

VARIANTE ALLA S.S. 1 "VIA AURELIA"
Viabilità di accesso all'hub portuale di La Spezia
Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Via Aurelia - 3°Lotto
2° Stralcio Funzionale B dallo Svincolo di Buon Viaggio allo Svincolo di San Venerio
COMPLETAMENTO

PRECEDENTI LIVELLI DI PROGETTAZIONE DELL'APPALTO INTEGRATO ORIGINALE

PD n°1861 del 09/07/03 aggiornato al 10/12/08 - Delibera CIPE n°60 del 02/04/08

PE n° 103 del 14/07/2011 - D.A. CDG-103321-P del 20/07/11

PVT n°112 del 21/01/16 aggiornata al 28/10/16 - D.A. CDG-92950-P del 21/02/17

Progetto Esecutivo Cantierabile Opere da Completare

PROGETTO ESECUTIVO

COD. GE266

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA:

Dott. Ing. Antonio Scalamandrè
Ordine Ing. di Frosinone n. 1063

IL GEOLOGO

Dott. Geol. Flavio Capozucca
Ordine Geol. del Lazio n. 1599

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Geom. Emiliano Paiella

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Fabrizio Cardone

PROTOCOLLO

DATA

OPERE D'ARTE MAGGIORI
GALLERIA FELETTINO I
COMPLETAMENTO GALLERIA NATURALE
RELAZIONE DI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO LIV. PROG. DPGE0266 E 20		V03OM05STRRE01A		A	--
		CODICE ELAB. T00GN01OSTRE01			
D					
C					
B					
A	Emissione	Giugno 2020	Ing.	Ing.	Ing.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

LAVORI DI COSTRUZIONE DELLA VARIANTE ALLA SS1 AURELIA – 3°
LOTTO TRA FELETTINO ED IL RACCORDO AUTOSTRADALE

OPERE MAGGIORI - GALLERIA NATURALE



GALLERIA NATURALE FELETTINO I - COMPLETAMENTO

NOTA DI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

T00GN01OSTRE01A

-	30.06.2020	Ago	CR
Versione	Data	Redatto	Verificato

Lombardi Ingegneria S.r.l. – Socio Unico

Via Giotto 36, IT-20145 Milano

Telefono +39 02 583 03 324, Fax +39 02 583 03 190

milano@lombardi.group, www.lombardi.group

Unità locale Torino

Via R. Montecuccoli 9, IT-10121 Torino, Italy

Telefono: +39 011 192 149 20, Fax: +39 02 583 03 190

torino@lombardi.group, www.lombardi.group

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
1.1	Premessa	1
1.2	Normativa di riferimento	3
1.3	Riferimenti bibliografici	3
1.4	Documenti di progetto	4
2.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	5
2.1	Premessa	5
2.2	Contesto regionale	5
2.3	Modello geologico locale	9
2.4	Considerazioni particolari sulla galleria Felettino I	10
3.	INDAGINI GEOGNOSTICHE PREGRESSE	13
3.1	Sondaggi	13
4.	CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO	14
4.1	Caratteristiche di resistenza e deformabilità	14
4.2	Parametri di base	16
4.3	Risultati analisi parametrica	17

ALLEGATI

A	Rilievi geomeccanici di superficie
---	------------------------------------

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa

La presente relazione tratta della galleria "Felettino I", prevista lungo il tracciato del 3° Lotto della variante alla S.S. 1 "Aurelia" a La Spezia, tra la località di Felettino e il raccordo autostradale.

La galleria, della lunghezza totale di 777.28 m, presenta una sezione policentrica con raggio interno in calotta pari 6,18 m, nella quale è alloggiata una piattaforma stradale formata da una corsia per ciascun senso di marcia di larghezza 3,75 m e banchine laterali da 1,50 m, per una larghezza complessiva di 10,50.

Planimetricamente la galleria presenta un andamento rettilineo da Nord-Ovest verso Sud-Est; presso l'imbocco lato Nord della galleria si trovano le rampe dello svincolo di Via di Buonviaggio, mentre presso l'imbocco lato Sud si trova il viadotto S.Venerio I.

Trattandosi di galleria con lunghezza superiore a 500 m, è prevista per un tratto l'adozione di una sezione di scavo all'interno della quale viene ricavato un cunicolo di emergenza per l'evacuazione degli utenti e la realizzazione di uscite di emergenza in galleria verso il cunicolo ogni 300 m.

Allo stato attuale la galleria si presenta realizzata parzialmente, lo scavo è stato effettuato da entrambi gli imbocchi per un totale di 217m così suddivisi:

- Da imbocco Lato Sud : da pk 2497 a 2461 (L=36m)
- Da imbocco Lato Nord: da pk 1805 a 1986 (L=181m)

Il presente documento si propone di fornire gli elementi un approfondimento sulla **caratterizzazione geomeccanica** dell'ammasso roccioso per la porzione di galleria naturale ancora da scavare, a tal fine sono stati prese in considerazione i recenti studi effettuati per la revisione del modello geologico dell'area e le evidenze emerse dai tratti già realizzati.



Figura 1: Vista dell'area della galleria Felettino I adiacente all'abitato di Carozzo (In rilievo).



Figura 2: Vista dell'area della galleria Felettino I adiacente all'abitato di Carozzo (Pianta).

1.2 Normativa di riferimento

- [1] D.M. LL. PP. 11 marzo 1988 “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 24 settembre 1988, N. 30483 - Circolare Ministero Lavori Pubblici 9 gennaio 1996, N. 218/24/3).
- [2] Legge 5 novembre 1971, N. 1086 “Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio normale, precompresso ed a struttura metallica”.
- [3] D.M. LL. PP. 14 febbraio 1992 “Norme tecniche per l’esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 24 giugno 1993, N. 37406/STC).
- [4] D.M. LL. PP. 9 gennaio 1996 “Norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 15 ottobre 1996, N. 252).
- [5] D.M. LL. PP. 16 gennaio 1996 “Norme tecniche relative ai «Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e dei sovraccarichi»” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 4 luglio 1996, N. 156AA.GG./STC).
- [6] Legge 2 Febbraio 1974 n° 64 - “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche”.
- [7] D.M. LL. PP. 16 gennaio 1996 “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche” e le relative istruzioni (Circolare Ministero Lavori Pubblici 10 aprile 1997, N. 65/AA.GG.).
- [8] Ordinanza n. 3274 20 marzo 2003 della Presidenza del Consiglio dei Ministri “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” e s.m.i.
- [9] Presidenza del Consiglio dei Ministri – Ordinanza n. 3519 del 28 Aprile 2006 - “Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone”.
- [10] Decreto Ministero Infrastrutture 14/01/2008 - “Nuove Norme tecniche per le costruzioni”.
- [11] Circolare Ministero Infrastrutture e Trasporti n. 617 del 2 Febbraio 2009 - “Istruzioni per l’applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14 Gennaio 2008”.

1.3 Riferimenti bibliografici

- [12] Hoek E, Marinos PG. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Tunnels and Tunnelling International 2000;132(11):45e51.
- [13] Hoek E. (2004): “Numerical Modelling for Shallow Tunnels in Weak Rock” – Rocscience.
- [14] Lo Biondo (2019) Relazione illustrativa dei risultati dello studio geologico dell’area ad ovest di Carozzo (SP)
- [15] Carta Geologica PUC de LA Spezia (2003)

-
- [16] Abbate E. e Bortolotti V. (1966) Osservazioni geologiche nei dintorni di Vezzano Ligure (La Spezia). Mem. Soc. Geol. It. v. 6, 1-22. 22ff- 2t.
- [17] Abbate, E., Fanucci, F., Benvenuti, M., Bruni, P., Cipriani, N., Falorni, P., Fazzuoli M., Morelli D., Pandeli E., Papini M., Sagri M., Reale V., Vannucchi, P. (2005). Note Foglio Illustrative della Carta Geologica d'Italia, scala 1:50.000, Foglio 248 La Spezia, APAT, Liguria.

1.4 Documenti di progetto

- [18] Relazione di calcolo (T00GN01OSTRE04A)
- [19] Linee guida per l'applicazione delle sezioni tipo (T00GN01OSTRE02A)

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

2.1 Premessa

Le informazioni qui riportate sono propedeutiche alla definizione della caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso attraversato dallo scavo e rappresentano una sintesi degli studi a disposizione, in particolare:

- Progetto esecutivo per sondaggi e prove di laboratorio (Ref PE "Studi Indagini e Relazioni Specialistiche - Geotecnica - Relazione Geotecnica" (T00GE00GETRE01_A).
- Studio geologico 2019 [14] per l'aggiornamento del modello geologico

2.2 Contesto regionale

L'area nei dintorni della Spezia si caratterizza per la presenza delle unità tettoniche fondamentali che costituiscono l'Appennino Settentrionale nella sua porzione interna, dalle Unità Liguri alle Unità Toscane metamorfiche. Queste unità tettoniche si ritrovano però in un assetto geometrico peculiare, perché le unità più alte (le Unità Liguri e Subliguri) si ritrovano quasi a diretto contatto con le Unità Toscane metamorfiche in un edificio strutturale assottigliato, eliso tettonicamente.

Le cartografie riportate collocano le formazioni rocciose affioranti nell'area di studio all'interno dell'Unità tettonica di Canetolo (Arenarie di Ponte Bratica) e dell'Unità tettonica del Monte Gottero (Arenarie del M. Gottero).

L'Unità di Canetolo appartiene alle unità Subliguri che si interpongono geometricamente tra le Unità Liguri e la Falda Toscana. Le unità Subliguri nei luoghi tipici comprendono l'Unità Aveto-Petrignaccola, l'Unità Bratica, l'Unità Canetolo e l'Unità Marra. Le successioni di queste unità sono generalmente scollate dal substrato cretaceo e quindi la loro originaria posizione paleogeografica è basata su evidenze stratigrafico strutturali indirette. Solo in una zona è stato segnalato un substrato costituito da litologie analoghe a quelle delle successioni liguri esterne orientali (Arenarie di Ostia e Argille varicolori). Questo indica un substrato continentale appartenente al margine assottigliato della placca Adria.

