REGIONE LIGURIA
Dipartimento Programmi Regionali,
Porti, Trasporti, Lavori Pubblici ed Edilizia
Settore Progetti Infrastrutture Viabilità
Porti e Logistica

Anas S.p.A.
Direzione Centrale Progettazione

InfrastruttureLiguria
GRUPPO FILSE

CONVENZIONE DEL 14 SETTEMBRE 2009 TRA REGIONE LIGURIA E INFRASTRUTTURE LIGURIA S.R.L. PER LA REALIZZAZIONE DI ATTIVITÀ PER L'ATTUAZIONE DEL PROGRAMMA DI STUDI E PROGETTAZIONI INFRASTRUTTURALI STRATEGICHE

Oggetto:

VARIANTE DI TRACCIATO ALLA S.P.1 AURELIA – CAPO NOLI
PROGETTO DEFINITIVO

Titolo:

RELAZIONE GEOTECNICA

Doc. n: 02A\DEF\GEO\R002

Rev.	Data	Sez.	Pag.	Redatto	Controllato	Approvato	Descrizione
01	15-11-2011	4	34	ET	FB	SB	Per Emissione
02	20-07-2012	4	34	ET	FB	SB	Per Emissione
03	20-03-2013	4	32	ET	FB	SB	Per Emissione

Spazio riservato alla codifica ANAS

CODICE PROGETTO	CODICE ELABORATO	RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
DP GE05 D 11 01	T 00 GE 02 GET RE 01	*Ing. Nicola Dinnella*

INDICE

1	**PREMESSA**	**3**
2	**SINTESI DEI RISULTATI DI INDAGINE**	**4**
2.1	INDAGINI GEOGNOSTICHE	4
2.2	PROSPEZIONI GEOFISICHE	5
2.3	REGIME IDROGEOLOGICO	5
3	**CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI**	**6**
3.1	CARATTERIZZAZIONE DELLA ROCCIA INTEGRA	7
3.2	CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: DOLOMIE - IMBOCCO LATO NOLI	7
3.3	CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: CALCARI - IMBOCCO LATO FINALE	8
3.4	CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: TRATTO PROFONDO	9
3.5	CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: ZONE DI DISTURBO	10
3.6	CARATTERIZZAZIONE DEGLI STRATI DI COPERTURA	12
4	**PARAMETRI DI PROGETTO PER CIASCUN TRATTO DI GALLERIA**	**13**

APPENDICI

Appendice A: Sintesi prove di laboratorio;

Appendice B: Analisi delle prove di laboratorio (RockLab v. 1.0, Rockscience Inc.);

Appendice C: Stima dei parametri di resistenza delle cataclasiti secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb;

Appendice D: Tabella per la stima del GSI (E. Hoek, 2007, Practical Rock Engineering, www.rockscience.com);

Appendice E: Parametri geomeccanici preliminari.

1 PREMESSA

La presente relazione geotecnica è stata redatta a supporto della progettazione definitiva della Variante di tracciato alla *S.P. 1 "Aurelia - Capo Noli"*.

La presente relazione geotecnica ha mantenuto la stessa impostazione della relazione geotecnica preliminare, andando a suddividere la galleria naturale in n.3 tratti principali, ciascuno considerato omogeneo ai fini delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso:

1. imbocco *lato Noli*;
2. imbocco *lato Finale*;
3. tratto intermedio (tratto profondo).

In particolare il tratto profondo è stato a sua volta suddiviso in zone litologiche a comportamento geomeccanico omogeneo, differenziate in base al tipo di formazione interessata, al livello di disturbo tettonico dell'ammasso, nonché alla geometria ed alla copertura della sezione.

Le indagini geognostiche sono disponibili in numero di 4 ed hanno interessato esclusivamente le aree circostanti i due imbocchi della galleria. Il tratto intermedio della galleria è stato invece esplorato con metodi indiretti quali prospezioni geofisiche di superficie (*sismica a riflessione* e *sismica a rifrazione*). Le informazioni raccolte mediante le indagini suddette sono state utilizzate nel presente studio ai fini della caratterizzazione degli ammassi rocciosi nonché dell'identificazione delle principali criticità caratterizzanti il tracciato di progetto.

