

"La complementarità dell'approccio numerico e del controllo geomeccanico nelle coltivazioni di pietra ornamentale in sotterraneo".

*Original*

"La complementarità dell'approccio numerico e del controllo geomeccanico nelle coltivazioni di pietra ornamentale in sotterraneo" / Oggeri, Claudio; Oreste, Pierpaolo. - STAMPA. - (2000), pp. 167-174. (Intervento presentato al convegno Le cave di pietre ornamentali tenutosi a Torino nel 28-29 Novembre, 2000).

*Availability:*

This version is available at: 11583/1663918 since: 2021-12-01T10:02:13Z

*Publisher:*

GEAM

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

## LA COMPLEMENTARIETA' DELL'APPROCCIO NUMERICO E DEL CONTROLLO GEOMECCANICO NELLE COLTIVAZIONI DI PIETRE ORNAMENTALI IN SOTTERRANEO

OGGERI C. e ORESTE P.P.

*Tunnelling and Underground Space Center  
Dipartimento di Georisorse e Territorio, Politecnico di Torino, Italia*

### 1. Introduzione

La coltivazione in sotterraneo di pietre ad uso ornamentale, già di significativa rilevanza in Italia, riveste notevole attualità anche in diversi paesi esteri (Portogallo, Croazia, Grecia). Tali scavi sono connotati dal fatto di essere realizzati in ammassi rocciosi di buona od ottima qualità geomeccanica (basti pensare ai bacini marmiferi delle Apuane), per la finalità stessa cui è destinata la produzione. Ciò è all'origine, anche se non in modo esclusivo, della tendenza alla realizzazione di grandi vuoti, destinati a rimanere tali nel tempo, con delicate implicazioni legate alla necessità di assicurare la stabilità a lungo termine degli scavi o quantomeno dell'area coinvolta (ad esempio le coltivazioni storiche di Pietra di Saltrio presso Varese).

Le tipologie di coltivazione sono di regola inquadrabili nelle moderne configurazioni a camere e diaframmi o camere e pilastri, più raramente - poiché derivate da situazioni del passato (coltivazioni nel bacino delle Orobie) o da tecniche tradizionali consentite da singolarità geogiacimentologiche del luogo (marmo della Cava Madre di Candoglia) - in singole caverne.

Un elemento fondamentale del progetto di una cava sotterranea è rappresentato dal dimensionamento delle strutture rocciose, tenendo conto delle caratteristiche della roccia, delle anisotropie geologiche, delle dimensioni dei vuoti e, infine, dello stato tensionale naturale. Le geometrie sono talora complesse e la sensibilità del progettista o l'esperienza del cavatore possono non essere sufficienti a valutare compiutamente le condizioni statiche dell'ammasso. La constatazione che vi siano comunque coltivazioni di grande sviluppo e volumetrie, con evoluzioni rapide degli scavi, dovrebbe consigliare cautela nell'affrontare responsabilmente tali situazioni, per non incorrere in facili confidenze senza conoscere il reale comportamento della roccia, con il rischio di non essere in grado di delineare le condizioni di sicurezza statica delle strutture (i bacini Apuani in genere).

Un approccio di studio integrato (calcolo numerico di grande precisione e controllo geomeccanico) può non solo agevolare la comprensione dei fenomeni ma anche guidare le scelte operative per questo particolare tipo di costruzioni in sotterraneo. Tale approccio è costituito dalla caratterizzazione geomeccanica della roccia visibile direttamente sulle pareti del vuoto attraverso le classificazioni geomeccaniche e le prove di laboratorio, dall'analisi tensionale e deformativa dei vuoti di coltivazione con metodi numerici 2D od anche 3D, dalla misura di alcune grandezze geomeccaniche, quali le sollecitazioni, gli spostamenti e le deformazioni nella roccia e i carichi indotti nelle strutture di sostegno e rinforzo.

Le scelte progettuali relative all'attività di cava devono necessariamente preoccuparsi della stabilità globale e locale dei vuoti sotterranei e non possono più, oggi, far riferimento unicamente all'esperienza del cavatore e a semplici metodi di calcolo analitici. D'altra parte, la sola modellazione numerica delle cavità non può, da sola, fornire indicazioni affidabili sulla situazione statica della cava sotterranea.

Nella presente nota si evidenziano le possibilità di utilizzare tale approccio integrato per giungere sia ad una più affidabile progettazione delle strutture sia ad un auspicabile miglioramento delle rese, con beneficio economico ed ambientale e con maggiori garanzie di sicurezza del cantiere e del territorio. Le esigenze produttive non sempre collimano con quanto proposto, ma il rischio che scelte basate sulla tradizione e sul gigantismo possano condurre ad una ingovernabilità di talune situazioni territoriali, oltre che alla depauperazione del giacimento, deve imporre una riflessione volta a privilegiare la conoscenza delle strutture rocciose della cava.

## 2. Aspetti geomeccanici e tecnici tipici delle cave sotterranee di pietre ornamentali

Al fine di comprendere i motivi per cui è necessario articolare in diverse fasi integrate il progetto e la conduzione della coltivazione di una cava in sotterraneo, è utile esporre le considerazioni seguenti, sulla base delle quali occorre confrontarsi per addivenire alle corrette scelte tecniche, economiche e di pianificazione territoriale.

