

## CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA E GEOTECNICA DI UN VERSANTE DI UNA CAVA DI MARMO DELLE ALPI APUANE

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

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

**ABSTRACT.** Lo studio oggetto del presente articolo propone i risultati conseguenti alla caratterizzazione geomeccanica e geotecnica di alcuni ammassi rocciosi affioranti in una zona adiacente la ‘Cava Sottovettolina’, una cava di marmo in sotterraneo situata nelle Alpi Apuane. L’intera area in coltivazione è stata caratterizzata da rilievi topografici tridimensionali con laser scanner e drone, rilievi geotecnici, prove di laboratorio sui materiali per la loro caratterizzazione fisica e meccanica. Queste attività hanno permesso di definire in dettaglio i parametri dell’ammasso roccioso, da utilizzare per le verifiche di stabilità e per pianificare le future attività di scavo.

### 1. INTRODUZIONE

La caratterizzazione geomeccanica e geotecnica delle principali formazioni rocciose affioranti in una zona adiacente alla cava di marmo ‘Sottovettolina’ nel comune di Massa è stata effettuata al fine di definire i parametri di calcolo necessari a verificare la stabilità di un versante di cava in conformità con le vigenti normative tecniche. Questa attività hanno permesso di ottenere una caratterizzazione molto accurata dell’area individuando le differenti litologie e le loro caratteristiche meccaniche, in modo da poter ottimizzare già in fase progettuale, il recupero di materiale in condizione di sicurezza.

### 2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

La cava si trova in località Forno (Massa), è organizzata su un unico cantiere in sotterraneo ed è coltivata per fette orizzontali discendenti. Essa fa parte del complesso estrattivo delle Alpi Apuane.

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.

Nell’area oggetto di studio affiorano, come è possibile notare in Figura 1, da Ovest verso Est:

- Marmi a megalodonti e Dolomitici (md): i primi sono marmi massicci o grossolanamente stratificati con frequenti molluschi, brachiopodi e lumachelle a megalodonti (Retico). Rappresentano lo sviluppo di una prima piattaforma carbonatica triassica. I secondi sono marmi dolomitici alternati a livelli di dolomie deposti in condizioni di piattaforma (Lias inf.);
- Marmi (m): marmi bianchi con sottili livelli di calcescisti e localmente filladi carbonatiche correlati ad una fase estensionale che ha provocato la frammentazione della piattaforma carbonatica;

- Calcari selciferi (cs): metacalcilutiti con liste e noduli di selci e rari livelli di metacalcareniti spesso alternati a strati di calcescisti e filladi carbonatiche con tracce di pirite e ammoniti piritizzate (Lias Medio - Sup.);
- Diaspri e Calcescisti (d): metaradiolariti con interstrati di filladi quarzitiche (Giur. Sup.) e calcescisti con sottili intercalazioni di filladi carbonatiche (Lias Sup-Giur. Medio);
- Calcari selciferi a entrochi: calcari selciferi metamorfici con, localmente, a tetto lenti di metacalciruditi derivate da originarie breccie poligeniche a elementi di calcilutiti, dolomie e radiolariti (Titonico Sup. - Cretaceo Inf.).

La zona in esame si trova sul fianco occidentale di una struttura di prima fase: la sinclinale Orto di Donna – M. Altissimo. 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 litologici presenti (anche fino a 60°).

