

**SGC Grosseto Fano (E78).  
Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) - Selci Lama (E45).  
Adeguamento a 4 corsie del tratto Le Ville - Selci Lama (E45).  
Lotto 7.**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**PG 364**

**ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI**

<p><b>IL GEOLOGO</b> <i>Dott. Geol. Salvatore Marino</i> Ordine dei geologi della Regione Lazio n. 1069</p>	<p><b>PROGETTISTI SPECIALISTICI</b> <i>Ing. Ambrogio Signorelli</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. A35111</p>	<p><b>PROGETTAZIONE ATI:</b> (Mandataria) <b>GP INGENGERIA</b> <i>GESTIONE PROGETTI INGENGERIA srl</i></p> <p>(Mandante)</p> <p>(Mandante)</p> <p>(Mandante)</p>
<p><b>COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE</b> <i>Arch. Santo Salvatore Vermiglio</i> Ordine Architetti Provincia di Reggio Calabria n. 1270</p>	<p><i>Ing. Moreno Panfili</i> Ordine Ingegneri Provincia di Perugia n. A2657</p>	<p> <b>cooprogetti</b></p> <p> <b>engeko</b></p> <p> <i>Studio di Architettura e Ingegneria Moderna</i></p>
<p><b>L'ARCHEOLOGO</b> <i>Dott.ssa Maria Grazia Liseno</i> Elenco MIBACT n. 1646</p>	<p><i>Ing. Claudio Muller</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 15754</p>	<p><b>IL PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE. (DPR207/10 ART 15 COMMA 12):</b> <i>Dott. Ing. GIORGIO GUIDUCCI</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 14035</p>
<p><b>VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO</b> <i>Ing. Michele Consumini</i></p>	<p><i>Ing. Giovanni Suraci</i> Ordine Ingegneri Provincia di RC n. A2895</p>	<p></p>
<p><b>VISTO: IL RESP. DEL PROGETTO</b> <i>Arch. Pianif. Marco Colazza</i></p>	<p><i>Ing. Giuseppe Resta</i> Ordine Ingegneri Provincia di Roma n. 20629</p>	

**OPERE D'ARTE MAGGIORI**  
Gallerie naturali – Elaborati Generali  
Relazione geotecnica delle opere in sotterraneo  
Galleria Le Ville

<b>CODICE PROGETTO</b>			<b>NOME FILE</b>		<b>REVISIONE</b>	<b>SCALA</b>
COMP.	PROGETTO	LIV. ANNO N.PROG.	T00GN00OSTRE03A			
DP	LO702G	D2110	T00GN00OSTRE03		A	-
D						
C						
B						
A	Emissione		Marzo '24	M.Morigi	A. Signorelli	G. Guiducci
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

## INDICE

<b>1.</b>	<b><u>PREMESSA.....</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b>2.</b>	<b><u>GENESI GEOLOGICA.....</u></b>	<b><u>3</u></b>
<b>3.</b>	<b><u>ANALISI CAMPAGNE GEOGNOSTICHE .....</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b>4.</b>	<b><u>CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA .....</u></b>	<b><u>6</u></b>
4.1.	ZONIZZAZIONE GEOMECCANICA: CRITERI UTILIZZATI .....	6
4.2.	MODELLO GEOMECCANICO .....	9
<b>5.</b>	<b><u>PARAMETRIZZAZIONE GEOMECCANICA DEI LITOTIPI .....</u></b>	<b><u>11</u></b>
5.1.1.	<i>Parametri di deformabilità .....</i>	12
5.2.	DOMINI GEOMECCANICI.....	13
5.2.1.	<i>UG4b (Macigno-MAC1).....</i>	18
5.2.1.	<i>UG4b_Tett (Macigno MAC1-fascia tettonizzata).....</i>	21
<b>6.</b>	<b><u>CONCLUSIONI.....</u></b>	<b><u>24</u></b>

PROGETTAZIONE ATI:

## **1. PREMESSA**

Nella presente Relazione viene descritto il “percorso progettuale” che ha portato all’identificazione delle classi geomeccaniche a comportamento omogeneo, nelle aree interessate dal Progetto Definitivo denominato “SGC Grosseto Fano (E78). Tratto Nodo di Arezzo (S. Zeno) – Selci Lama (E45), Adeguamento A 4 Corsie Del Tratto Le Ville - Selci Lama (E45), Lotto 7”.

Sono state analizzate in prima fase la quantità e la rappresentatività dei dati in ingresso e successivamente l’interpretazione di tali dati che costituisce il processo fondamentale per la determinazione delle classi di comportamento “geomeccanicamente omogeneo” per le varie tratte di scavo della galleria naturale “Le Ville”. A tal fine, sono stati considerati tutti i sondaggi che interessano la tratta della galleria naturale. I dati così ottenuti sono stati trattati poi in maniera analitica e statistica, ottenendo quindi per ogni litotipo roccioso, un range di variabilità dei parametri geomeccanici.

La galleria in oggetto sarà scavata in contesti geomeccanici ricadenti nel campo della meccanica delle rocce.

L’attribuzione di parametri geomeccanici, specifici per ogni litotipo, viene effettuata dall’introduzione di una variabilità sulla parametrizzazione geomeccanica per i vari litotipi e con l’introduzione dei Domini Geomeccanici.

I domini Geomeccanici hanno lo scopo di giustificare ed individuare il range di variabilità delle caratteristiche meccaniche di rocce eterogenee basandosi sulla disponibilità dei dati di campagna.

## 2. GENESI GEOLOGICA

Di seguito si riportano una sintesi degli aspetti di Geologia per le formazioni interessanti lo scavo della Galleria Naturale Le Ville, necessari per comprendere la genesi e le motivazioni dello stato di variabilità del materiale oggetto della parametrizzazione Geomeccanica. Per una più completa definizione a livello Geologico si rimanda alla Relazione Geologica allegata al progetto.

### **MACIGNO - MEMBRO DI MOLIN NUOVO (SIGLA IN CARTA: MAC1)**

Il membro del Molin Nuovo è caratterizzato da potenti bancate arenacee, a composizione quarzoso-feldspatica, spesso amalgamate e lateralmente abbastanza discontinue che si susseguono in modo relativamente monotono. Le intercalazioni argillitico-marnose sono del tutto subordinate e quasi assenti, come pure gli strati calcarenitico-marnosi. Lo spessore degli strati varia normalmente da uno ad alcuni metri: a luoghi si riscontrano intervalli spessi anche alcuni metri che presentano aspetto massivo, grana mediamente molto grossolana e clasti eterometrici fino ad alcuni mm di diametro; in altri affioramenti sono state osservate areniti a grana grossolana, relativamente più classate e interessate da una stratificazione incrociata. Da bibliografia lo spessore massimo di questo membro è stato valutato in circa 500-600 m. Il passaggio al membro sovrastante avviene per alternanze ma piuttosto rapidamente. (età Chattiano).

Rispetto all'area rappresentata questo termine caratterizza la parte iniziale e quindi occidentale del tracciato (loc. Le Ville), mentre rispetto alle indagini eseguite, il Membro di Molin Nuovo è stato intercettato in S1 dalla profondità di 15.50m al di sotto delle alluvioni del T. Cerfone e fino a fondo foro (-22.50m) e nel sondaggio S3 per tutto il suo sviluppo (40m).

