

Analisi geomeccaniche per la stabilità degli scavi in sotterraneo della Pietra del Cardoso

C. Oggeri, R. Vinai

Politecnico di Torino - Dipartimento di Georisorse e Territorio,
TUSC - Tunnelling and Underground space Center

La coltivazione in sotterraneo di pietre ornamentali, pratica antica, ha visto negli ultimi anni un significativo sviluppo, particolarmente per ragioni tecniche e ambientali. Oltre alle opportunità si presentano però numerosi problemi, in particolare di natura geomeccanica, a seguito delle grandi dimensioni che la meccanizzazione e la produzione impongono agli scavi. Il caso della Pietra del Cardoso è fra i più recenti ed offre interessanti spunti per impostare sin dall'esordio uno studio integrato per la gestione in sicurezza della risorsa lapidea. La nota presenta i primi dati relativi ad una cava del bacino della Pietra del Cardoso.

Geomechanical analysis for underground excavations stability on Cardoso Stone

Underground exploitation of ornamental stones, already applied in ancient times, has undergone a remarkable development, mainly due to technical and environmental reasons. A part from the opportunities, there are also many problems, in particular from the geomechanical point of view, because the use of mechanical equipment and the tremendous demand for materials has determined an increase in the size of the voids. The case of Cardoso Stone is among the most recent and it has proved to be an opportunity to study the correct exploitation of the natural resource from the beginning. The paper presents the first results of a study that was focused on an underground quarry of the Cardoso Stone basin.

Analyses geomechaniques pour la stabilité des creusements en souterrain de la Pierre de Cardoso

L'exploitation en souterrain des pierres ornamentales, technique ancienne, a été développé récemment en manière très important, particulièrement a cause des motifs techniques et environnementaux. Au delà des opportunités il y a aussi des problèmes, en particulier geomechaniques, du à les dimensions des vides que la mécanisation des carrières et les exigences de production ont déterminé. Le cas de la Pierre de Cardoso est dans le plus nouveaux et il présente une occasion d'étude complémentaire par le gestion en sécurité de la ressource naturelle. La note présente le premier résultats par un carrière du bassin de la Pierre de Cardoso.

INTRODUZIONE

Lo sfruttamento in sotterraneo di pietre ornamentali, pratica conosciuta sin dall'antichità, ha visto crescere intorno a sé un rinnovato interesse negli ultimi anni, grazie agli sviluppi di nuove tecnologie di scavo e di controllo della statica dei

vuoti sotterranei.

La coltivazione in sotterraneo nella situazione italiana riguarda svariati litotipi, localizzati in buona parte nel Nord Italia, fatta eccezione per i "tufi" leccesi. I marmi Apuani, l'arenaria del Cardoso, le ardesie liguri, la calcarenite di Vicenza, il calcare di Finale Ligure, i marmi di Lasa

e Candoglia, l'oficalcite della Valle d'Aosta, la breccia arabescata Orobica, il calcare ligure di Portoro, il conglomerato d'Iseo, il citato calcare tufaceo del leccese, sono i litotipi più importanti (Fig. 1). All'estero l'opzione in sotterraneo per materiali di cava interessa soprattutto calcari e marmi: tra gli altri si ricorda il marmo rosa dell'Alentejo, in Portogallo, il bianco dell'Attica, in Grecia, e il calcare compatto dell'Istria.

Nella presente nota sono riportati i caratteri salienti dello studio geomeccanico svolto per analizzare il trasferimento in sotterraneo di una cava di arenaria del Cardoso ubicata nel comune di Stazzema. Tale nota segue, in un percorso logico di inquadramento generale, quella pubblicata da M. COLI ed E. LIVI, avente per titolo "Caratterizzazione geologica e geomineraria della Pietra del Cardoso", (GEAM, n°108, 2003).

LE COLTIVAZIONI IN SOTTERRANEO: CONSIDERAZIONI GENERALI

La possibilità di sviluppare (o iniziare) i lavori in ambito sotterraneo dipende da molteplici fattori, sia tecnici che economici: tra questi ricordiamo le limitazioni fisiche imposte agli arretramenti dei fronti dalla presenza di alti cigli, le eccessive coperture detritiche, la necessità di operare coltivazioni selettive, i vincoli geometrici e ambientali, la disponibilità di spazi. Dal punto di vista geomeccanico la roccia deve presentare buone proprietà di resistenza e di ridotta deformabilità, sia a livello di roccia intatta, sia a livello di ammasso roccioso. Tale aspetto è dunque imprescindibilmente legato alla presenza di discontinuità, di contatti geologici, di carsismi e di altre strutture geologiche che possono generare instabilità di carattere locale o globale.