Gli ammassi rocciosi interessati da coltivazioni di cava per pietre ornamentali sono, ad eccezione di alcuni casi specifici, di buona o addirittura ottima qualità. Le formazioni adiacenti, sovrastanti o intercalate ai volumi utili possono invece essere alterate, fratturate o sede di fenomenologie particolari, quali la circolazione d'acqua, i carsismi, le concentrazioni di sforzi tettonici.

Nello scavo in sotterraneo rimangono in posto, nella roccia, strutture quali i tetti, i pilastri o i diaframmi, destinati ad assolvere ad una funzione statica. La forma delle superfici esposte e la dislocazione delle strutture (in particolare dei pilastri) dipendono dalle tecniche di taglio ed abbattimento, dalla qualità "merceologica" e geomeccanica del materiale, dalla conformazione e profondità del giacimento, dal metodo di coltivazione. Poiché il ricorso a strutture di sostegno integrative è, ad oggi, nelle cave di pietra ornamentale, in genere limitato agli interventi sulle instabilità locali manifeste (splaccaggi, fratture nei pilastri) o alle misure preventive (zone di imbocco, tetti con stratificazioni), si deve adottare il presupposto che le strutture naturali in posto debbano rimanere stabili per sempre.

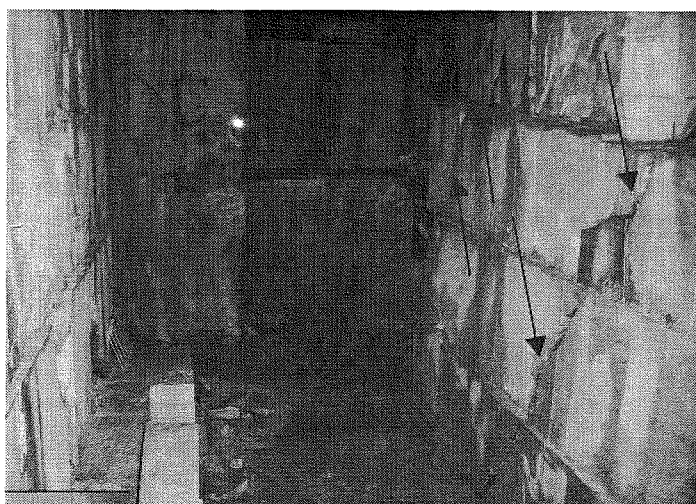
Le dimensioni dei vuoti residui e lo stato di sollecitazione presente al loro contorno vanno di conseguenza determinati con un approccio che non può essere lasciato alla sola esperienza (che peraltro potrebbe essere ingannevole se trasferita da un bacino estrattivo ad un altro), ma deve essere frutto di un apporto coordinato della modellazione numerica, delle tecniche grafiche ed analitiche e del monitoraggio geomeccanico (preventivo per la caratterizzazione e di controllo per la sicurezza e la validazione delle assunzioni fatte).

Le osservazioni, comunque, sui casi esistenti possono fornire un valido confronto per l'applicazione delle tecniche di calcolo, anche se bisogna mettere in evidenza che, in assenza di misure quantitative in sito, non è possibile valutare con una certa affidabilità un qualsivoglia fattore di sicurezza, indipendentemente dalla sua definizione.

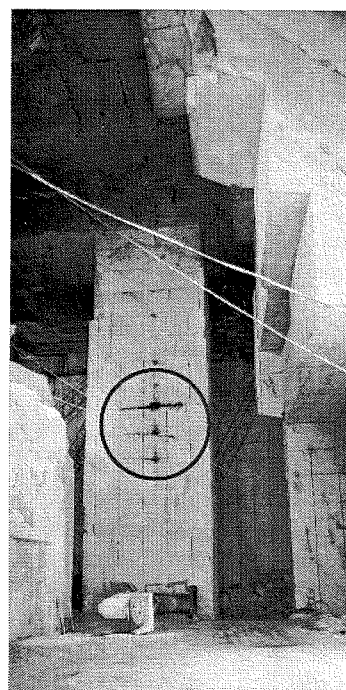
Questa consapevolezza deve essere primaria ed indifferibile soprattutto oggi che, con l'adozione di una meccanizzazione capillare, le produzioni sono aumentate e le dimensioni degli scavi stanno tendendo al gigantismo (figura 1c). La necessità di operare un controllo di tipo geomeccanico delle coltivazioni di cava in corso d'opera scaturisce da esigenze di conoscenza dell'effettivo comportamento della roccia ai fini della pianificazione delle future coltivazioni e per la sicurezza operativa in cantiere.

Gli aspetti geomeccanici che si devono affrontare per il progetto e la coltivazione di una cava sotterranea di pietre ornamentali sono:

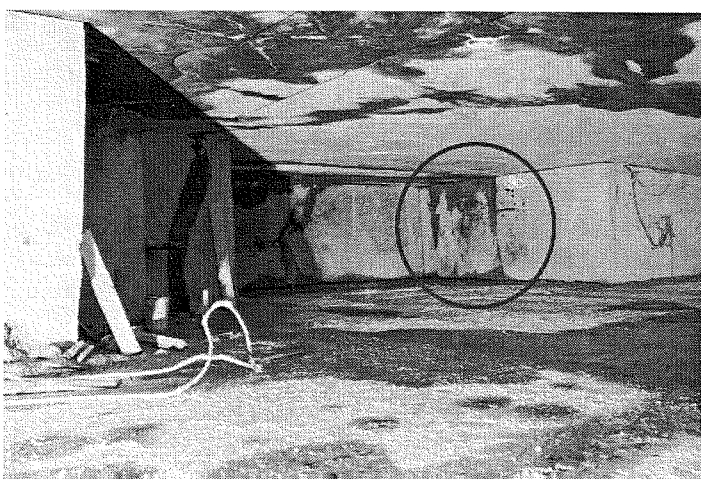
- **Caratterizzazione geologica e giacimentologica dell'ammasso.**  
Essa è rivolta ad individuare la forma e lo sviluppo delle masse rocciose di migliore qualità ed a comprendere anche le caratteristiche delle rocce incassanti.
- **Caratterizzazione geostrutturale in sito.**  
Tale fase deve ricorrere a rilievi sugli affioramenti o a scavi e sondaggi eseguiti appositamente o preesistenti. Occorre comprendere quali siano i sistemi prevalenti nell'ammasso e quali siano le specifiche caratteristiche delle discontinuità, soprattutto la persistenza e la rugosità superficiale, poiché da esse dipende in gran parte il comportamento della massa rocciosa in prossimità dello scavo. Poiché gli scavi in oggetto sono in genere realizzati a profondità non eccessive, è possibile che talora (ad esempio al tetto degli scavi o su pareti laterali) si manifestino zone detensionate, in cui sono quindi possibili cinematismi di blocchi poco confinati. Diverso è il caso dei pilastri che, per le loro ridotte dimensioni, possano invece trovarsi in condizioni critiche a causa sia dell'incremento delle tensioni indotte, sia per una preesistente discontinuità in grado di innescare un processo di rottura.  
Vi sono poi situazioni in cui la conoscenza della struttura è fondamentale ed imprescindibile per una regolare conduzione degli scavi: esempi tipici si hanno nelle formazioni stratificate delle ardesie liguri (figura 1d) oppure nelle bancate di calcare compatto, ma fratturato, dell'Istria.
- **Caratterizzazione geomeccanica in laboratorio.**  
E' fondamentale conoscere la legge sforzi deformazioni della roccia intatta (rigidezza e resistenza), soprattutto quando l'ammasso roccioso risulta essere di buona od ottima qualità geomeccanica. L'analisi del comportamento della roccia nelle condizioni di post-rottura agevola lo studio di quelle strutture rocciose che appaiano ormai compromesse o in incerta condizione di carico.
- **Osservazioni sperimentali su situazioni geomeccaniche analoghe e raffronto con il metodo di coltivazione.**  
Tale analisi permette di confrontare le situazioni già note, con i vantaggi e le problematiche riscontrate, acquisendo dall'esperienza soprattutto indicazioni per ciò che attiene le tecniche per migliorare le rese di coltivazione, studiando l'interazione tra struttura dell'ammasso e metodo di coltivazione. Esperienze in tal senso sono state avviate in Istria (calcare), in Portogallo (marmi), in Grecia (marmi) e in Italia (ofalciti, marmi).



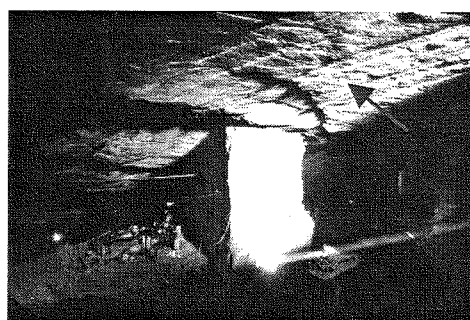
a)



c)



b)



d)

Figura 1. Esempi di cave sotterranee di pietre ornamentali. Legenda: a): esempio di discontinuità principali oblique e sub-parallele sulle pareti di una camera della cava di marmo Acqua Bianca di Lasa (BZ); b): attacco sommitale della futura camera di coltivazione nell'oficalcite nella cava Champlong a Chatillon (AO); nel cerchio si intravede una discontinuità molto persistente e beante; c): pilastro verticale residuo integro di grandissime dimensioni nel marmo arabescato Corchia; si possono notare le tracce delle incisioni lasciate dalla tagliatrice a catena; d): camera a tetto inclinato con problemi di "splaccaggio", nelle ardesie liguri.

La caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi interessati da una cava sotterranea di pietre ornamentali è, in genere, un'operazione complessa ed incerta per i seguenti motivi:

- L'ammasso roccioso è, di solito, di buona od ottima qualità, con indici di classificazione geomeccanica prossimi ai valori massimi ( $RMR=100$ ;  $Q=1000$ ). Le stime dei parametri geomeccanici ottenibili dalle classificazioni non sono affatto affidabili per questi tipi di roccia, poiché dette classificazioni pongono grande interesse alla natura e numero delle discontinuità presenti, in questi casi sempre molto ridotte in numero.
- Le proprietà dell'ammasso alla scala del problema, però, non sono quelle misurate in laboratorio, ma sensibilmente più basse sia per il modulo elastico sia per la resistenza. Non esiste in letteratura, però, una casistica sufficiente a fornire indicazioni sulla riduzione della resistenza della roccia a causa dell'effetto scala; alcuni autori (Hardy & Agapito, 1967; Laubscher, 1984) hanno proposto formulazioni per l'effetto scala, che, però, sono valide per il solo tipo di roccia per il quale sono state ricavate.
- La caratterizzazione dipende anche dal tipo di analisi che si vuole realizzare: continuo equivalente o discontinuo. Sui criteri di scelta tra il modello continuo e quello discontinuo si tratterà nel prossimo paragrafo, ma già sin d'ora si deve sottolineare come lo stesso materiale roccioso presenta parametri meccanici diversi a seconda se le discontinuità naturali sono considerate insieme alla roccia intatta in un materiale fittizio omogeneo oppure separatamente da essa. Nel primo caso il problema è quello di valutare l'influenza delle