Nel Foglio 248-La Spezia (Abbate et al., 2005) le formazioni rocciose appartenenti al dominio Subligure vengono attribuite all'Unità Canetolo, qui rappresentata da successioni del Paleogene individuate nella letteratura (Elter, 1964) come Argille e Calcari di Canetolo, Calcari di Groppo del Vescovo e Arenarie di Ponte Bratica. I rapporti tra le tre formazioni sono molto discussi in letteratura a causa dei contatti generalmente tettonizzati che hanno quasi del tutto obliterato le originarie relazioni sedimentarie, in particolare nell'area della Spezia dove si sovraimpongono complicazioni tettoniche particolarmente marcate.

Le **Argille e Calcari di Canetolo** sono rappresentate prevalentemente da argilliti fissili scure alle quali si intercalano torbiditi calcareo-marnose e torbiditi siltoso-arenacee (Abbate, 2005). Spesso si presentano come una breccia tettonica definibile come una cataclasite foliata, rappresentata da elementi calcarei scompaginati all'interno di una matrice argillitica deformata. Le età generalmente accettate per questa formazione sono riferite all'Eocene inferiore-medio, mentre nel Foglio 248- La Spezia, a causa dei dubbi rapporti stratigrafici legati delle complicazioni tettoniche, vengono attribuite a tutto il Paleogene (Abbate et al., 2005). A causa delle forti deformazioni che hanno subito, non è possibile stimare uno spessore stratigrafico per questa formazione che in alcuni casi supera il centinaio di metri ed in altri viene totalmente laminata, come accade sulla prosecuzione nord del promontorio orientale della Spezia (Del Tredici e Robbiano, 1997).

I Calcari di Groppo del Vescovo sono costituiti da torbiditi calcareo-marnose di colore grigio chiaro o biancastro separati da livelli siltitici o argillitici e vengono attribuiti all'Eocene inferiore-medio (Del Tredici e Robbiano, 1997).

Le **Arenarie di Ponte Bratica** sono rappresentate arenarie torbiditiche da grossolane a medio fini e siltiti marnose riferibili all'Oligocene superiore, in strati da centimetrici a decimetrici spesso con alto contenuto di fasi carbonatiche sia come clasti che come cemento (Bruni et al., 2007; Abbate et al., 2005; Vescovi, 1998). Frequentemente si ritrovano molto alterate, friabili e decalcificate, acquisendo un colore giallo-ocraceo, e rendendo difficile riconoscere la natura originale della roccia (Abbate e Bortolotti 1966, Del Tredici e Robbiano, 1997); spesso però si caratterizzano per una peculiarità rappresentata da alcuni strati calcarei, anch'essi profondamente alterati, con frattura aciculare (fig. 16) (Abbate e Bortolotti, 1966). Nelle zone tipiche nella successione delle Arenarie di Ponte Bratica si riconoscono slump, intercalazioni caotiche e deformazioni pre-litificazione che testimoniano un'attività tettonica contemporanea alla loro deposizione oligocenica superiore (Vescovi, 1998).

L'**Unità del Monte Gottero** appartiene alle Unità Liguri Interne (Elter, 1975). Le successioni che caratterizzano queste unità sono riferibili ad una sequenza ofiolitica basale del Giurassico Medio-Superiore e da una copertura sedimentaria composta da depositi prevalentemente pelagici (Diaspri, Calcari a Calpionelle, Argille a Palombini), seguiti da depositi prevalentemente torbiditici (Scisti Manganesiferi, Ardesie di Monte Verzi, Scisti Zonati che compongono il gruppo degli Scisti di Val Lavagna, seguiti dalle Arenarie del Monte Gottero) e infine da depositi gravitativi (Scisti del Bocco) che chiudono la successione nel Paleocene Inferiore (Marroni e Elter, 1991). L'Unità del M. Gottero è costituita dagli Scisti del Bocco, dalle Arenarie del M. Gottero, dagli Scisti di Val Lavagna ed è scollata a livello delle Argille a Palombini.

Le **Arenarie del M. Gottero** sono rappresentate da arenarie quarzo-feldspatiche gradate in strati di spessore variabile da centimetrico a metrico, con gli strati meno spessi a granulometria più fine che sfumano a siltiti e argilliti grigio plumbeo, mentre gli strati più spessi presentano granulometrie grossolane fino a microconglomeratiche.

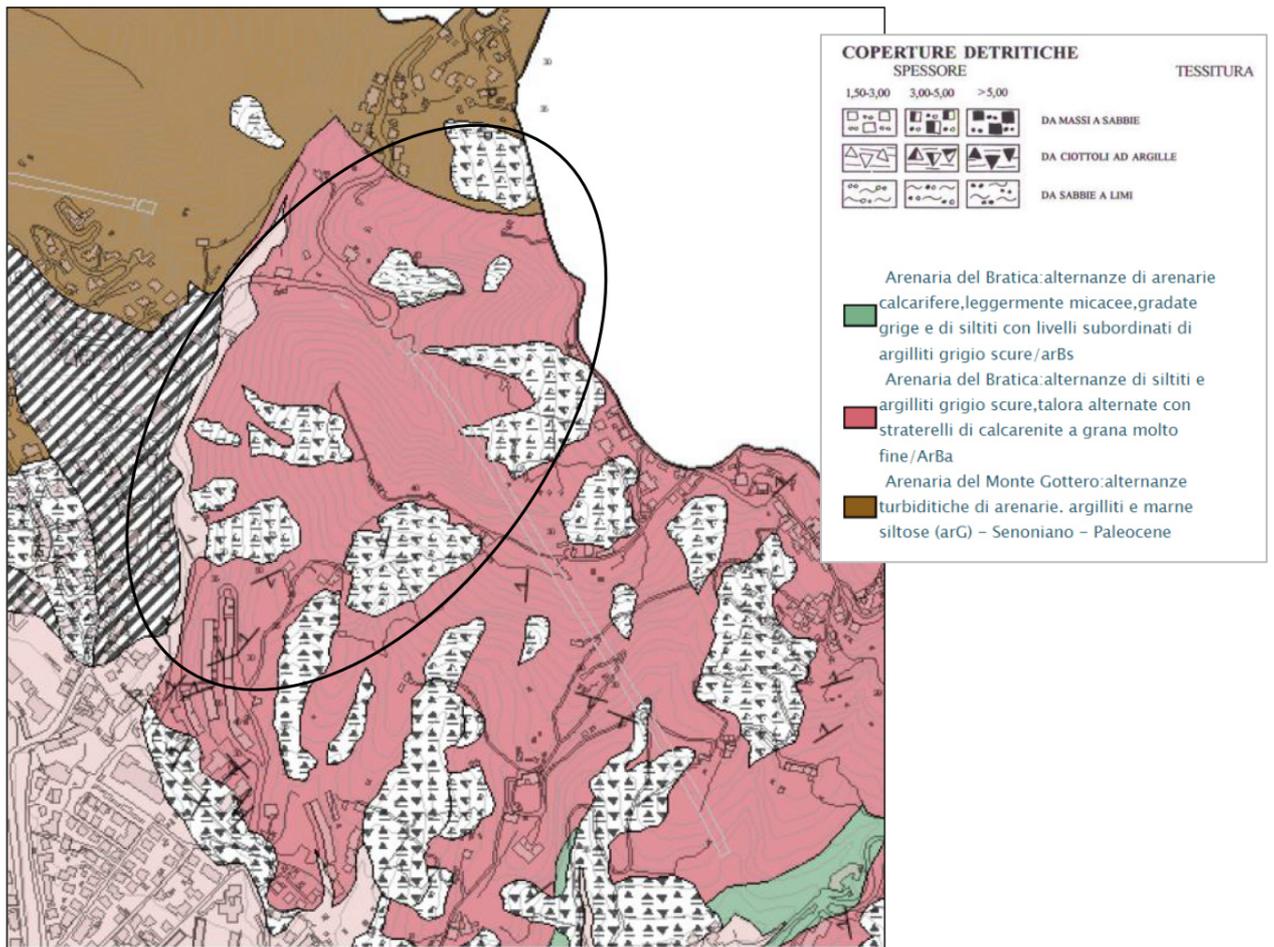


Figura 3: Carta geologica (PUC La Spezia [15])