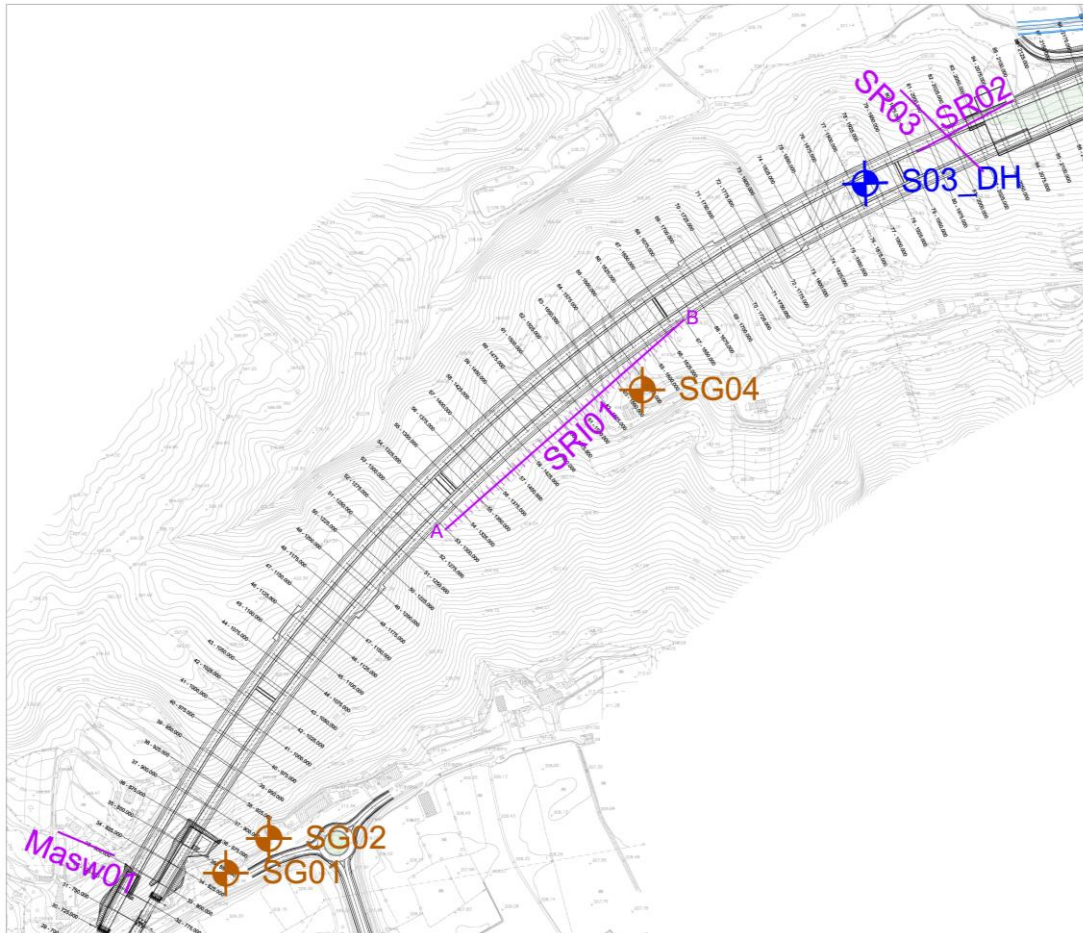


Figura 2-1 Affioramento delle arenarie massive del Macigno – Membro di Molin Nuovo in loc. Le Ville di Monterchi

PROGETTAZIONE ATI:

### 3. ANALISI CAMPAGNE GEOGNOSTICHE

Nelle relazioni relative agli studi e indagini geologiche e geomeccaniche sono allegati tutti i risultati delle indagini eseguite.  
Si riporta di seguito uno stralcio della planimetria indagini per la Galleria in oggetto.



**Figura 3-1 – Stralcio planimetria indagini**

Si dispone di n. 3 stazioni geomeccaniche, denominate SG01, SG02, SG04, effettuate nel 2023 (T00GE01GEORE02).

Il metodo di interpretazione delle stazioni si basa sulla definizione di un indice di qualità dell'ammasso indicato con la sigla BRMR (Basic Rock Mass Rating) che tiene conto di 5 parametri relativi allo stato della matrice rocciosa e delle discontinuità dell'ammasso.

Attraverso le stazioni si sono identificati dei range di resistenza a compressione monoassiale e, attraverso il parametro BRMR, si è pervenuti alla valutazione del GSI.

In prossimità dell'imbocco lato Fano è stato realizzato il sondaggio S03DH, che mostra la presenza in continuità di Arenaria, fratturata fino a circa 15.0m da testa foro e poco fratturata a profondità superiori.

È stato prelevato un campione alla quota di 30m da testa foro. Per la valutazione delle caratteristiche del materiale, in particolare della resistenza a compressione monoassiale, verranno

PROGETTAZIONE ATI:

cautelativamente considerati solo i risultati del sondaggio S03, unitamente alle stazioni geomeccaniche SG01, SG02, SG04.

Sono state inoltre realizzate, nel 2023, le seguenti prove geofisiche:

- Sismica ibrida SRI01, di lunghezza totale 360m, nella tratta centrale della galleria
- Sismiche a rifrazione SR02 ed SR03 in prossimità dell'imbocco lato Fano

Il set di rilievi di superficie, analisi delle verticali di sondaggio e prove geofisiche ha consentito la ricostruzione dei profili geologici e geotecnici di progetto, impiegati per la ricostruzione dei profili geomeccanici in sottoterraneo, in particolare per la definizione di tratte in cui potranno manifestarsi fenomeni di tettonizzazione.

Per quanto riguarda la possibile interazione degli scavi con falde sotterranee, la ricostruzione dai profili geologici non evidenzia particolari criticità. Nel tratto centrale potrebbe essere intercettata una falda con quota massima pari al piano dei centri della costruenda galleria.

Con riferimento infine agli aspetti geomorfologici, si evidenzia che in prossimità dell'imbocco lato Fano le opere di imbocco lambiscono un'area interessata da deformazioni superficiali lente\soliflussi, ma senza contatti diretti.

PROGETTAZIONE ATI:

#### **4. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA**

La caratterizzazione geomeccanica si è prefissata di individuare lungo il tracciato scelto e coerentemente con il modello geologico - strutturale:

- le zone geotecnicamente omogenee interessate dallo scavo;
- il modello geotecnico della roccia/terreno associato a tali zone che sarà utilizzato nei calcoli di progetto;
- i parametri geotecnici, in funzione del modello adottato, da impiegare nelle analisi.

##### **4.1. ZONIZZAZIONE GEOMECCANICA: CRITERI UTILIZZATI**

Dal modello geologico proposto è possibile individuare delle zone litologicamente omogenee; una prima elementare parzializzazione del tracciato in tratte omogenee si basa sul criterio di individuazione delle variazioni litologiche. Una volta effettuata tale “zonizzazione orizzontale”, per la quale si rimanda agli appositi elaborati progettuali (Relazione Geologica, Profili Geologici e Geomeccanici), ad ogni unità litologica sono state associate le relative indagini e prove. L’analisi e l’elaborazione di queste ha permesso una parametrizzazione che tenesse conto degli stati tensionali in gioco e quindi delle coperture previste, consentendo quindi anche una “zonizzazione geotecnica verticale”.

Per quanto concerne specificatamente gli ammassi rocciosi è stato possibile effettuare una zonizzazione individuando per tutte le tratte, le diverse “qualità” delle rocce; tali cambiamenti di qualità, imputabili a cambiamenti delle caratteristiche geologiche all’interno dell’ammasso, dipendono dalla variabilità delle caratteristiche della matrice rocciosa e delle discontinuità presenti. Tale cambiamenti lungo il tracciato sono dipese in generale dall’individuazione di cause locali (es: presenza di fasce tettonizzate, di transizione, ...) e generali (es: variazioni delle coperture sulla galleria litofacies prevalente). Tale variabilità, di qualità, è stata localmente testata attraverso lo studio dei rilievi geologici e all’analisi delle indagini realizzate.

Dai rilievi geologici e dai sondaggi è possibile infatti dedurre utili informazioni circa le caratteristiche dell’ammasso.

I metodi di classificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi utilizzati nel presente progetto fanno riferimento al sistema di classificazione di Bieniawski (1989).

Il metodo si basa sulla definizione di un indice di qualità dell’ammasso indicato con la sigla BRMR (Basic Rock Mass Rating) che tiene conto di 5 parametri relativi allo stato della matrice rocciosa e delle discontinuità dell’ammasso.

Per l’individuazione della litologia prevalente sono stati utilizzati, quindi, tutti i dati di campagna.

Dalle precedenti considerazioni, in funzione della litofacies prevalente riportata sui profili geologici è stato possibile stimare la percentuale di presenza di una classe rispetto ad un’altra ponderandola sulla lunghezza della tratta omogenea di applicazione. Una sintesi di tale schematizzazione è riportata nei profili geomeccanici.

Tabella 4-1 Sistema di classificazione di Bieniawski (1989).