Talune coltivazioni in sotterraneo – nei marmi ad esempio – sono spesso caratterizzate dalla mancanza di sistemi di discontinuità evidenti e regolari, spesso a causa dello stato di fatturazione dovuto alla complessa storia tensionale e geologica. Ciò determina la presenza di elementi rocciosi di forma e dimensione molto varia: la tecnica di coltivazione e lo sviluppo degli scavi devono ovviamente tenerne conto, per ottenere i migliori risultati in termini di rendimento, resa e recupero, sia per permettere sufficienti condizioni di stabilità. Alle caratteristiche intrinseche della qualità della roccia –

utile o incassante – vanno aggiunte quelle dovute alla tipologia di scavo, che può disturbare in misura variabile la roccia circostante. È comunque un fatto ormai conclamato il ricorso a geometrie dei vuoti sempre più ampie: queste ultime sono a loro volta condizionate da almeno due fattori, cioè dalla possibilità di recupero del materiale estratto e dall'utilizzo di mezzi meccanici in cantiere. Il primo aspetto riguarda il volume minimo di bancata da cavare: per un materiale teoricamente omogeneo e regolare dal punto di vista della fratturazione basterebbe il taglio ripetitivo di piccoli blocchi; conseguentemente si avrebbero volumi minori di estratto ad ogni taglio e bisogno di mezzi meno potenti per la gestione del cantiere; mentre con un materiale a basso recupero percentuale le bancate devono essere necessariamente più grandi, onde aumentare la probabilità di ottenere comunque dei blocchi utilizzabili. L'estesa meccanizzazione dei cantieri attuali di scavo, infine, comporta un inevitabile aumento delle dimensioni degli spazi in cui si deve operare.

L'analisi di stabilità dei vuoti sotterranei in coltivazioni di pietra ornamentale deve riguardare sia le condizioni del tetto, che possono essere talora critiche per il possibile contatto con la roccia incassante, sia la stabilità dei diaframmi, o pilastri, che sorreggono la cavità. Talvolta tali strutture si trovano ad operare con sovraccarichi che, nel caso di geologie particolari o di dimensioni ragguardevoli del vuoto, possono portare al collasso per superamento della resistenza del materiale, mentre più

in generale i problemi riguardano potenziali scivolamenti o cadute di blocchi generati dall'intersezione di discontinuità. Le analisi di stabilità si effettuano secondo tre diverse classi di metodi: i metodi empirici, i metodi analitico-grafici e i metodi numerici.

I primi si avvalgono di esperienze pregresse raccolte e ordinate in abachi, di formule empiriche basate sulle classificazioni tecniche degli ammassi e di raccomandazioni di carattere generale.

I metodi analitici e grafici studiano le condizioni di possibili scivolamenti a partire dalle giaciture delle discontinuità e dalla geometria del cavo, identificano direzioni e tipologie di scivolamento e volumi interessati per mezzo dei reticoli stereografici, infine definiscono gli interventi di sostegno attraverso formulazioni analitiche basate sul concetto di equilibrio limite di un corpo rigido. Un'ulteriore possibile applicazione è la determinazione analitica delle condizioni statiche per mezzo di formulazioni semplificate derivanti dalla meccanica del continuo.

I metodi numerici utilizzati per le simulazioni di stabilità si dividono in due categorie, quelli che sostituiscono il mezzo reale con un continuo equivalente a cui vengono assegnate le caratteristiche medie dell'ammasso roccioso (modelli detti agli elementi finiti FEM o alle differenze finite FDM, secondo l'algoritmo di risoluzione) e quelli che simulano l'interazione dei blocchi rigidi separati dalle discontinuità (metodi detti agli elementi distinti DEM) (Fig. 2). Entrambi i metodi

rappresentano un potente mezzo di indagine, ma devono permettere sempre una gestione ragionata dei dati, poiché la bontà dei risultati è legata alla accuratezza dei parametri di ingresso, sempre affetti da incertezze e naturale variabilità. Gli interventi di stabilizzazione applicabili in contesti tipo di cava in sotterraneo consistono in provvedimenti passivi (bulloni ad ancoraggio puntuale o ripartito, reti di contenimento) o attivi (tiranti). Ovviamente a differenza dei sostegni in galleria non si utilizzano, se non in casi molto particolari, armature metalliche quali centine. La scelta di un tipo di sostegno piuttosto di un altro dipende essenzialmente dall'effetto di stabilizzazione che si vuole fornire, generalmente correlato alle volumetrie in gioco: il sostegno è quindi ricavato nella stessa struttura rocciosa lasciata in posto.

MONITORAGGI DEL SOTTERRANEO: CRITERI E TECNICHE

Nell'ambito delle coltivazioni in sotterraneo il monitoraggio riveste tre importanti ruoli: a) fornisce i dati per la valutazione e la taratura dei parametri geomeccanici, sempre affetti da incertezze, nel processo di back-analysis; b) consente il controllo delle strutture, naturali e/o artificiali, in termini di evoluzione delle grandezze di interesse, essenzialmente tensioni e deformazioni; c) permette l'aggiornamento del modello concettuale dello scavo secondo il prosieguo dei lavori. Le misure geotecniche in sotterraneo sono generalmente più complesse da ese-

