

00	18/12/2023	PRIMA EMISSIONE	VLDC	-----	ACHI	LVA
REV. REV.	DATA DATE	DESCRIZIONE DESCRIPTION	PREPARATO PREPARED	COLLABORAZ. CONTRIBUTION	CONTROLLATO CHECKED	VALIDATO VALIDATED



**COMUNE DI ISOLA DEL
GRAN SASSO D'ITALIA
PROVINCIA DI TERAMO
REGIONE ABRUZZO**



Enel Green Power Italia srl Technical Referent:
O&M Hydro Italy Maintenance & Technical Support
Center Southern Area Dams & Civil Infrastructures Safety
Territorial Unit MONTORIO ROMA TS CIVIL

ESECUTORE / ESECUTOR RTI Frosio Next (mandataria) - Geodes (mandante)

STRATEGIES FOR WATER



Frosio Next S.r.l.
Via Corfù 71 - 25124 Brescia
Tel: +39 030 3702371
Mail: info@frosionext.com
Sito: www.frosionext.com



Geodes S.r.l.
Piazza Arturo Graf, 124 - 10126 Torino
Tel. +39.011.69.60.938
Mail: mail@geodes.it
Sito: www.geodes.it



IMPIANTO / PLANT	CENTRALE IDROELETTRICA DI SAN GIACOMO AL VOMANO	CODICE ELABORATO / CODE	R.051
PARTE / PART	GRONDA RUZZO MAVONE	FILE / FILES	R.051_Relazione geotecnica.docx
PROGETTO / PROJECT	PROGETTO DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA RIPRISTINO FUNZIONALE CANALE DI GRONDA E OPERE DI PRESA DISSESTATE GRONDA RUZZO MAVONE PER LA CENTRALE IDROELETTRICA DI SAN GIACOMO AL VOMANO	FORMATO / FORMAT	A4
		SCALA PLOT / PLOT SCALE	-
RELAZIONE / REPORT	RELAZIONE GEOTECNICA	SCALA / SCALE	-

RIFERIMENTO CONTRATTO: JA10100090

Commessa: 1395 (FN) - 211232 (GD)

Questo disegno non può essere riprodotto, né utilizzato altrove, né ceduto a terzi in tutto o in parte senza il consenso scritto degli autori

INDICE

1	Premessa	3
2	Inquadramento geologico	4
3	Indagini di riferimento	7
3.1	Zona del nuovo tratto in variante della galleria di derivazione	7
3.2	Zona della gabbionata di sostegno nel tratto iniziale della strada comunale Fano a Corno – Grotte dei Mulattieri	7
4	Risultati delle indagini	9
4.1	Zona del nuovo tratto in variante della galleria di derivazione	9
4.1.1	Sondaggi geognostici	9
4.1.2	Prove di permeabilità di tipo Lugeon	10
4.1.3	Prove dilatometriche	10
4.1.4	Rilievo geostrutturale con sonda BHTV nei fori di sondaggio	11
4.1.5	Prove di laboratorio	12
4.1.6	Indagini geofisiche	15
4.1.7	Stazioni di rilievo geostrutturale	15
4.2	Zona della gabbionata di sostegno nel tratto iniziale della strada comunale Fano a Corno – Grotte dei Mulattieri	15
4.2.1	Sondaggio geognostico	15
4.2.2	Prove di laboratorio	16
4.2.3	Indagini geofisiche	17
4.2.4	Stazione di rilievo geostrutturale	18
5	Caratterizzazione geotecnica della Zona del nuovo tratto in variante della galleria di derivazione	19
5.1	Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso	19
5.1.1	Parametri geotecnici della roccia intatta	20
5.1.2	Parametri geotecnici dell'ammasso roccioso	23
5.2	Caratterizzazione geotecnica dei materiali sciolti	25
5.2.1	Argille limose	26
5.2.2	Depositi detritici	29
6	Caratterizzazione geotecnica della Zona della gabbionata di sostegno nel tratto iniziale della strada comunale Fano a Corno – Grotte dei Mulattieri	30
6.1	Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso	30
6.2	Caratterizzazione geotecnica dei materiali sciolti	32
7	BIBLIOGRAFIA	33

Appendice 1 – BRMR e GSI (Bieniawski, 1989)

1 PREMESSA

Con contratto numero JA10100090 la società Enel Green Power Italia s.r.l. ha affidato tramite gara d'appalto all'Associazione Temporanea d'Impresa (ATI), composta dalla società mandataria Frosio Next S.r.l. e dalla società mandante Geodes S.r.l., lo svolgimento di servizi di ingegneria aventi come oggetto: *“Impianto idroelettrico di San Giacomo al Vomano - Canale di gronda Ruzzo Mavone - Nuovo tratto in variante e ripristino funzionale opere dissestate - Affidamento di incarico professionale per servizi di progettazione direzione lavori e sicurezza nel cantiere”*. La necessità di tali interventi nasce dai dissesti che hanno interessato le opere di derivazione e di adduzione nel periodo 2017-2018. Il suddetto contratto è stato sottoscritto in data 08/02/2022.