single discontinuità sul comportamento dell'ammasso roccioso, anche in relazione alla dimensione dei blocchi di roccia e delle camere di coltivazione e all'orientazione relativa discontinuità-pareti della camera. Nel secondo caso, invece, bisogna non solo definire anche le caratteristiche meccaniche delle discontinuità alla scala del problema, ma anche quali discontinuità saranno considerate distintamente e quali, invece, saranno omogeneizzate all'interno dei singoli blocchi di roccia.

La caratterizzazione a grande scala delle discontinuità rappresenta ancora un problema non completamente definito. Bisogna mettere in evidenza come la persistenza delle discontinuità, parametro in genere non noto con precisione, ha un'influenza preminente sul comportamento dell'ammasso roccioso alla scala del problema in esame.

### 3. Metodi di analisi delle condizioni di stabilità

Diversi metodi di calcolo sono oggi disponibili per l'analisi del comportamento delle cave sotterranee di pietre ornamentali. Essi sono essenzialmente:

- Metodi dell'equilibrio limite.

Tali metodi individuano inizialmente blocchi di roccia instabili nei riguardi della caduta o dello scivolamento, e successivamente valutano l'entità delle forze instabilizzanti e delle forze resistenti, fornendo un'indicazione sulla stabilità di detti blocchi. Un fattore di sicurezza, espresso come rapporto tra le forze resistenti e quelle instabilizzanti, permette di indicare sommariamente anche la probabilità che il blocco possa risultare instabile e la necessità di intervenire per garantirne la stabilità.

Pur essendo metodi semplici e di facile impiego, sono ancora validi e molto utili per stimare la stabilità locale della roccia al contorno delle camere di coltivazione. Devono, però, essere supportati da metodi più complessi per la definizione delle tensioni di confinamento esistenti al contorno del blocco. Richiedono pochi parametri la cui stima non è complessa e possono essere impiegati in analisi parametriche, molto utili quando esiste un'intrinseca variabilità delle caratteristiche dell'ammasso roccioso, oppure quando vi è una grande incertezza sui alcuni parametri geomeccanici.

L'interesse nell'individuare singoli blocchi di roccia instabili non è dovuto unicamente alla necessità di evitare che essi scivolando o cadendo investano gli operatori di cava: un'instabilità locale può, infatti, essere anche l'innescò di una instabilità di grande scala, che può interessare il tetto o i pilastri delle camere di coltivazione.

- Metodo delle aree di influenza.

Attraverso questo metodo è possibile stimare, in prima approssimazione, la tensione verticale media nei pilastri e nei diaframmi e, nota la resistenza della roccia alla scala del problema, anche il fattore di sicurezza del pilastro o del diaframma. Si tratta di un metodo semplice che può ancora essere adoperato in sede di una valutazione preliminare della quantità di giacimento da lasciare in posto per il sostegno delle camere di coltivazione, quando la geometria della cava non è molto complessa.

- Metodo delle lastre piane.

Attraverso questo metodo è possibile stimare le condizioni di stabilità del tetto di una camera di coltivazione quando esso si presenta con una struttura stratificata parallela al profilo dello scavo (figura 1d). In questo caso si considera, a favore di sicurezza, scollegati i vari strati di roccia e si procede ad una verifica delle sollecitazioni indotte al loro interno dallo sviluppo dei momenti flettenti.

- Metodi numerici del continuo.

Tali metodi numerici, bidimensionali o tridimensionali (ancora poco impiegati per la complessità nella definizione del modello, nello sviluppo dei calcoli e nell'interpretazione dei risultati), permettono di simulare in modo realistico tutte le fasi della coltivazione di una cava, discretizzando l'ammasso roccioso in elementi di calcolo di piccole dimensioni. Permettono di ottenere lo stato tensionale e deformativo nella roccia in ogni punto al contorno delle camere di coltivazione. Trattano l'ammasso roccioso come un continuo equivalente, che può presentare leggi di comportamento anche molto sofisticate. Richiedono la definizione delle caratteristiche di un materiale che, in effetti, non esiste, ma è solo il risultato di una omogeneizzazione prodotta precedentemente. I moderni metodi numerici del continuo permettono anche, però, l'inserimento nel modello di singole discontinuità che possono risultare influenti sul comportamento tensionale e deformativo dell'ammasso roccioso. Tali discontinuità incidono marcatamente sui risultati del calcolo e devono, quindi, essere caratterizzate dal punto di vista geomeccanico con grande dettaglio. Bisogna sottolineare come anche la geometria della discontinuità debba essere individuata con precisione. In genere, l'inserimento di una discontinuità singolare in un modello bidimensionale del continuo inserisce una ipotesi molto forte sulla sua orientazione, che può portare a risultati errati, non più utili neanche qualitativamente. Basta, infatti, che la discontinuità abbia, nella realtà, una direzione inclinata seppur di poco rispetto alla normale al piano di studio considerato, che alcuni cinematicismi che il calcolo considera non si possono realizzare nella pratica, ed altri, invece, che non sono analizzati, possono produrre instabilità locali.

