

ANALISI NUMERICA AL DISCONTINUO PER LO STUDIO TENSO-DEFORMATIVO DI UNA CAVA DI MARMO SOTTERRANEA DELLE ALPI APUANE

Marco Berlinghieri (marco@studiopandolfi.it)
Studio di Ingegneria Pandolfi, Carrara, Italia

Giorgia Parmeggiani (giorgia@studiopandolfi.it)
Studio di Ingegneria Pandolfi, Carrara, Italia

ABSTRACT. Il presente studio propone un approccio metodologico, supportato da strumenti informatici e misurazioni in sito, per lo studio dello stato tenso-deformativo di alcune cave di marmo in sotterraneo delle Alpi Apuane.

Il lavoro è stato condotto presso la ‘Cava Sottovettolina’, una cava di marmo in sotterraneo situata nelle Alpi Apuane. L’intera area in coltivazione è stata caratterizzata da rilievi topografici con laser scanner e drone, rilievi geotecnici, prove di laboratorio sui materiali per la loro caratterizzazione fisica e meccanica, campagne di misurazioni dello stato di sforzo mediante cella CSIRO e prove Doorstopper. Sono stati quindi realizzati modelli numerici della galleria 2D e 3D, opportunamente tarati sulla base delle misurazioni in sito mediante una valutazione a ritroso, e utilizzati per la simulazione delle future fasi di scavo.

Questo approccio progettuale permette di effettuare una previsione della risposta tensionale e deformativa al contorno di future cavità sotterranee, simulando differenti geometrie di coltivazione in modo da ottimizzare il recupero di materiale in condizione di sicurezza.

1. INTRODUZIONE

Nell’ambito della progettazione delle coltivazioni sotterranee di materiale lapideo, è necessario disporre di strumenti che permettano una previsione della risposta tensionale e deformativa dell’ammasso roccioso.

A tal fine, il complesso roccioso può essere rappresentato da diversi modelli matematici preposti a schematizzare il suo comportamento. L’affidabilità di una simulazione del comportamento meccanico del mezzo fratturato dipende dalla precisione con cui viene definito l’ammasso roccioso, quindi riveste molta importanza la parte di caratterizzazione geologica e geomeccanica del sito e la fase di modellazione geometrica.

Per la modellazione del comportamento meccanico dell’ammasso roccioso in esame viene utilizzato il metodo degli elementi distinti che ne considera la sua natura discontinua. Considerata la particolarità strutturale e la conformazione del sito, si è optato per una trattazione “deterministica” così da simulare fedelmente le differenti litologie e la posizione delle principali discontinuità rilevate in sito.

2. CONTESTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

Le Alpi Apuane rappresentano una finestra tettonica in Appennino settentrionale in cui affiorano due unità metamorfiche (Unità Autoctono Auct. e la sovrastante Unità di Massa) di basso grado metamorfico al di sotto di una pila di falde che dal basso sono: Falda Toscana, Unità di Canetolo (Unità sub-ligure) e Unità Liguri s.l. L’Unità Autoctono è costituita da un basamento pre-alpino (Cambriano sup. – Devoniano?) deformato e metamorfosato durante l’orogenesi Varisica e coperto in discordanza da una successione del ciclo sedimentario alpino (Triassico – Oligocene). L’Unità di Massa è costituita da un basamento pre-alpino rappresentato solo dalla successione del Cambriano sup. – Ordoviciano inf. coperto in discordanza da una successione del ciclo sedimentario alpino di cui è rimasto preservato solo l’intervallo Triassico (Anisico – Lanidico). Nelle unità metamorfiche sono presenti due fasi di deformazione (Carmignani et al., 1990) che sviluppano rispettivamente pieghe anticlinali e sinclinali isoclinali a scala pluri-chilometrica e con assi a direzione appenninica NW-SE (fase 1) e pieghe rovesciate di secondo ordine, localmente di dimensioni chilometriche (fase 2). La seconda fase è connessa all’upflit del massiccio roccioso in condizioni ancora duttili. Con il proseguimento del sollevamento e la transizione da regimi duttili a fragili, si sviluppano piani estensionali a basso angolo che tagliano le strutture

precedenti. La tettonica estensionale prosegue con lo sviluppo di faglie dirette ad alto angolo che ritagliano i precedenti piani a basso angolo.

La zona in esame si trova sul fianco occidentale di una struttura di prima fase: la sinclinale Orto di Donna – M. Altissimo. Come visibile in Figura 1.a in questo punto al nucleo della sinclinale si trovano i diaspri (d) circondati da calcari selciferi (cs), marmi (m) e marmi a Megalodonti (md). Il sito estrattivo si sviluppa a ridosso dell'asse di tale struttura determinando in conseguenza un'inclinazione elevata dei diversi litotipi presenti (anche fino a 60°).