PARAMETRI		INTERVALLI DI VALORI							
1	RESISTENZA ROCCIA INTATTA	Carico puntuale(Mpa) Compressione monoassiale(MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Non applicabile		
	Indice		>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Indice		20	17	13	8	3		
3	SPAZIATURA GIUNTI (m)		>2	0,6-2	0,6-0,2	0,06-0,2	<0,06		
	Indice		32	15	10	8	5		
4	CONDIZIONE GIUNTI		Superfici molto scabre non continue. Pareti roccia non alterate	Superfici scabre. Apertura <1mm. Pareti roccia leg.alterate	Superfici scabre. Apertura <1mm. Pareti roccia molto alterate	Superfici lisce o laminate o riempimento<5mm o apertura 1-5mm. Giunti continui	Riempimento tenero con spessore >5mm o giunti aperti>5 mm. Giunti continui		
	Indice		30	25	20	10	0		
5	CONDIZIONI IDRAULICHE	Afflusso per 10m di lunghezza del tunnel (litri/min)	Assente	<10	10-25	25-125	>125		
		Rapporto Pressione acqua nei giunti/Pressione naturale in sito	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condizioni generali	Giunti asciutti	Umidi	Bagnati	Stillicidio	Venute d'acqua		
	Indice		15	10	7	4	0		

All'indice BRMR può essere applicato un indice correttivo che tiene conto dell'orientamento dei giunti rispetto all'opera ricavando quindi l'indice RMR.

Il valore di RMR può essere correlato al grado di qualità dell'ammasso secondo la classificazione proposta da Bieniawski:

RMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
CLASSE	V	IV	III	II	I
QUALITA'	Molto scadente	Scadente	Discreta	Buona	Ottima

Ai fini della parametrizzazione geomeccanica, nella presente relazione, si farà riferimento all'indice GSI (Geological Strength Index) così definito:

$$GSI = BRMR - 5 = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 - 5$$

dove:

R1 = resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta;

R2 = indice RQD (Rock Quality Designation);

R3 = spaziatura dei giunti;

R4 = condizioni dei giunti (alterazione delle pareti, scabrezza, persistenza, apertura e materiale di riempimento);

R5 = condizioni idrauliche dei giunti (valore posto sempre pari a 15).



I sondaggi eseguiti in fase di progetto definitivo e poi esecutivo hanno permesso, oltre che la localizzazione degli affioramenti rocciosi, l'approfondimento delle caratteristiche litologiche e strutturali degli ammassi osservati, della configurazione geomorfologica della zona di studio, delle caratteristiche idrogeologiche sintetizzate nei profili geologici con l'indicazione delle litofacies prevalenti e consentendo la stima dei valori degli indici R1, R2, R3, e R4.

Sui campioni di roccia prelevati dai sondaggi, invece, si sono eseguite prove per la determinazione delle caratteristiche meccaniche quali prove di compressione assiale semplice (determinazione del fattore R1).

La parametrizzazione meccanica degli ammassi rocciosi quindi si è basata sul calcolo dell'indice GSI ottenuto elaborando:

- i dati forniti dai rilievi geologici e dai sondaggi;
- le prove di laboratorio dalle quali si sono ricavati i valori di resistenza a compressione assiale caratteristici della matrice (che entrano nella definizione del GSI stesso).

Di seguito i principali risultati.

**Tabella 4-2 Sintesi dei risultati ottenuti dai rilievi geologico strutturali (UG4b)**

<b>Stazione geomeccanica</b>	<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>	<b>RMR</b>	<b>GSI</b>
SG01 (2023)	5	12	10	19	15	0	61	56
SG02 (2023)	5	18	12	8	15	0	58	53
SG04 (2023)	5	16	12	18	15	0	66	61

I valori di resistenza a compressione monoassiale ottenuti tramite prove sclerometriche forniscono risultati nell'intorno di 40 MPa.

Inoltre, dal sondaggio S03 è stato prelevato un campione a 30 m di profondità, sul quale sono state realizzate due prove di compressione assiale semplice non confinata, i quali hanno fornito valori di resistenza a compressione monoassiale pari a 22.81 e 26.29 MPa.

La zonizzazione geologica effettuata per le gallerie in esame contempla tratte omogenee degli ammassi in cui è stata individuata una classe di qualità prevalente. Ad ognuna di queste tratte sono stati associati alcuni valori calcolati dell'indice GSI. Per ogni tratta omogenea, quindi, è possibile individuare, in funzione del GSI e della copertura media prevista, un range di parametri di resistenza attraverso la definizione dei Domini Geomeccanici descritti nel paragrafo 5.2.

## 4.2. MODELLO GEOMECCANICO

Per determinare le *caratteristiche di resistenza* dell'ammasso roccioso si è utilizzato il criterio "generalizzato" proposto da Hoek e Brown ("Practical Estimates of Rock Mass Strength" - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 8, 1997).

In questo modello, la curva intrinseca che fornisce le condizioni di rottura dell'ammasso è data dall'espressione:

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

dove:

- $\sigma'_1$  tensione principale efficace maggiore a rottura;
- $\sigma'_3$  tensione principale efficace minore a rottura;
- $\sigma_{ci}$  resistenza a compressione uniaassiale della roccia intatta.

I parametri « $m_b$ », « $s_b$ » ed « $a$ » dell'ammasso possono essere determinati in funzione dei parametri GSI ottenuti per l'ammasso. A questo proposito è possibile adottare tali correlazioni:

*parametri ammasso indisturbato*

$$m_{bp} = m_i (GSI-100)/28$$

$$s_{bp} = s_i (GSI-100)/9$$

*parametri residui ammasso indisturbato*

$$m_{br} = m_i (GSI-100)/14$$

$$s_{br} = s_i (GSI-100)/6$$

con  $m_i$  e  $s_i$  valori relativi alla matrice rocciosa.

E' possibile derivare delle relazioni fra il criterio di rottura di Hoek e Brown espresso in termini di tensioni efficaci e quello di Mohr-Coulomb nel piano  $\tau - \sigma'_n$ .

In modo pratico, l'equazione esprime il criterio di rottura di Hoek e Brown può essere utilizzata per generare una serie di prove triassiali, simulando più prove in larga scala, e un procedimento di tipo statistico può essere utilizzato per derivare una curva equivalente nel piano  $\tau - \sigma'_n$ :

$$\tau = A \sigma_c \left( (\sigma'_n - \sigma_{tm}) / \sigma_c \right)^B$$

con  $\sigma_{tm}$ , resistenza a trazione dell'ammasso roccioso, con  $\sigma_c$ , resistenza a compressione, A e B, costanti del materiale, ricavabili mediante regressione lineare. Poiché la resistenza al taglio degli ammassi è espressa, nelle analisi effettuate, secondo un criterio lineare di resistenza, i valori della coesione e dell'angolo di attrito equivalenti sono stati ottenuti considerando rette tangenti all'involuppo equivalente di Mohr in punti corrispondenti a valori della  $\sigma'_n$  relativi alle profondità corrispondenti alle coperture della galleria.

La *deformabilità* è indubbiamente uno dei parametri più importanti che governano il comportamento geomeccanico degli ammassi rocciosi.

I parametri caratteristici che definiscono la deformabilità di un ammasso roccioso, il modulo elastico e il modulo di deformabilità, evidenziano il comportamento deformativo del mezzo sottoposto a differenti livelli di sollecitazione crescenti o ciclici. Essi dipendono sostanzialmente da tutte le caratteristiche fisico - meccaniche degli elementi che concorrono a costituire l'ammasso stesso, ovvero il litotipo e il reticolo di discontinuità, e perciò da:

PROGETTAZIONE ATI:

- caratteristiche di deformabilità del litotipo intatto;
- caratteristiche geometriche giacitureali del reticolo di discontinuità (spaziatura, orientazione, ecc);
- caratteristiche di deformabilità delle discontinuità.

Le differenti e, assai variabili combinazioni di tali caratteristiche con cui in natura appaiono gli ammassi rocciosi, rende assai ardua e aleatoria la conoscenza e la previsione della loro deformabilità.