I metodi numerici del continuo vengono impiegati quasi sempre nei problemi relativi alle cave sotterranee di pietre ornamentali, anche se l'ammasso roccioso si presenta fratturato. Sono adatti soprattutto quando

l'ammasso roccioso è poco o per niente fratturato o quando è molto fratturato, con riferimento alla scala del problema (alle dimensioni delle camere) (figura 2).

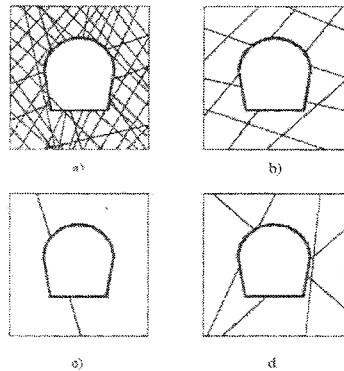


Figura 2. Schemi geometrici per la modellazione numerica dei problemi di stabilità delle camere di coltivazione sotterranee di pietre ornamentali.

Legenda: a): ammasso roccioso intensamente fratturato con blocchi di roccia piccoli rispetto alle dimensioni del vuoto (modelli continui); b): ammasso roccioso mediamente fratturato con blocchi di roccia di dimensioni paragonabili con la dimensione del vuoto (modelli discontinui); c): ammasso roccioso per niente o pochissimo fratturato (modelli continui con l'eventuale presenza di una o comunque poche discontinuità singolari); d): ammasso roccioso poco fratturato (incertezza sul tipo di modello da impiegare).

Si dividono in metodi di contorno (implicano la suddivisione in elementi del solo contorno dello scavo, mentre l'ammasso roccioso è considerato come un continuo indefinito), detti BEM (Boundary Element Methods), e metodi di dominio, molto più diffusi (implicano la discretizzazione di tutta la porzione di roccia influenzata dalle operazioni di scavo e considerata all'interno del modello), tra i quali i FEM (Finite Element Methods) e i FDM (Finite Difference Methods).

- Metodi numerici del discontinuo.

Tali metodi discretizzano l'ammasso roccioso in blocchi di roccia racchiusi da discontinuità, che presentano leggi di comportamento proprie differenti da quelle della roccia intatta. Per le discontinuità vengono richieste la rigidità normale, quella trasversale, la resistenza (coesione ed angolo d'attrito). E' un'impostazione concettuale che tende a simulare in modo più corretto (cioè più realistico e rappresentativo) l'ammasso roccioso, ma che, proprio per questo, richiede parametri e conoscenze che non sono in genere disponibili sia per la non completa ed esauriente caratterizzazione geomeccanica, sia per la intrinseca variabilità di tutte (o quasi) le formazioni litologiche naturali.

E' ancora un approccio di calcolo non completamente testato, che per l'interpretazione dei risultati dovrebbe sempre essere associato ad una modellazione numerica del continuo. Si rende necessario quando l'ammasso roccioso è mediamente o poco fratturato (figura 2b e 2d), cioè quando i blocchi di roccia isolati dalle discontinuità hanno dimensioni paragonabili con le dimensioni del vuoto.

I metodi di calcolo maggiormente impiegati sono del tipo DEM (Distinct Element Methods), che considerano i singoli blocchi di roccia indeformabili oppure di rigidità finita, ammettono spostamenti finiti e riconoscono i nuovi contatti tra i blocchi man mano che il calcolo avanza.

Soprattutto per i metodi numerici (del continuo e del discontinuo), la caratterizzazione geomeccanica preliminare dell'ammasso roccioso non è mai sufficiente e soddisfacente sia perché i dati di input richiesti sono in numero elevato, sia perché è necessario definire parametri non direttamente misurabili in sito. Per i metodi del continuo, poi, sono richiesti parametri di un materiale che in realtà non esiste (il continuo equivalente). Nel campo delle cave sotterranee, poi, non esistono dati in letteratura in numero sufficiente e le classificazioni geomeccaniche non sono in genere direttamente applicabili. E' per questi motivi che si rende necessario affiancare all'analisi tensionale e deformativa della roccia attraverso i potenti metodi numerici, un controllo geomeccanico in sito, volto a tarare i parametri della roccia e a verificare le condizioni di lavoro delle strutture sotterranee. L'approccio integrato necessario è a volte sviluppato attraverso tecniche matematiche sofisticate dette di back-analysis che, partendo dalle misure di sollecitazione e spostamento realizzate, sono in grado di definire i parametri incogniti dell'ammasso roccioso. I parametri dell'ammasso roccioso incogniti sono quelli in grado di produrre, con il calcolo e con una certa approssimazione, le stesse misure di spostamento e sollecitazione effettivamente riscontrate.

#### 4. Monitoraggi geomeccanici

Il monitoraggio rappresenta, quindi, un elemento fondamentale per l'analisi del comportamento delle cave sotterranee di pietre ornamentali e per la validazione e l'ottimizzazione dei moderni strumenti di analisi di tipo numerico. Inoltre, vi sono altri due scopi principali del monitoraggio:

- a) controllare che non si verifichino problematiche statiche e meccanismi di instabilità non presi in considerazione nelle analisi preliminari;
- b) segnalare il pericolo di imminenti condizioni di rischio per gli operatori di cava e per l'integrità delle camere di coltivazione.



