

**APPLICAZIONE DI UNA METODOLOGIA DI INDAGINE  
SPERIMENTALE PER LO STUDIO DEL COMPORTAMENTO  
MECCANICO DI AMMASSI ROCCIOSI OGGETTO DI  
COLTIVAZIONE IN SOTTERRANEO – AREA ESTRATTIVA DEL  
MONTE TORRIONE, CARRARA (MS)**

Cristina Raffi

*Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Civile*

*crisrina.raffi@for.unipi.it*

Domenico Gullì

*Unità Operativa Ingegneria Mineraria (U.O.I.M.) AUSL 1 Massa Carrara (MS)*

*d.gulli@usl1.toscana.it*

Carlo Diego Lo Presti

*Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Civile*

*diego.lopresti@dic.unipi.it*

**Sommario**

Il presente lavoro descrive un approccio metodologico per la valutazione della stabilità di un pilastro in corso di realizzazione presso una cava di marmo del comprensorio estrattivo di Carrara. Lo studio descritto si inquadra all'interno di un più articolato progetto – che vede impegnati la Regione Toscana, l' Unità Operativa Ingegneria Mineraria (U.O.I.M.) AUSL 1 Carrara e l'Università di Pisa – finalizzato allo studio dell'assetto geo-strutturale e tensionale del comprensorio del Monte Torrione presso Carrara. Questa attività viene sviluppata nell'ambito di un Dottorato di Ricerca.

**Introduzione**

Lo sviluppo di moderne tecnologie, avvenuto in particolar modo nell'ultimo ventennio, ha contribuito a meccanizzare e velocizzare notevolmente l'attività estrattiva marmifera condotta sia a giorno che in sotterraneo. Ciò, insieme alla tendenza storica di effettuare il dimensionamento dei vuoti sotterranei sulla base di osservazioni generiche e valutazioni di massima, ha portato allo sviluppo di vuoti sotterranei di enorme sviluppo, con geometrie

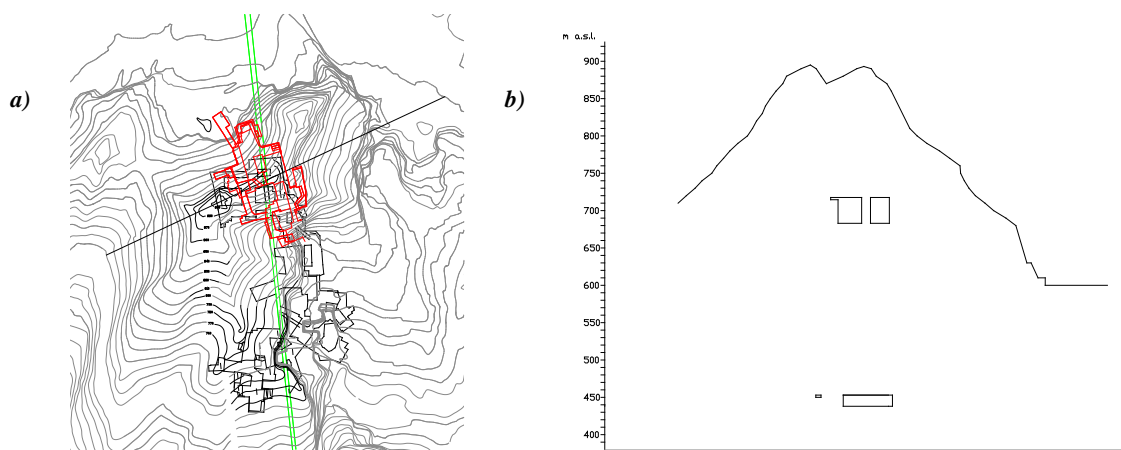
complesse ed elementi di supporto talvolta sottodimensionati. Negli ultimi anni i progettisti sono stati chiamati a valutare le scelte operative sulla base delle effettive caratteristiche meccaniche degli ammassi rocciosi, delle loro condizioni geo-strutturali e dell'assetto tensionale rilevato in situ. Tale aspetto assume particolare rilievo in ammassi rocciosi nei quali diverse esperienze (Cravero e al., 2006, Iabichino e al., 2006, Gulli e al. 2010 ) indicano che spesso le condizioni tensionali non riflettono un assetto di tipo litostatico e sono fortemente influenzate dall'origine metamorfica e dunque tettonica del marmo. Oltre che dall'orogenesi del marmo lo stato di sforzo può essere influenzato dalle diverse condizioni geo-strutturali, dagli improvvisi salti topografici, dalle particolari geometrie di scavo. Lo studio presenta un esempio di applicazione di una metodologia di indagine - sviluppata ed applicata dalla UOIM di Carrara combinando i fattori precedentemente citati - finalizzata a valutare la stabilità e controllare la sicurezza nelle cave in sotterraneo mediante un approccio di tipo sperimentale. Il metodo di indagine utilizzato si basa sull'applicazione delle seguenti fasi:

- i. Determinazione della geometria interna e della morfologia esterna della cava mediante l'utilizzo di un teodolite laser;
- ii. Determinazione del comportamento meccanico della roccia per mezzo di prove in situ ed in laboratorio
- iii. Misura in situ dello stato di stress
- iv. Monitoraggio, tramite opportuni strumenti posizionati in foro, del comportamento tenso-deformativo della roccia;
- v. Studio geologico per la determinazione delle caratteristiche geo-strutturali dell'ammasso roccioso e la definizione del paleo-stress;
- vi. Creazione di modelli numerici dell'ammasso roccioso, calibrati attraverso misure sperimentali e monitoraggi, con simulazione delle varie fasi di scavo;

Come si evince il presente programma di ricerca risponde all'obiettivo specifico di condurre il maggior numero di osservazioni sperimentali in situ anche al fine di implementare e validare modelli numerici 3D mediante la tecnica del confronto punto a punto.

### **Inquadramento del sito ed esperienze pregresse**

Il sito in esame è rappresentato da una cava che si sviluppa in sotterraneo all'interno del Monte Torrione: un rilievo che separa il bacino di Torano da quello di Fantiscritti nel cui intorno sono dislocate almeno 7 cave, fra attive e inattive, delle quali alcune a giorno. Il Monte Torrione è dunque interessato da coltivazioni a giorno impostate su acclivi versanti che ne intaccano le pendici e da scavi in sotterraneo impostati su almeno tre livelli.



*Figura 1: Planimetria (a) e sezione NE-SW (b) rappresentative dell'area oggetto di indagine*

Uno degli obiettivi principali dello studio complessivo – che vede impegnati l'Unità Operativa Ingegneria Mineraria (U.O.I.M.) della AUSL 1 Carrara e l'Università di Pisa – è capire se e in che modo le attività di scavo passate, quelle attuali e quelle future (già oggetto di piani di coltivazioni previsti per i prossimi 5-10 anni) possano influire sulla stabilità a grande scala del sotto-bacino oggetto di studio. Le indagini condotte dalla UOIM nel corso degli anni attraverso un approccio integrato di misure in situ e indagini geologiche, hanno consentito di definire la presenza di un regime di stress tettonico di tipo estensionale. Tale assetto tensionale trova riscontro nella fase di deformazione fragile di tipo estensivo (D2) in atto presso il complesso delle Alpi Apuane. Tali osservazioni, insieme con la determinazione puntuale dello stato di sforzo ad elevate profondità all'interno del massiccio (copertura rocciosa di circa 450-500 m, piano di imposta di ca. 438 m s.l.m) ha consentito di spiegare fenomeni di intensificazione degli sforzi al contorno degli scavi che si sono manifestati sotto forma di spalling superficiali.