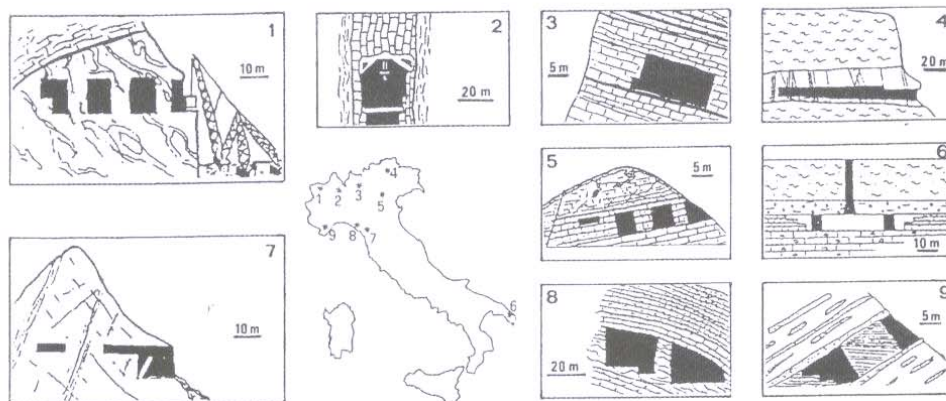


FIG. 1 - Ubicazione geografica delle principali coltivazioni di cava in sotterraneo in Italia: 1) l'oficalcite della Valle d'Aosta; 2) il marmo di Candoglia; 3) la breccia arabescata Orobica; 4) il marmo di Lasa; 5) la calcarenite di Vicenza (Berica); 6) il calcare tufaceo del leccese; 7) i marmi Apuani e il bacino della Pietra di Cardoso; 8) il calcare ligure di Portoro; 9) le ardesie liguri.
Geographic position of the major underground quarries in Italy: 1) Green opicalcite of Aosta Valley 2) Candoglia marble; 3) Breccia Orobica; 4) Lasa marble; 5) Arenaceous limestone Berica; 6) "Tuff" limestone of Curtofiano (Lecce); 7) Apuane marble and Cardoso Stone basin; 8) Portoro limestone; 9) Ligurian slate.

guire rispetto a quelle a giorno, tanto più in un contesto estrattivo, in quanto gli spazi sono ristretti e i controlli sono in genere eseguiti dovendo forzatamente interrompere la produzione; le condizioni sono spesso gravose, sia per l'effettuazione materiale delle letture, sia per gli effetti che l'ambiente sotterraneo esercita nei confronti degli strumenti lasciati in posto; il rischio di lesionare punti di controllo (pioli di riferimento, mire) a seguito di manovre con i grossi mezzi meccanici è purtroppo possibile, se non frequente. La perdita di letture di zero, se non immediatamente ripristinata, può impedire

l'osservazione dell'evoluzione delle grandezze di interesse primario.

Le misure di monitoraggio, nell'ottica della gestione della sicurezza, devono poter essere accompagnate a sistemi di controllo che definiscano un valore di attenzione, oltre il quale si prevede una variazione importante dell'evoluzione del fenomeno, e un valore critico di soglia che indica un pericolo più o meno imminente.

Nell'ambito di grandi vuoti in roccia possono essere annoverate misure di tipo diretto (per grandezze delle quali si vuole conoscere l'intensità), oppure di tipo

indiretto (quando attraverso la misura di determinate grandezze fisiche si hanno informazioni sul valore di altri parametri). Appartengono alla prima categoria le misure di convergenza, di tensione, di spostamento o di carico, mentre appartengono alla seconda tutte le indagini di tipo geofisico.

I trasduttori adatti all'applicazione in cava sono quelli solitamente impiegati nell'ingegneria civile e mineraria: trasduttori elettrici, a corda vibrante, LVDT, meccanici. I controlli di tipo ottico sono raramente impiegati, per i problemi descritti precedentemente relativi all'ambiente in sotterraneo e per la ridotta precisione ottenibile con mezzi ordinari, senza cioè considerare i dispositivi laser.

Occorre infine dedicare una particolare cautela alla scelta della metodologia e tecnica di misura da utilizzare: ogni coltivazione in sotterraneo presenta peculiarità tali da non permettere, se non in linea di massima, generalizzazioni; pertanto metodi risultati efficaci in un sito possono per esempio non essere utilizzabili in un altro, sebbene in presenza di analogie geometriche o litologiche.

IL CASO DELLA PIETRA DEL CARDOSO: METODOLOGIA DELLO STUDIO

L'estrazione della pietra arenaria del Cardoso costituisce un esempio che presenta molte delle problematiche richiamate precedentemente, prestandosi così ad una analisi ampia e dettagliata. Il bacino di estrazione della pietra di Cardoso raccoglie numerose cave, ormai giunte per ragioni topografiche a limiti di geometria difficilmente superabili: alti fronti, coltivazioni a pozzo; difficoltà di coltivazione selettiva hanno poi creato condizioni per ricercare uno sviluppo nel sotterraneo. Va comunque precisato in termini perentori che, nonostante il bacino sia geograficamente circoscritto, le condizioni geomeccaniche (resistenza) riscontrabili sono assai variabili, molto più di quelle geosturali (giaciture).

L'arenaria del Cardoso, pur essendo una roccia compatta, presenta sia alla scala del provino di laboratorio, così come alla scala delle coltivazioni, evidenti lineamenti geologico-strutturali e tessiturali tali da condizionarne le modalità di rottura della roccia stessa.