Nella presente relazione viene riportata la caratterizzazione geotecnica dei litotipi interessati:

- dal nuovo tratto in variante della galleria di derivazione
- dalla gabbionata di sostegno localizzata in corrispondenza del tratto iniziale della strada comunale Fano a Corno – Grotte dei Mulattieri che conduce alle Opere di Presa del tratto iniziale del canale di gronda.

2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nel seguito si riportano in sintesi le principali caratteristiche geologiche dell'area di studio. Per una descrizione più approfondita si rimanda alla Relazione geologica – Elaborato R.050, nonché alla Carta geologica e geomorfologica – Elaborato D.150 e alle Sezioni geologiche – Elaborato D.151.

Nell'area di studio si incontrano, a partire dal basso verso l'alto stratigrafico:

- il **Basamento pre-Quaternario**, costituito principalmente dai litotipi appartenenti alla **Formazione delle Marne con Cerrognà** che rappresentano il termine stratigrafico più giovane della successione calcareo-marnosa meso-cenozoica. La formazione, il cui spessore varia da 90 m della serie rovesciata (Casale S. Nicola) a 750 m (anticlinale del Montagnone), è caratterizzata da due distinte lito-facies.
 - Litofacies marnoso-calcarenitica costituita da marne, marne calcaree grigie e grigio-avana, e marne-argillose a foraminiferi planctonici, con intercalazioni di calcareniti in strati medi a granulometria da molto fine a media.
 - Litofacies calcarenitico-calciruditica costituita da calcareniti e calciruditi flussoturbiditiche in strati e banchi, di colore grigio e nocciola, con resti spongolitici e glauconite rimaneggiata, e marne calcaree di colore grigio. Verso il basso è presente un intervallo di prevalenti calcareniti massicce a pectinidi, lamellibranchi ostreidi
- Le **Coperture Quaternarie** che rappresentano l'80-85% della superficie nell'area studiata e sono prevalentemente costituite da **depositi eluvio-colluviali** con spessori generalmente inferiori al metro e talora di potenza maggiore in corrispondenza dei settori più pianeggianti. Sono caratterizzati da depositi incoerenti *matrix supported*, costituiti da clasti di dimensioni da millimetrici a centimetrici immersi in abbondante matrice fine di colore scuro limoso-argillosa e sono legati alla disgregazione chimico-fisica del substrato roccioso. In superficie, a monte della frana che negli anni 2017-2018 ha coinvolto il canale di gronda Ruzzo Mavone, sono diffusamente presenti blocchi eterometrici di composizione prevalentemente calcarea. In corrispondenza del settore occidentale dell'area di studio si rinvencono, principalmente alla base delle pareti roccioso calciruditiche e calcareo-marnose, **depositi detritici** incoerenti costituiti da clasti e ciottoli eterometrici e spigolosi, immersi in una matrice fine sabbioso-limosa. Tali depositi derivano da processi di disgregazione meccanica ad opera degli agenti esogeni del substrato roccioso, che in questo settore si presenta intensamente fratturato. Il sondaggio sub-orizzontale S1/2022, eseguito a quota 1089 m s.l.m., ha interessato per i primi 26 m i depositi detritici presenti nell'area di versante circostante l'opera di presa Fonte Nera. In corrispondenza dei principali impluvi sono presenti **depositi torrentizi** costituiti da ciottoli e blocchi generalmente sub-arrotondati di dimensioni da centimetriche a pluridecimetriche in scarsa matrice ghiaioso-sabbiosa. Si tratta di depositi clast-supported originati dal trasporto e successiva deposizione di sedimenti e blocchi da

parte delle acque di ruscellamento superficiale che si incanalano negli impluvi. La presenza di acqua in tali incisioni non è continua ma di carattere stagionale ed è legata ai periodi di maggiore piovosità.

Infine i **depositi di frana** sono largamente diffusi in tutta l'area rilevata e coinvolgono sia le litologie del substrato sia i depositi quaternari. Si tratta di accumuli gravitativi caotici costituiti da ciottoli e blocchi eterometrici (anche maggiori al m³) in scarsa matrice limoso-sabbiosa. Alla base della scarpata principale della frana che ha coinvolto il canale di gronda, sono presenti grosse porzioni di ammasso roccioso disarticolate e ruotate rispetto alla loro posizione originaria, indicanti un cinematismo prevalente di tipo scivolamento rotazionale misto a fenomeni di crollo avvenuti successivamente all'evento principale.

L'assetto geologico-strutturale dell'area di studio risulta essere fortemente complicato dalla presenza di una tettonica fragile e duttile molto complessa legata ad una tettonica a pieghe e sovrascorrimenti che accavallano l'unità di piattaforma carbonatica Triassico-Giurassica, e il suo dominio di transizione al Bacino Pelagico Umbro-Marchigiano, sulle più recenti formazioni Mioceniche torbiditiche silicoclastiche della Formazione della Laga. Tale assetto strutturale è tipico dei cunei accrezionali compressivi.