### Ultima campagna prove

Alle misure descritte al paragrafo precedente, condotte presso le coltivazioni sotterranee più profonde del Monte Torrione, sono state aggiunte ulteriori indagini eseguite presso la cava Fiordichiara. Il portale di ingresso della cava è impostato alla quota di ca. 683 m s.l.m e la copertura rocciosa variabile da 80 m a 200 m. Nell'ottica di effettuare la determinazione dello stato di sforzo in differenti postazioni, periferiche rispetto allo sviluppo delle coltivazioni, il primo cantiere di misura è stato attrezzato in un'area che rappresenta l'attuale limite N-O degli scavi, con copertura rocciosa di 80-100 m. In tale zona la ditta esercente intende isolare un pilastro di dimensione 15.5 x 22.5 mt, come visibile nella figura sottostante (Figura 2 a). Per tale motivo le misure sono state condotte in modo da valutare ante-operam lo stato di sollecitazione agente nell'intorno del centro del futuro pilastro.

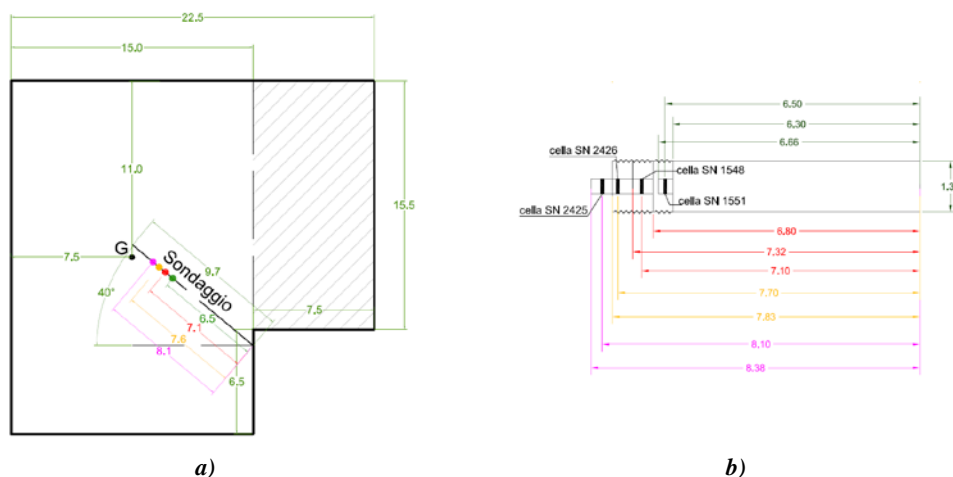


Figura 2 - Sezione orizzontale pilastro (a); localizzazione celle deformometriche (b)

Per le misure sono state utilizzate celle deformometriche triassiali del tipo CSIRO Hi-Cell (Worotnicki, 1993). La cella è attrezzata con 12 strain gauges di cui 2 assiali ( $A_0, C_0$ ), 5 tangenziali ( $A_{90}, B_{90}, C_{90}, E_{90}, F_{90}$ ) e 5 inclinati a  $\pm 45^\circ$  rispetto all'asse della cella ( $A_{45}, B_{45}, B_{135}, C_{45}, D_{135}$ ), più un termistore. Tale metodo è attualmente fra i metodi di misura dello stato di sforzo più utilizzati ed efficaci. Per determinare lo stato di stress nell'ammasso roccioso mediante tale tecnica di misura si procede nel modo seguente: dopo aver realizzato un primo foro di diametro  $\varphi_1$  (pari 130 mm) fino alla profondità prevista, viene effettuato a fondo foro un secondo foro pilota, concentrico, avente diametro pari a 38 mm (tali diametri

assicurano un rapporto fra  $\varphi_2$  e  $\varphi_1$  pari ad almeno 1/3). A questo punto, dopo accurata pulizia delle superfici del foro pilota, si procede all'installazione della cella all'interno di questo che avviene mediante incollaggio. Dopo aver atteso la presa della colla (da 20 a 48 h a seconda delle condizioni ambientali) inizia la fase vera e propria di misura con la definizione delle prime letture di zero dei trasduttori di spostamento; il rilascio tensionale avviene mediante il sovracarotaggio della porzione di foro all'intero del quale è alloggiata la cella di misura, il diametro di sovracarotaggio, come detto, è pari a circa tre volte il diametro del foro pilota per garantire che il volume di roccia oggetto di sovracarotaggio non risenta della concentrazione degli sforzi dovuta alla perforazione del foro pilota. Questa tecnica di misura presenta il vantaggio di consentire l'acquisizione in continuo di tutti i segnali elettrici provenienti dalla cella di misura durante tutte le fasi di prova (Figura 3): ciò, insieme al numero ridondante di strain gauges utilizzati, assicura una valutazione accurata circa l'attendibilità della singola determinazione effettuata.