Cambi di colorazione, inclusioni, micro e macro pieghe, fogliettatura, ne caratterizzano l'aspetto. La rottura si manifesta

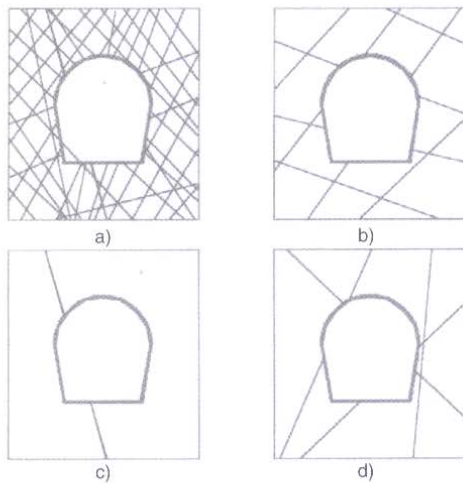


Fig. 2 - Gli schemi sopra riportati sono relativi alle situazioni tipo: a) ammasso pseudo continuo (approccio FEM, FDM); b) ammasso discontinuo (approccio DEM, wedge analysis); c) ammasso continuo (approccio FEM, BEM); d) situazione intermedia (approccio DEM, stereogrammi).

Sketch of typical rock structure situations: a) pseudo-continuum rock mass (FEM, FDM approaches); b) blocky rock mass (DEM approach, wedge analysis); c) continuum rock mass (FEM, FDM approaches); d) intermediate situation (DEM approach; stereographic analysis)

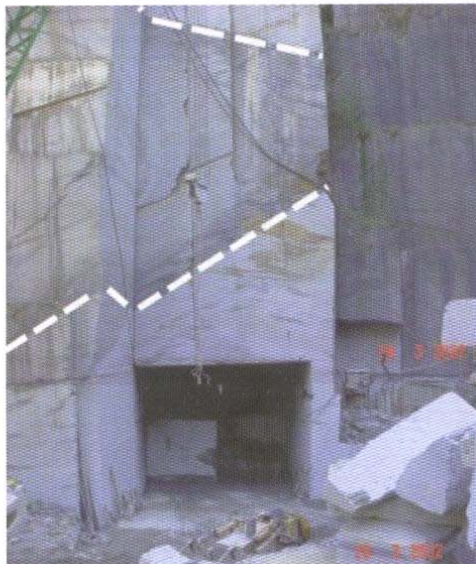


FIG. 3 - Vista di insieme dell'imbocco della camera di coltivazione e dell'assetto geosturali nella cava con fronte di attacco impostato al "secondo", al di sotto di una netta piega "ardesiaca" (linea tratteggiata).

Global view of the adit of the exploitation chamber and of the quarry structural order with the excavation face placed in the "secondo" direction, under a clear "ardesiaca" fold (dashed line)

quindi anche in funzione di tali singolarità, manifeste o latenti.

Si ha quindi in genere un comportamento piuttosto elastico-fragile e la formazione di scaglie e di placche prevale sulla formazione di elementi geometrici definiti e regolari.

La variabilità dei parametri di resistenza riscontrata è tale da far ritenere inevitabile il ricorso, per ciascun sito di cava, ad una caratterizzazione mirata: tale esigenza è ancor più acuita dal comportamento anisotropo del materiale, dovuto evidentemente al risultato delle azioni tettoniche legate alla formazione dell'ammasso roccioso.

La cava in esame si diparte da una ampia coltivazione a giorno, ed è caratterizzata dalla presenza di formazioni ripiegate di ardesie e di arenarie, la cui ubicazione è di primario interesse ai fini della sperimentazione in sotterraneo (Fig. 3).

Lo studio è stato articolato su due fasi generali: la caratterizzazione geomeccanica in laboratorio e la modellazione numerica alle differenze finite del sito.

La caratterizzazione geomeccanica ha previsto l'esecuzione di prove di laboratorio su campioni di roccia intatta, onde ricavare i parametri di resistenza meccanica e di elasticità. Le prove complessivamente eseguite sono state:

- n° 24 prove di compressione monoassiale, di cui 6 con provini estensimetri per la determinazione delle caratteristiche elastiche. Dimensioni caratteristiche dei provini: $\Phi=56 \text{ mm}$ con $H=150 \text{ mm}$; $\Phi=80 \text{ mm}$ con $H=190 \text{ mm}$;
- n° 18 prove di compressione triassiale in cella di Hoek, con dimensioni caratteristiche dei provini $\Phi=54 \text{ mm}$ con $H=112 \text{ mm}$; tensioni di confinamento da 3 a 12 MPa;
- n° 4 prove di trazione indiretta (flessione);
- n° 6 prove di trazione indiretta ("Brasiliana") con dimensioni caratteristiche dei provini $\Phi=56 \text{ mm}$ con $L=34 \text{ mm}$ circa;
- n° 6 prove di taglio diretto su matrice, su prismi di sezione $10 \cdot 10 \text{ cm}^2$;
- n° 24 prove per la determinazione della velocità delle onde sismiche nel provino.

Data la anisotropia della roccia si sono eseguite le prove applicando i carichi in tre direzioni diverse; in particolare si sono adottati i termini "verso" per indicare l'applicazione del carico in direzione perpendicolare ai piani di scistosità,

"secondo" e "contro" per le due direzioni planari con la scistosità (Fig. 4).