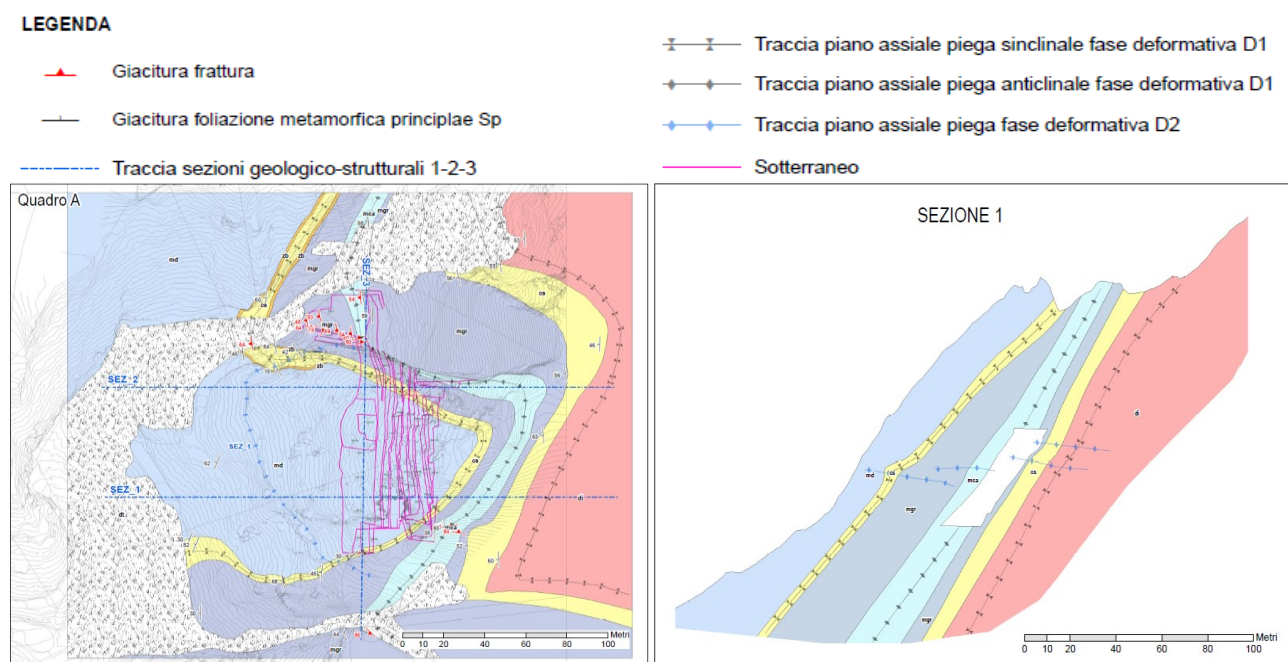


Figura 1. Carta geologica strutturale di dettaglio e sezione - Rosso: Diaspri [di], Giallo: Calcari selciferi [cs], Blu: marmi([md]: marmi dolomitici,[mgr]: marmi grigi, [mca]: marmo calacatta, [zb]:marmo zebrino).

### 3. RILIEVO GEOMECCANICO

Sono stati effettuati sei rilievi su marmi, diaspri e calcari selciferi al fine di raccogliere dati sperimentali utili per la caratterizzazione geomeccanica dell'area. In Figura 2a è riportata una foto aerea generale dell'area con evidenziata la posizione degli stendimenti.

I dati ricavati sono stati trattati statisticamente ed esaminati mediante lo stereogramma di Schmidt per valutare le principali famiglie di discontinuità che interessano la zona. In Figura 2b è proposto lo stereogramma di Schmidt relativo alle discontinuità rilevate sui marmi.

Sono stati eseguiti test e misurazioni speditive in campo avvalendosi del pettine di Barton, del martello di Schmidt e point load test su alcuni campioni di forma irregolare. Si sono eseguiti inoltre alcuni test di laboratorio su campioni raccolti, come prova brasiliana e prova di compressione monoassiale semplice.

Il coefficiente JRC è stato ottenuto confrontando i profili tipo riportati nelle raccomandazioni ISRM con quelli ottenuti sperimentalmente, mentre il parametro JCS è stato ottenuto dalle letture mediante sclerometro, opportunamente corrette in base alla posizione del martello durante l'esecuzione della prova.

Questi dati sono stati utilizzati per definire i parametri geometrici dell'ammasso roccioso e per valutare le caratteristiche geomeccaniche e le resistenze mobilitabili sui giunti.

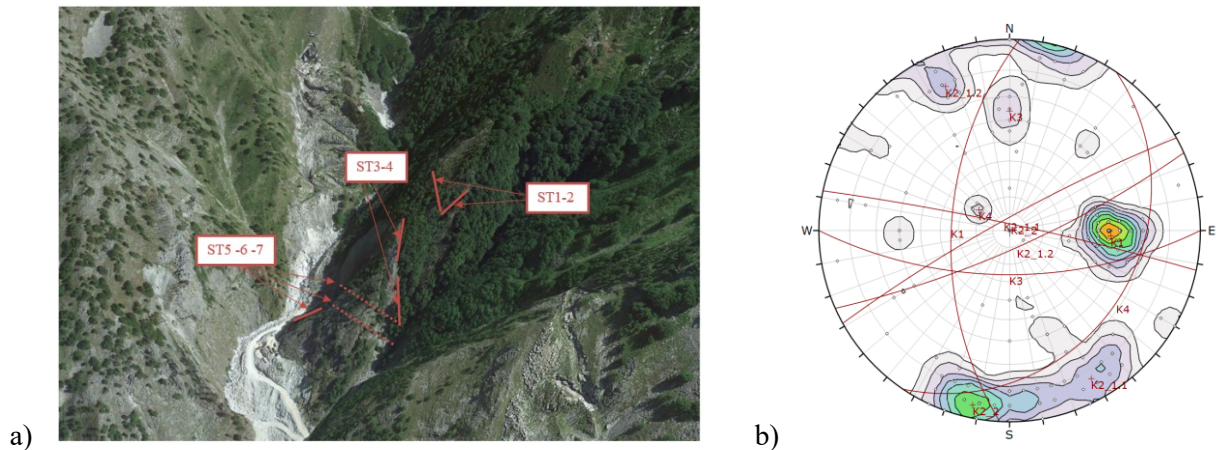


Figura 2. a) Estratto della foto aerea con posizione degli stendimenti (ST1-2: rilevamento su Diaspri, ST3-4: Calcari selciferi, ST5-6: Marmi); b) Stereogramma di Schmidt delle discontinuità rilevate sui Marmi [m].

Nella Tabella 1 vengono riportate le giaciture e i parametri geomeccanici delle famiglie caratteristiche individuate distinte in base alla litologia.