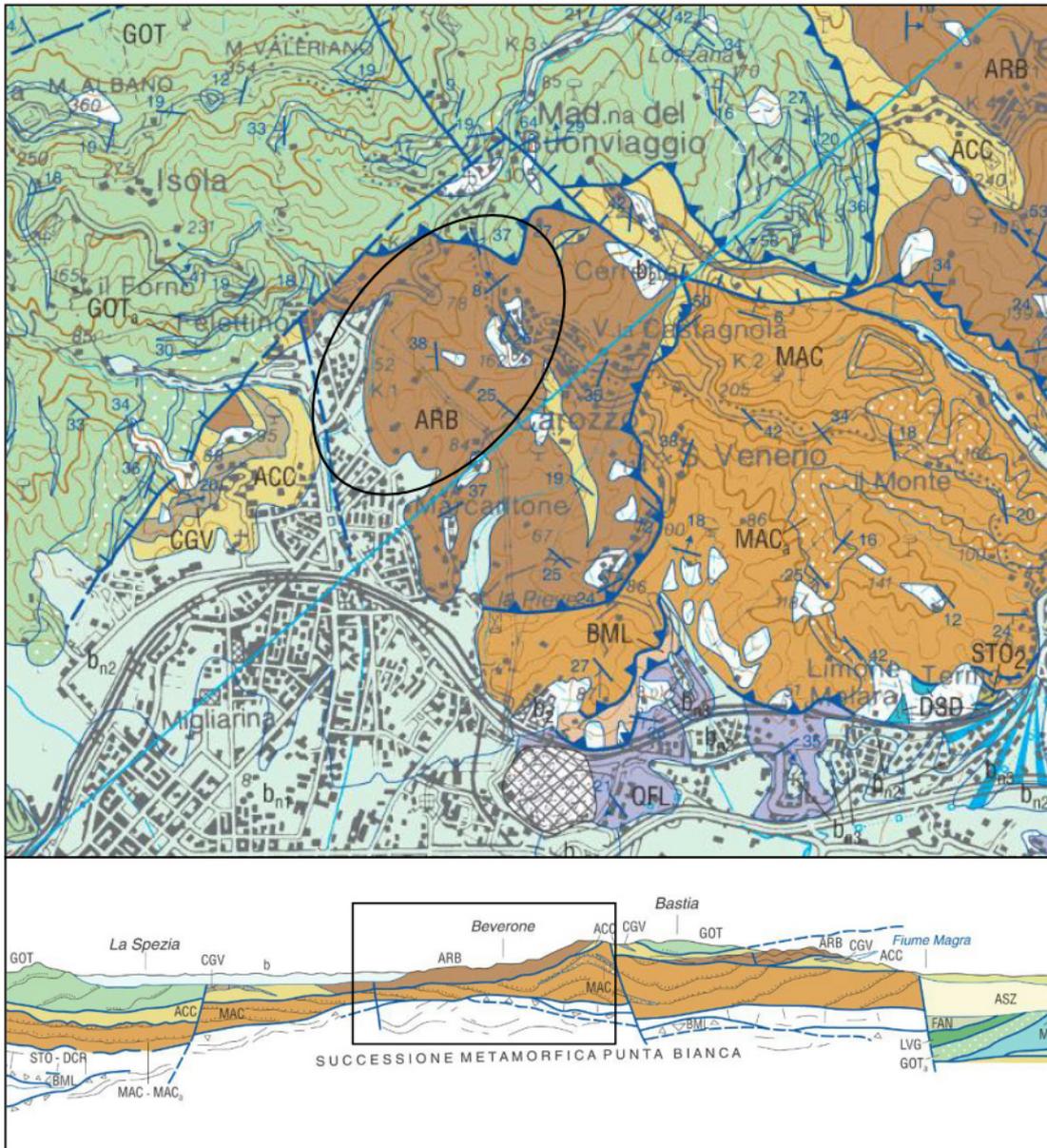


Figura 4: Carta geologica (Abbate et al., 2005 [17]).

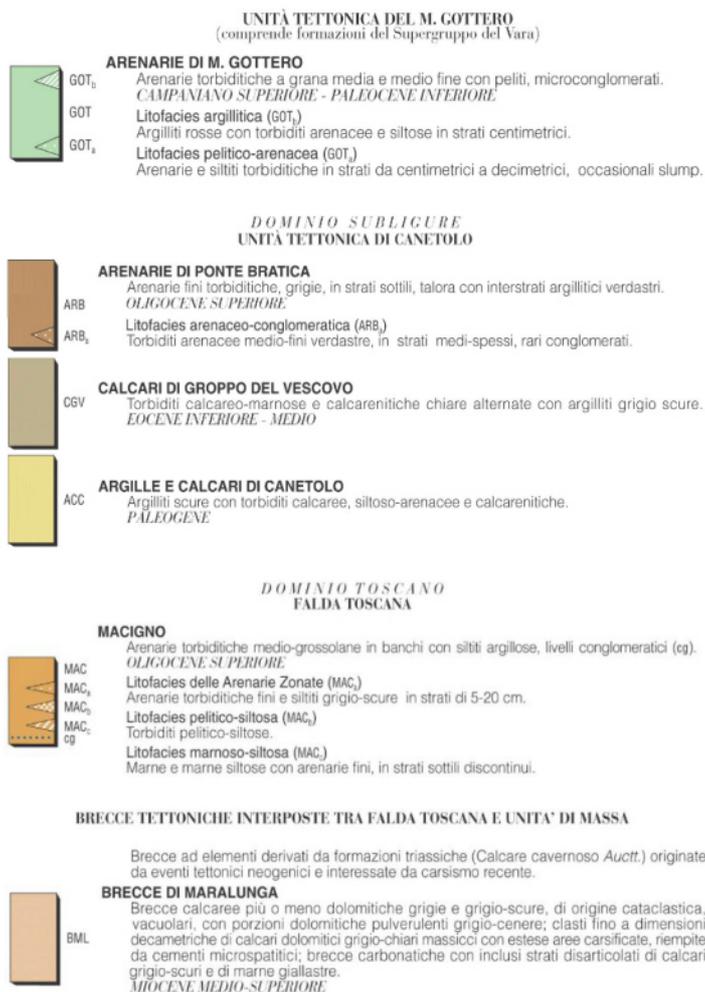


Figura 5: Carta geologica (Abbate et al., 2005) Legenda.

2.3 Modello geologico locale

Il modello geologico è ricostruito sulla base dei dati rilevati ed in continuità con l'adiacente modello geologico del versante di Carozzo, il quale dispone di dati molto dettagliati grazie alle campagne di indagini svolte e al quale si rimanda per eventuali dettagli non presenti in questo settore. Tale modello prevede l'individuazione di due unità tettoniche principali, denominate **Unità Bratica s.l. e Unità Canetolo** entrambe di pertinenza delle Unità Subliguri.

L'Unità Canetolo è rappresentata dalle Argille e Calcari di Canetolo (ACC), sottoforma di argilliti foliate molto deformate in cui sono immersi sporadici livelli lentiformi di calcilutiti, e al tetto delle quali si ritrova localmente una lente di Calcari di Groppo del Vescovo, invece rappresentati da calcari e calcari marnosi chiari e biancastri separati da livelli argillitici.

L'Unità Bratica s.l. è a sua volta suddivisa in tre sub-unità, separate da contatti tettonizzati, che riflettono una stratigrafia locale composta, dal basso verso l'alto, da uB1, uB2 e uB3.

- L'unità basale uB1 si manifesta attraverso calcari, calcari marnosi, marne siltose, siltiti e argilliti, spesso micacee e con frequenti tracce di bioturbazione.
- L'unità uB2 si presenta invece sottoforma di argilliti e siltiti subordinate, con intercalazioni più carbonatiche sottoforma di strati calcarei.
- L'unità più alta uB3 affiora sottoforma di siltiti, argilliti e arenarie fini, raramente anche a granulometria medio-grossolana, in strati da centimetrici a decimetrici. L'Unità Bratica s.l. passa alla sottostante Unità Canetolo attraverso un contatto tettonico sottrattivo che comporta elisione tettonica e deformazione cataclastica per diversi metri di spessore.

Nell'area rilevata in questo lavoro si rinviene inoltre, in posizione marginale, l'Unità del Monte Gottero, rappresentata dalle Arenarie del M. Gottero, che qui viene direttamente a contatto con le Unità Subliguri sottostanti tramite un contatto tettonico a scala regionale.

2.4 Considerazioni particolari sulla galleria Felettino I

Il modello geologico ricostruito in questo studio descrive un edificio strutturale costituito dall'Unità Bratica s.l. qui rappresentata prevalentemente delle sub-unità uB1 e uB3, con uB2 che si intercala tra le 2 unità procedendo verso est, completando la stratigrafia locale rinvenuta nell'area di Carozzo. Al di sotto dell'unità Bratica s.l., separate da un contatto tettonico a cui si associa una forte tettonizzazione dei litotipi coinvolti, si ritrovano le Argille e Calcari di Canetolo, per lo meno nella porzione più a nord-est, mentre procedendo verso sud-ovest l'elisione tettonica potrebbe aver completamente laminato l'unità di Canetolo sottostante.

Nell'area rilevata si riscontra un generale assetto monoclinale immergente verso sud-ovest associato a piegamenti ed una parziale immersione meno marcata verso nord-ovest. Questo fa sì che nell'area di studio in superficie affiori quasi esclusivamente l'unità uB3, mentre in profondità troviamo le unità sottostanti, uB2 e uB1. Quest'ultima infatti affiora nei pressi dell'imbocco nord della galleria e continua verosimilmente a intercettare il tracciato nell'area di studio; questo si può dedurre sulla base di considerazioni sulla posizione e sullo spessore di questa unità determinati dalle indagini e dagli studi più approfonditi effettuati sul versante di Carozzo, oltre che dalle descrizioni dei fronti di scavo, che trovano riscontro con i dati dei numerosi sondaggi geognostici.

I fronti di scavo inoltre spesso riportano la presenza di porzioni caotiche, slump e deformazioni sinsedimentarie che si possono ricollegare all'attività tettonica sin-deposizionale durante la sedimentazione delle Arenarie del Bratica, come documentato nei luoghi tipici (Val Bratica) e come riconosciuto anche in alcuni sondaggi nel versante di Carozzo.

Nel settore rilevato si riscontra inoltre la presenza della terminazione di una faglia subparallela al tracciato, che quindi si manifesta più che altro attraverso la sua zona di danneggiamento terminale (process zone), ossia come un trend diffuso di fratturazione, con fratture coniugate a direzione prevalentemente appenninica, senza una vera e propria localizzazione della deformazione come si avrebbe al nucleo della faglia. Nei fronti di scavo si fa infatti riferimento a possibili elementi attribuibili

a faglie che dalla documentazione fotografica possono essere attribuibili a strutture immergenti a SO e direzione subparallela al tracciato. Tuttavia, la natura da argillitica a calcareo-marnosa, spesso molto alterata, con deformazioni sia sinsedimentarie che di sovrapposizione tettonica, fanno sì che il comportamento dell'ammasso roccioso non sia sempre quello di un ammasso "discontinuo" rigido dominato dall'assetto e caratteristiche delle discontinuità, ma bensì un ammasso "continuo" che nei casi più estremi assume un comportamento plastico.

Questa variabilità è intrinseca all'unità uB1 e si amplifica se in presenza d'acqua per alterazione delle porzioni più siltitiche e argillitiche e fillosilatiche in generale all'interno delle marne, che facilitano il disfacimento e plasticizzazione della roccia lungo i piani di clivaggio.

Ne consegue che i rilievi geomeccanici effettuati sugli affioramenti, necessariamente meglio esposti, riflettano la componente a competenza maggiore dell'ammasso roccioso, mentre da quanto risulta dai sondaggi geognostici e dalle esperienze lungo i fronti di scavo, occorrerà considerare cautelativamente dei valori di resistenza e deformazione più scadenti.