Per quanto riguarda le caratteristiche litologiche dei campioni ci si è riferiti alla roccia caratteristica della coltivazione con il termine "classico", mentre si sono analizzati altri litotipi, contenenti inclusioni di ardesie scure indicandoli con il termine "macchia", e campioni di roccia con maggiori affinità con l'ardesia vera e propria con il termine "scuro". La Tab. 1 fa riferimento alle succitate caratteristiche.

La modellazione numerica effettuata con il codice di calcolo alle differenze finite FLAC (Itasca) ha previsto la simulazione di diverse sezioni della coltivazione in sotterraneo, comunque parallele al "secondo". A titolo di esempio si riportano i risultati della sezione che interessa la camera all'interno del versante (sezione B). I parametri caratteristici dell'ammasso roccioso sono riportati in Tab. 2.

Delle sezioni è stata simulata la condizione attuale (Fase di studio 2), l'evoluzione delle grandezze di interesse geotecnico con l'esecuzione di un primo ribasso di 3 m dall'attuale piano di calpestio (Fase di studio 3) e di un secondo ribasso ulteriore di 6 m (Fase di studio 4), portando dunque l'altezza complessiva della camera a 12 m.

I risultati della citata sezione B indicano una situazione tensionale con valori di

sollecitazione fino ai 6 MPa, valori comunque ottenuti solo negli spigoli della camera, con spostamenti orizzontali di ordine millimetrico. Le condizioni rimangono pressoché immutate dopo i ribassi simulati (Figg. 7 e 8). Il modello di comportamento evidenzia comportamenti prevalentemente elastici.

Occorre tuttavia evidenziare che tale modellazione non prevede la simulazione di distacchi di blocchetti o lastre in concomitanza con la presenza di scistosità o di contatti tra l'arenaria e le ardesie.

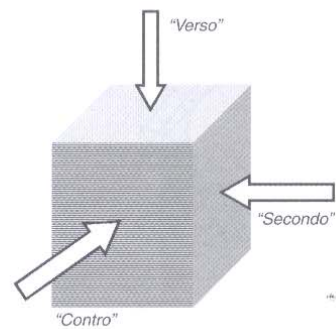


FIG. 4 - Direzioni di applicazione del carico. Il tratteggio sulla faccia frontale indica la scistosità.
Load application directions. The outline on the frontal face indicates the schistosity.

TAB. 1 - Riassunto dei parametri caratteristici di resistenza e deformabilità della roccia intatta. σ_c : resistenza a compressione monoassiale; m,s: parametri del criterio di rottura di Hoek-Brown; A,B: parametri del criterio di Hoek-Brown sul piano di Mohr; E: modulo di deformabilità; v: rapporto di Poisson.

Summary of strength and deformability parameters of intact rock. σ_c : uniaxial compression strength; m,s: Hoek-Brown failure criterion parameters; A,B: Hoek-Brown failure criterion parameters on Mohr plane; E: deformability modulus; v: Poisson's ratio.

Valori	σ_c [MPa]	m [-]	s [-]	A	B	c [MPa]	φ [°]	E [MPa]	v [-]
"Globale"	124,8	15,43	1	1,06	0,69	17,3	54,2	39000	0,2
"Verso"	143,5	12,74	1	1,00	0,69	21,7	52,5	38500	0,2
"Secondo" "contro"	104,5	18,9	1	1,13	0,70	13,5	56,5	55500	0,15

TAB. 2 - Parametri caratteristici utilizzati nella modellazione numerica alle differenze finite con il codice di calcolo FLAC (Itasca). Bulk modulus: modulo di deformazione volumetrico; shear modulus: modulo di deformazione a taglio; cohesion: coesione; friction angle: angolo di attrito; dilation: angolo di dilatanza; tensile: resistenza a trazione.

Parameters used for numerical modelling with finite difference code FLAC (Itasca).

Proprietà	Arenaria picco	Arenaria residuo	Ardesia
Bulk modulus [MPa]	21667	13890	21000
Shear modulus [MPa]	16250	10417	12600
Cohesion [MPa]	10	0,2	3
Friction angle [°]	38	32	35
Dilation [°]	6	6	6
Tensile [MPa]	2	0,01	1,1

PRIME CONCLUSIONI DELLO STUDIO

La scelta dei parametri geomeccanici

Come appare evidente dai dati sperimentali della caratterizzazione, i parametri geomeccanici della Pietra del Cardoso sono quelli di un materiale anisotropo a marcato comportamento elasto-fragile.

La caratterizzazione eseguita non ha evidentemente esaurito tutti i risvolti di tipo geomeccanico, quali ad esempio lo studio dell'influenza delle dimensioni o delle proporzioni geometriche dei provini sulla resistenza, ma fornisce comunque un valido elemento di riscontro per la cava esaminata.

I valori da utilizzare nelle analisi di stabilità devono essere scelti in base al tipo di tecnica numerica o analitica utilizzata ed al problema fisico: infatti sono diversi i

parametri da utilizzare se si considera il mezzo roccioso come omogeneo oppure come mezzo discontinuo con una separazione tra arenaria ed ardesie. Vanno poi tenute in conto le differenze di approccio per criteri di resistenza alla Mohr-Coulomb oppure alla Hoek-Brown, i quali utilizzano in modo diverso i valori da attribuire alle stesse caratteristiche geomeccaniche della roccia.