L'esperienza internazionale del campo dell'ingegneria mineraria e la letteratura hanno dimostrato che le prove in sito, ovvero procedure sperimentali condotte sulle masse rocciose nelle loro condizioni naturali indisturbate, rappresentano l'unica metodologia affidabile per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità. Un ammasso roccioso è caratterizzato dalla contemporanea presenza di una o più specie litologiche (litotipi) e un reticolo fessurativo che, se sviluppato maggiormente secondo una famiglia di piani rispetto alle altre (per spaziatura e caratteristiche delle discontinuità), conferisce alla massa una "anisotropia meccanica". Inoltre l'intensità del reticolo fessurativo ovvero l'inverso della spaziatura delle discontinuità, determina, in rapporto alla dimensione del problema in esame (diga, galleria, versante, ecc.) un altro importantissimo fenomeno denominato "effetto scala". Pertanto, aumentando la dimensione del "provino ideale" sottoposto al test di deformabilità diminuiscono contestualmente le caratteristiche di deformabilità dello stesso. Ne consegue che le prove in sito coinvolgono porzioni di ammasso roccioso differenti e volumi significativi (provino ideale) ben differenti in rapporto al problema in esame.

I *parametri di deformabilità* (modulo elastico di deformazione) sono stati stimati anche dalle prove sismiche condotte in sito. La valutazione del modulo elastico dinamico di taglio  $G_0$  a livelli bassissimi di deformazione ( $\gamma < 10^{-7}$ ) consente una stima dei valori massimi che possono raggiungere i parametri di deformabilità. In realtà l'impiego diretto di moduli ricavati da tale prova risulta scarsamente cautelativo in quanto l'esperienza mostra che nelle opere in sotterraneo si raggiungono valori della deformazione di taglio dell'ordine di  $10^{-3}$ , e questo comporta una notevole riduzione dei valori ottenuti dalle prove. I moduli statici ottenuti riducendo quelli dinamici sono stati ottenuti attraverso dei fattori riduttivi che possono ritenersi dipendenti dal grado di fatturazione dell'ammasso (valori dell'indice RQD).

I valori dei moduli elastici possono anche essere valutati secondo le correlazioni empiriche usualmente utilizzate in letteratura (Modulus Ratio, MR, di Hoek) che utilizzano il valore del rapporto di modulo MR stimato per ogni litotipo roccioso (tabella riportata nel par 5.1.1).

## 5. PARAMETRIZZAZIONE GEOMECCANICA DEI LITOTIPI

Lo scavo in sotterraneo riguarderà per intero la formazione geologica del Macigno-MAC1, alla quale, dal punto di vista geotecnico, è assegnata la denominazione **UG4b**.

Per la descrizione delle unità **UG3** (depositi eluviali e colluviali di natura granulare) e **UG4a** (porzione superficiale alterata della UG4), che non interessano gli scavi in sotterraneo ma possono interessare le opere di imbocco, si rimanda alla Relazione Geotecnica (T00GE08GETRE01).

I valori di GSI ottenuti sono compresi entro un range di valori medi variabile da 50 a 60, mentre la resistenza a compressione monoassiale è compresa tra 20 e 40 MPa.

Per quanto riguarda il Macigno-MAC1 influenzato dalla fascia di disturbo tettonico (**UG4b tett.**) i valori di GSI stimati sono compresi entro un range di valori medi variabile da 25 a 30, mentre la resistenza a compressione monoassiale è compresa tra 10 e 20 MPa.

Pertanto, in base ai dati di input riportati nelle tabelle precedenti, si sono ottenuti i seguenti range di valori:

RMR		0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Classe		V	IV	III	II	I
Qualità dell'ammasso		molto scadente	scadente	discreta	buona	ottima
Coesione	c [MPa]	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	>0,4
Angolo d'attrito	$\varphi$ (°)	<15	15-25	25-35	35-45	>45
Tempo di autoportanza		10 min	5 ore	1 sett	6 mesi	10 anni
Lunghezza libera di scavo	[m]	0,5	1,5	2	4	5

Figura 5-1 Classificazione dell'ammasso roccioso in funzione dell'indice globale RMR

Come si può notare, si sono ottenuti valori di GSI superiori o uguali a 25; pertanto ai litotipi in oggetto è possibile applicare i criteri di classificazione validi per gli ammassi rocciosi ed utilizzare il criterio di Hoek – Brown per la determinazione dei parametri di resistenza.

### 5.1.1. PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ

I *parametri di deformabilità* (moduli elastici) sono stati valutati tenendo conto delle ultime formulazioni presenti in letteratura.

Bieniawski (1976) ha proposto la seguente relazione tra il modulo di deformabilità  $E_d$  e l'indice di qualità RMR, valida solo per valori di quest'ultimo maggiori di 55:

$$E_d \text{ (GPa)} = 2 \cdot \text{RMR} - 100 \quad (5.12)$$

La precedente equazione fu successivamente modificata da Serafim e Pereira (1979) e abbracciata dallo stesso Bieniawski nel 1989 per includere dati derivanti da prove effettuate su ammassi rocciosi di pessima qualità:

$$E_d \text{ (GPa)} = 10^{\frac{\text{RMR}-10}{40}} \quad (5.13)$$

Alcuni anni dopo Hoek et al. (1995) hanno osservato che l'Eq. (5.13) tende a sovrastimare il modulo di Young per materiali rocciosi a bassa rigidità. Utilizzando l'indice di qualità GSI anziché RMR, hanno proposto di modificare la relazione precedente introducendo un termine relativo alle caratteristiche del materiale roccioso:

$$E_d \text{ (GPa)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\sigma_{ci} / 100} \cdot 10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} \quad \text{for } \sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa} \quad (5.14)$$

$$E_d \text{ (GPa)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{\text{GSI}-10}{40}} \quad \text{for } \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}$$

L'utilizzo della resistenza a compressione uniassiale  $\sigma_{ci}$  invece della deformabilità del materiale roccioso nella formulazione precedente è probabilmente dovuto al fatto che la prima grandezza viene misurata più frequentemente della seconda.

In questa relazione si è utilizzata la formulazione 5.14.

## 5.2. DOMINI GEOMECCANICI

Lo scopo dell'introduzione dei domini geomeccanici è stato quello di attribuire alle riconosciute tratte a comportamento omogeneo in naturale (che nel modello geomeccanico sono attribuibili a un comportamento di meccanica delle rocce), un range di variabilità dei parametri di resistenza meccanica e di deformabilità. Per gli scriventi è stata opportuna l'introduzione di questa elaborazione per evitare di attribuire i soli dati derivanti dall'indagine di campagna ad un'intera tratta a comportamento omogeneo, che di sua natura/genesi geologica risulta estremamente variabile.

In funzione Dei dati di GSI stimati dall'indagine e dall'elaborazione Geologica e dei valori di resistenza caratteristica  $\sigma_{ci}$  si è ipotizzato un range di variabilità compatibile con i dati sperimentali dei seguenti parametri:

- Variabilità della copertura per la tratta omogenea di riferimento
- Variabilità del  $\sigma_{ci}$  rilevata
- Variabilità del GSI stimato ed eventualmente adottando valori leggermente più cautelativi.

Una volta calcolato il dominio sono stati inseriti i dati sperimentali a disposizione ed è stata valutata in questo modo l'attendibilità della variabilità dei parametri presentati.

In particolare è stato considerato valido e rappresentativo il dominio in cui i dati di campagna sono in linea con le ipotesi di base (in linea al dominio con le condizioni di copertura del dato sperimentale) o nel caso in cui il dato sperimentale sia al di fuori del dominio ma con parametri di resistenza più elevati rispetto a quanto ipotizzato. In questo modo l'introduzione dei Domini geomeccanici permette di parametrizzare in modo più cautelativo il range di variabilità delle caratteristiche meccaniche di un materiale che dal punto di vista geologico si presenta particolarmente eterogeneo.

Per la redazione dei Domini sono state condotte analisi parametriche con il software di calcolo RockLab al fine di determinare un dominio dei parametri rappresentativi degli ammassi rocciosi presi in considerazione dalla realizzazione delle opere in sotterraneo.

Il codice di calcolo RockLab, prodotto da Rocscience, permette di calcolare lo stato di sforzo nell'ammasso roccioso utilizzando il criterio di Hoek-Brown.

Il programma linearizza opportunamente il criterio non lineare di Hoek-Brown, consentendo di calcolare i relativi parametri di coesione e angolo di attrito di Mohr-Coulomb.