Modellazione e verifica sperimentale devono procedere concordemente per poter installare le strumentazioni al posto giusto nel momento giusto; va installato solo ciò che è utilizzabile ed interpretabile, disponendo però di un margine per avere una ridondanza di letture tale da non vanificare l'intero studio per la perdita di uno strumento, e riservando alcune strumentazioni per il controllo diretto di situazioni più delicate per la stabilità locale.

Affinché il monitoraggio sia realmente significativo ai fini della progettazione, esso può comportare costi a volte non trascurabili. In tal senso il successo dell'operazione richiede un coinvolgimento della sensibilità dell'imprenditore, intesa come disponibilità ad investire nella conoscenza del mezzo roccioso e dei fenomeni correlati nella consapevolezza che da ciò deriveranno vantaggi non solamente formali ma anche sostanziali. L'investimento nel monitoraggio della cava non è semplicemente un costo superfluo per ottemperare ad esigenze meramente burocratiche ed amministrative, bensì un miglioramento in conoscenza e sicurezza, addirittura traducibile in termini economici in migliori condizioni di resa dell'ammasso. Invero ad oggi sono ancora pochi i casi in cui il monitoraggio sia intervenuto con incisività e capillarità. Ovviamente il supporto di finanziamenti e progetti scientifici ministeriali o comunitari può aiutare nell'adozione e diffusione delle opportune strumentazioni e tecniche di misura, ma vi può essere un monitoraggio efficace anche con strumentazioni relativamente semplici, purché vi sia il convincimento che questo serva e debba essere parte necessaria delle attrezzature della cava, alla stregua delle macchine da taglio o dell'impianto di illuminazione.

I parametri misurati sono, in genere, spostamenti, deformazioni e sollecitazioni. In tabella 1 sono riportate le caratteristiche tecniche (range, precisione e possibilità di errore) delle misure comunemente impiegate. Nel caso di cave sotterranee di pietre ornamentali, gli spostamenti e le deformazioni sono, in genere, molto contenuti, dell'ordine di grandezza della precisione degli strumenti. La misura di essi, quindi, non viene effettuata se non in relazione al comportamento di discontinuità principali e in corrispondenza delle aperture su versante. Molto interesse, invece, riveste la misura delle sollecitazioni nella roccia ed in particolare nei pilastri o diaframmi.

Tabella 1. Valori usuali del range e della precisione, e possibilità di errore di diversi tipi di misura.

<i>Tipo di misura</i>	<i>Range</i>	<i>Precisione</i>	<i>Possibilità di errore</i>
carico con celle	$10^4 - 10^6$ N	2 - 10 %	media
deformazioni con strain gages	500 - 6000 $\mu\epsilon$	5 - 100 $\mu\epsilon$	bassa
crack gages	10 mm - 50 cm	0.1 - 3 mm	bassa
convergenze	10 cm - 1 m	0.1 mm - 1 cm	bassa
distensione in roccia	1 - 10 cm	0.01 - 1 mm	media

Le misure di spostamento lungo i giunti può essere realizzata con fessuometri attrezzati con trasduttori potenziometrici o a corda vibrante. Le misure di convergenza (presso gli imbocchi o attraverso sezioni delle camere) possono utilizzare dispositivi a filo indeformabile tensionati e muniti di trasduttore potenziometrico o a corda vibrante, a seconda del tipo di acquirettore che si intende utilizzare. Poiché non sempre è possibile mantenere in posto tali strumentazioni durante le normali operazioni di cava, potrebbe essere necessaria un'attrezzatura rimovibile, purché non vi sia compromissione dei dati acquisiti e delle tarature iniziali. Alcune sezioni di scavo possono essere equipaggiate con estensimetri in foro, ad esempio a barra, a base multipla o a fori multipli con ancoraggi a profondità differenti. Il trasduttore a bocca foro può essere nuovamente dei tipi già menzionati. Esiste anche la possibilità di installare il solo rivestimento del foro di sondaggio ed utilizzare la sonda estensimetrica rimovibile. In tal caso la misura è discontinua, ma vi può essere un vantaggio nella maggior versatilità delle strumentazioni, peraltro assai sensibili (si utilizzano anche trasduttori induttivi). Misurazioni particolari potrebbero essere richieste nelle zone di contatto con le formazioni incassanti o in versanti montani acclivi.

Le misure tensionali riguardano le sollecitazioni naturali e quelle indotte. Si può ricorrere a misure corticali utilizzando la tecnica del martinetto piatto (in grado anche di rimanere in posto fornendo l'andamento delle tensioni nel tempo, durante l'evoluzione del cantiere di coltivazione). Tale strumento è sensibile, però, ai disturbi locali della roccia e i risultati necessitano di una interpretazione attraverso un adeguato metodo di analisi. Inoltre, le postazioni di misura vanno ripetute per comprendere quali siano le variazioni in prossimità di zone singolari (spigoli). Tecniche di recente adozione ed estremamente interessanti sono quelle che utilizzano le sonde "stressmeter", con misura diretta in foro della variazione dello stato tensio-deformativo, attraverso un trasduttore a corda vibrante (figura 3). Infine, specialmente per la misura dello stato tensionale naturale si è talora fatto ricorso al metodo del doorstopper, limitando la sua applicazione alle zone non eccessivamente fratturate (ad es. nella cava di Lasa presso Bolzano).