Infine, il ricorso alle classificazioni geomeccaniche per la stima dei parametri geomeccanici mal si presta in circostanze quali quelle esaminate, analogamente a quanto già osservato in altre cave in sotterraneo di pietra ornamentale di buona qualità. La caratterizzazione di laboratorio, la individuazione di singolarità in cava e l'ausilio di tecniche geofisiche per la valutazione di singole discontinuità sono gli strumenti da utilizzare per otte-

nere una visione integrata e realistica del caso in esame.

L'uso del mezzo continuo equivalente

Le analisi numeriche qui presentate sono state sviluppate con significativi elementi applicativi per la coltivazione in sotterraneo della Pietra del Cardoso.

L'ammasso roccioso, pur nel suo manifesto comportamento anisotropo, è stato assimilato ad un mezzo continuo equivalente ed il metodo scelto per le analisi è quello delle differenze finite.

Le connotazioni salienti della modellazione sono:

- modellazione dell'intero versante su cui è impostata la cava (le coperture ridotte permettono di approntare il modello senza problemi di gestione del calcolo);

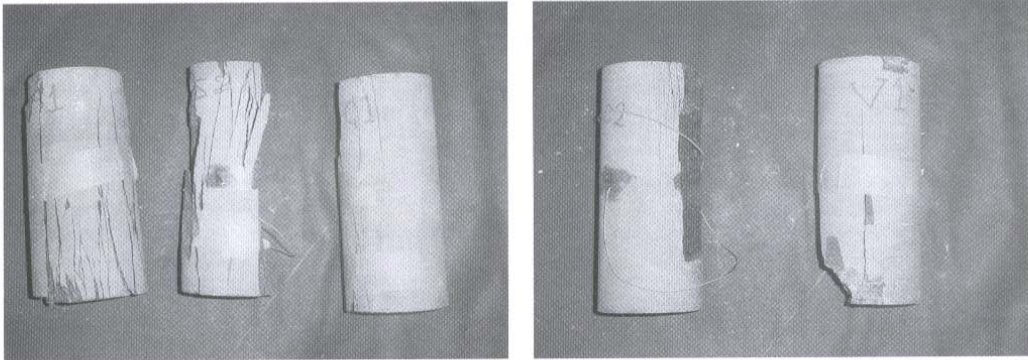


FIG. 5 - Provini di Pietra del Cardoso dopo rottura: la netta fogliettatura verticale e l'assenza di polvere di comminazione denunciano un comportamento prettamente fragile con sviluppo di sollecitazioni di trazione.
Cardoso Stone samples after failure: the clear vertical sheet-type fractures and the absence of comminution dust show a mainly brittle behaviour with the development of tension stresses.

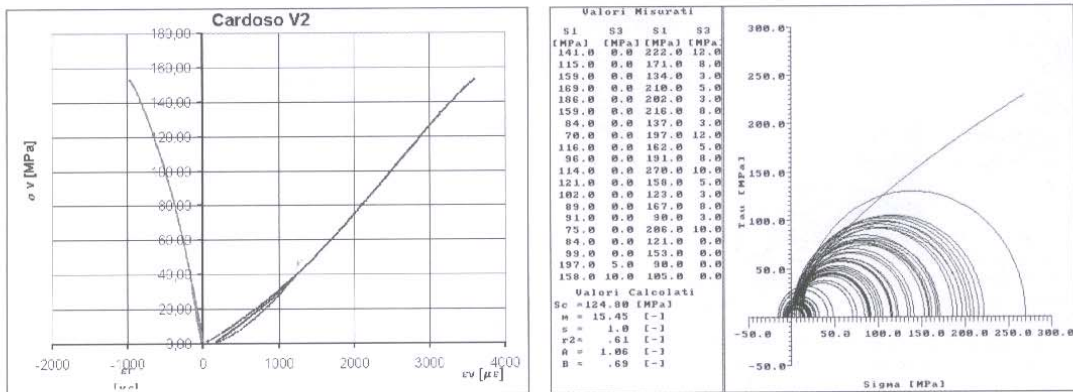


FIG. 6 - A sinistra: curve σ/ϵ per un provino caricato monoassialmente. A destra: involucro di rottura di Hoek-Brown per i valori ottenuti dalle prove di laboratorio.
On the left: σ/ϵ curves for an uniaxially-loaded sample. On the right: Hoek-Brown failure criterion for the laboratory tests data.

- analisi in campo elastico ed elasto-plastico;
- valutazioni incrociate degli aspetti tensionali e deformativi con quelli geostrukturali, in virtù di bassi livelli di carico agenti;
- analisi dell'evoluzione della dimensione degli scavi, in termini tensionali e deformativi.

Le risultanze di maggior interesse risiedono nella constatazione che, pur in presenza di vuoti di ragguardevoli dimensioni e di geometria "spigolosa", i valori delle sollecitazioni indotte sono praticamente sempre compatibili con la resistenza dei mezzi rocciosi in posto (sollecitazioni massime, nella fase attuale, di 5 MPa circa).

Gli spostamenti sono anch'essi molto contenuti, con valori assoluti di convergenza di ordine millimetrico.