Non disponendo di indagini profonde non si può definire la profondità delle brecce tettoniche individuate nei sondaggi di Carozzo; tuttavia, sulla base della debole immersione dell'edificio strutturale verso nord-ovest, si può ragionevolmente stimare la loro presenza a profondità maggiori della quota del tracciato; fermo restando la possibilità di intercettare zone di taglio di minore importanza legate alla generale tettonizzazione che spesso caratterizza i litotipi della zona.

Si nota come, rispetto al Progetto Esecutivo, oltre alla diversa attribuzione formazionale lì associata alle Argille e calcari di Canetolo e la limitatezza areale dei rilevamenti svolti, il modello contava di numerose faglie ad alto angolo, di cui una a cinematica apparentemente inversa nei pressi dell'imbocco nord, condirezioni trasversali rispetto al tracciato, che tuttavia non trovano riscontro né sul terreno, né dal punto di vista morfostrutturale locale [14].

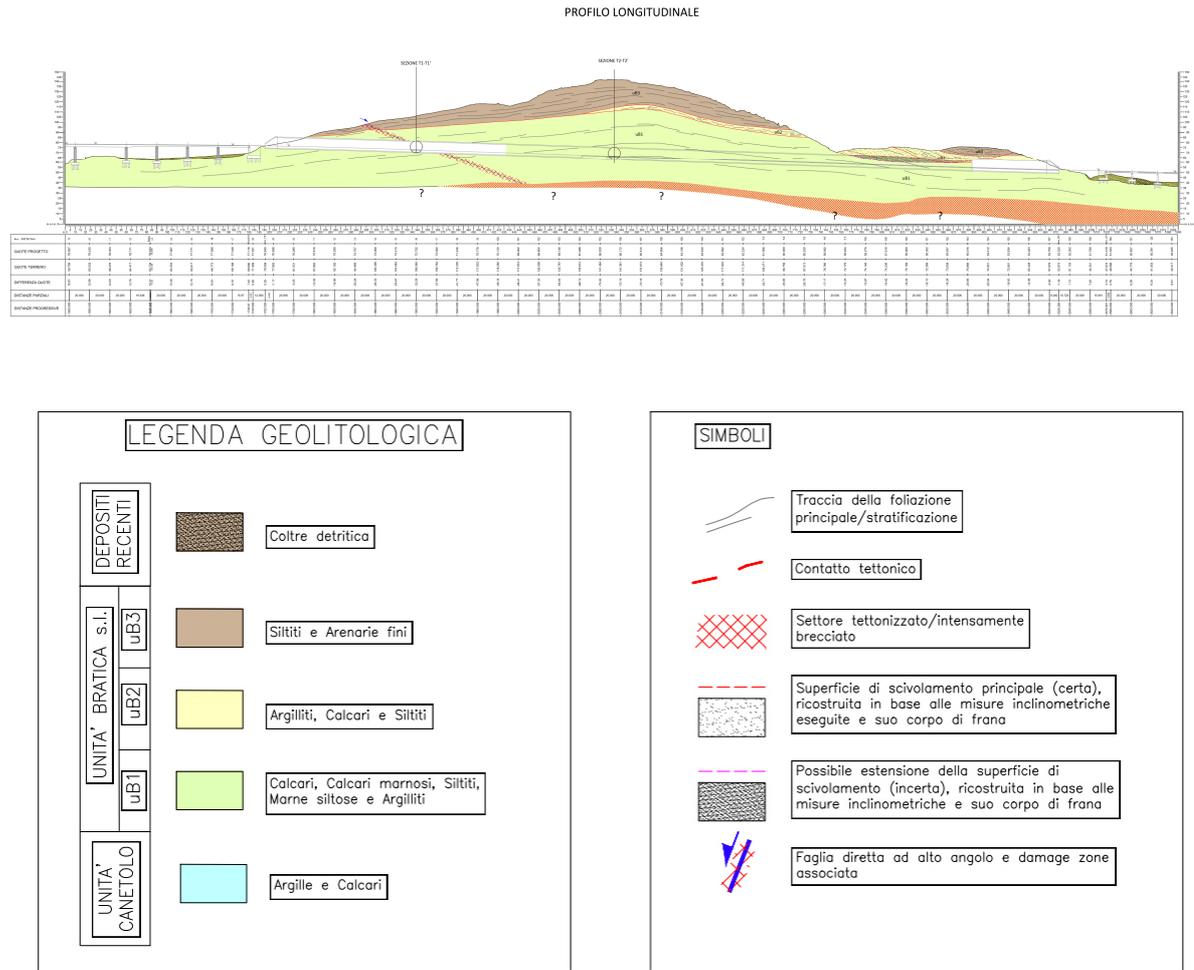


Figura 6: Profilo geologico della galleria e legenda delle formazioni

3. INDAGINI GEOGNOSTICHE PREGRESSE

3.1 Sondaggi

Lungo il tracciato della galleria "Felettino I" sono stati eseguiti i seguenti sondaggi:

- Campagna indagini 2000-2001 : n. 4 sondaggi geognostici
- Campagna indagini 2007 : n. 7 sondaggi geognostici
- Campagna indagini 2010 : n. 4 sondaggi geognostici

Per i dettagli riguardo le campagne di indagine si rimanda all'elaborato "STUDI. INDAGINI E RELAZIONI SPECIALISTICHE- GEOTECNICA - RELAZIONE GEOTECNICA" (T00GE00GETRE01_A). Nella tabella seguente vengono riassunti sondaggi effettuati e le principali caratteristiche.

Sondaggio	Lunghezza (m)	Note	Attrezzatura
S17	20	Carotaggio continuo	_____
S18	90	Carotaggio continuo	_____
S19	25	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande - Cella a 25 m
S20bis	25,40	Carotaggio continuo	Tubo inclinometrico
Sondaggio	Lunghezza (m)	Note	Attrezzatura
I6	50	Distruzione nucleo	Inclinometro
I7	30	Distruzione nucleo	Inclinometro
I8	52	Distruzione nucleo	Inclinometro
I9	50	Distruzione nucleo	Inclinometro
PZ6	50	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande – Cella a 50 m
PZ7	30	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande – Cella a 30 m
PZ8	30	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande – Cella a 30 m
Sondaggio	Lunghezza (m)	Note	Attrezzatura
206	40	Carotaggio continuo	-
207	20	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande – cella a 20 m
301	30	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande – cella a 30 m
303	30	Carotaggio continuo	Piezometro Casagrande – cella a 30 m

Tabella 1: Parametri assunti per la definizione dei parametri di resistenza e deformabilità secondo il criterio di HB e loro variabilità. I valori tra parentesi

4. CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

4.1 Caratteristiche di resistenza e deformabilità

Per la valutazione delle caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso in esame, si è fatto riferimento alla curva intrinseca del materiale ricostruita secondo il modello proposto da E. Hoek e E.T. Brown, con le correlazioni proposte da Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). Il parametro base per tale caratterizzazione è il GSI (Geological Strength Index), legato al valore di RMR dalla relazione:

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5$$

Il criterio suddetto è espresso analiticamente dalle correlazioni:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$\frac{m_b}{m_i} = \exp \left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14D} \right)$$

$$s = \exp \left(\frac{\text{GSI} - 100}{9 - 3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{\text{GSI}}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

dove:

σ'_1, σ'_3 tensioni principali efficaci a rottura, rispettivamente massima e minima

σ_{ci} resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta, non interessata cioè da macroscopiche discontinuità

m_i parametro caratteristico del tipo di roccia

m_b valore ridotto della costante del materiale m_i , in funzione della qualità dell'ammasso roccioso (GSI) e del fattore di disturbo (D)

D fattore di disturbo, variabile tra 0 e 1, funzione delle modalità di abbattimento del materiale e delle modifiche allo stato tensionale indotte dalle operazioni di scavo

s, a parametri dipendenti dalla qualità dell'ammasso roccioso

L'eventuale derivazione dei parametri di resistenza secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb (angolo di attrito e coesione) si può ricavare, linearizzando nel campo di pressioni di interesse l'involuppo non lineare di Hoek & Brown secondo le seguenti espressioni:

$$\varphi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + \frac{(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})}{(1+a)(2+a)}}}$$

dove:

$$\sigma'_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma_{ci}$$

Il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, per un dato valore di tensione normale σ , si ricava quindi sostituendo i suddetti valori di c' e ϕ' nella equazione:

$$\tau = c' + \sigma \tan \phi'$$

Per la valutazione delle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso, per le classi geomeccaniche in esame, si è fatto riferimento alla espressione di seguito riportata, nella quale il modulo di deformazione E_{rm} si ricava in funzione dell'indice GSI e del modulo della roccia intatta (Hoek and Diederichs, 2006).

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{\left| \frac{60 + 15D - GSI}{11} \right|}} \right)$$

dove:

E_i Modulo elastico della roccia intatta

In assenza di determinazioni dirette, una stima del valore del modulo elastico della roccia intatta può essere ricavata da:

$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$ Dove: MR fattore di riduzione funzione del tipo di roccia

4.2 Parametri di base

L'analisi è stata condotta attraverso un'analisi parametrica che ha considerato i seguenti elementi:

- Caratteristiche tipiche delle formazioni descritte nel modello geologico ([14])
- Risultanze dei tratti di galleria già scavati (rilievi al fronte, prove sul materiale scavato)
- Coerenza con il comportamento dello scavo per i tratti già scavati ovvero confronto con le convergenze misurate ([18]).

I parametri di base del criterio, illustrati nel paragrafo precedente, assegnati all'ammasso attraversato dalla galleria sono riportati nella seguente tabella con la variabilità considerata. Questi parametri sono da intendersi come rappresentativi per le analisi e le verifiche delle stabilità degli scavi e dei rivestimenti attraverso la linearizzazione del criterio di HB, sono quindi stati scelti in modo conservativo e considerandone l'influenza sui parametri di calcolo.