Considerata la grande variabilità che si prevede di incontrare lungo le zone di faglia e lungo i contatti stratigrafici, in fase di esecuzione si dovrà procedere alla realizzazione di sondaggi orizzontali in avanzamento, finalizzati ad individuare l'esatta posizione delle fasce tettonizzate ed a definirne con accuratezza le effettive caratteristiche fisico-meccaniche, avvalorando o modificando le previsioni avanzate in sede progettuale.

2 SINTESI DEI RISULTATI DI INDAGINE

2.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le indagini geognostiche effettuate nel corso della campagna di indagini finalizzata alla progettazione preliminare comprendevano un totale di n.4 sondaggi a carotaggio continuo di cui:

- n.2 ("S1" ed "S2") effettuati in prossimità dell'imbocco lato Noli nelle Dolomie di San Pietro ai Monti, entrambi sub-orizzontali e protratti fino a raggiungere la profondità di 25m;
- n.2 ("S3" ed "S4") effettuati in prossimità dell'imbocco lato Finale nei Calcari Val Tanarello: il sondaggio S3, sub-orizzontale, è stato protratto fino a raggiungere la profondità di 50 m; mentre il sondaggio S4, inclinato di 45°, ha raggiunto la profondità di 25 m.

All'interno dei suddetti sondaggi sono state effettuate complessivamente n.12 prove Lugeon, di cui n.6 nelle dolomie e n.6 nei calcari. Le stratigrafie dei quattro sondaggi, come rilevate in fase di indagine, sono presentate nella relazione della società *Promogeo*.

Le prove di laboratorio condotte sulle carote recuperate nel corso delle perforazioni hanno compreso:

- n. 6 prove di compressione uniassiale, di cui n. 3 nelle dolomie e n. 3 nei calcari;
- n. 2 prove di compressione triassiale (n. 5 provini per prova), di cui n. 1 nelle dolomie e n. 1 nei calcari;
- n. 6 misure di velocità sonica (onde V_p e V_s), di cui n.3 nelle dolomie e n.3 nei calcari;
- n.11 prove Point Load, di cui n. 4 nelle dolomie e n. 7 nei calcari;
- n.1 prova di taglio condotta su un giunto dei calcari (n.3 provini).

I risultati delle suddette prove sono presentati, in forma tabellare, nell'Appendice A.

L'ammasso roccioso in corrispondenza dell'imbocco lato Noli si presenta fratturato ed i valori di RQD ottenuti dalle perforazioni risultano nella maggior parte dei casi compresi tra 0 e il 50%, con livelli di roccia frantumata. Nel complesso i giunti sono moderatamente alterati, con apertura attorno ad 1 mm, talvolta con presenza di materiale di riempimento sabbioso, talvolta con ricristallizzazioni di calcite.

Nei calcari l'ammasso si presenta più compatto, ed i valori di RQD sono in gran parte compresi tra il 50 e il 75%.

Le permeabilità stimate sulla base delle prove Lugeon sono dell'ordine di 10^{-5}-10^{-6}m/s, attribuibili prevalentemente a fratturazione.

Per quanto riguarda i parametri di resistenza della roccia integra, descritti mediante il criterio di Hoek-Brown $\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci}' \cdot \left(m_B \frac{\sigma_3'}{\sigma_1'} + 1 \right)^{0,5}$, le prove di laboratorio in cella triassiale hanno fornito i seguenti parametri:

- σ'_{ci} = resistenza alla compressione uniassiale della roccia integra:
  - 67 MPa nelle dolomie;
  - 45 MPa nei calcari;
- m_i = parametro costante:
  - 16 nelle dolomie;
  - 19 nei calcari.

I valori del parametro m_i ottenuti mediante prove di laboratorio risultano dunque sostanzialmente superiori ai valori tipici normalmente adottati in rocce di queste tipologie (*Hoek* e *Brown*, 1980), tipicamente:

- $m_i = 9 \pm 3$ per le dolomie;

- $m_i = 8 \pm 3$ per i calcari.