Queste osservazioni non esauriscono però lo studio della stabilità delle strutture rocciose in posto, in quanto:

- esistono dei contatti tra materiali rocciosi diversi (ardesie, arenarie) con scendenti caratteristiche di interfaccia, nonché difetti locali della massa rocciosa;
- il materiale roccioso ha rottura elastofragile e discontinuità latenti possono esaltare tale comportamento;
- il taglio con macchina genera ampie superfici planari che, al tetto in particolare, favoriscono lo scarico tensionale. Questa riduzione del confinamento non sempre risulta favorevole, in quanto, se

accompagnata dalla presenza di discontinuità sub-parallele al tetto (falso tetto) oppure di sistemi concorrenti (cunei) possono verificarsi repentini distacchi di elementi rocciosi (Fig. 9).

Un sistematico rilievo locale e l'ausilio di tecniche geofisiche aiutano nella conoscenza preventiva di tali sistemi e con l'ausilio di interventi di sostegno locali i rischi legati all'instabilità possono essere fronteggiati.

L'analisi di stabilità del tetto della camera, così come di pilastri e di diaframmi, va completata con il ricorso al metodo dei blocchi (analisi stereoscopica di volumi rocciosi instabilizzabili) e al metodo dell'equilibrio limite, il quale potrà tenere in considerazione anche la presenza dei rinforzi.

Una bullonatura a tetto dovrà dunque essere dimensionata per reggere il carico di lastre o cunei rocciosi, avendo adeguato ancoraggio nella roccia salda.

La coltivazione ovviamente potrà tener conto di tali evenienze, prevedendo, ad esempio, il disgiungimento di "croste" rocciose isolate dalla retrostante roccia a causa di discontinuità alterate o contatti tra materiali diversi.

Il monitoraggio

Nel caso dei vuoti di coltivazione della Pietra del Cardoso sono consigliabili:

- misure di spostamento, da realizzare principalmente con l'installazione di

fessurimetri a cavallo delle fratture nella roccia sia di tetto sia sui pilastri; tali fessurimetri possono essere meccanici o muniti di trasduttori elettrici per una comoda misura automatica e remota;

- misure di spostamento da realizzare con l'installazione di estensimetri in foro, a cavo o con asta, in grado di cogliere la deformazione complessiva di "strati" o "pieghe" formazionali, organizzate con misurazione remota;
- misure di carico su teste di bulloni, con celle di carico anulari, in grado di evidenziare in modo puntuale la variazione di condizioni di carico.

Altre misurazioni, quali quelle che prevedono l'adozione di celle di pressione, non paiono in grado di fornire dati molto significativi, in quanto la misura dello stato tensionale naturale presenta sempre notevoli difficoltà, specialmente per la dispersione dei risultati e per l'aspetto "locale" che tali risultati forniscono; inoltre la misura delle sollecitazioni che si sviluppano nelle pareti a seguito dello scavo nel caso in esame non paiono essere di importanza cruciale, data la loro modesta entità. Per un controllo generale delle alte pareti esterne possono essere installate mire topografiche o pioli per estensimetri a filo.

L'adozione effettiva del sistema di monitoraggio va comunque sempre commisurata all'effettivo sviluppo delle coltivazioni e alla previsione di condizioni effettivamente gravose.

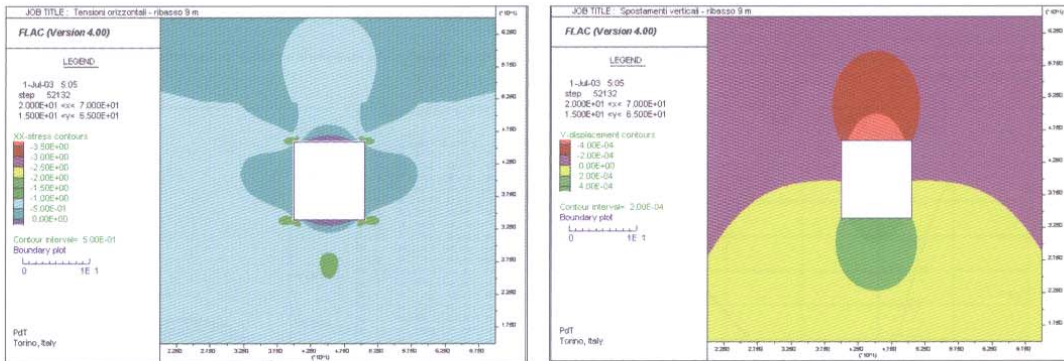


FIG. 7 - (sinistra) Tensioni orizzontali dopo l'ultimo ribasso (altezza della camera 12 m) nella sezione B. Si può osservare l'effetto di concentrazione degli sforzi negli spigoli e lo stato di trazione orizzontale a tetto, fenomeno dovuto alla planarità della superficie creata con il taglio.

(destra) Spostamenti verticali alla fine dell'ultimo ribasso (altezza della camera 12 m) nella sezione B. La permanenza in condizioni elastiche della roccia comporta spostamenti molto ridotti della massa rocciosa verso il cavo, con una convergenza totale verticale dell'ordine di 1 mm.