Dalle evidenze di terreno il substrato roccioso affiorante nell'area di studio è caratterizzato da una stratificazione St con giacitura variabile ma generalmente immergente verso SO con inclinazione compresa tra 17° e 63°.

Nel corso del rilevamento di terreno sono state riconosciute più famiglie di discontinuità responsabili dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e una serie di faglie con orientazione differente, generalmente con cinematismo normale, accompagnate da brecce di faglia scarsamente coesive. Tali strutture sono riportate nella Carta geologica e geomorfologica (Elaborato D.150).

I principali sistemi di fratturazione sono di seguito descritti:

- Il sistema K1 – K1a è caratterizzato da superfici coniugate immergenti verso NE e SO, direzione generale NO-SE, a medio-alto angolo di inclinazione compreso tra 40° e 70°. Il sistema K1a risulta meno rappresentativo in quanto costituito da una bassa quantità di poli.
- Il sistema K2 è caratterizzato da superfici immergenti verso ESE con inclinazione media di 44°. A questo sistema è associato il sistema K2a immergente nella stessa direzione del sistema K2 ma si differenzia dal precedente in quanto risulta essere molto inclinato con valori compresi tra 65-85°.
- Il sistema K3 è caratterizzato da superfici immergenti verso NO con inclinazione media di 65° e presenta una discreta dispersione dei dati.

- Il sistema K4 immerge mediamente verso NNE con inclinazioni comprese tra 30 e 45° e anch'esso presenta una discreta dispersione dei dati.
- Il sistema K5 è caratterizzato da superfici immergenti verso ONO con un medio-basso angolo di inclinazione compreso tra 28-38°. Nonostante la scarsità di dati costituenti questo sistema, si osserva una discreta concentrazione degli stessi indicatori una buona rappresentatività del set di discontinuità.

Sono altresì presenti numerose superfici che non definiscono una concentrazione tale da potersi considerare appartenenti ad uno specifico sistema di discontinuità; pertanto tali giunti possono essere considerati come famiglie *random*.

Per quanto riguarda la tettonica fragile i dati strutturali indicano la presenza di 3 sistemi di faglie principali aventi cinematisimo prevalente di tipo normale. Il sistema F1 presenta superfici con direzione NO-SE e inclinazione media pari a 42°. Il sistema F2 è caratterizzato da piani con direzione OSO-ENE con inclinazioni dell'ordine di 70° e sarebbe associato alle faglie sub-verticali orientate circa E-O che delimitano lateralmente il corpo di frana principale. Tali faglie sono state ben individuate dalle indagini geofisiche. Si individua inoltre un sistema F3 con orientazione NE-SO anch'esso caratterizzato da superfici a medio-alto angolo di inclinazione (70°).

3 INDAGINI DI RIFERIMENTO

Nel seguito sono riportate le indagini di riferimento per la caratterizzazione geotecnica.

3.1 ZONA DEL NUOVO TRATTO IN VARIANTE DELLA GALLERIA DI DERIVAZIONE

In questa zona sono state eseguite le seguenti indagini (ubicate come riportato nella Planimetria con ubicazione delle indagini – Elaborato D.050 e nella Carta geologica e geomorfologica – Elaborato D.150):

- n. 2 sondaggi a carotaggio continuo:
 - il sondaggio S1, avente inclinazione di circa 10° rispetto all'orizzontale, è ubicato presso l'opera di presa Fonte Nera ed è stato carotato in asse al nuovo tratto in variante della galleria di derivazione; ha profondità 50 m
 - il sondaggio S2, carotato in direzione verticale a monte del movimento franoso del pendio che ha interessato il canale tra le opere di presa Fonte Nera e San Nicola 1, ha profondità 120 m
- prove nei fori di sondaggio consistite in: prove di permeabilità di tipo Lugeon, prove dilatometriche, rilievi geostrukturali con sonda BHTV
- prelievo, durante l'esecuzione dei sondaggi, di campioni di terreno e di roccia, indisturbati e rimaneggiati, e successive prove di laboratorio
- indagini geofisiche consistite in:
 - n. 3 sezioni geoelettriche multielettrodo
 - n. 3 sezioni sismiche a rifrazione in onde di compressione
 - n. 1 sezione sismica a rifrazione in onde di taglio
- stazioni di rilievo geostrukturale.

Le perforazioni di sondaggio, il prelievo di campioni di terreno e di roccia e le prove nei fori di sondaggio sono stati effettuati nel periodo ottobre-novembre 2022 dalla ditta Trivelsonda S.r.l. Le prove di laboratorio sono state eseguite nel dicembre 2022 dal laboratorio Laborgeo S.r.l. Le indagini geofisiche sono state eseguite nell'ottobre 2022 dalla società Techgea S.r.l. Le stazioni di rilievo geostrukturale sono state eseguite nel luglio 2022 da Geodes S.r.l.