Per tale motivo, in sede di progettazione preliminare si era dunque scelto di adottare valori di m_i inferiori a quelli ottenuti in laboratorio, ed in particolare:

- $m_i = 12$ per le dolomie;
- $m_i = 15$ per i calcari.

Non disponendo di alcun dato aggiuntivo a riguardo, tali parametri di calcolo vengono sostanzialmente riconfermati anche per la fase di progettazione definitiva avendo cura di raccomandare, per la fase di progettazione esecutiva, una più accurata definizione dei parametri suddetti tramite l'integrazione di ulteriori indagini geognostiche e prove di laboratorio.

Grazie ai risultati delle prove triassiali è stato infine possibile determinare i parametri che definiscono i criteri di rottura per l'ammasso roccioso: criterio di *Hoek-Brown* (*Hoek* e *Carranza-Torres*, 2002) e criterio *Mohr-Coulomb* (Appendice B).

Le velocità soniche (V_p=4600-5600m/s, V_s=3200-4000m/s) ricadono all'interno del tipico range di variazione riscontrato per le formazioni in esame.

2.2 PROSPEZIONI GEOFISICHE

Le prospezioni geofisiche effettuate in corrispondenza dei due imbocchi e di buona parte del tracciato profondo hanno permesso di ricostruire i profili ottenuti con i metodi *sismico a riflessione* e *sismico a rifrazione*.

Le informazioni di maggiore interesse progettuale e contenute nelle prospezioni riguardano essenzialmente:

- le velocità delle onde di compressione nell'ammasso;
- l'identificazione, sia pure indiretta, di strutture tettoniche.

Le velocità delle onde di compressione sono state fornite dai profili sismici a rifrazione elaborati con tecnica tomografica.

Nel tratto profondo i profili non sono stati spinti fino alla profondità di progetto (raggiunta invece dalla sismica a riflessione), ma le velocità rilevate possono comunque essere ritenute ragionevolmente rappresentative anche per profondità maggiori e pari a quella di progetto.

Ai fini della caratterizzazione del tratto profondo, sono dunque state assunte velocità di circa 4500 m/s, con l'eccezione delle zone di faglia e di sovrascorrimento (definite nel seguito "*zone di disturbo*"), nelle quali si ritengono plausibili velocità sensibilmente inferiori.

2.3 REGIME IDROGEOLOGICO

La complessità tettonica e litologia emersa dai rilevamenti di superficie nonchè dalla esecuzione delle indagini preliminari, unitamente al carattere carsico o pseudo-carsico della maggior parte dei termini formazionali presenti, rendono lo stesso assetto idrogeologico ipogeo profondo caratterizzato da grande complessità.

In relazione allo specifico comportamento carsico degli ammassi rocciosi calcarei, ove si instaurano reticoli di flusso idrico ipogeo dominati da cavità, cunicoli e vuoti eterometrici privi di qualsiasi allineamento o assetto geometricamente definibile, la circolazione idrica ipogea è di natura "*random*".

Come riportato nella relazione geologica, la rappresentazione di una falda delimitata da superficie piezometrica non è pertanto in alcun modo possibile.

Tuttavia, poiché nel corso delle indagini effettuate, ed in particolare delle perforazioni orizzontali eseguite (max 50.00 m in orizzontale), non si sono incontrate cavità o vuoti, né la presenza di significative venute idriche o indizi di un'importante circolazione idrica sotterranea, ai fini delle analisi il livello di falda è stato assunto più basso della quota inferiore della galleria. Eventuali effetti locali potranno essere comunque drenati durante le fasi di avanzamento.

Non è tuttavia possibile escludere a priori che nelle zone di contatto stratigrafico nonché in quelle di faglia possano essere intercettate zone ad elevata permeabilità o interessate da cavità carsiche, che dovranno dunque essere identificate con sufficiente anticipo.