Bisogna ricordare come le sollecitazioni siano grandezze puntuali e non integrali come gli spostamenti, e che, quindi, possono variare naturalmente nella roccia da punto a punto. E' richiesto, quindi, un gran numero di misure

strumentazioni al  
do però di un  
o strumento, e  
le.

e costi a volte  
lla sensibilità  
dei fenomeni  
ne sostanziali.  
re ad esigenze  
za, addirittura  
ancora pochi i  
nanziamenti e  
strumentazioni  
mente semplici,  
della cava, alla

no riportate le  
e. Nel caso di  
lto contenuti,  
uata se non in  
ersante. Molto  
rammi.

(e investimenti non trascurabili) per poter ottenere informazioni affidabili sull'andamento degli sforzi all'interno della roccia.

Misure di carico e di sollecitazione indotta possono essere altresì utilmente effettuate su strutture di sostegno artificiali, quali ad esempio i tiranti (celle di carico montate sulla testa di ripartizione esterna).

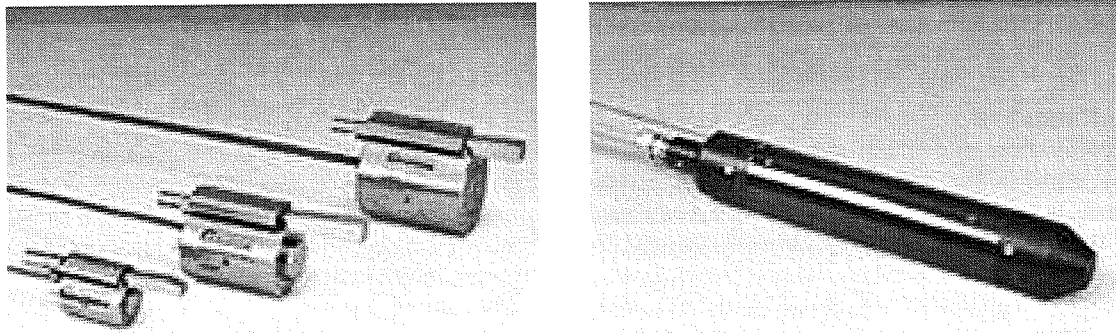


Figura 3. Esempi di stress-meter da foro, per la misura dello stato tensionale della roccia, funzionanti con trasduttore a corda vibrante (cortesia Geokon).

misura.

<b>di errore</b>
dia
ssa
ssa
ssa
dia

L'acquisizione delle letture delle misure può oggi essere realizzata adottando centraline in grado di scandire le frequenze desiderate e immagazzinare i dati su periodi relativamente lunghi. Con opportune interfacce è inoltre possibile disporre di una linea di trasmissione dei dati ad una unità remota, nel caso in cui occorresse una sorveglianza più tempestiva. Il cantiere di cava è naturalmente in evoluzione, pertanto questa parte della strumentazione dovrà essere relativamente adattabile a diverse configurazioni.

### 5. Casi tipici di cave in sottoterraneo in Italia

Le cave in sottoterraneo in Italia sono concentrate in una decina di bacini, il più rilevante dei quali è quello dei marmi Apuani. Rilevanza va data anche alle oficalciti della Val d'Aosta, alle ardesie Liguri, al marmo della ValVenosta. Casi singolari si hanno per la caverna della Cava Madre di Candoglia, oppure per il Ceppo del Lago d'Iseo.

Ognuno dei casi menzionati ha le proprie peculiarità. A titolo d'esempio di riportano le problematiche che un monitoraggio e una progettazione integrati devono affrontare con riferimento ad alcune delle cave segnalate.

Le oficalciti della Val d'Aosta sono presenti in versanti montani, con coperture dell'ordine di diverse decine di metri. La struttura della roccia presenta discontinuità di persistenza totale ed apertura da centimetrica a decimetrica, disposte con andamento prevalente subverticale. Il monitoraggio deve seguire l'eventuale dislocazione dei lembi delle discontinuità sui pilastri e al tetto piano delle camere. I fenomeni attesi hanno evoluzione relativamente lenta. Può essere interessante misurare lo stato tensionale all'interno dei pilastri con sonda stress-meter o doorstopper. Metodo numerico adatto sarebbe quello per elementi distinti o elementi finiti con alcune singolarità.

Nelle ardesie Liguri la struttura dominante è quella laminata e fissile sia del materiale ardesiaco sia delle formazioni a tetto. Qui è importante il controllo sui pilastri, peraltro in genere inclinati per mantenere l'ortogonalità con il tetto piano e con giacitura inclinata. I fenomeni attesi per questi litotipi sono abbastanza repentini, pertanto sarebbe necessario in controllo della distensione all'interno degli strati di tetto e dell'apertura delle eventuali fessurazioni al tetto o sui pilastri. Il controllo delle tensioni potrebbe essere attuato con martinetti piatti. Metodo numerico adatto può essere quello ad elementi distinti oppure alle differenze finite con anisotropia dei materiali.