3.2 ZONA DELLA GABBIONATA DI SOSTEGNO NEL TRATTO INIZIALE DELLA STRADA COMUNALE FANO A CORNO – GROTTI DEI MULATTIERI

In questa zona sono state eseguite le seguenti indagini (ubicate come riportato nella Planimetria con ubicazione delle indagini – Elaborato D.050 e nella Carta geologica e geomorfologica – Elaborato D.150):

- n. 1 sondaggio verticale a carotaggio continuo denominato S1, di profondità 15 m
- prelievo, durante l'esecuzione dei sondaggi, di campioni di terreno e di roccia, indisturbati e rimaneggiati, e successive prove di laboratorio
- indagini geofisiche consistite in:
 - n. 1 sezione tomografica di resistività elettrica
 - n. 1 sezione sismiche tomografica a rifrazione in onde di compressione
 - n. 1 sezione sismiche tomografica a rifrazione in onde di taglio
- n. 1 stazione di rilievo geostrutturale.

La perforazione di sondaggio, il prelievo di campioni di terreno e di roccia sono stati effettuati nel maggio 2014 dalla ditta Sondedile S.r.l. Le prove di laboratorio sono state eseguite nel giugno 2014 dal laboratorio Sogea S.r.l.. Le indagini geofisiche sono state eseguite nell'ottobre 2022 dalla società Techgea S.r.l. La stazione di rilievo geostrutturale è stata eseguita nel luglio 2022 da Geodes S.r.l.

4 RISULTATI DELLE INDAGINI

Nel seguito si riportano i risultati delle indagini eseguite nelle aree di studio con particolare attenzione agli aspetti di riferimento per la caratterizzazione geotecnica. Per ulteriori dettagli relativi a tali indagini si rimanda alla Relazione geologica – Elaborato R.050 e alle relazioni specifiche (Elaborati R.001, R.002, R.003, R.004, R.005, R.006, R.007 e R.010).

4.1 ZONA DEL NUOVO TRATTO IN VARIANTE DELLA GALLERIA DI DERIVAZIONE

4.1.1 SONDAGGI GEOGNOSTICI

Come detto, nella zona del tratto in variante della galleria di derivazione sono stati eseguiti due sondaggi geognostici a carotaggio continuo.

Il sondaggio S1, avente inclinazione di circa 10° rispetto all'orizzontale, è ubicato presso l'opera di presa Fonte Nera ed è stato carotato in asse al nuovo tratto in variante della galleria di derivazione; ha profondità 50 m. Questo sondaggio ha incontrato:

- tra 0.0 e 26.2 m di profondità: depositi detritici
- tra 26.2 e 29.0 m di profondità: argille limose disarticolate
- tra 29.0 e 36.2 m di profondità: calcari marnosi
- tra 36.2 e 46.0 m di profondità: argille limose disarticolate
- tra 46.0 e 50 m di profondità (fondo foro): calciruditi.

Il sondaggio S2, carotato in direzione verticale a monte del movimento franoso del pendio che ha interessato il canale tra le opere di presa Fonte Nera e San Nicola 1, ha profondità 120 m. Questo sondaggio ha incontrato:

- tra 0.0 e 2.7 m di profondità: depositi eluvio colluviali
- tra 2.7 e 16.4 m di profondità: marne argillose
- tra 16.4 e 56.6 m di profondità: marne calcaree-argillose
- tra 56.6 e 59.6 m di profondità: marne argillose
- tra 59.6 e 76.0 m di profondità: calciruditi
- tra 76.0 e 86.0 m di profondità: calcari marnosi
- tra 86.0 e 92.5 m di profondità: calciruditi
- tra 92.5 e 120.0 m di profondità (fondo foro): calcari marnosi.

Per una descrizione più dettagliata della stratigrafia dei suddetti sondaggi si rimanda alla Relazione geologica (Elaborato R.050) e al rapporto tecnico prodotto da Trivelsonda S.r.l. (Elaborato R.002).

4.1.2 PROVE DI PERMEABILITÀ DI TIPO LUGEON

Le prove di permeabilità di tipo Lugeon sono state eseguite nel sondaggio verticale S2 tra 93 e 118 m di profondità all'interno di calcari marnosi intensamente fratturati (prove n. 1 e n. 2) e di calcari marnosi da intensamente fratturati a poco fratturati (prova n. 3). L'ultimo tratto di prova (prova n. 3, da 113 a 118 m di profondità) è ubicato in corrispondenza della profondità della galleria. I risultati sono riportati nella Tabella 4-1, in termini di Unità Lugeon, e nella Tabella 4-2, in termini di coefficiente di permeabilità k . Si nota che il coefficiente di permeabilità, nei tratti di prova indagati, assume un valore mediamente variabile tra $1.8E-08$ e $2.6E-08$ m/s. I valori maggiori del coefficiente di permeabilità corrispondono ai tratti più fratturati.