In **Tabella 1** sono riassunti i parametri utili alla definizione delle caratteristiche dell'ammasso e la variabilità ad essi associata. Il valore tra parentesi è un minimo associato ai valori massimi di convergenza riscontrato nel tratto già scavato a basse coperture.

Parametro	Simbolo	Variabilità	Descrizione
(-)	(-)	(-)	(-)
Resistenza a compressione monoassiale	σ_{ci}	70-15 (10) MPa	Intervallo tipico per formazioni analoghe a quelle interessate ed evidenze del tratto scavato
Geological strength index	GSI	35	In base alle risultanze dei sondaggi e dei rilievi al fronte del tratto scavato
Parameter m_i (HB criterion)	m_i	5	Valore tipico per formazioni analoghe a quelle attraversate
Modulo di deformabilità della roccia intatta	E_i	15000-4000 (2000) MPa	Intervallo tipico per formazioni analoghe a quelle interessate
Disturbance factor	D	0.5	Valore in accordo con i metodi utilizzati
Copertura	c	55 m	Copertura rappresentativa del cavo nel tratto da realizzare

Tabella 2: Parametri assunti per la definizione dei parametri di resistenza e deformabilità secondo il criterio di HB e loro variabilità. I valori tra parentesi è un minimo associato ai valori massimi di convergenza riscontrato nel tratto già scavato a basse coperture

4.3 Risultati analisi parametrica

Nell tabella di seguito sono riportati i casi di analisi individuati per il tratto di galleria naturale ancora da scavare e la corrispondente linearizzazione del criterio alla copertura rappresentativa definita.

In **Tabella 4** è invece riportata una previsione del comportamento deformativo secondo il criterio di Hoek et al. (2002) [12]. L'approccio, sebbene di carattere speditivo è utile per circostanziare le condizioni di scavo ed è propedeutico alle analisi di dettaglio sviluppate della relazione di calcolo. In particolare (vedi **Figura 7**), si nota come l'intervallo dei parametri calcolati definisce una condizione che si attesta a condizioni di deformazioni moderate senza problemi per i supporti per la metà migliore dell'intervallo, mentre per la parte peggiore sono previste condizioni di squeezing moderato fino, nei casi peggiori al limite della zona di squeezing severo (confine zona B e C). Questa analisi è in accordo con quanto riscontrato nella porzione di galleria già scavata in cui sono state osservate convergenze dell'ordine dell'1-2%.

Case	Cover	γ	σ_{ci}	m_i	D	E_i	GSI	m_b	s	a	E_{rm}	σ_{cm1}	c	φ
[-]	[m]	[kN/m ³]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
1	55.0	23.0	70.0	5.0	0.5	15000	35.0	0.226	0.0002	0.516	857	0.80	0.223	40
2	55.0	23.0	65.0	5.0	0.5	14000	35.0	0.226	0.0002	0.516	800	0.74	0.214	39
3	55.0	23.0	60.0	5.0	0.5	13000	35.0	0.226	0.0002	0.516	743	0.69	0.205	39
4	55.0	23.0	55.0	5.0	0.5	12000	35.0	0.226	0.0002	0.516	686	0.63	0.196	38
5	55.0	23.0	50.0	5.0	0.5	11000	35.0	0.226	0.0002	0.516	629	0.57	0.186	37
6	55.0	23.0	45.0	5.0	0.5	10000	35.0	0.226	0.0002	0.516	571	0.51	0.176	36
7	55.0	23.0	40.0	5.0	0.5	9000	35.0	0.226	0.0002	0.516	514	0.46	0.166	36
8	55.0	23.0	35.0	5.0	0.5	8000	35.0	0.226	0.0002	0.516	457	0.40	0.156	35
9	55.0	23.0	30.0	5.0	0.5	7000	35.0	0.226	0.0002	0.516	400	0.34	0.145	33
10	55.0	23.0	25.0	5.0	0.5	6000	35.0	0.226	0.0002	0.516	343	0.29	0.133	32
11	55.0	23.0	20.0	5.0	0.5	5000	35.0	0.226	0.0002	0.516	286	0.23	0.120	30
12	55.0	23.0	15.0	5.0	0.5	4000	35.0	0.226	0.0002	0.516	229	0.17	0.106	28
13*	36.0	20.0	10.0	5.0	0.0	2000	20.0	0.287	0.0001	0.544	91	0.08	0.057	30

Tabella 3: Sezioni tipo di avanzamento - Sintesi dei tratti di applicazione delle sezioni tipo.

Case	Cover	E_m	c	φ	σ_{cm}	σ_{cm} / p_o	$\varepsilon = 0.2(\sigma_{cm}/p_o)-2$
[-]	[m]	[MPa]	[MPa]	[°]	(kPa)	(-)	(-)
1	55.0	857	0.223	40	950	0.75	0.4
2	55.0	800	0.214	39	901	0.71	0.4
3	55.0	743	0.205	39	851	0.67	0.4
4	55.0	686	0.196	38	801	0.63	0.5
5	55.0	629	0.186	37	750	0.59	0.6
6	55.0	571	0.176	36	699	0.55	0.7
7	55.0	514	0.166	36	646	0.51	0.8
8	55.0	457	0.156	35	593	0.47	0.9
9	55.0	400	0.145	33	538	0.42	1.1
10	55.0	343	0.133	32	480	0.38	1.4
11	55.0	286	0.120	30	420	0.33	1.8
12	55.0	229	0.106	28	355	0.28	2.5
13*	36.0	91	0.057	30	196	0.27	2.7

Tabella 4: Deformazione attesa per i vari scenari di analisi secondo l'approccio di Hoek et al. (2002) [12]

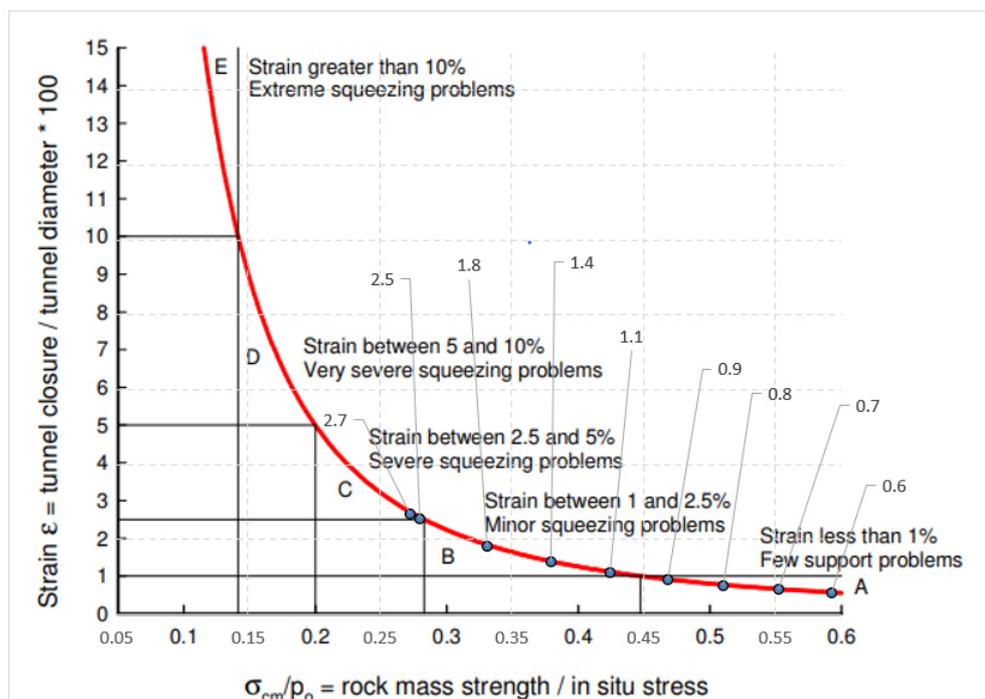


Figura 7: Casi di analisi studiati in relazione alla relazione alla curva resistenza dell'ammasso proposta da Hoek et al. (2002) [12]

Le curve relative a ciascuna delle classi geomeccaniche esaminate, rappresentative dei domini di rottura sui piani σ'_1 - σ'_3 e τ - σ , ricavate sulla base delle ipotesi precedentemente descritte, vengono riportate nelle figure che seguono.