Per ridurre i rischi in fase esecutiva, nel corso dei lavori sarà necessario procedere con fori esplorativi in avanzamento tesi ad individuare l'eventuale presenza di cavità carsiche riempite d'acqua lungo l'asse della galleria nonché nelle zone circostanti la zona di scavo.

Vale infine la pena di ricordare che la presenza di una sorgente utilizzata dall'Acquedotto di Savona presso la dismessa galleria ferroviaria (cfr. Carta Idrogeologica) non suscita particolari timori di interferenza con l'opera in progetto, da essa distante circa 350 m, sia in virtù dell'azione drenante esercitata ormai da decenni dalla stessa galleria ferroviaria, sia in virtù della disposizione geometrica e spaziale della nuova opera in rapporto al complessivo assetto idraulico ipogeo profondo locale.

Per maggiori dettagli in merito al regime idrogeologico si rimanda alla relazione geologica allegata al progetto.

3 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

La caratterizzazione degli ammassi rocciosi è stata condotta secondo i seguenti criteri:

- negli **imbocchi**, dove sono disponibili i risultati dei sondaggi geognostici, è stato stimato il valore di GSI (*Geological Strength Index*, *Hoek et al*., 1995) e, successivamente, i parametri necessari a definire i criteri di resistenza di *Hoek-Brown* e di *Mohr-Coulomb*, nonchè il modulo di deformazione (*Hoek* e *Diederichs*, 2006);
- in corrispondenza del **tratto profondo**, nelle zone non interessate dalla presenza di faglie ed al di fuori della zona di sovrascorrimento, si è fatto riferimento alla velocità delle onde di compressione stimando il valore normalizzato *Qc* (*Barton*, 2002) e, di conseguenza, il *GSI*, procedendo poi come al punto precedente;
- per le **fasce tettonizzate e cataclasate**, per le quali non sono disponibili informazioni specifiche, le caratteristiche dell'ammasso sono state stimate facendo riferimento ai criteri proposti da *Habimana et al*. (1999), con la raccomandazione di procedere a valutazioni più approfondite basate su indagini più dettagliate da condurre nel corso della successiva fase esecutiva.

Il valore di *GSI* è stato stimato in base alla tabella proposta da *Hoek* (vedi *Appendice D*).

I parametri di resistenza dell'ammasso roccioso secondo il criterio di *Mohr-Coulomb* sono invece stati calcolati linearizzando l'inviluppo di rottura del criterio di *Hoek-Brown*.

Per tenere conto dell'effetto dello stato tensionale, e quindi della profondità della galleria in corrispondenza delle varie sezioni, il tratto di inviluppo da linearizzare è stato troncato in corrispondenza del valore:

$$\sigma_{3MAX}/\sigma_{cm} = 0{,}47(\sigma_{cm}/\gamma H)^{-0{,}94} \qquad \text{(Hoek et al., 2002)}.$$

Per semplicità, ed a favore di sicurezza, si è omesso di sostituire il termine "γ H" con "$K_0\ \gamma$ H" nei casi in cui

$$K_0 = \sigma_{h0} / \sigma_{v0} > 1.$$

La relazione è applicabile sia a tratti di galleria profondi che a tratti di galleria superficiali, purché la zona plasticizzata non si estenda fino in superficie.

I parametri di resistenza dell'ammasso roccioso sono stati calcolati adottando un coefficiente di disturbo D=0, compatibile con modalità di abbattimento in grado di limitare al minimo il disturbo della roccia circostante il cavo: la qualità dei sistemi di profilatura e di abbattimento dovrà pertanto essere garantita lungo l'intero tracciato.