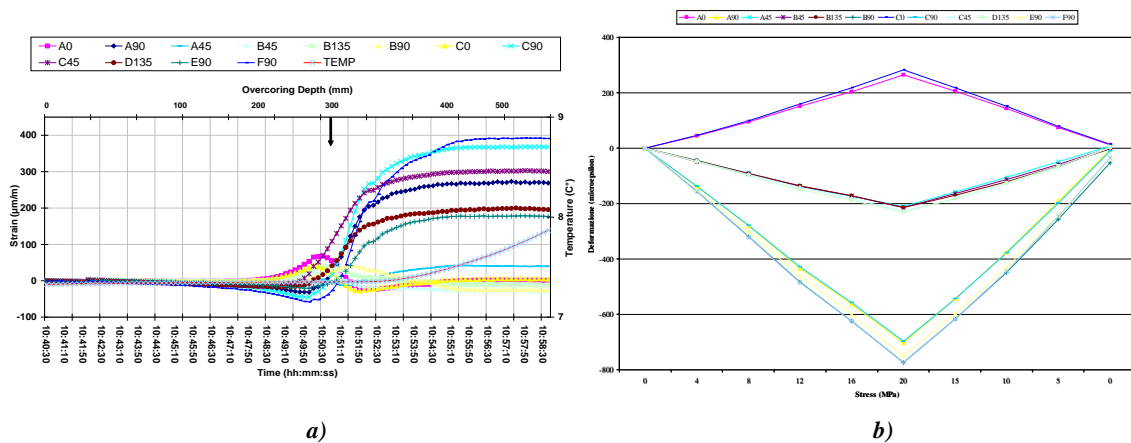


Figura 3 – Acquisizione segnale strain-gauges (a); Test Biassiale (b)

Al termine del sovracarotaggio la carota può essere estratta e sottoposta ad un test biassiale che consente la determinazione delle costanti elastiche della roccia sullo stesso volume all'interno del quale è stata effettuata la misura di deformazione. L'esecuzione di tale test biassiale consente anche di definire l'eventuale grado di anisotropia del materiale testato che in questo caso appare comunque isotropo (Figura 3.b).

Tabella 1 - Sintesi dei risultati ottenuti

	3D01	3D02	3D03
Prof. (m)	6.5	7.1	7.7
$\sigma_1$ (MPa)	5.2	5.1	4.8
dip (°)	74	62	53
bearing (°)	090	324	347
$\sigma_2$ (MPa)	2.4	0.2	1.5
dip (°)	5	19	32
bearing (°)	197	192	198
$\sigma_3$ (MPa)	-0.8	-3.4	-1.3
dip (°)	15	19	15
bearing (°)	289	95	98

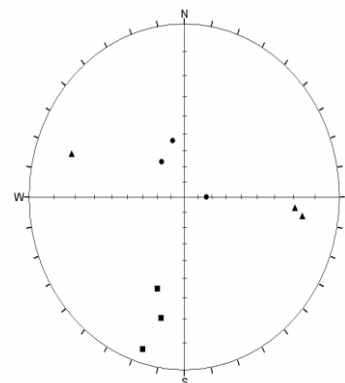


Figura 4 - Rappresentazione stereografica delle componenti di sforzo misurate ( $\sigma_1$  = cerchi;  $\sigma_2$  = quadrati;  $\sigma_3$  = triangoli)

In Tabella 1 sono riportate le intensità e le direzioni delle componenti principali dello stress agente. Come appare evidente osservando i valori di sollecitazione misurati, l'area indagata è

caratterizzata da uno stato di sforzo che rispecchia le evidenze già acquisite negli anni precedenti con una  $\sigma_1$  pseudo verticale media di ca. 5 MPa, una  $\sigma_2$  orizzontale paria a circa 1/3 di  $\sigma_1$  e una  $\sigma_3$  orizzontale di trazione (compresa fra ca. 1 e 3 MPa) in direzione circa Est-Ovest. I risultati riportati in Tabella 1 e la rappresentazione stereografica in Figura 4 indicano una buona approssimazione nella determinazione dello stato di sforzo, sia in intensità che in direzione, nell'ammasso roccioso oggetto di indagine.