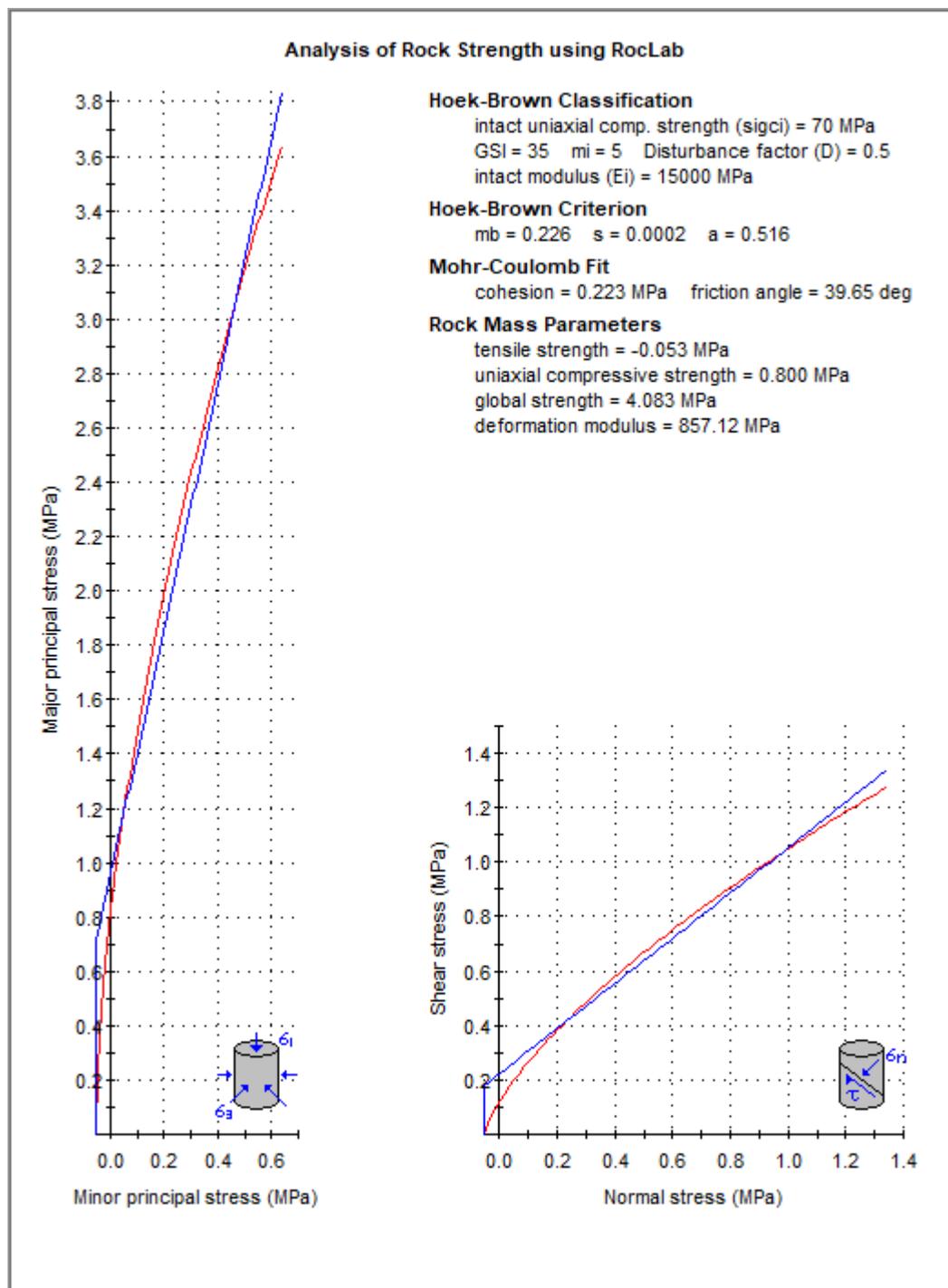


Figura 8: Criterio di HB per il caso di analisi 1.

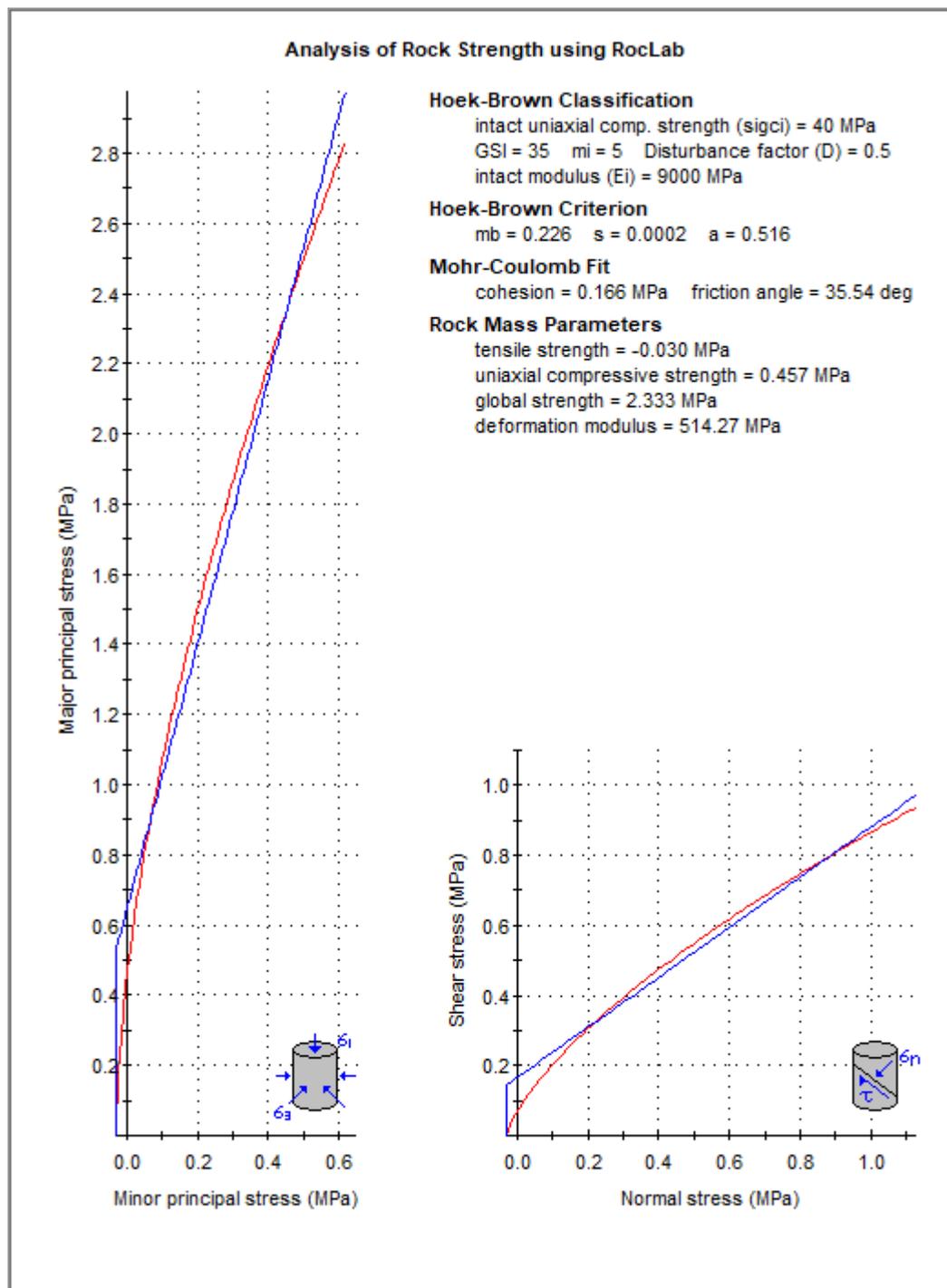


Figura 9: Criterio di HB per il caso di analisi 7.

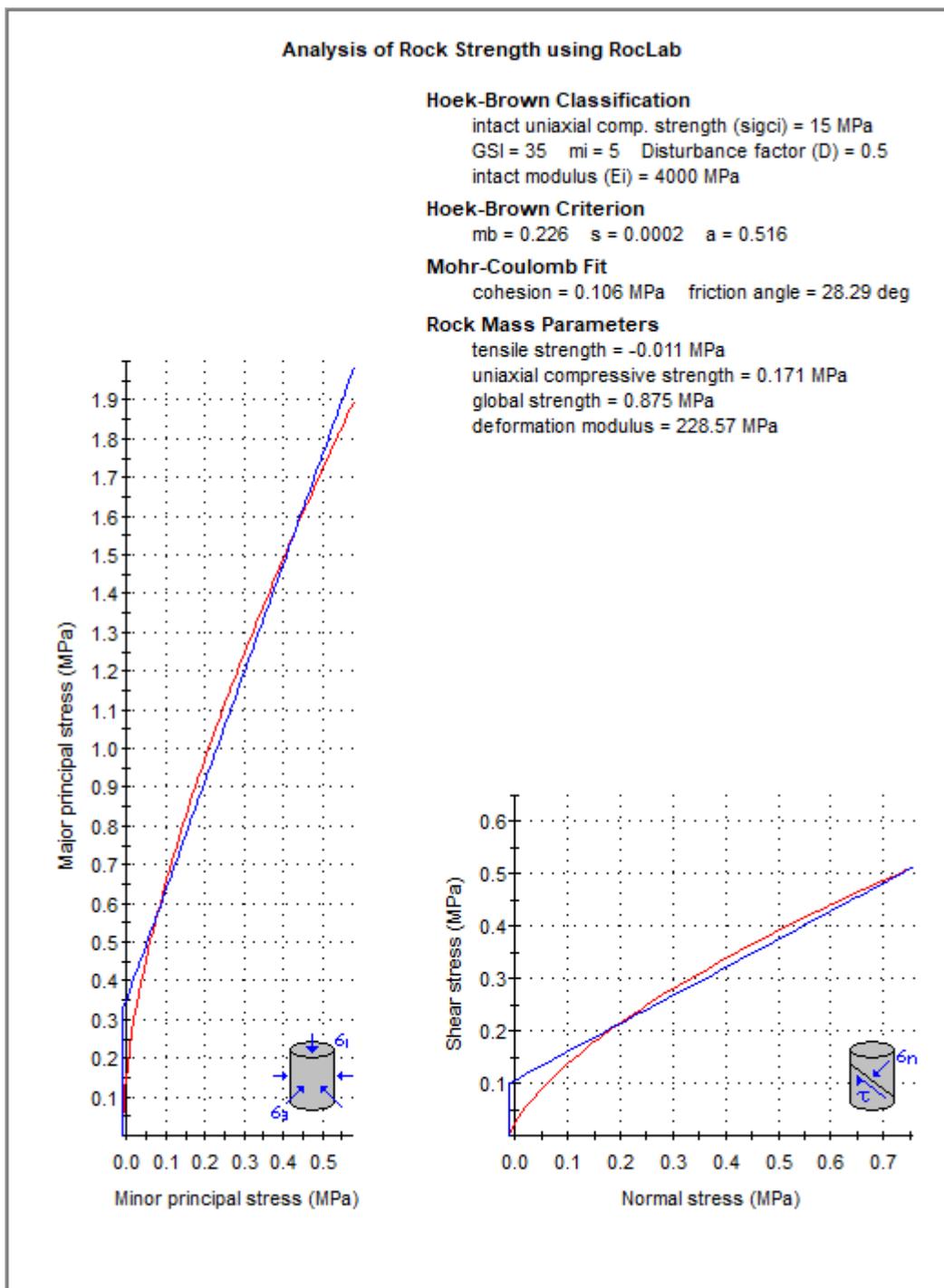


Figura 10: Criterio di HB per il caso di analisi 12.

ALLEGATO A

Rilievi geomeccanici di superficie

Nel seguito sono riportati i risultati dei rilievi geomeccanici di superficie

Allo scopo di caratterizzare gli ammassi rocciosi affioranti nell'area, sono stati svolti due rilievi geomeccanici, indicati come ST1 e ST2.