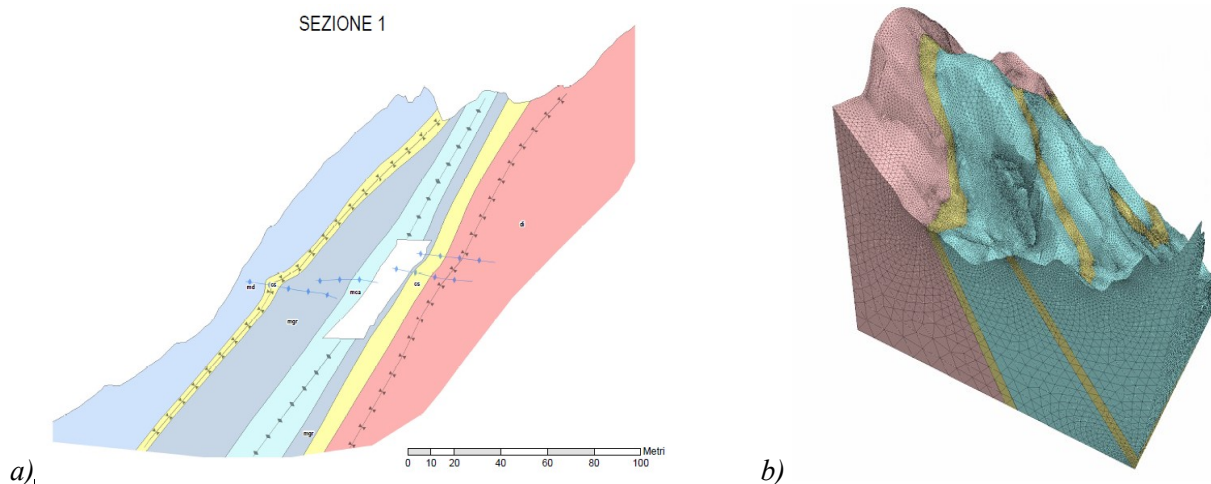


Figura 1. a) Sezione geologica strutturale di dettaglio - Rosso: Diaspri [di], Giallo: Calcari selciferi [cs], Blu: marmi [m];
b) Modello geotecnico 3D della cava.

3. CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

Il sito è stato oggetto di un'accurata campagna di indagini, che hanno compreso rilievi topografici della cava mediante fotogrammetria da drone e laser scanner terrestre, rilievi geotecnici tradizionali, rilievi delle fratture in alcuni fori di sondaggio mediante sonda ottica OPTV, campagne di misurazioni dello stato di sforzo mediante cella CSIRO e Doorstopper.

A partire dai modelli 3D ottenuti dai rilievi topografici, dai dati ottenuti dai sondaggi e dai rilievi strutturali condotti nel sito, si è ricostruito, come visibile in Figura 1.b un modello geologico tridimensionale molto preciso.

Lo stato di sforzo che agisce in questo sito è stato valutato, nell'ambito di un progetto di ricerca dell'Azienda USL Toscana Nord Ovest - U.O.C. Ingegneria Mineraria e l'Università degli Studi di Siena, utilizzando la metodologia di prova CSIRO Triaxial HI-CELL e Doorstopper. Per la prima si sono realizzate due stazioni di misura per un totale di quattro test, mentre per la seconda tipologia di prova sono stati condotti sei test.

Queste prove consistono nel misurare il rilascio tensionale che avviene effettuando il sovracarotaggio della porzione di foro all'interno del quale è alloggiata la cella deformometrica, attrezzate con strain-gauges (12 per CSIRO Triaxial HI-CELL e 4 per Doorstopper).

Le misure sono state eseguite orizzontalmente lungo le direzioni NE-SO, che rappresentano la direzione ortogonale all'avanzamento del sotterraneo.

4. MODELLAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO E ANALISI DEM 3D

La geometria della coltivazione sotterranea è molto particolare, ha sezione a forma di parallelogramma inclinato di $\approx 60^\circ$ e altezza che arriva a 70 m nella zona del portale, come visibile in Figura 2.a. La realizzazione del modello geometrico è stata svolta mediante l'ausilio di un codice di calcolo appositamente messo a punto da Itasca, Griddle. Esso è un'estensione al software di modellazione geometrica Rhinoceros, che permette di riprodurre con gran fedeltà la geometria dello scavo e le fratture rilevate nelle fasi di caratterizzazione del sito (Figura 2.b).

E' stata effettuata la discretizzazione del problema, definendo il reticolo di nodi ed elementi (mesh), e nelle aree dove ci si aspettava forti gradienti tensionali si è utilizzata una maglia più fitta, ottenendo così un modello discreto caratterizzato da un numero finito di gradi di libertà.