3.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA ROCCIA INTEGRA

In fase preliminare, sulla base delle prove di laboratorio effettuate, sono state attribuite alla roccia integra le seguenti caratteristiche:

Calcari	Peso dell'unità di volume:	γ =26,2 kN/m^3
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c =45 MPa
	Costante per roccia integra (H-B):	m_i =15
	Modulo di deformazione:	E_d =50 GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν =0,25
	Velocità delle onde di compressione:	V_p =5200 m/s
Dolomie	Peso dell'unità di volume:	γ =27,7 kN/m^3
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c =67 MPa
	Costante per roccia integra (H-B):	m_i =12
	Modulo di deformazione:	E_d =63 GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν =0,30
	Velocità delle onde di compressione:	V_p =5100 m/s

Poiché, rispetto alla precedente fase di progetto, non si dispone di alcuna prova di laboratorio aggiuntiva, tali valori sono sostanzialmente riconfermati.

3.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: DOLOMIE - IMBOCCO LATO NOLI

In fase preliminare, sulla base della tabella riportata in Appendice D, è stato selezionato un valore di GSI pari a 40.
Tale valore, unito ai parametri caratteristici per la roccia integra (dolomie), ha consentito la stima dei seguenti parametri caratteristici per l'ammasso roccioso:

Caratteristiche ammasso	Peso dell'unità di volume:	γ = 27,0 kN/m^3
	Resistenza a trazione:	σ_t = -0,061 MPa
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c = 2,2 MPa
	Resistenza globale:	σ_{cm} = 10,2 MPa
	Costante per ammasso roccioso s:	s = 0,0013
	Costante per ammasso roccioso m_b :	m_b =1,41
	Costante per ammasso roccioso a:	a = 0,51
	Coesione:	c' = 320 kPa

	Angolo di attrito:	φ' = 58.2°[1]
	Modulo di deformazione:	E_d = 10,0 GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν =0,25

Alla luce dei sopralluoghi effettuati ove è prevista la realizzazione dello stesso imbocco Lato Noli, in considerazione dell'elevato grado di fratturazione mostrato dalle rocce ivi presenti, il valore di GSI è sembrato troppo elevato e poco rappresentativo della reale situazione in sito.

D'altra parte, le risultanze delle prove di laboratorio condotte sui campioni di dolomia intatta sono contraddistinte da valori piuttosto dispersi.

In assenza di indagini più approfondite, ed in considerazione del fatto che i parametri di calcolo presentano una grande variabilità in dipendenza dai corrispondenti valori di GSI, m_i e σ_{ci}, è stata effettuata un'analisi di sensitività che ha portato a definire, ai fini del calcolo, parametri di resistenza secondo il criterio di *Mohr-Coulomb* più cautelativi rispetto a quelli adottati in fase preliminare:

Caratteristiche ammasso	Coesione:	c' = 80 kPa
	Angolo di attrito:	φ' = 38°
	Modulo di deformazione:	E_d = 2,0 GPa

3.3 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: CALCARI - IMBOCCO LATO FINALE

In fase preliminare, sulla base della tabella riportata in Appendice D, è stato selezionato un valore di GSI pari a 50.
Tale valore, unito ai parametri caratteristici per la roccia integra (calcari), ha consentito la stima dei seguenti parametri caratteristici per l'ammasso roccioso:

Caratteristiche ammasso	Peso dell'unità di volume:	γ = 26,0 kN/m^3
	Resistenza a trazione:	σ_t = -0,069 MPa
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c = 2,7 MPa
	Resistenza globale:	σ_{cm} = 9,5 MPa
	Costante per ammasso roccioso s:	s = 0,0039
	Costante per ammasso roccioso m_b :	m_b = 2,51
	Costante per ammasso roccioso a:	a = 0,51
	Coesione:	c = 0,43 MPa [2]
	Angolo di attrito:	φ = 57,3° [2]
	Modulo di deformazione:	E_d = 15 GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν = 0,25

Alla luce dei sopralluoghi effettuati ove è prevista la realizzazione dello stesso imbocco Lato Finale, in

[1] Valore riferito ad una profondità di 25 m.

[2] Valore riferito ad una profondità di 40m.

considerazione del grado di fratturazione mostrato dalle rocce ivi presenti, il valore di GSI è sembrato abbastanza elevato e poco rappresentativo della reale situazione in sito, almeno per quanto riguarda la zona più esterna.