Il lavoro si è svolto attraverso una serie di indagini per definire i parametri e le caratteristiche geomeccaniche che condizionano il comportamento degli ammassi rocciosi. Le fasi di studio sono state le seguenti:

- Determinazione della resistenza della roccia: per determinare la resistenza a compressione semplice della roccia intatta, sono stati prelevati dei campioni presso le stazioni di misura e sono state svolte n° 2 prove di compressione in laboratorio (report prove in allegato alla relazione).
- Caratterizzazione delle discontinuità: sono state analizzate le proprietà fondamentali delle discontinuità definendo i seguenti parametri:
 - Sistemi di discontinuità
 - Orientazione
 - Spaziatura
 - Apertura
 - Riempimento
 - Persistenza
 - Scabrezza
 - Filtrazione d'acqua

I parametri ottenuti sono stati utilizzati nella classificazione *Rock Mass Rating* di Bieniawski (1989) allo scopo di calcolare l'indice di qualità BRMR (Basic Rock Mass Rating) che si basa sulla determinazione di questi cinque parametri:

- A1 Resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta
- A2 RQD - Rock Quality Designation
- A3 Spaziatura delle discontinuità
- A4 Condizioni delle discontinuità
- A5 Condizioni idrauliche

Questi parametri vengono associati a dei punteggi secondo la tabella seguente.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS

PARAMETER		Range of values // ratings								
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compr. strength is preferred			
		Uniaxial compressive strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa	
		RATING	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core quality RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%			
		RATING	20	17	13	8	5			
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
		RATING	20	15	10	8	5			
4	Condition of discontinuities	Length, persistence	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
			Rating	6	4	2	1	0		
		Separation	none	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
			Rating	6	5	4	1	0		
		Roughness	very rough	rough	slightly rough	smooth	slickensided			
			Rating	6	5	3	1	0		
		Infilling (gouge)	none	Hard filling		Soft filling				
	Rating	6	4	2	2	0				
	Weathering	unweathered	slightly w.	moderately w.	highly w.	decomposed				
	Rating	6	5	3	1	0				
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	none	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25 - 125 litres/min	> 125 litres /min			
			Rating	6	4	2	0			
		p_w / σ_1	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5			
			Rating	6	4	2	0			
	General conditions	completely dry	damp	wet	dripping	flowing				
	RATING	15	10	7	4	0				

p_w = joint water pressure; σ_1 = major principal stress

B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS

		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
RATINGS	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

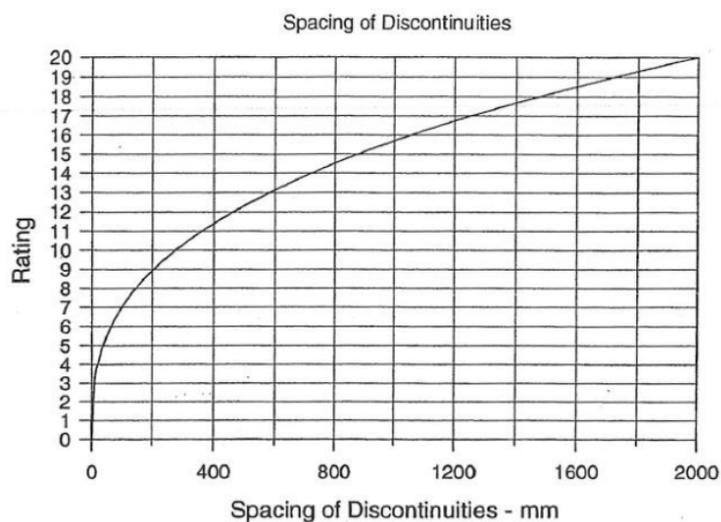
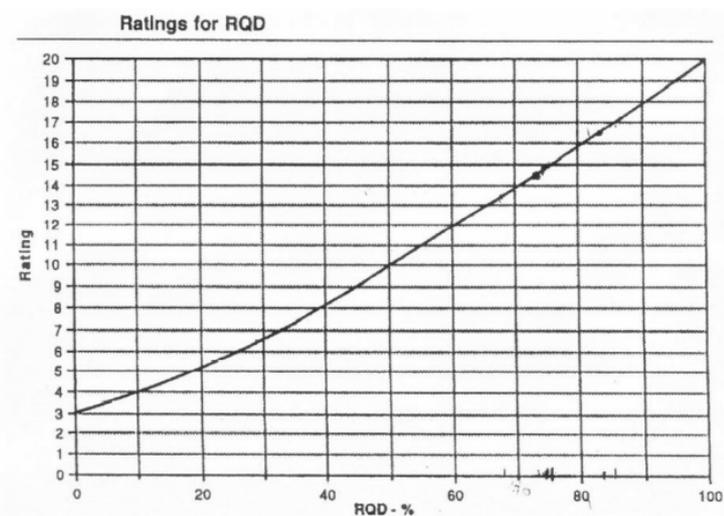
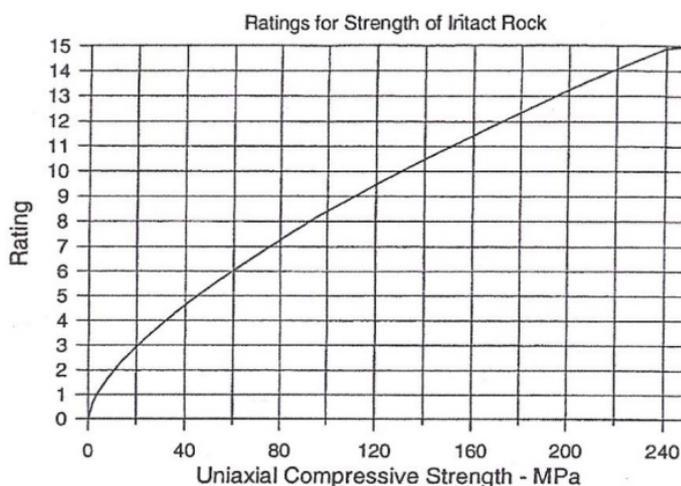
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR

D. MEANING OF ROCK MASS CLASSES

Class No.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	10 years for 15 m span	6 months for 8 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of the rock mass	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa
Friction angle of the rock mass	< 45°	35 - 45°	25 - 35°	15 - 25°	< 15°

Per un'attribuzione più precisa, il punteggio per gli indici A1 (Resistenza della roccia intatta), A2 (RQD) e A3 (Spaziatura) sono stati ottenuti tramite gli appositi grafici proposti dall'autore.



La stazione ST1 è rappresentativa dell'unità uB3. Nell'affioramento si distinguono quattro set di discontinuità:

- S0 (giunti di stratificazione)
- S1, S2, S3 (fratture)

La prevalente direzione NO-SE della fratturazione trova buon riscontro con le generazioni faglie a direzione appenninica presenti nella zona.

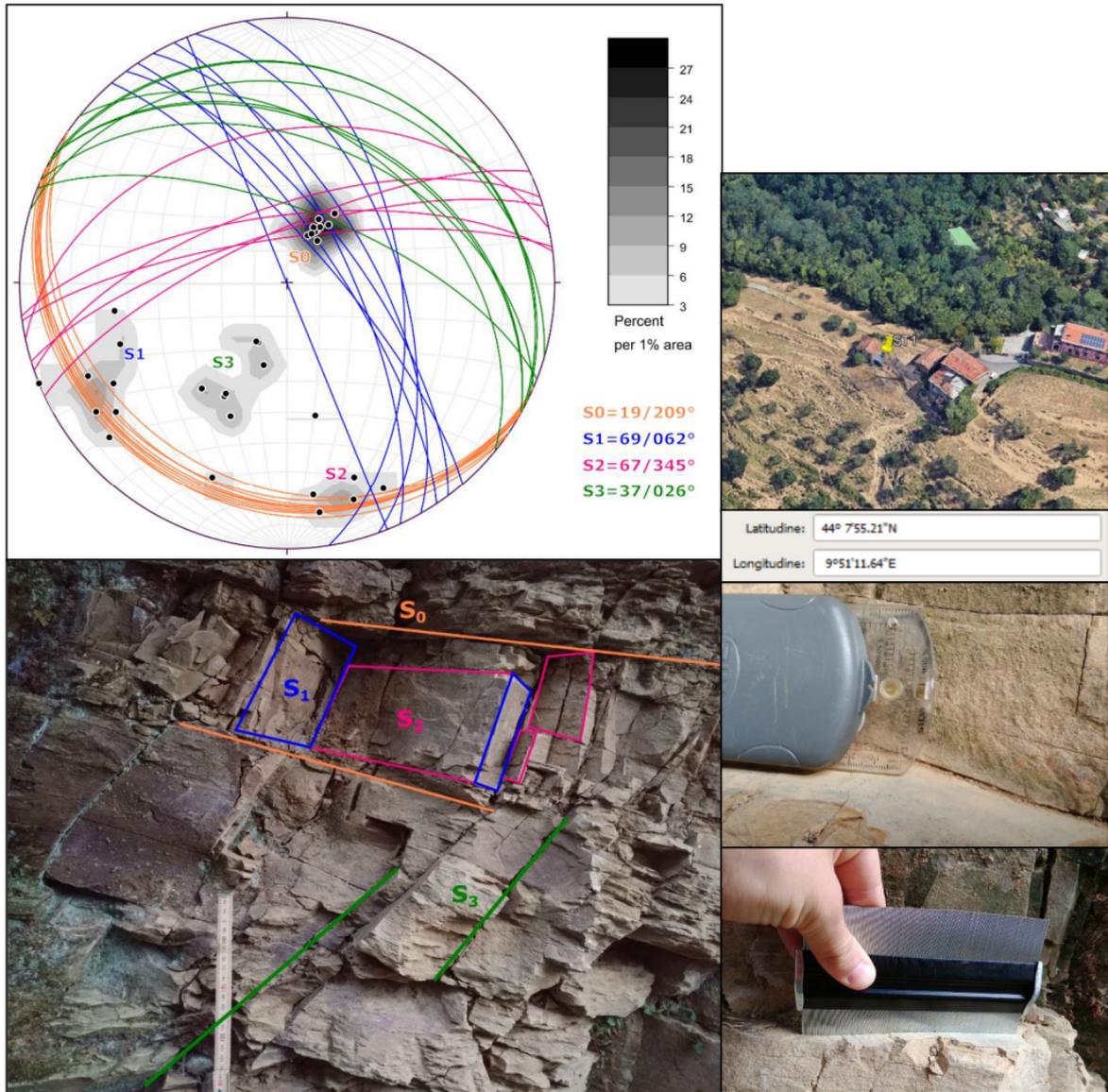


Figura 35. Proiezione stereografica delle famiglie di discontinuità e documentazione fotografica del rilievo della stazione geomeccanica ST1.