I parametri di ingresso della classificazione di Hoek-Brown sono:

- $\sigma_{ci}$ : resistenza a compressione monoassiale del materiale intatto espresso in MPa;
- GSI: Geological Strength Index, sviluppato da Hoek, e varia da 0 a 100;
- $m_i$ : un parametro che esprime l'influenza della pressione di confinamento  $\sigma_3$  sull'incremento di resistenza;
- D: fattore di disturbo o danno variabile da 0 (eccellente qualità di scavo) a 1 (elevato disturbo)
- $E_i$ : stima del modulo del materiale intatto, oppure il valore MR.

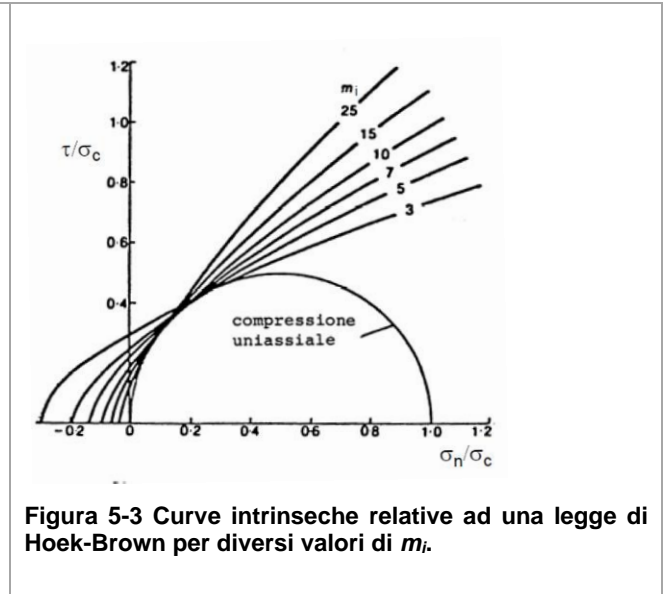
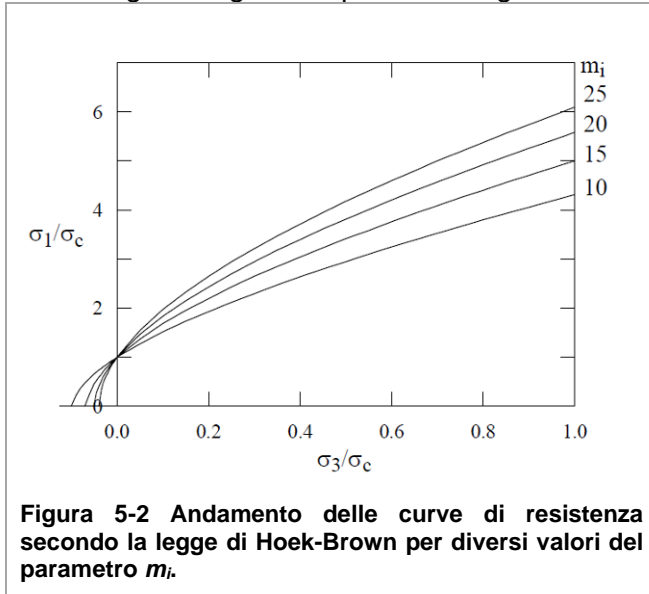
Il criterio di resistenza di Hoek e Brown del 1980 e attualmente utilizzato prevede una correlazione non lineare tra lo stato di sforzo principale  $\sigma_1$  e quello di confinamento  $\sigma_3$  :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + s \cdot \sigma_{ci}^2}$$

Nella quale intervengono i seguenti parametri:

- s: parametro adimensionale che rappresenta lo stato di fatturazione della roccia (pari ad 1 per i campioni di laboratorio integri)
- m<sub>i</sub>: parametro che svolge funzioni analoghe a quelle dell'angolo di attrito nel criterio di Mohr-Coulomb, in quanto esprime l'influenza della pressione di confinamento  $\sigma_3$  sull'incremento di resistenza.

Nelle seguenti figure si riportano dei grafici adimensionali che mostrano l'influenza del fattore m<sub>i</sub>.


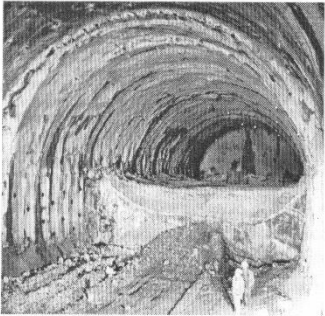
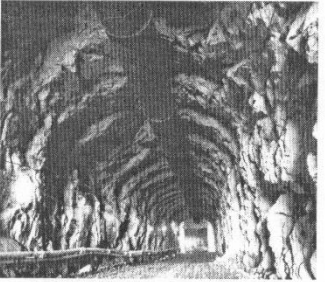
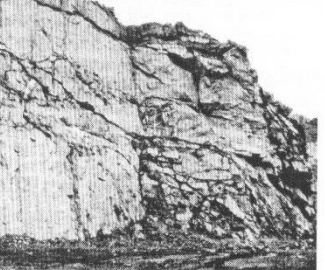



Si riportano i valori tipici di  $\sigma_{ci}$  e  $m_i$  per vari tipi di rocce secondo Hoek e Brown del 1980.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates (21 ± 3)	Sandstones (17 ± 4)	Siltstones (7 ± 2)	Claystones (4 ± 2)
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones (10 ± 2)	Micritic Limestones (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum (8 ± 2)	Anhydrite (12 ± 2)	
	Organic				Chalk (7 ± 2)	
METAMORPHIC	Non Foliated		Marble (9 ± 3)	Hornfels (19 ± 4) Metasandstone (19 ± 3)	Quartzites (20 ± 3)	
	Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites (26 ± 6)	Gneiss (28 ± 5)	
	Foliated*			Schists (12 ± 3)	Phyllites (7 ± 3)	Slates (7 ± 4)
IGNEOUS	Plutonic	Light	Granite (32 ± 3)	Diorite (25 ± 5) Granodiorite (29 ± 3)		
		Dark	Gabbro (27 ± 3) Norite (20 ± 5)	Dolerite (16 ± 5)		
	Hypabyssal			Porphyries (20 ± 5)	Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
	Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5) Andesite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Volcanic breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

Figura 5-4 Vengono riportati i valori tipici di  $m_i$  per campioni normali di roccia intatta per diversi litotipi.



Appearance of rock mass	Description of rock mass	Suggested value of <i>D</i>
	Excellent quality controlled blasting or excavation by Tunnel Boring Machine results in minimal disturbance to the confined rock mass surrounding a tunnel.	<i>D</i> = 0
	Mechanical or hand excavation in poor quality rock masses (no blasting) results in minimal disturbance to the surrounding rock mass.  Where squeezing problems result in significant floor heave, disturbance can be severe unless a temporary invert, as shown in the photograph, is placed.	<i>D</i> = 0  <i>D</i> = 0.5 No invert
	Very poor quality blasting in a hard rock tunnel results in severe local damage, extending 2 or 3 m, in the surrounding rock mass.	<i>D</i> = 0.8
	Small scale blasting in civil engineering slopes results in modest rock mass damage, particularly if controlled blasting is used as shown on the left hand side of the photograph. However, stress relief results in some disturbance.	<i>D</i> = 0.7 Good blasting  <i>D</i> = 1.0 Poor blasting
	Very large open pit mine slopes suffer significant disturbance due to heavy production blasting and also due to stress relief from overburden removal.  In some softer rocks excavation can be carried out by ripping and dozing and the degree of damage to the slopes is less.	<i>D</i> = 1.0 Production blasting  <i>D</i> = 0.7 Mechanical excavation

**Figura 5-5** Linee guida per la stima del fattore di disturbo *D* (Hoek et al., 2002).

PROGETTAZIONE ATI:

Un tipico esempio è mostrato nella Figura 5-6 Figura 5-2, preparato considerando 4 possibili valori di  $\sigma_{ci}$ , 3 di H e 2 di GSI (indicati come GSI<sub>min</sub> e GSI<sub>max</sub>). È evidente che sia la coesione che l'angolo di attrito aumentano per valori maggiori di  $\sigma_{ci}$  e GSI, cioè man mano che migliora la qualità del materiale roccioso e dell'ammasso roccioso. Al contrario, l'effetto di valori crescenti di H è benefico per la coesione e dannoso per l'angolo di attrito, a causa dell'influenza dello sforzo di confinamento sul processo di linearizzazione dell'ammasso roccioso dal criterio di Hoek-Brown a quello di Mohr-Coulomb.