(On the left): Horizontal stresses after the last excavation (final room of 12 m high) in section B. It can be noted the concentration effect in the chins and the horizontal tension on the roof, phenomenon due to existence of a planar surface created by the cut.

(On the right): Vertical displacement at the end of the last excavation (final room of 12 m high) in section B. The permanence in elastic conditions of the rock leads to a very little displacements of the rock mass, with a total vertical convergence less than 1 mm.

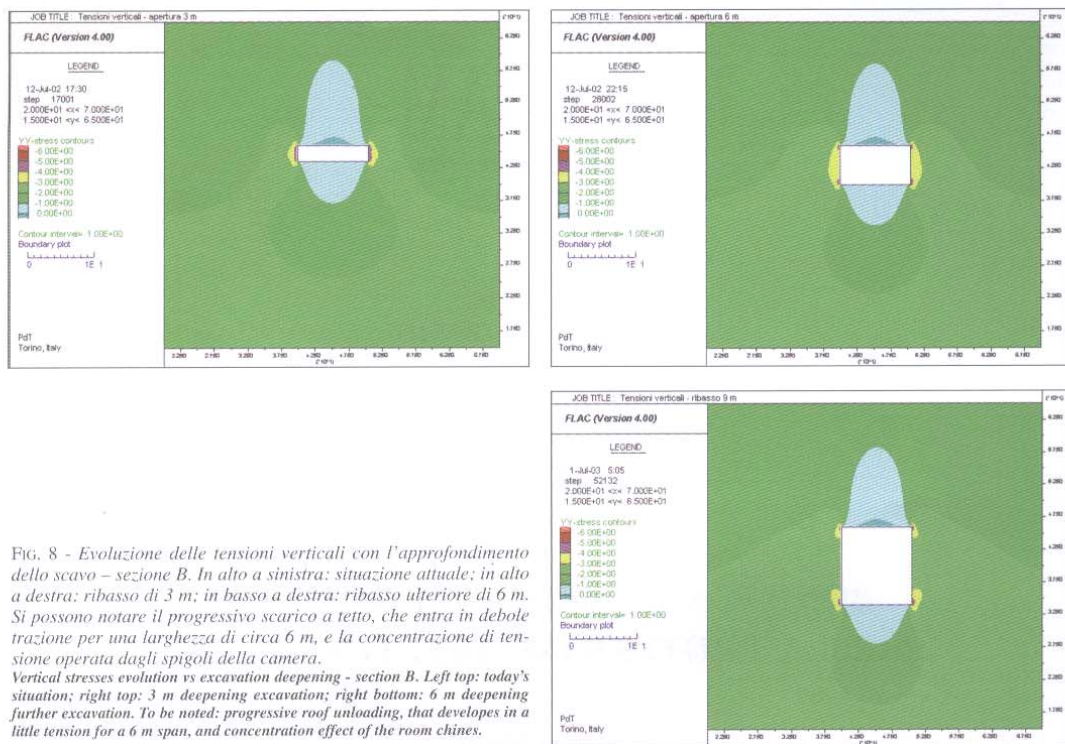


FIG. 8 - Evoluzione delle tensioni verticali con l'approfondimento dello scavo - sezione B. In alto a sinistra: situazione attuale; in alto a destra: ribasso di 3 m; in basso a destra: ribasso ulteriore di 6 m. Si possono notare il progressivo scarico a tetto, che entra in debole trazione per una larghezza di circa 6 m, e la concentrazione di tensione operata dagli spigoli della camera.
Vertical stresses evolution vs excavation deepening - section B. Left top: today's situation; right top: 3 m deepening excavation; right bottom: 6 m deepening further excavation. To be noted: progressive roof unloading, that develops in a little tension for a 6 m span, and concentration effect of the room chines.



FIG. 9 - Dettaglio della discontinuità naturale che potrebbe originare un falso tetto nella cava.
Detail of natural joint that could originate a false roof in the quarry.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Azienda USL 12 di Viareggio per l'opportunità di studio offerta, nelle persone degli Ing. M. Gragnani e del P.M. L. Cassiodoro. Per i contributi all'avvio

dello studio un ringraziamento è dovuto ai colleghi del TUSC Ing. P. Oreste e D. Peila, per la revisione del testo ai Prof. S. Pelizza e M. Fornaro. Infine un ringraziamento alla Ditta Migliorini e Bertacchi per la fornitura dei materiali lapidei per le prove di laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- CARMIGNANI L., GIGLIA L. (1984): "Il problema della doppia vergenza sulle Alpi Apuane e la struttura del M. Corchia", *Boll. Soc. Geol. It.*, 26, 515-525.
- COLI L., LIVI E. (2003): "Studi sulla Pietra del Cardoso: caratterizzazione geologica e geomineraria", *Rivista GEAM*, 108, pp. 13-20.
- DEL GRECO O., FORNARO M., OGGERI C. (1999): "Underground dimension stone quarrying: rock mass structure and stability", *Proc. '99ISMST Int. Symp. on Mining Sciences and Technology, Beijing, 29-31 agosto*, Balkema, pp. 385-390.
- FORNARO M. (1999): "La coltivazione in sotterraneo delle rocce ornamentali", *Quaderno 22, GEAM*, Torino.