Le prove di laboratorio sulla roccia intatta riportano un valore di resistenza a compressione semplice di 16,4 Mpa, molto scarso trattandosi di una silite molto alterata e decalcificata. Il valore di *Rock Quality Designation* (RQD) risulta essere prossimo a zero in più direzioni (“*molto scarsa*”) e le condizioni idrauliche rilevate erano umide. Le discontinuità presentano spesso un riempimento limoso, prodotto dall’alterazione della roccia stessa.

Elaborando i dati per ogni set di discontinuità, si ottengono i punteggi che si associano all’intero ammasso roccioso, per ogni indice della classificazione di Benjawsky. Nella tabella seguente si elencano i punteggi assegnati e la variabilità dei parametri nei vari set di discontinuità.

ST1 - uB3	S0	punteggio	S1	punteggio	S2	punteggio	S3	punteggio		punteggio medio
Resistenza roccia intatta (Mpa)									16,4	2,5
RQD									0%	3,0
Spaziatura (mm)	54,5	6	58,3	6	74,04	6	67	6	63,46	6,0
Persistenza (cm)	>2000	0	23,8	6	20	6	37,2	6		4,5
Apertura (mm)	1,1	1	1,7	1	1,2	1	1,4	1		1,0
Riempimento (mm)	1,1	2	1,1	2	0,6	2	0,7	2		2,0
Rugosità	liscia	1	legg. rug.	3	legg. rug.	3	legg. rug.	3		2,5
Alterazione	m. alterate	1		1,0						
Condizioni idrauliche	umide	10	umide	10	umide	10	umide	10	umide	10,0
									RMRb = 33	"Roccia debole"

Dai punteggi dei vari indici si ottiene un BRMR di 33, che ricade nella **classe IV- roccia debole**.

Dal valore di BRMR è possibile ricavare i parametri di resistenza e deformabilità dell’ammasso roccioso (coesione, angolo di attrito interno, modulo di deformabilità):

$$c = 5 \cdot BRMR = 165 \text{ KPa}$$

$$\varphi = 5 + \frac{BRMR}{2} = 21,5^\circ$$

$$E_d = 10^{(BRMR-10)/40} = 3,76 \text{ GPa} \text{ (Serafim \& Pereira (1983), per BRMR < 50)}$$

Dalla massa e dimensioni dei provini esaminati in laboratorio si ottiene inoltre:

$$\text{peso di volume } \gamma = 18,28 \text{ kN/m}^3$$

La stazione ST2 è rappresentativa dell'unità uB1 ed ubicata nei pressi dell'imbocco sud. Nell'affioramento si distinguono tre set di discontinuità:

- S0 (giunti di stratificazione)
- S1, S2 (fratture)

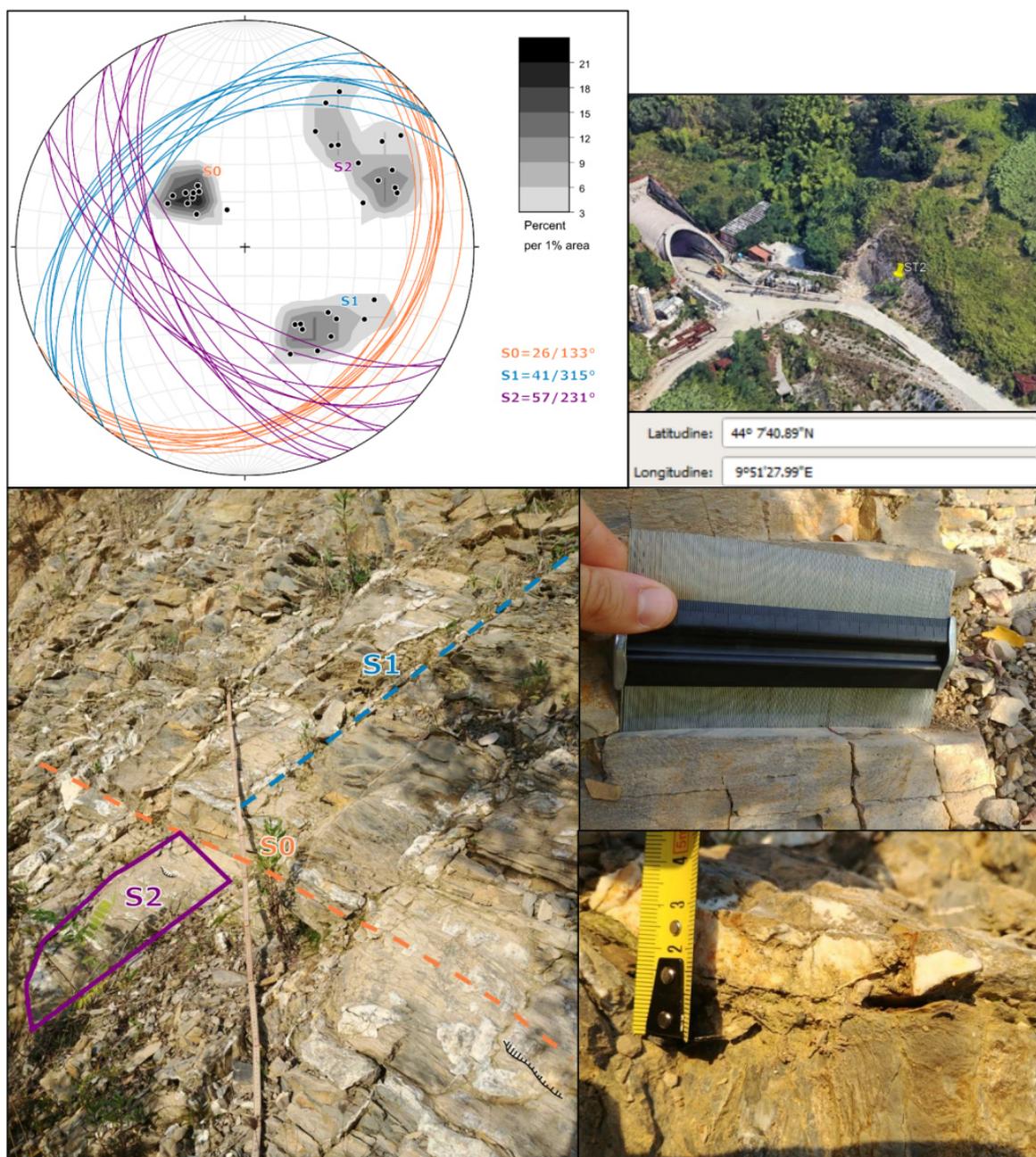


Figura 36. Proiezione stereografica delle famiglie di discontinuità e documentazione fotografica del rilievo della stazione geomeccanica ST2.

Le prove di laboratorio sulla roccia intatta riportano un valore di resistenza a compressione semplice di 103,8 Mpa. Il valore di *Rock Quality Designation* (RQD) risulta pari a 32% (“scarsa”) e le condizioni idrauliche rilevate erano umide. Le discontinuità presentano spesso un riempimento di calcite, sottoforma di vene di spessore centimetrico, talvolta circondate da riempimento limoso formatosi per alterazione della porzione siltitica della roccia e dissoluzione della porzione carbonatica.

Elaborando i dati per ogni set di discontinuità, si ottengono i punteggi che si associano all’intero ammasso roccioso, per ogni indice della classificazione di Benjowsky. Nella tabella seguente si elencano i punteggi assegnati e la variabilità dei parametri nei vari set di discontinuità.

ST2 - uB1	S0	punteggio	S1	punteggio	S2	punteggio		punteggio medio
Resistenza roccia intatta (Mpa)							103,8	8,5
RQD							32%	7,0
Spaziatura (mm)	71,3	6	176,7	8	141,7	7	129,9	7,0
Persistenza (cm)	>2000	0	300-1000	2	100-200	1		1,0
Apertura (mm)	1,5	1	27	0	28	0		0,3
Riempimento (mm)	1,3	2	24,4	2	25	2		2,0
Rugosità	liscia	1	legg. rug.	3	striate	0		1,3
Alterazione	legg. alter	5	legg. alter	5	legg. alter	5		5,0
Condizioni idrauliche	umide	10	umide	10	umide	10	umide	10,0
RMRb =							42	"Roccia discreta"

Dai punteggi dei vari parametri si ottiene un BRMR di **42** che ricade nella **classe III- roccia discreta**.

Dal valore di BRMR è possibile ricavare i parametri di resistenza e deformabilità dell’ammasso roccioso (coesione, angolo di attrito interno, modulo di deformabilità):

$$c = 5 \cdot BRMR = 210 \text{ KPa}$$

$$\varphi = 5 + \frac{BRMR}{2} = 26^\circ$$

$$E_d = 10^{(BRMR-10)/40} = 6,31 \text{ GPa} \text{ (Serafim \& Pereira (1983), per BRMR < 50)}$$

Dalla massa e dimensioni dei provini esaminati in laboratorio si ottiene inoltre:

$$\text{peso di volume } \gamma = 25,87 \text{ kN/m}^3$$

Effettuando la correzione per l’orientamento delle discontinuità rispetto al tracciato della galleria (prendendo in considerazione l’andamento della stratificazione) si ottiene:

$$RMR = BRMR - 5 = 37 \text{ (classe IV "roccia debole")}$$