In questo caso le risultanze delle prove di laboratorio condotte sui campioni di calcare intatto sono contraddistinte da valori meno dispersi di quelli mostrati invece dalle prove eseguite su campioni di dolomia intatta.

Alla luce della grande variabilità dei parametri di calcolo dai corrispondenti valori di GSI, anche in questo caso è stata effettuata un'analisi di sensitività che ha portato a definire, ai fini del calcolo delle opere predisposte in corrispondenza dell'imbocco, parametri di resistenza secondo il criterio di *Mohr-Coulomb* più cautelativi rispetto a quelli adottati in fase preliminare:

Caratteristiche ammasso	Coesione:	c' = 200 kPa
	Angolo di attrito:	φ' = 40°
	Modulo di deformazione:	E_d = 5,0 GPa

Poiché all'addentrarsi della galleria all'interno dell'ammasso roccioso è plausibile attenersi che le caratteristiche geomeccaniche dello stesso risultino progressivamente migliori, ai fini del calcolo della galleria, in corrispondenza dell'imbocco sono stati adottati gli stessi valori di calcolo suggeriti in fase preliminare, cautelativamente ridotti nel tratto più esterno. Per maggiori dettagli si rimanda al profilo geomeccanico allegato al progetto nonché all'elaborato "*Relazione geotecnica e di calcolo della galleria Capo Noli*".

3.4 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: TRATTO PROFONDO

In corrispondenza del tratto profondo, lungo le zone non interessate dalla presenza di faglie né da fenomeni di sovrascorrimento tra la formazione calcarea e quella dolomitica, non sono attualmente disponibili dati forniti da indagini dirette.

La caratterizzazione degli ammassi rocciosi si è dunque basata sulla velocità delle onde di compressione, adottando come parametri di resistenza della roccia integra quelli ottenuti in corrispondenza degli imbocchi.

Assumendo una velocità delle onde di compressione pari a 4500 m/s, una profondità di 150 m ed una porosità pari al 5%, si ottiene $Q_c \approx 4$ (*Barton*, 2002), che corrisponde a valori di Q pari a circa 6 nelle dolomie e a circa 8,9 nei calcari I suddetti valori sono caratteristici di ammassi rocciosi in condizioni "*discrete*".

Si ottiene quindi il valore di Q modificato (Q') che può essere correlato con GSI secondo la relazione:

$$GSI = 9 \ln Q' + 44$$ (*Hoek et al*., 1995).

Ponendo prudenzialmente Q' = Q si ottiene un valore di GSI circa pari a 60 per entrambe le formazioni.

A partire dai suddetti valori di GSI e dai parametri della roccia integra presentati nei paragrafi precedenti, ipotizzando ancora un grado di disturbo D=0, sono stati stimati i seguenti parametri per gli ammassi rocciosI:

Caratteristiche dolomie	Peso dell'unità di volume:	γ = 27,0 kN/m^3
	Resistenza a trazione:	σ_t = -0,274 MPa
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c = 7,2 MPa
	Resistenza globale:	σ_{cm} = 15,9 MPa
	Costante per ammasso roccioso s:	s = 0,0117
	Costante per ammasso roccioso m_b :	m_b = 2,88

	Costante per ammasso roccioso a:	a = 0,50
	Coesione:	c = 0,91 [3] - 1,32 [4] MPa
	Angolo di attrito:	φ = 59,4 [3] - 51,6° [4]
	Modulo di deformazione:	E_d =16[5] - 33[6] GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν =0,25
Caratteristiche calcari	Peso dell'unità di volume:	γ =26,0 kN/m^3
	Resistenza a trazione:	σ_t =-0,147 MPa
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c = 4,8 MPa
	Resistenza globale:	σ_{cm} =11,8 MPa
	Costante per ammasso roccioso s:	s = 0,0117
	Costante per ammasso roccioso m_b :	m_b = 3,59
	Costante per ammasso roccioso a:	a = 0,50
	Coesione:	c = 0,76 MPa [7]
	Angolo di attrito:	φ = 55,9° [7]
	Modulo di deformazione:	E_d =16[3] – 26[4] GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν =0,25

Per l'identificazione dei parametri di calcolo utilizzati per ogni singolo tratto di galleria si rimanda al profilo geomeccanico allegato al progetto nonché alla relazione geotecnica e di calcolo della galleria.