### Valutazione nel tempo del comportamento tenso-deformativo

La determinazione dello stato di sforzo agente consente, da un lato, l'acquisizione di un dato sperimentale di notevole importanza ai fini della progettazione del sotterraneo, dall'altro rappresenta il primo passo per eseguire una valutazione a scala locale (ridotta rispetto alla scala del bacino estrattivo del Monte Torrione) del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso e in particolare del pilastro oggetto di studio attraverso l'installazione di un sistema di monitoraggio (Figura 5). Le misure effettuate verranno quindi utilizzate come valore di riferimento per valutare come l'avanzamento dello scavo, nel tempo, influenzi lo stato deformativo e tensionale dell'ammasso roccioso.

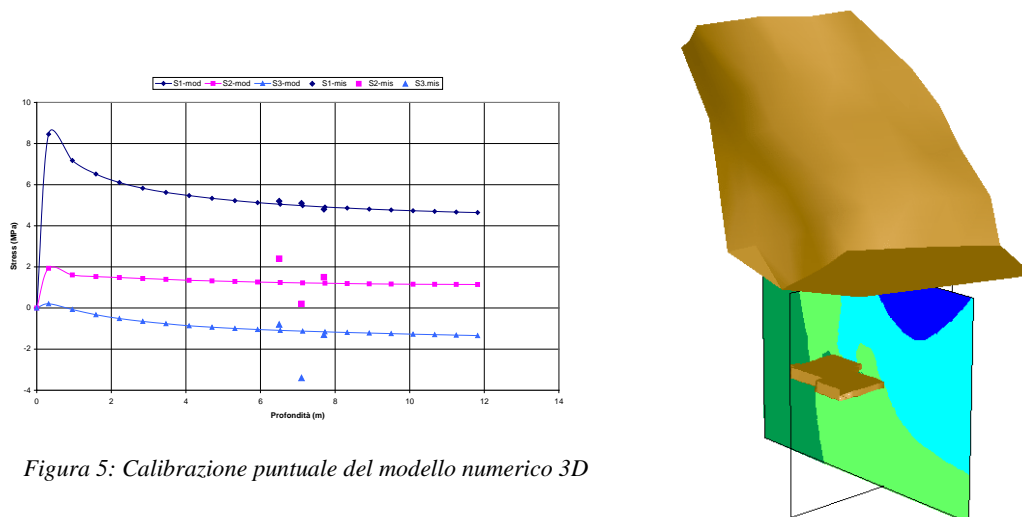


Figura 5: Calibrazione puntuale del modello numerico 3D

Per effettuare tale valutazione, attraverso la ricostruzione della geometria della cava nell'intorno del pilastro di progetto e della morfologia sovrastante, è stato messo a punto un modello numerico 3D della porzione di ammasso roccioso oggetto di indagine. Il modello BEM (Examine 3D, Rockscience) è stato quindi calibrato puntualmente (Figura 5) rispetto alle misure di stato tensionale effettuate. Per la calibrazione del modello, allo stato attuale, è stato imposto un regime di sforzo gravitativo con una componente tettonica di compressione verticale e di trazione orizzontale orientata in direzione ca. E-W. Al fine di effettuare una calibrazione continua in corso d'opera è stato inoltre predisposto un sistema di monitoraggio che consta di una ulteriore cella di misura tensionale, installata ad una profondità di 8,1 m all'interno dello stesso foro, che verrà utilizzata come stressmeter al fine di registrare nel tempo le variazioni dello stato tensionale tridimensionale e due estensometri multibase (MPBX) in foro in grado di misurare gli spostamenti fra la testa di misura, ancorata in superficie, e le basi, installate a diverse profondità.