Tabella 4-1 – Zona galleria di derivazione – Prove di permeabilità di tipo Lugeon. Valori delle Unità Lugeon

Sondaggio	Prova n.	Profondità (m)	Pressione (bar)	Unità Lugeon media	Litologia				
			1.00 Unità Lugeon	2.00 Unità Lugeon	4.00 Unità Lugeon	2.00 Unità Lugeon	1.00 Unità Lugeon		
S2	1	93.00-98.00	0.19	0.22	0.29	0.20	0.14	0.21	Calccare marnoso intensamente fratturato
S2	2	103.00-108.00	0.15	0.20	0.29	0.17	0.13	0.19	Calccare marnoso intensamente fratturato
S2	3	113.00-118.00	0.12	0.14	0.19	0.15	0.12	0.14	Calcari marnosi da intensamente fratturati a poco fratturati in profondità

Tabella 4-2 – Zona galleria di derivazione – Prove di permeabilità di tipo Lugeon. Valori del coefficiente di permeabilità (k)

Sondaggio	Prova n.	Profondità (m)	Pressione (bar)	k medio (m/s)	Litologia				
			1.00 k (m/s)	2.00 k (m/s)	4.00 k (m/s)	2.00 k (m/s)	1.00 k (m/s)		
S2	1	93.00-98.00	$2.3E-08$	$2.8E-08$	$3.5E-08$	$2.5E-08$	$1.8E-08$	$2.6E-08$	Calccare marnoso intensamente fratturato
S2	2	103.00-108.00	$1.9E-08$	$2.5E-08$	$3.6E-08$	$2.1E-08$	$1.6E-08$	$2.3E-08$	Calccare marnoso intensamente fratturato
S2	3	113.00-118.00	$1.5E-08$	$1.8E-08$	$2.4E-08$	$1.8E-08$	$1.5E-08$	$1.8E-08$	Calcari marnosi da intensamente fratturati a poco fratturati in profondità

4.1.3 PROVE DILATOMETRICHE

Sono state eseguite n. 4 prove dilatometriche nel sondaggio verticale S2 tra 94 e 115 m di profondità all'interno di calcari marnosi intensamente fratturati, ad eccezione della prova n. 3 che ha interessato alternanze di porzioni di calcari marnosi litoidi e porzioni cataclastiche. La prova n. 1, da 114 a 115 m di profondità, è stata eseguita in corrispondenza della profondità della galleria. I risultati delle prove dilatometriche sono riportati nella Tabella 4-3 in termini di modulo dilatometrico a carico e modulo dilatometrico a scarico, entrambi calcolati sul 2° ciclo di prova. I moduli variano tra 3000 e 11000 MPa circa.

Tabella 4-3 – Zona galleria di derivazione – Prove di dilatometriche. Valori del modulo dilatometrico

Sondaggio	Prova n.	Profondità (m)	Moduli calcolati sul 2° ciclo		Litologia
			Carico Ed2 (MPa)	Scarico Ee2 (MPa)	
S2	1	114.00-115.00	4 863.6	5 638.2	Calcari marnosi intensamente fratturati
S2	2	109.00-110.00	3 235.1	5 333.4	Calcari marnosi intensamente fratturati
S2	3	104.00-105.00	10 851.8	9 622.2	Alternanze di porzioni di calcari marnosi litoidi e porzioni cataclastiche
S2	4	94.00-95.00	7 200.3	9 391.8	Calcare marnoso intensamente fratturato

4.1.4 RILIEVO GEOSTRUTTURALE CON SONDA BHTV NEI FORI DI SONDAGGIO

Sono stati effettuati rilievi geostutturali con sonda BHTV (Bore-Hole Tele-Viewer) in entrambi i fori di sondaggio, S1 e S2. Più precisamente, nel sondaggio S1 è stato effettuato un log ottico (con sonda ottica OBI-BHTV), mentre nel sondaggio S2 è stato effettuato un log acustico (con sonda acustica ABI-ABHTV). Durante le operazioni, in entrambi i fori di sondaggio sono state riscontrate problematiche nell'esecuzione del rilievo a causa di cedimenti delle pareti di terreno e/o roccia, problematiche che non hanno garantito il completo rilievo geostutturale lungo tutto il profilo dei sondaggi.