I marmi delle Apuane presentano in genere coperture di diverse decine di metri, tetti piani anche di notevole luce e alti pilastri. I fenomeni attesi sono di carico progressivo, se non addirittura di fenomeni viscosi a lungo termine, con notevoli detensionamenti a tetto e carichi indotti sui pilastri. La presenza dei solchi lasciati a tetto dalle tagliatrici può essere innesco di fessurazioni. Quindi, si potrebbe eseguire un monitoraggio delle fratture reali e potenziali per seguire l'evoluzione delle aperture e dei carichi indotti attraverso stress-meter, doorstopper e martinetto piatto. Il metodo numerico più indicato è quello alle differenze finite o agli elementi finiti.

Nel Ceppo del Lago d'Iseo viene coltivato un conglomerato in versante, con presenza di fratturazioni subverticali aperte e riempite. Le sollecitazioni indotte sui pilastri sono basse, anche se contenute sono le caratteristiche meccaniche del materiale, data la sua natura sedimentaria; problemi possono aversi per

on trasduttori  
sezioni delle  
ziometrico o a  
ibile mantenere  
un'attrezzatura  
zioni di scavo  
i multipli con  
zionati. Esiste  
estensimetrica  
ersatilità delle  
ari potrebbero

isure corticali  
ndamento delle  
erò, ai disturbi  
analisi. Inoltre,  
zone singolari  
ano le sonde  
n trasduttore a  
a fatto ricorso  
es. nella cava

amenti, e che,  
nero di misure



detensionamento a tetto. Sarebbe opportuno un controllo delle discontinuità e una misura delle tensioni indotte con martinetto piatto. Metodo numerico adatto è quello agli elementi finiti o alle differenze finite.

Il marmo di Lasa è coltivato in due cave principali in versante con coperture anche rilevanti. I problemi sono legati alle sollecitazioni naturali e indotte nella roccia, oltreché alle dimensioni dei vuoti. Le misurazioni da tempo effettuate hanno riguardato sia le tensioni naturali sia quelle indotte e le deformazioni della massa rocciosa (Cravero e Iabichino, 1997). I metodi numerici utilizzabili sono quelli agli elementi finiti, alle differenze finite e, in particolari situazioni della roccia, agli elementi distinti.

## 6. Conclusioni

Le coltivazioni di pietre ornamentali in sotterraneo rappresentano strutture in roccia che possono raggiungere notevoli dimensioni e che richiedono un'analisi tensionale e deformativa accurata. Le geometrie sono talora complesse e la sensibilità del progettista o l'esperienza del cavatore possono non essere sufficienti a valutare compiutamente le condizioni statiche dell'ammasso. Per tale analisi è oggi comune il ricorso ai metodi di calcolo numerici (del continuo e del discontinuo), strumenti potenti, in grado di definire l'evoluzione tensionale e deformativa in ogni punto nella roccia al contorno delle camere di coltivazione.

In questo articolo sono stati illustrati tali metodi di calcolo ed è stato messo in evidenza come da soli, essi non siano sufficienti per uno studio esauriente sulle condizioni statiche delle camere di coltivazione. E' necessario affiancare a tale analisi un accurato monitoraggio dei vuoti, secondo la filosofia dell'approccio integrato: la modellazione numerica deve servire per decidere dove posizionare le strumentazioni di misura per ottenere informazioni significative; le misure devono servire per tarare i parametri geomeccanici della roccia e per verificare i risultati della modellazione numerica.

Un approccio di studio integrato (calcolo numerico di grande precisione e controllo geomeccanico), inoltre, può guidare le scelte operative per questo particolare tipo di costruzioni in sotterraneo, in passato lasciate all'esperienza e sensibilità del cavatore.

## 7. Bibliografia

- Barla G., *Meccanica delle Rocce, Teoria e Applicazioni*, 2 vol., C.L.U.T., Torino, 1972.
- Bieniawski Z.T., *Engineering rock mass classification*, J. Wiley, New York, 1989, 251 pp.
- Bieniawski Z.T., *Rock Mechanics Design in Mining and Tunnelling*, Balkema, Rotterdam, 1984.
- Cravero M. e Iabichino G., *Geomechanical study for the exploitation of an underground marble quarry*, Int. Journal Rock Mech. and Min. Science, Vol. 34, No. 3-4, 1997.
- Del Greco O., Fornaro M., Oggeri C., *Underground dimension stone quarrying: rock mass structure and stability*, Proc. ISMST 1999, Beijing, China, Balkema.
- Grasso P. e Mahtab A., *Geomechanics Principles in the Design of Tunnels and Caverns in Rock*, Elsevier Science Publishers, 250 p., 1992.
- Hoek E. e Brown E.T., *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p., 1980.
- Oggeri C., *Design Methods and monitoring in ornamental stone underground quarrying*, GeoEng 2000, Melbourne, Australia.
- Sinha R.S., *Underground Structures - Design and Instrumentation*, Elsevier, 453 p., 1989.
- Voyat I.H., *Studio sui metodi di modellazione geometrica e meccanica di ammassi rocciosi fratturati*, tesi di laurea, Politecnico di Torino, ottobre 2000.

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto MURST 40 % , coordinato dal prof. Gecchele, dal titolo "Controllo ambientale dell'attività di cava per lapidei ornamentali in importanti bacini estrattivi".

Gli autori hanno collaborato in ugual misura per la realizzazione di questo articolo.