3.5 CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI: ZONE DI DISTURBO

Le zone di maggiore difficoltà, caratterizzate dalla presenza di materiali con caratteristiche scadenti e potenzialmente soggetti a instabilità in fase di avanzamento, sono identificate con la zona di sovrascorrimento dei calcari sulle dolomie e con gli attraversamenti delle faglie rilevate nel corso delle prospezioni geofisiche.

Le caratteristiche delle cataclasiti che ci si aspetta di incontrare in queste zone sono state stimate facendo riferimento ai criteri proposti da *Habimana* et al. (1999), dove il criterio di rottura di *Hoek-Brown* per l'ammasso roccioso è riformulato come segue:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + t\sigma_{ci}\left(m_b \frac{\sigma_3}{t\sigma_{ci}} + s\right)^a$$

[3] Valore riferito ad una profondità di 35m.

[4] Valore riferito ad una profondità di 150m.

[5] Stimato in base alla relazione $E=10x(Q_c)^{1/3}$ (Barton, 2002)

[6] Stimato in base alla relazione di Hoek e Diederichs (2006)

[7] Valore riferito ad una profondità di 70m.

Dove:

- m_b, s, a = parametri di *Hoek-Brown*, ottenuti con relazioni specifiche per i materiali cataclasati;
- σ_{ci} = resistenza a compressione della roccia integra;
- σ_1 , σ_3 = tensioni principali massima e minima;
- t = coefficiente riduttivo della resistenza a compressione della roccia integra σ_{ci} .

I parametri *t*, *s* ed *a* sono definiti in funzione di GSI. Il parametro m_b dipende invece, oltre che da GSI, anche da m_i (analogo parametro per la roccia integra) e dall'angolo di attrito del materiale di matrice, assunto pari a 30°.

Per quanto riguarda la stima della deformabilità, questa è stata effettuata applicando il metodo proposto da *Hoek e Diederichs* (2006), adottando i consueti parametri della relazione di *Hoek-Brown* ed una resistenza alla compressione della roccia pari al prodotto $t \cdot \sigma_{ci}$. I valori del modulo secante E_S sono stati stimati per GSI compreso tra 15 e 25:

- E_S (GSI = 15 ÷ 25) = 363 ÷ 801 MPa per le dolomie cataclasate;
- E_S (GSI = 15 ÷ 25) = 264 ÷ 633 MPa per i calcari cataclasati.

I valori suddetti saranno adottati ai fini delle valutazioni discusse nel seguito.

I valori di σ_{cm}, qui indicati come σ^*_{cm}, sono stati ottenuti considerando i valori di c' e ϕ' calcolati alla profondità corrispondente, mediante linearizzazione dell'inviluppo di rottura (*Appendice C*).

I parametri ottenuti per gli ammassi rocciosi nelle zone di disturbo (GSI = 15 ÷ 25) risultano i seguenti:

Sovrascorrimento	Peso dell'unità di volume:	γ	= 27,0 kN/m³ [8]
	Resistenza a trazione:	σ_t	≈ 0,0 MPa
	Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c	= 0,015 ÷ 0,099 MPa
	Costante per ammasso roccioso s:	s	= $8 \cdot 10^{-5}$ ÷ $2{,}4 \cdot 10^{-4}$
	Costante per ammasso roccioso m_b :	m_b	= 2,48 ÷ 2,69
	Costante per ammasso roccioso a:	a	= 0,74 ÷ 0,64
	Coefficiente riduttivo:	t	= 0,35 ÷ 0,47
	Coesione:	c	= 0,12 ÷ 0,22 MPa
	Angolo di attrito:	φ	= 40 ÷ 44°
	Resistenza dell'ammasso (z = 92 m):	σ^*_{cm}	= 0,514 ÷ 1,036 MPa
	Modulo di deformazione:	E_d	= 0,29 ÷ 0,63 GPa
	Coefficiente di Poisson:	ν	= 0,30
Faglie	Peso dell'unità di volume:	γ	= 27,0 kN/m³ [8]

[8] Peso unitario della roccia integra, da utilizzare nel calcolo dello stato tensionale alla profondità della galleria.