In tal modo sarà possibile valutare sollecitazioni e deformazioni indotte sul pilastro mettendo a punto un modello calibrato relativo allo stato di progetto e calibrando sulla base delle misure sperimentali di zero e di monitoraggio il modello previsionale stesso.

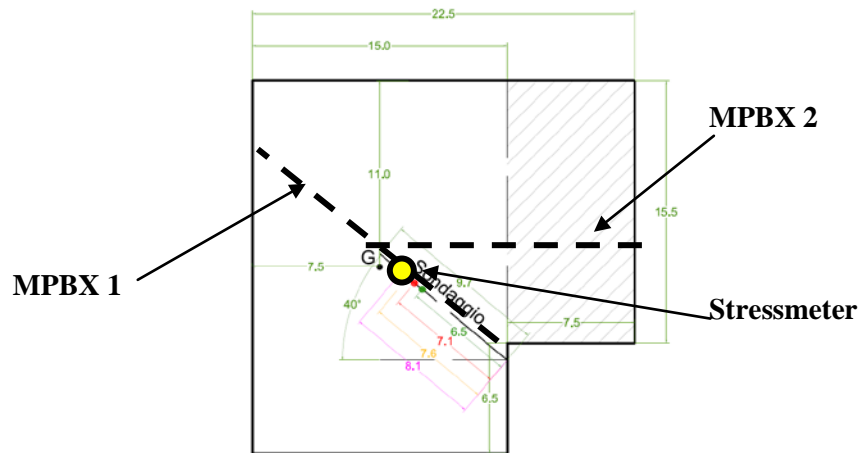


Figura 6 – Schema del sistema di monitoraggio attivato

### Conclusioni

Le indagini condotte nel corso degli anni attraverso un approccio integrato di misure in situ e indagini geologiche ed implementate con le ultime determinazioni sperimentali condotte presso il sito del Monte Torrione, hanno consentito di definire la presenza di un regime di stress tettonico di tipo estensionale che trova riscontro nella fase di deformazione fragile di tipo estensivo (D2) in atto presso il complesso delle Alpi Apuane.

Utilizzando le ultime determinazioni è stato impostato lo studio di stabilità di un pilastro in fase di realizzazione: lo studio è condotto utilizzando un modello numerico BEM 3D, calibrato attraverso le misure di stato tensionale e un sistema di monitoraggio in grado di rilevare, in corso d'opera, il comportamento tenso-deformativo della roccia.

Il proseguo delle indagini presso il sito in oggetto consentirà di passare dall'analisi a piccola scala a quella a grande scala; l'obiettivo del più ampio progetto in corso è infatti quello di analizzare e studiare la stabilità globale del Monte Torrione. Per far questo nei prossimi anni condurremo un'ampia campagna d'indagini e di rilievi geologici, atta all'implementazione della caratterizzazione geo-meccanica dell'intero sito.

### Bibliografia

- Cortopassi, A., Molli, G., Ottria, G. (2006). "Studio della deformazione fragile nel bacino marmifero di Fantiscritti (Alpi Apuane, Carrara) finalizzato alla ricostruzione del campo di paleostress", *Geol. Tec. & Amb.*, 1-2, pp. 27-45
- Cravero M., Gullì D., Iabichino G., Valentino D., (2006) Rock stress measurements in Alpi Apuane quarry sites by means of hydraulic fracturing (HF), *Int. Symp. on In Situ Rock Stress*, 19-21 June 2006, Trondheim, Norway
- Gullì, D., Pellegri, M., Cortopassi (2010). Experimental study for stress analysis on different Carrara marble underground quarries. *International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, September 1 - 3, 2010, Seoul, Korea*
- Iabichino G., Gullì D., Cravero M., Bianchini S. (2006) Comparison between 2D overcoring and Hydraulic Fracturing stress measurements in the Apuane Alps, *Int. Symp. on In Situ Rock Stress*, 19-21 June 2006, Trondheim, Norway
- Worotnicki, G. (1993). "CSIRO triaxial stress measurement cell", *Comp. Rock Eng.*, Pergamon Press, Oxford, Ch 13, (3), 329-394