Il modello matematico tridimensionale del problema in esame è stato risolto mediante il codice di calcolo agli elementi distinti 3DEC di Itasca. I metodi agli elementi discreti, o metodi discontinui, rappresentano il sistema come un insieme di corpi distinti, o particelle, che hanno la possibilità di interagire tra loro nel caso di contatto.

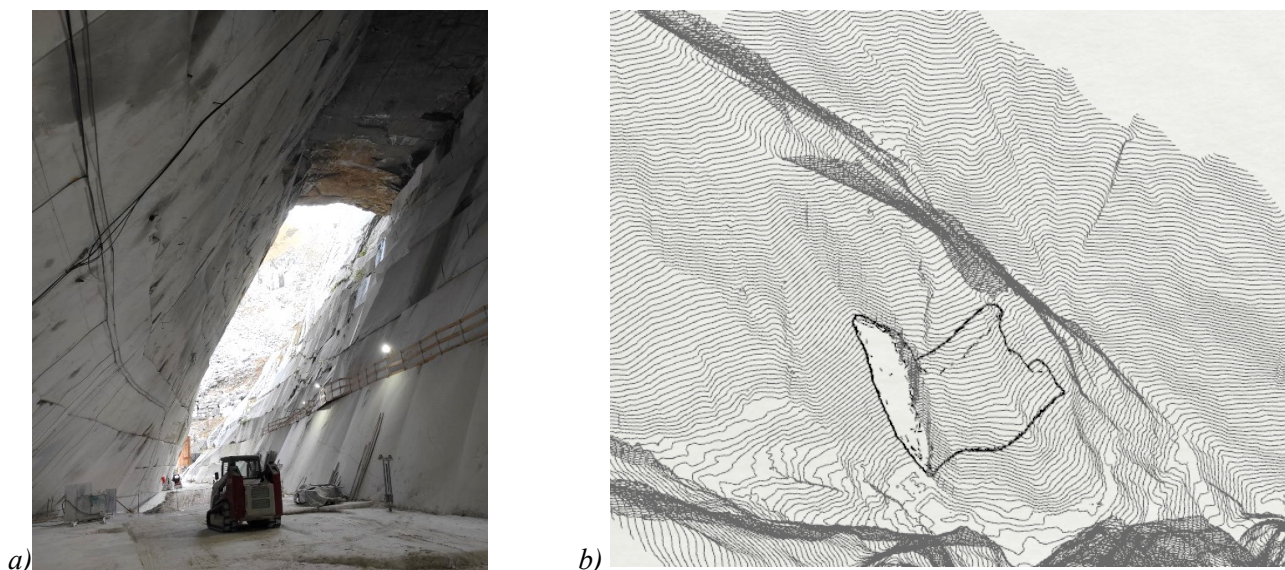


Figura 2. a) Foto dell'interno della cava; b) Modello topografico tridimensionale con la traccia del cantiere sotterraneo.

Attraverso test in sito e prove di laboratorio si sono caratterizzate le diverse litologie con i parametri riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Parametri di deformabilità e resistenza della matrice rocciosa.

	Modulo di Young E (GPa)	Densità γ (kN/m³)	Coefficiente di Poisson ν (-)	Angolo di attrito interno ϕ (°)	Coesione c (MPa)
Diaspri	15.8	25.0	0.25	57.17	1.745
Calcari selciferi	18.4	25.0	0.25	53.81	1.626
Marmi	63.1	27.0	0.33	54.62	7.015

L'interazione fra i due lembi di una discontinuità a contatto fra loro è caratterizzata da una rigidità nella direzione normale (K_n) e una rigidità nella direzione tangenziale (K_s) rispetto alla direzione di frattura. Le strutture principali sono state caratterizzate attraverso i parametri riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Parametri di deformabilità e resistenza delle superfici di discontinuità.

Rigidità normale della discontinuità K_n (GPa/m)	Rigidità di taglio della discontinuità K_s (GPa/m)	Angolo di attrito interno residuo ϕ_r (°)
40	2	25

Sono state quindi definite le condizioni di bordo, inducendo dei vincoli agli spostamenti sui contorni del modello e imponendo uno stato tensionale al contorno. Le misure di stress condotte hanno permesso di definire lo stato tensionale di progetto e il campo di tensioni laterali K_0 , così da tarare il modello e validarlo grazie a una rigorosa procedura di back analysis effettuata grazie alla tecnica dei minimi quadrati.

