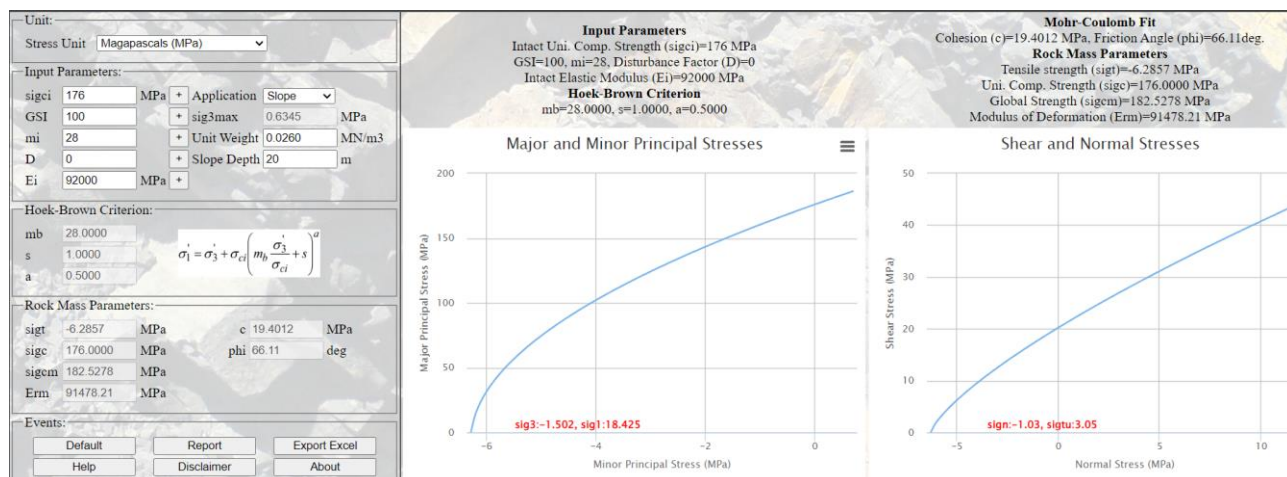


Figura 26: parametri meccanici iniziali dell'ammasso roccioso

7 Considerazioni finali

Dai risultati dello studio numerico 3D FEM illustrati nel presente documento si evince che:

1. mediante due approcci differenti, è stato possibile back-analizzare i parametri a rottura che hanno determinato l'evento di crollo dell'anno **2022**;
2. per quanto concerne la stabilità dei volumi rocciosi potenzialmente instabili, ben chiara anche dall'analisi visiva in sito, non si rilevano situazioni di criticità estrema. Il Blocco 2, ovvero quello caratterizzato dalla maggiore potenzialità di distacco, è associato a dei valori di sicurezza compresi, in funzione dell'approccio utilizzato, tra 1.7 e 2.5.

I risultati della modellazione dello stato attuale sono corroborati dalle evidenze del monitoraggio GB-SAR. Il report di Lisalab sulla campagna di monitoraggio di maggio 2023 sostiene infatti che:

- *L'analisi degli spostamenti nell'arco della campagna di misura attuale (dal 3 Maggio al 12 Maggio 2023) non ha evidenziato aree del versante osservate dal sistema radar interessate da spostamenti e/o riconducibili a spostamenti generalizzati; il valore medio dello spostamento di tutti i pixel delle mappe di spostamento ottenute è prossimo a 0.0 mm con deviazione standard pari a circa 0.5 mm.*
- *La presenza invece di piccole aree caratterizzate da spostamenti di pochi pixel non desta alcuna preoccupazione in quanto queste aree sono particolarmente localizzate e poste in prossimità della gru che è affetta da movimenti termici o in altre aree, vicine alla vegetazione o nel detrito.*
- *L'analisi quantitativa del POI è stata eseguita utilizzando le immagini mediate a 2 ore, producendo 7 sezioni che tagliano verticalmente i gradoni della parete della cava, e posizionando due ulteriori punti (1 e 23) posti sulla struttura metallica della gru. L'analisi quantitativa dei POI ha confermato l'assenza di spostamenti nell'intervallo di tempo coperto da questo report*

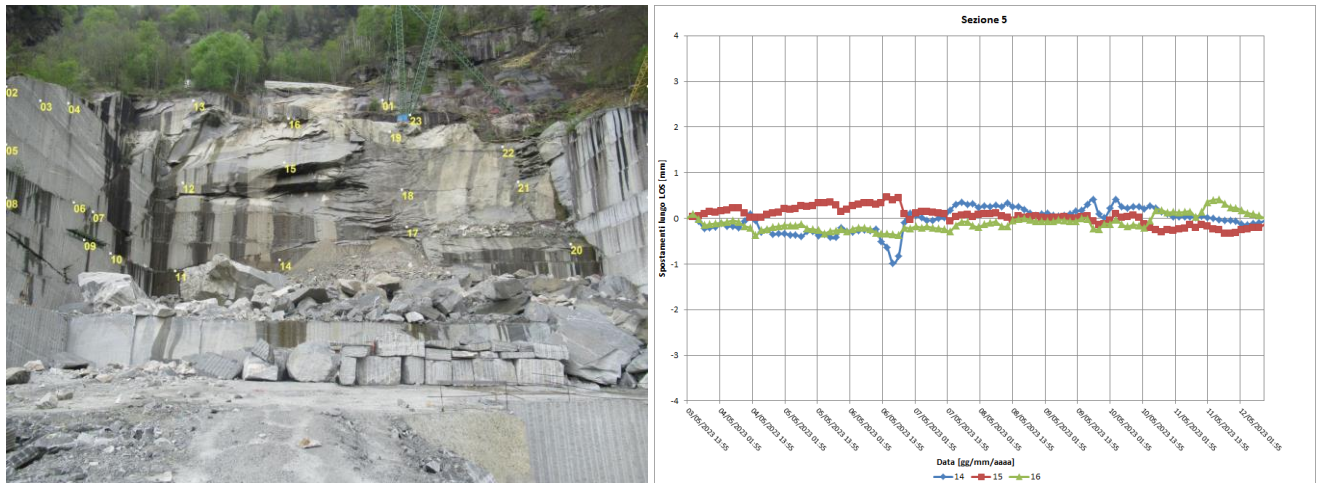


Figura 27 – Punti di interesse sulla parete per l'analisi dello spostamenti. Tutti i punti risultano stabili. A titolo di esempio di riporta la sezione 5 che include i punti 14, 15 e 16 (estratto dalla relazione di Lisalab).

Considerando che gli studi effettuati possiedono una validità nell'ambito delle ipotesi effettuate, delle imprescindibili semplificazioni che le simulazioni impongono nonché delle caratteristiche delle modellazioni proposte, si suggerisce di mantenere costantemente attivo il monitoraggio delle pareti della cava.