Tabella 1. Tabella riassuntiva di giaciture e parametri geomeccanici.

Famiglia Discontinuità	DIASPRI				CALCARI SELCIFERI			MARMİ					
	J1	J2	J3	J4	J1	J2	J3	K1	K2_1.1	K2_1.2	K2.2	K3	K4
DIP [°]	58	80	66	80	60	68	77	56	83	79	86	64	22
DIP DIR [°]	269	019	138	311	296	146	022	273	331	156	012	180	124
Frequenza [%]	53.5	25.6	16.3	4.6	55.5	27.8	16.7	28.2	9.2	4.9	17.6	6.3	2.8
Spaziatura [m]	0.2-0.6	2-6	6-10	>10	0.6-2	6-10	6-10	2-6		6-10		>10	>10
Continuità [m]	10-20	1-3	<1	1-3	10-20	1-3	3-6	>10		>10		3-6	3-6
JRC	4-6	6-8	6-8	3-6	4-6	4-6	4-6	4-6		4-6		4-6	4-6
JCS	34	48	48	48	30	35	35	44		46		40	42
Apertura [mm]	0-1	1-5	1-5	1-5	0-1	1-5	1-5	0-1		0-1		0-1	0-1
Riempimento	Mat. alterato	-	-	-	-	-	-	-		-		-	-
Acqua	-	-	-	-	-	-	-	-		-		-	-

#### 4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Sulla base dei risultati raccolti dai rilievi geostrukturali, si è proceduto alla determinazione dell'indice di classificazione RMR, che rappresenta una stima quantitativa dei parametri che caratterizzano l'ammasso roccioso presente nel versante.

La classificazione è stata fatta applicando formule empiriche che permettono la valutazione dei parametri di resistenza in relazione al valore di alcuni indici di qualità.

Il calcolo RMR, introdotto da Beniaowski (1973), prevede la definizione di sei parametri:

- P1 – resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta ( $\sigma_{ci}$ ) in MPa;
- P2 – recupero percentuale modificato RQD;
- P3 – spaziatura delle discontinuità;
- P4 – condizioni delle discontinuità;
- P5 – Venute d'acqua;

P6 – orientazione delle discontinuità in rapporto alla direzione di scavo.

La somma degli indici associati ai primi cinque parametri fornisce il valore del cosiddetto RMR “di base”, caratteristico dell’ammasso analizzato. Al valore dell’RMR di base viene poi sottratto un punteggio legato alla valutazione dell’influenza della giacitura dei sistemi di discontinuità principali sull’opera per la quale si esegue la classificazione. Nella Tabella 2 vengono riportati i parametri di resistenza delle tre litologie incontrate.

Tabella 2. Tabella riassuntiva caratterizzazione geotecnica ammasso roccioso.

PARAMETRI RMR	P1	P2	P3	P4	P5	P6	RMR	CLASSE
<b>DIASPRI</b>	12	13	10	13	7	-5	50	III-DISCRETA
<b>CALCARI SELCIFERI</b>	7	17	10	17	7	-5	53	III-DISCRETA
<b>MARMI</b>	12	20	20	20	15	-5	82	I-OTTIMA

Mediante l’ausilio del codice di calcolo Rocdata, che consente di interpolare direttamente i dati sperimentali e valori presenti in letteratura con il metodo della regressione lineare o della riflessione semplice, si sono stimati i parametri di resistenza caratteristici della roccia secondo i criteri di Hoek – Brown e Mohr-Coulomb. Nella Tabella 3 vengono riportati i parametri di resistenza degli ammassi rocciosi in esame.

Tabella 3. Tabella riassuntiva parametri resistenza.

PARAMETRI	Hoek-Brown Classificatio		Hoek-Brown Criterion			Mohr-Coulomb Fit		Rock Mass Parameters
	GSI	mi	mb	s	a	c (MPa)	$\varphi$ (°)	E (MPa)
<b>DIASPRI</b>	58	9	2.008	0.0094	0.503	1.745	56.17	15848.93
<b>CALCARI SELCIFERI</b>	61	8	1.987	0.0131	0.503	1.626	53.81	18359.54
<b>MARMI</b>	82	9	4.732	0.1353	0.500	7.015	54.62	63095.73

## 5. CONCLUSIONI

Sono stati descritti i rilievi e la metodologia di calcolo adottata per stimare i parametri geomeccanici, per le tre formazioni rocciose adiacenti la cava ‘Sottovettolina’.

Da tali rilievi, e dal successivo trattamento statistico dei dati, sono stati valutati i parametri geomeccanici attribuibili alle discontinuità presenti nell’ammasso in esame, inoltre è stata effettuata una stima quantitativa dei parametri che caratterizzano l’ammasso roccioso.

I dati raccolti, utili per le successive valutazioni analitiche saranno trattati secondo la Normativa tecnica, contenuta nel D.M. 17/01/2018, che impone l’uso del metodo semi-probabilistico “dei coefficienti parziali” che prevede l’uso del criterio di verifica agli stati limite.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Beniawski (1973). *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 15, 355-344.

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.