Resistenza a trazione:	σ_t	≈ 0,0 MPa
Resistenza a compressione uniassiale:	σ_c	= 0,023 MPa
Costante per ammasso roccioso s:	s	= $8 \cdot 10^{-5} \div 2,4 \cdot 10^{-4}$
Costante per ammasso roccioso m_b :	m_b	= 2,34 ÷ 2,48
Costante per ammasso roccioso a:	a	= 0,74 ÷ 0,64
Coefficiente riduttivo:	t	= 0,35 ÷ 0,47
Coesione (z = 62 m):	c	= 0,1 ÷ 0,18 MPa
Angolo di attrito (z = 62m):	φ	= 42 ÷ 48°
Resistenza dell'ammasso (z = 62m):	σ^*_{cm}	= 0,45 ÷ 0,94 MPa
Coesione (z = 86 ÷ 96m):	c	= 0,12 ÷ 0,2 MPa
Angolo di attrito (z = 86 ÷ 96m):	φ	= 41 ÷ 46,5°
Resistenza dell'ammasso (z = 86 ÷ 96 m):	σ^*_{cm}	= 0,52 ÷ 1,0 MPa
Coesione (z = 113 m):	c	= 0,15 ÷ 0,30 MPa
Angolo di attrito (z = 113 m):	φ	= 40 ÷ 44°
Resistenza dell'ammasso (z = 113 m):	σ^*_{cm}	= 0,643 ÷ 1,41 MPa
Coesione (z = 140 ÷ 144m):	c	= 0,23 ÷ 0,32 MPa
Angolo di attrito (z = 140 ÷ 144m):	φ	= 38 ÷ 43°
Resistenza dell'ammasso (z = 140 ÷ 144m):	σ^*_{cm}	= 0,94 ÷ 1,47 MPa
Modulo di deformazione:	E_d	= 0,36 ÷ 0,80 GPa
Coefficiente di Poisson:	ν	= 0,30

3.6 CARATTERIZZAZIONE DEGLI STRATI DI COPERTURA

Per la caratterizzazione geotecnica degli strati di copertura sono stati assunti cautelativamente i seguenti parametri desunti dai valori disponibili in letteratura:

Peso dell'unità di volume:	γ	= 24,0 kN/m^3
Angolo di attrito:	φ	= 40°
Coesione:	c	= 0,035 MPa

4 PARAMETRI DI PROGETTO PER CIASCUN TRATTO DI GALLERIA

Le considerazioni presentate nei capitoli precedenti hanno portato alla suddivisione in tratti della galleria e all'attribuzione a ciascun tratto delle caratteristiche dell'ammasso e della categoria di stabilità (vedi Profilo Geomeccanico allegato al progetto). I parametri geomeccanici che caratterizzano la deformabilità e la resistenza dell'ammasso roccioso in corrispondenza di ciascun tratto di galleria sono presentati in forma tabellare in *Appendice E*.

RIFERIMENTI

Barton N. 2002, Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 39, 185–216.

Habimana, J., Labiouse, V. e Descoeudres, F., 2002 Geomechanical characterisation of cataclastic rocks : experience from the Cleuson-Dixence Project, *International Journal of Rock Mech. and Min. Sciences, vol. 39, num. 6, 2002, p. 677-693*

Hoek, E. ed Diederichs, M.S. 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 203–215.

Hoek, E., Carranza-Torres C. e Corkum, B., 2002, Hoek-Brown criterion – 2002 edition. *Proc. NARMS-TAC Conference*, Toronto, 2002, 1, 267-273.

Hoek E. e E.T. Brown, 1980, *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London.

Hoek E., P.K. Kaiser, e W.F. Bawden, 1995, *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, Balkem.