I risultati hanno mostrato, come da previsioni, che il vuoto sotterraneo presenta le maggiori criticità, in corrispondenza dei due spigoli acuti, opposti fra loro a tetto e al piede della galleria inclinata. Il campo di sforzo,

analizzato lungo diverse sezioni del modello, è stato valutato in termini di sollecitazione principale massima, minima e sforzo deviatorico (Figura 3), fornendo valori di picco al di sotto della resistenza del materiale. Infine si è sviluppata una funzione *Fish* per la valutazione del fattore di sicurezza locale, prendendo in considerazione criteri di rottura empirici sviluppati per i materiali lapidei, che considerano la matrice discontinua dell'ammasso roccioso, le condizioni di basso confinamento e le geometrie irregolari dei sotterranei.

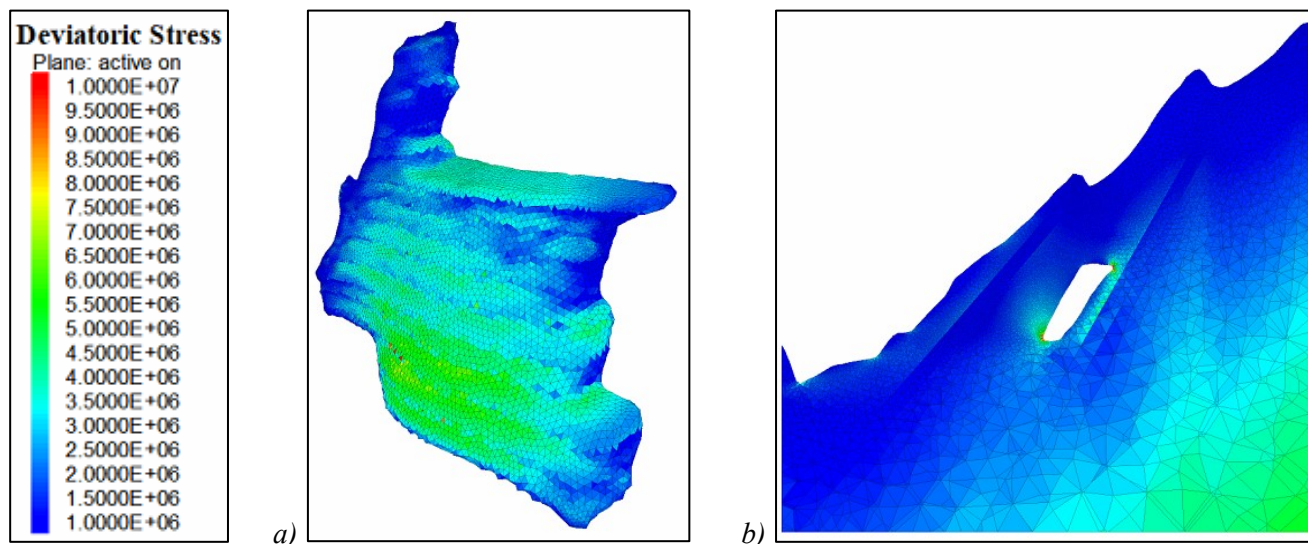


Figura 3. a) Vista assometrica della distribuzione dello stato di sforzo deviatorico σ_D al contorno della galleria; b) Vista in sezione della distribuzione dello stato di sforzo deviatorico σ_D al contorno della galleria.

5. MONITORAGGIO GEOTECNICO

L'attività di monitoraggio geotecnico condotta presso la cava è stata progettata per controllare l'evoluzione degli stati tensionali e deformativi al contorno dello scavo, in particolare si è scelto di valutare i fenomeni di convergenza della galleria (con l'utilizzo di elettrolivelle tipo *MEMS* biassiale installate in serie), gli spostamenti dell'ammasso roccioso in profondità (con l'utilizzo di estensimetri multibase in foro) e le variazioni di stato tensionale (con l'utilizzo di misuratori di stress da foro e di una cella triassiale *CSIRO*).

6. CONCLUSIONI

Questo articolo presenta un approccio di lavoro, che fa utilizzo delle più moderne tecnologie di rilievo come il laser scanner terrestre, che permette di ricostruire un modello geotecnico tridimensionale con elevata accuratezza e definizione da utilizzare con sofisticati modelli numerici tridimensionali. La metodologia di lavoro presentata nell'articolo è applicata con successo, dallo staff dello Studio di Ingegneria Pandolfi di Carrara, in cave di materiale lapideo italiane, greche e portoghesi; tale approccio ha permesso di studiare il comportamento del mezzo geotecnico nel dettaglio, migliorando l'accuratezza dei risultati. Si tratta quindi di uno strumento progettuale che permette di effettuare una previsione della risposta tensionale e deformativa al contorno di future cavità sotterranee, simulando differenti geometrie di coltivazione in modo da ottimizzare il recupero di materiale in condizione di sicurezza.

8. BIBLIOGRAFIA

Carmignani L., Kligfield R. (1990). *Crustal extension in the northern Apennines: The transition from compression to extension in the Alpi Apuane Core Complex*. Tectonics, Volume 9, Issue 6, p. 1275-1303.