Nel sondaggio S1 il rilievo è stato eseguito tra 17.19 e 40.07 m di profondità. In questo sondaggio la sonda si è bloccata nel tratto tra 36 m e 39 m, a causa delle scarse condizioni della roccia. Il rilievo ha evidenziato un ammasso roccioso caratterizzato da diverse famiglie di strutture. La prima immerge con circa 55° in direzione N280°. La seconda famiglia, subverticale, immerge con circa 85° in direzione N265°. Inoltre sono presenti altre strutture secondarie disseminate. Sono state rilevate inoltre due faglie/zone fragili poste alla profondità di 21-24 m e 39.5-40 m da inizio sondaggio. Tali strutture immergono verso SO (la prima) e verso OSO (la seconda) rispettivamente con inclinazioni di 60 e 85°. La stima dell'indice RQD riportata nelle schede di rilievo BHTV non trova riscontro con quanto osservato nelle cassette catalogatrici del sondaggio, in quanto il rilievo con sonda indicata valori di RQD quasi sempre prossimi al 100% con locali tratti compresi tra 10 e 30%. L'esame delle cassette catalogatrici del sondaggio evidenzia invece come l'ammasso roccioso appaia, nelle sue porzioni più litoidi, intensamente fratturato, condizione a cui dovrebbe corrispondere un indice RQD ben inferiore a quanto rilevato con la sonda BHTV. A conferma di ciò la stratigrafia di sondaggio redatta in sito dai tecnici di Trivelsonda mostra valori di RQD generalmente prossimi allo 0% con tratti compresi tra 10 e 30% e ridotte porzioni meno fratturate con RQD tra 50 e 70%.

Nel sondaggio S2 il rilievo con sonda BHTV è stato eseguito tra 75.87 e 120 m di profondità. Nel tratto compreso tra 75.87 e 100 m di profondità sono state individuate numerose discontinuità appartenenti a una famiglia di strutture principali che immerge in direzione 270N con inclinazione di circa 45°. Sono presenti inoltre altre discontinuità diversamente orientate riconducibili a sistemi di secondaria importanza. È stata inoltre riscontrata la presenza di un piano di faglia immergente verso SO con inclinazione pari a circa 60°; tale faglia si posiziona tra 83.8 e 84.2 m da p.c. In analogia al tratto precedente, nel tratto compreso tra 100 e 120 m di profondità si osserva una famiglia di strutture principale immergente verso O con inclinazione di circa 30°. In prossimità della fine del sondaggio (118-119 m da p.c.) è stata rilevata una faglia immergente verso SE con inclinazione di circa 40°. Le superfici di faglia rilevate con la sonda BHTV sono compatibili con le osservazioni delle carote di sondaggio. La stima dell'indice RQD riportata nelle schede di rilievo BHTV indica, per il tratto rilevato, valori generalmente compresi tra 50 e 95% con locali tratti caratterizzati da RDQ decisamente inferiori con valori prossimi al 25%. In questo caso la stratigrafia di sondaggio redatta in sito dai tecnici di Trivelsonda mostra valori di RQD compatibili con il rilievo BHTV.

4.1.5 PROVE DI LABORATORIO

Sono state eseguite prove di laboratorio su campioni di materiali lapidei e di materiali sciolti prelevati durante la perforazione dei sondaggi S1 e S2.

Le prove sui materiali lapidei sono consistite in:

- determinazione del peso di volume, della massa volumica apparente, della massa volumica reale, della porosità, della velocità delle onde di compressione e di taglio
- esecuzione dei prove di compressione monoassiale con determinazione della resistenza a compressione monoassiale, del coefficiente di Poisson tangente, del modulo elastico tangente e del modulo elastico secante
- esecuzione di prove di compressione triassiale.

Le prove sui materiali sciolti sono consistite in:

- determinazione dell'umidità naturale, del peso di volume naturale, del peso di volume secco, del peso di volume saturo, del peso dell'unità di volume della parte solida, dell'indice dei vuoti, della porosità, del grado di saturazione
- analisi granulometriche per setacciatura e per sedimentazione
- determinazione dei Limiti di Atterberg
- prove di compressione triassiale consolidate isotropicamente non drenate, con misura delle pressioni neutre
- prove di taglio diretto consolidate drenate.

I risultati delle prove di laboratorio sono riportati nella Tabella 4-4 (per i materiali lapidei) e nelle Tabelle 4-5 e 4-6 (per i materiali sciolti).

Tabella 4-4 – Zona galleria di derivazione – Prove di laboratorio su materiali lapidei

Calciruditi

Sondaggio	Campione	Profondità (m)	Peso di volume (g/cm ³)	Massa volumica apparente (g/cm ³)	Massa volumica reale (g/cm ³)	Porosità aperta (%)	Porosità totale (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Prova triassiale		Prova monoassiale			
										σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_r (MPa)	ν (-)	Et (MPa)	Es (MPa)
S1	C8	49.15-49.40	2.62838	2.64840	2.77780	0.90	4.70	5 307	2 617	-	-	14.77	0.340	14 982	51 868
S2	C7	64.65-65.00	2.65780	2.66460	2.74800	0.90	3.00	4 399	2 283	-	-	16.56	0.360	25 313	34 319
S2	C8	66.00-66.35	2.63882	2.67010	2.71220	0.60	1.60	5 053	2 478	-	-	15.18	0.330	25 065	31 057
S2	C9	69.00-69.60	2.57562	2.62110	2.72980	2.00	4.00	-	-	0.5	33.97	-	-	-	-
								-	-	1	37.94	-	-	-	-
								-	-	2	44.18	-	-	-	-
S2	C10	70.35-70.85	2.58723	2.67900	2.73170	0.70	1.90	-	-	1	49.74	-	-	-	-
								-	-	2	65.94	-	-	-	-
								-	-	4	87.88	-	-	-	-
S2	C15	87.60-87.90	2.54216	re	2.72380	0.80	2.40	4 626	1 970	-	-	10.43	0.390	15 951	21 559
S2	C21 (*)	91.60-92.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Marne Calcareae