La corrispondente variabilità del modulo di deformabilità  $E_d$  dell'ammasso roccioso viene valutata utilizzando l'Eq. (5.14), considerando quindi solo l'influenza di  $\sigma_{ci}$  e GSI (Figura 5-7).

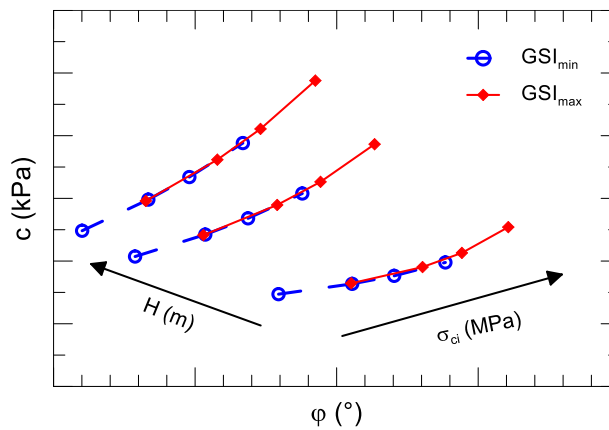


Figura 5-6 Esempio di dominio di resistenza geomeccanica per un ammasso roccioso.

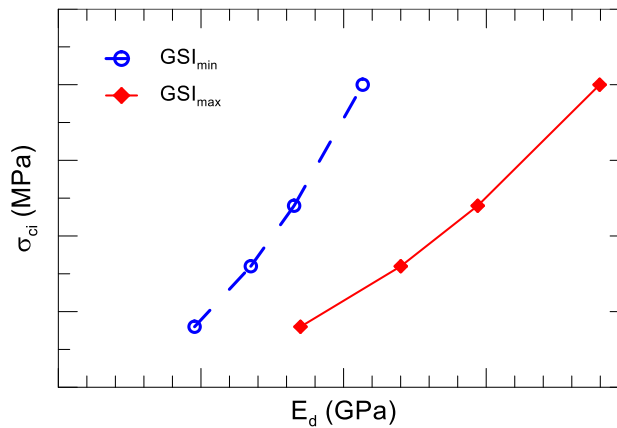


Figura 5-7 Esempio di dominio di rigidezza geomeccanica per un ammasso roccioso.

### 5.2.1. UG4B (MACIGNO-MAC1)

Si vuole determinare il dominio geomeccanico della galleria naturale Le Ville.

Nota il peso di volume della roccia pari a  $\gamma = 25 \text{ KPa}$ , e il range della resistenza a compressione del provino di roccia integro, derivante da prove di compressione assiale semplice, effettuate nella campagna di indagini in fase di progetto definitivo, si è determinato un dominio dei valori caratteristici dell'ammasso roccioso entro il quale ci si è mossi per la determinazione delle coppie di parametri geomeccanici di coesione ed angolo di attrito, in funzione della copertura della galleria, H e del valore di GSI.

La variabile copertura H incide sullo stato tensionale originario e si noterà come al crescere della copertura cresce il valore coesione dell'ammasso e diminuisce il suo comportamento attritivo.

La variabile GSI tiene conto dello stato di fatturazione dell'ammasso.

Il parametro  $m_i$  che, per questo ammasso roccioso, ha un range di variabilità pari a  $17 \pm 4$ , è stato scelto,  **$m_i$  pari a 17**

Si è considerato come fattore di disturbo  $D = 0.5$ , a favore di sicurezza.

Si prendono valori di  $\sigma_{ci}$  caratteristici dell'ammasso roccioso, tenendo conto delle prove di laboratorio di PD.

Per quanto riguarda la stima del modulo elastico E, si è utilizzata l'Eq. (5.14).

Quindi sono state condotte delle analisi parametriche con il software di calcolo RockLab, tenendo fissi alcuni parametri (peso di volume  $\gamma$ , fattore di disturbo D) mentre variano le coperture il valore di GSI e  $m_i$  come riportato in tabella.

**Tabella 5-1 Riepilogo valori utilizzati per l'analisi parametrica**

Dominio	H	GSI	$\sigma_{ci}$ .	$m_i$
	m		MPa	
UG4b (MAC1)	30 – 40 – 50 - 60 - 70	50 - 60	20 – 25 – 30 - 40	17

*Dominio UG4b*

Si riporta il dominio geomeccanico ottenuto dalla variazione dei parametri appartenenti al dominio UG4b della Galleria Le Ville.

Dominio	H	GSI	$\sigma_{ci}$	$m_i$
	m		MPa	
UG4b (MAC1)	30 – 40 – 50 - 60 - 70	50 - 60	20 – 25 – 30 - 40	17

Tale Dominio è stato ottenuto facendo variare la copertura H, la resistenza a compressione del provino intatto  $\sigma_{ci}$  e il GSI (ottenuto come visto nel capitolo 5 - Parametrizzazione geomeccanica dei litotipi). Il dominio determina un range di valori di coesione ed angolo di attrito rappresentativi della variabilità dell'ammasso roccioso in esame.

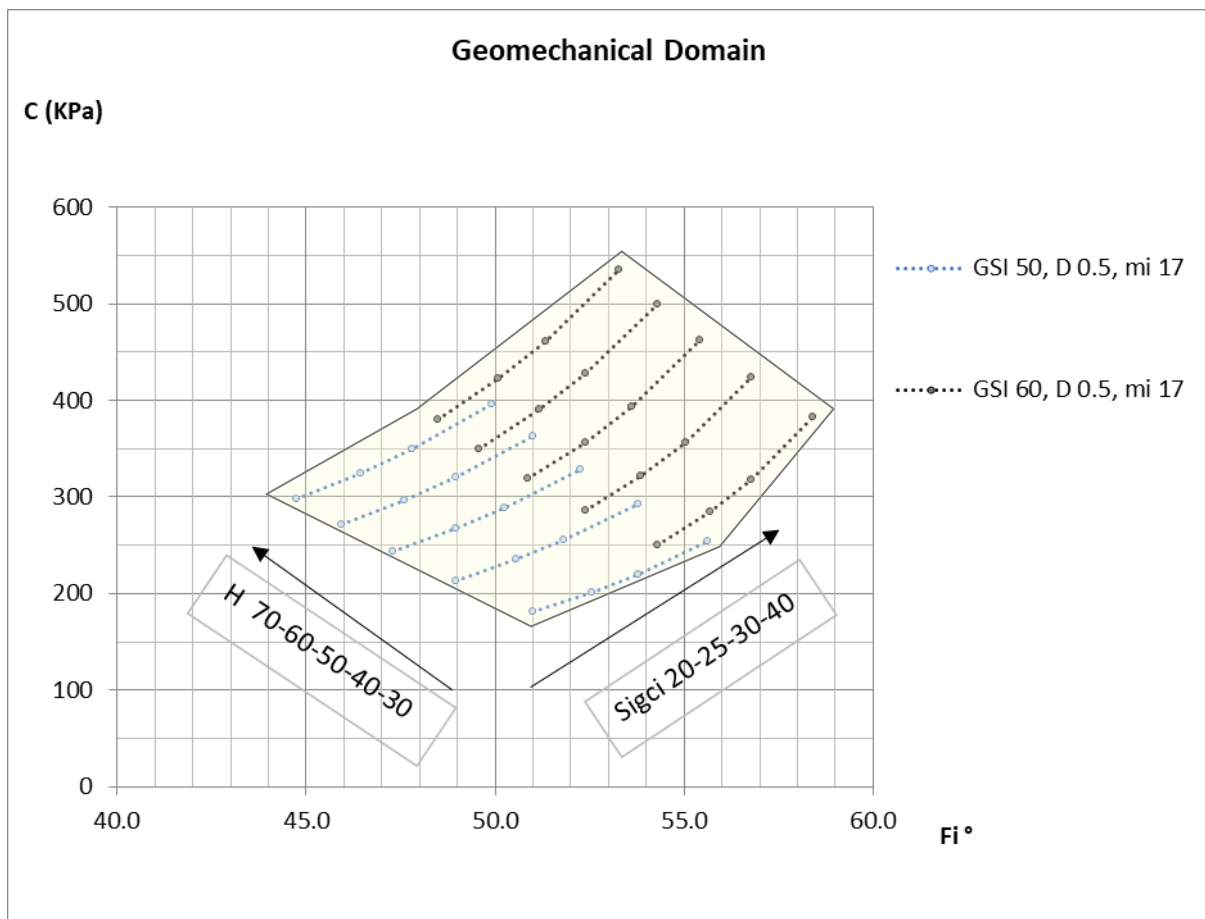


Figura 5-8 Dominio UG4b, Geomeccanico, Le Ville.

Ciascuna serie di dati, rappresentata con colori diversi, mostra il range dei valori di coesione ed angolo di attrito, per un fissato valore di GSI, Danno e  $m_i$ , al variare della  $\sigma_{ci}$  e della copertura H. All'interno di ciascuna serie i valori di coesione ed angolo di attrito crescono al crescere della resistenza a compressione del provino intatto, mentre al crescere della copertura cresce il valore di coesione e decresce il valore dell'angolo di attrito.

PROGETTAZIONE ATI:

Si riportano i valori dei moduli elastici dell'ammasso roccioso desunti dal rapporto di modulo MR per la stima del modulo elastico dell'ammasso roccioso noti i parametri di resistenza a compressione  $\sigma_{ci}$  e il GSI.

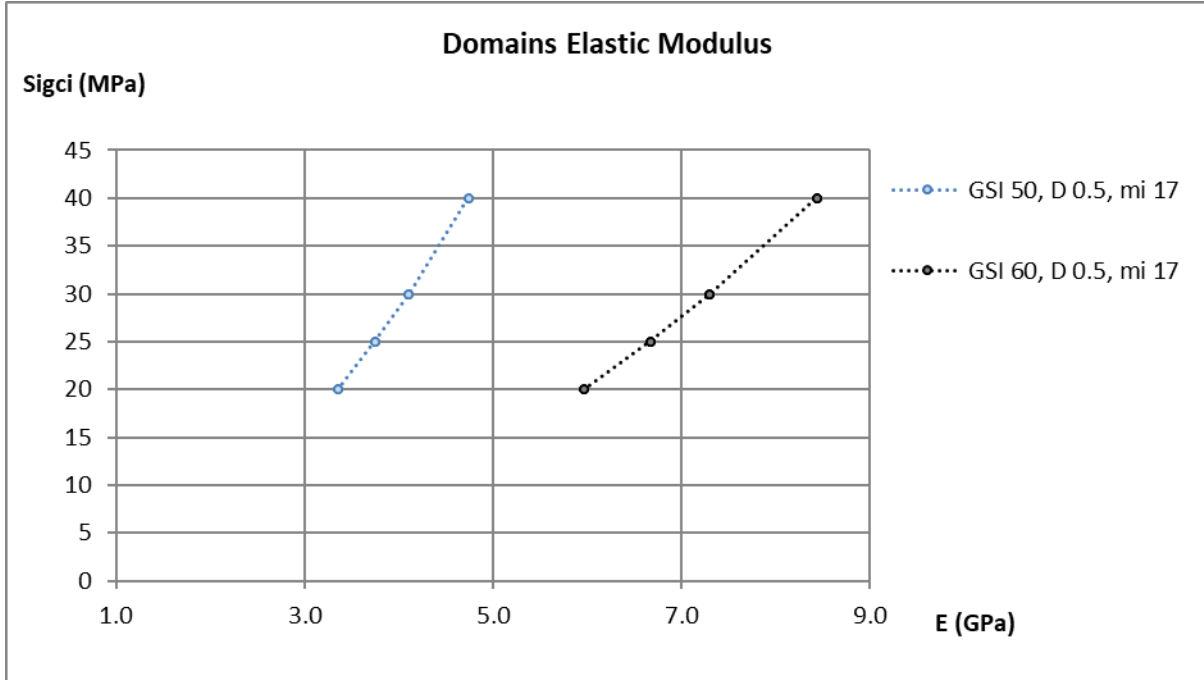


Figura 5-9 Dominio UG4b, Variabilità del modulo elastico E, Le Ville.

### 5.2.1. UG4B\_TETT (MACIGNO MAC1-FASCIA TETTONIZZATA)

Si vuole determinare il dominio geomeccanico della galleria naturale Le Ville.

Nota il peso di volume della roccia pari a  $\gamma = 25 \text{ KPa}$ , e il range della resistenza a compressione del provino di roccia integro, derivante da prove di compressione assiale semplice, effettuate nella campagna di indagini in fase di progetto definitivo, si è determinato un dominio dei valori caratteristici dell'ammasso roccioso entro il quale ci si è mossi per la determinazione delle coppie di parametri geomeccanici di coesione ed angolo di attrito, in funzione della copertura della galleria, H e del valore di GSI.

La variabile copertura H incide sullo stato tensionale originario e si noterà come al crescere della copertura cresce il valore coesione dell'ammasso e diminuisce il suo comportamento attritivo.

La variabile GSI tiene conto dello stato di fatturazione dell'ammasso.

Il parametro  $m_i$  che, per questo ammasso roccioso, ha un range di variabilità pari a  $17 \pm 4$ , è stato scelto,  **$m_i$  pari a 17**

Si è considerato come fattore di disturbo  $D = 0.5$ , a favore di sicurezza.

Si prendono valori di  $\sigma_{ci}$  caratteristici dell'ammasso roccioso, tenendo conto delle prove di laboratorio di PD.

Per quanto riguarda la stima del modulo elastico E, si è utilizzata l'Eq. (5.14).

Quindi sono state condotte delle analisi parametriche con il software di calcolo RockLab, tenendo fissi alcuni parametri ( peso di volume  $\gamma$ , fattore di disturbo D ) mentre variano le coperture il valore di GSI e  $m_i$  come riportato in tabella.

**Tabella 5-2 Riepilogo valori utilizzati per l'analisi parametrica**

Dominio	H	GSI	$\sigma_{ci}$ .	$m_i$
	m		MPa	
UG4b_Tett (MAC1-Tett)	30 – 40 – 50 - 60 - 70	25 - 30	10 – 12 – 15 - 20	17

*Dominio UG4b-Tett*

Si riporta il dominio geomeccanico ottenuto dalla variazione dei parametri appartenenti al dominio MAC1-Tett della Galleria Le Ville.

Dominio	H	GSI	$\sigma_{ci}$	$m_i$
	m		MPa	
UG4b_Tett (MAC1-Tett)	30 – 40 – 50 - 60 - 70	25 - 30	10 – 12 – 15 - 20	17

Tale Dominio è stato ottenuto facendo variare la copertura H, la resistenza a compressione del provino intatto  $\sigma_{ci}$  e il GSI (ottenuto come visto nel capitolo 5 - Parametrizzazione geomeccanica dei litotipi). Il dominio determina un range di valori di coesione ed angolo di attrito rappresentativi della variabilità dell'ammasso roccioso in esame.

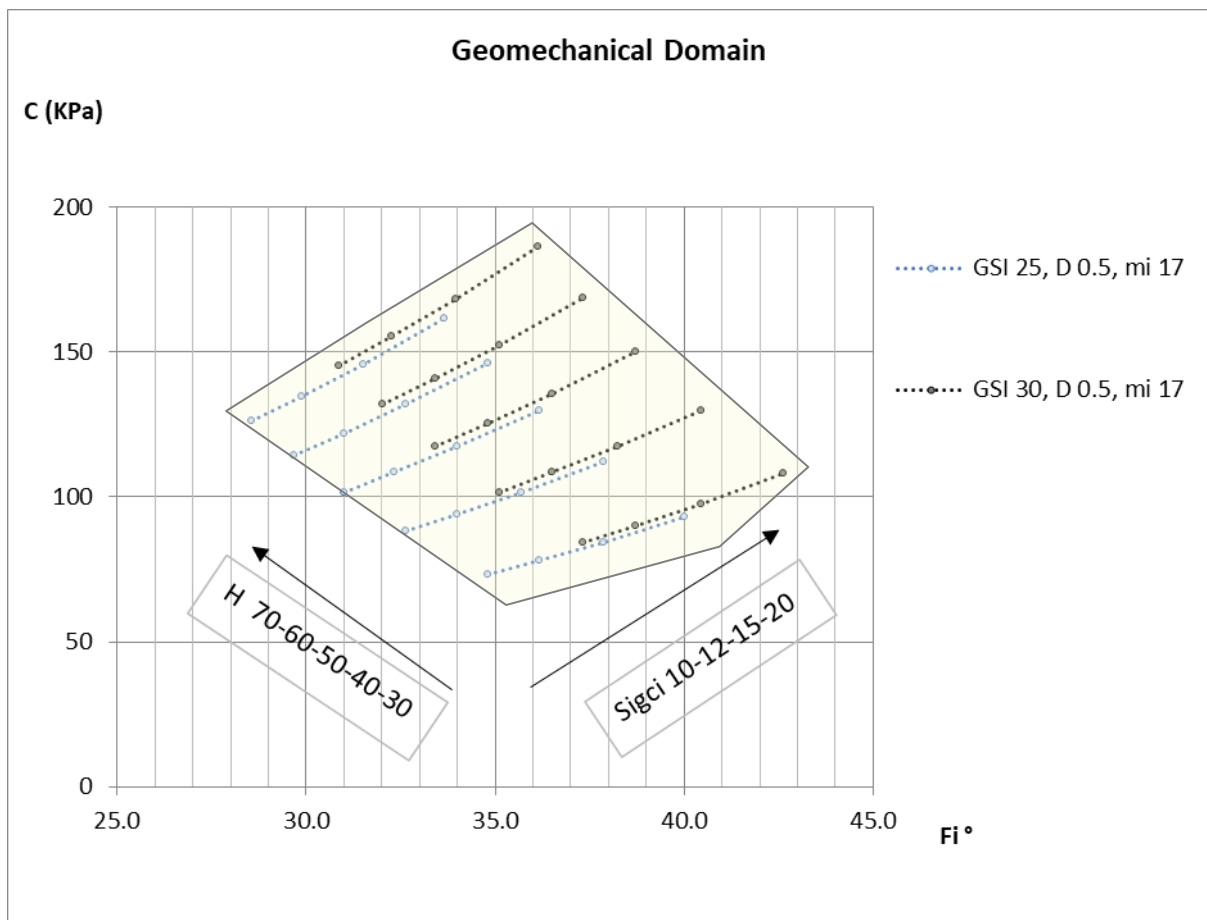


Figura 5-10 Dominio UG4-b, Geomeccanico, Le Ville.

Ciascuna serie di dati, rappresentata con colori diversi, mostra il range dei valori di coesione ed angolo di attrito, per un fissato valore di GSI, Danno e mi, al variare della  $\sigma_{ci}$  e della copertura H. All'interno di ciascuna serie i valori di coesione ed angolo di attrito crescono al crescere della resistenza a compressione del provino intatto, mentre al crescere della copertura cresce il valore di coesione e decresce il valore dell'angolo di attrito.

PROGETTAZIONE ATI:

Si riportano i valori dei moduli elastici dell'ammasso roccioso desunti dal rapporto di modulo MR per la stima del modulo elastico dell'ammasso roccioso noti i parametri di resistenza a compressione  $\sigma_{ci}$  e il GSI.

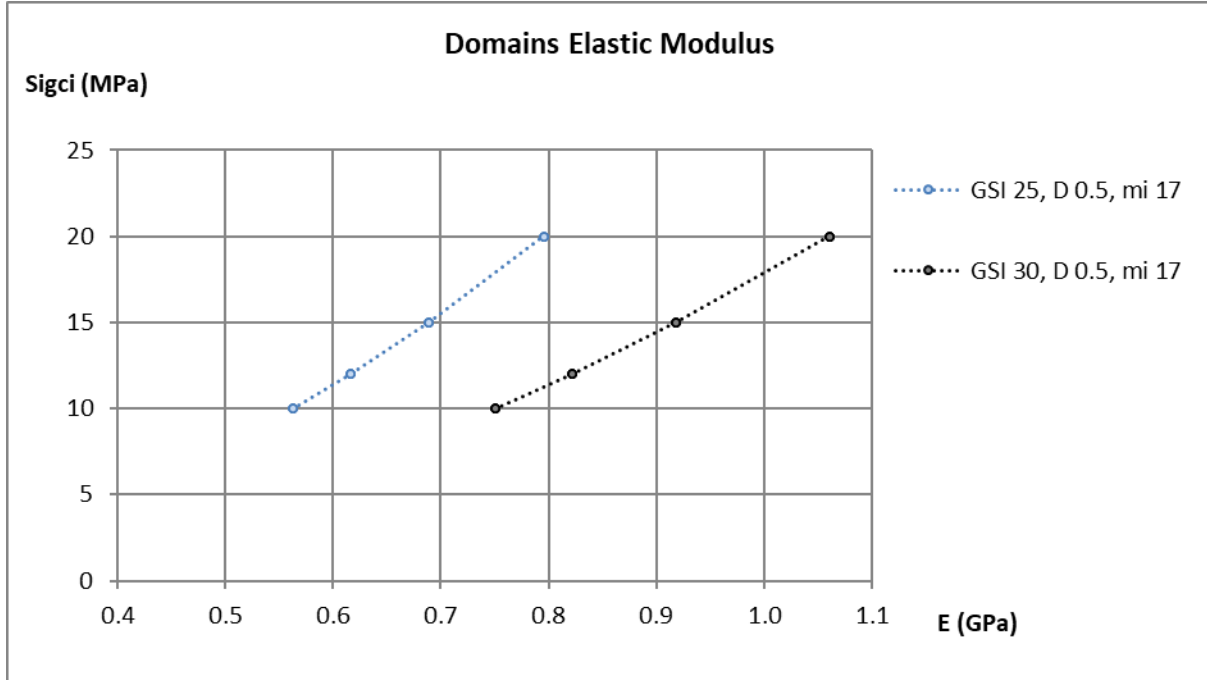


Figura 5-11 Dominio UG4b-Tett, Variabilità del modulo elastico E, Le Ville.



## 6. CONCLUSIONI

Dalle considerazioni fatte sull'interpretazione dei dati provenienti dai sondaggi e dai rilevamenti eseguiti in corrispondenza della galleria Le Ville, per caratterizzare gli ammassi rocciosi e grazie alla loro interpretazione per mezzo dei Domini Geomeccanici è possibile delimitare i comportamenti geomeccanici degli ammassi rocciosi presi in esame per ogni tratta omogenea ipotizzata.

I range di variabilità dei parametri di resistenza e deformabilità sono stati ottenuti dall'elaborazione statistica dei dati disponibili, a partire dai risultati delle prove a compressione monoassiale.

Sulla base della variabilità del parametro RQD con la profondità è stato individuato un valore di GSI e sulla base di esso si è proceduto alla caratterizzazione dei parametri di resistenza in base alle diverse coperture delle gallerie.

Si osserva che per i litotipi per i quali è stato individuato un GSI superiore a 25 è stato possibile rappresentare le caratteristiche meccaniche dell'ammasso attraverso il criterio di Hoek – Brown, a conferma della natura litologica dell'ammasso.

Di seguito si riporta la sintesi della caratterizzazione riportata nei Profili Geomeccanici per le tratte omogenee dove è ricostruito un modello di meccanica delle rocce medio – scadenti. Per la determinazione dei parametri delle tratte dove non è stato riconosciuto un modello di meccanica delle rocce sono stati utilizzati i parametri geotecnici ricavati da un modello di meccanica delle terre.

**Tabella 6-1 Tabella dei parametri geomeccanici della Galleria Le Ville**

Domini geomeccanici	UG4b		UG4b_Tett	
	Basse Cop	Medie Cop	Basse Cop	Medie Cop
Range Copertura	< 30	30-70	< 30	30-70
Peso di volume (kN/m <sup>3</sup> )	24-26	24-26	24-26	24-26
Coesione (kPa)	<b>200-300</b>	<b>300-450</b>	<b>60-100</b>	<b>100-200</b>
Angolo di Attrito (°)	<b>50-52</b>	<b>50-52</b>	<b>34-36</b>	<b>34-36</b>
Modulo di deformabilità (MPa)	<b>3000-5000</b>	<b>3000-5000</b>	<b>500-800</b>	<b>500-800</b>
Coefficiente di Poisson	0.3	0.3	0.3	0.3