Sondaggio	Camp.	Profondità (m)	Peso di volume (g/cm ³)	Massa volumica apparente (g/cm ³)	Massa volumica reale (g/cm ³)	Porosità aperta (%)	Porosità totale (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Prova triassiale		Prova monoassiale			
										σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_r (MPa)	ν (-)	Et (MPa)	Es (MPa)
S2	C1	25.20-25.60	2.51561	2.59720	2.70240	2.60	3.90	2 781	1 238	-	-	7.43	0.380	6 869	18 847
S2	C2	37.20-37.50	2.55863	2.61030	2.72990	3.30	4.40	3 258	1 471	-	-	12.91	0.370	3 012	9 521
S2	C3	45.70-46.00	2.57807	2.59380	2.71150	3.00	4.30	3 459	1 594	-	-	10.26	0.370	18 387	61 266
S2	C4	49.20-49.60	2.60465	2.61160	2.71630	1.40	3.90	-	-	0.5	19.91	-	-	-	-
								-	-	1	29.73	-	-	-	-
								-	-	2	41.98	-	-	-	-
S2	C5	50.60-51.00	2.66919	2.67550	2.72426	1.00	1.80	4 795	2 517	-	-	30.56	0.310	44 993	83 199

Calci Marnosi

Sondaggio	Camp.	Profondità (m)	Peso di volume (g/cm ³)	Massa volumica apparente (g/cm ³)	Massa volumica reale (g/cm ³)	Porosità aperta (%)	Porosità totale (%)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Prova triassiale		Prova monoassiale			
										σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_r (MPa)	ν (-)	Et (MPa)	Es (MPa)
S2	C14	85.00-85.40	2.60821	2.57680	2.72670	1.70	5.50	4 560	2 030	-	-	8.80	0.380	19 816	44 116
S2	C16	92.50-93.00	2.55242	2.59360	2.72980	2.20	5.00	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	C17	96.60-97.00	2.60263	2.59160	2.76030	1.20	6.10	4 192	2 130	-	-	16.40	0.330	19 310	29 049
S2	C18	103.20-103.60	2.55242	2.59060	2.73220	1.80	5.20	-	-	-	-	-	-	-	-
S2	C19	108.40-108.75	2.65005	2.66340	2.71920	0.80	2.10	4 927	2 470	-	-	17.90	0.330	25 021	30 129
S2	C20	115.60-116.00	2.65563	2.67550	2.74240	0.80	2.40	4 868	2 623	-	-	27.74	0.330	33 647	61 769
S2	C22 (*)	96.10-96.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda:

- Vp Velocità delle onde di compressione
- Vs Velocità delle onde di taglio
- σ_3 Pressione di confinamento laterale
- σ_1 Pressione verticale a rottura
- σ_r Resistenza a compressione monoassiale
- ν Coefficiente di Poisson tangente
- Et Modulo elastico tangente
- Es Modulo elastico secante

Nota:

- (*) Per questi campioni non sono state eseguite prove ma sono state presentate la descrizione generale del campione e una descrizione petrografica semplificata (si rimanda al rapporto tecnico del laboratorio)

Tabella 4-5 – Zona galleria di derivazione – Prove di classificazione in laboratorio su materiali sciolti

Sondaggio	Campione	Profondità (m)	W (%)	γ_v (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e (-)	n (%)	Sr (%)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Descrizione (AGI, 1977)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CNR_UNI 10006
S1	C2	41.40-41.60	15.1	19.4	16.8	20.3	26.1	0.548	35.4	73.1	5.7	21.8	59.7	12.8	Limo sabbioso, argilloso, deb. ghiaioso	40.2	26.3	13.9	A7-6
S1	C3	41.60-41.80	16.1	19.7	16.9	20.4	26.3	0.551	35.5	78.3	4.6	24.5	59.6	11.3	Limo sabbioso, argilloso	38.3	27.5	10.8	A6
S1	C4	41.80-42.00	14.9	19.8	17.2	20.6	26.2	0.522	34.3	76.1	7.2	27.5	56.4	8.9	Limo con sabbia, deb. argilloso, deb. ghiaioso	39.1	27.3	11.8	A6
S1	C5	42.00-42.15	11.6	20.0	17.9	21.0	26.1	0.459	31.5	67.1	8.0	25.4	53.2	13.4	Limo con sabbia, argilloso, deb. ghiaioso	41.6	26.8	14.8	A7-6
S1	C6	42.15-45.00	10.6	20.5	18.5	21.4	26.3	0.416	29.4	68.1	5.5	19.4	61.9	13.2	Limo sabbioso, argilloso, deb. ghiaioso	39.6	26	13.6	A6

Legenda:

- W Umidità naturale
- γ_v Peso di volume naturale
- γ_d Peso di volume secco
- γ_{sat} Peso di volume saturo
- γ_s Peso dell'unità di volume della parte solida
- e Indice dei vuoti
- n Porosità
- Sr Grado di saturazione
- LL Limite liquido
- LP Limite plastico
- IP Indice plastico

Tabella 4-6 – Zona galleria di derivazione – Prove meccaniche in laboratorio su materiali sciolti

Sondaggio	Campione	Profondità (m)	TRX-CIU			TG-CD	
			σ'_3 (kPa)	σ'_1 (kPa)	u (kPa)	σ'_n (kPa)	τ (kPa)
S1	C2	41.40-41.60	-	-	-	100	58.9
			-	-	-	200	108.6
			-	-	-	300	152.8
S1	C3	41.60-41.80	70	207	130	-	-
			250	499	150		
			615	1013	185		
S1	C4	41.80-42.00	-	-	-	100	45.8
			-	-	-	200	86.4
			-	-	-	300	123.6
S1	C5	42.00-42.15	-	-	-	100	68.1
			-	-	-	200	117.8
			-	-	-	300	179.2
S1	C6	42.15-45.00	78	183	122	-	-
			257	435	143		
			636	935	164		

Legenda:

- σ'_3 Pressione di confinamento laterale efficace
- σ'_1 Pressione verticale a rottura efficace
- u Pressione interstiziale a rottura
- σ'_n Pressione verticale efficace
- τ Sforzo di taglio a rottura

4.1.6 INDAGINI GEOFISICHE

Come detto in precedenza, in questa zona sono state eseguite le seguenti indagini geofisiche:

- n. 3 sezioni geoelettriche multielettrodo
- n. 3 sezioni sismiche a rifrazione in onde di compressione
- n. 1 sezione sismica a rifrazione in onde di taglio.

Gli stendimenti sismici e geoelettrici hanno consentito, unitamente ai dati di rilievo in sito e alle risultanze dei sondaggi geognostici, di valutare gli spessori delle coperture detritiche e degli accumuli gravitativi in appoggio sul substrato roccioso e di definire caratteristiche e distribuzione delle principali litologie che caratterizzano il contesto litostratigrafico della zona oggetto di studio. Hanno inoltre permesso di evidenziare le principali faglie e zone di taglio, nonché le principali zone di discontinuità. I risultati sono riportati nella Relazione geologica – Elaborato R.050 e sulle Sezioni geologiche – Elaborato D.151.

4.1.7 STAZIONI DI RILIEVO GEOSTRUTTURALE

Nella zona della galleria, in corrispondenza di un affioramento di marne calcaree (v. Elaborato D.150 – Carta geologica e geomorfologica), è stata effettuata una stazione di rilievo geostrutturale denominata St2A, in corrispondenza della quale è stato stimato un GSI (Geological Strength Index) di 45÷50 (per i dettagli si rimanda alla scheda di rilievo riportata nell'Elaborato R.001 – Rilievi geo-strutturali).

Un'altra stazione geostrutturale, denominata St1, è stata eseguita in questa zona in corrispondenza di un affioramento di calciruditi (v. Elaborato D.150 – Carta geologica e geomorfologica). In corrispondenza di questa stazione è stato stimato un GSI (Geological Strength Index) di 45÷55 (per i dettagli si rimanda alla scheda di rilievo riportata nell'Elaborato R.001 – Rilievi geo-strutturali).

4.2 ZONA DELLA GABBIONATA DI SOSTEGNO NEL TRATTO INIZIALE DELLA STRADA COMUNALE FANO A CORNO – GROTTI DEI MULATTIERI

4.2.1 SONDAGGIO GEOGNOSTICO

Come detto, in questa zona è stato eseguito nel 2014 un sondaggio verticale a carotaggio continuo denominato S1 avente profondità di 15 m.

Questo sondaggio ha incontrato:

- tra 0.0 e 4.7 m di profondità: sabbia media-grossolana con ghiaia da poco a moderatamente addensata
- tra 4.7 e 6.0 m di profondità: argilla marnosa da mediamente consistente a consistente
- tra 6.0 e 11.8 m di profondità: marna calcarea
- tra 11.8 e 12.9 m di profondità: calcarenite
- tra 12.9 e 14.2 m di profondità: marna calcarea
- tra 14.2 e 15 m di profondità (fondo foro): marna e marna argillosa.

Per una descrizione più dettagliata della stratigrafia del suddetto sondaggio si rimanda alla Relazione geologica (Elaborato R.050) e al rapporto tecnico prodotto da Sondedile S.r.l. (Elaborato R.010).

4.2.2 PROVE DI LABORATORIO

Sono state eseguite prove di laboratorio su un campione di materiale lapideo (calcarenite) e su due campioni di materiali sciolti (di cui uno indisturbato e uno rimaneggiato) prelevati durante la perforazione del sondaggio S1. I campioni di materiali sciolti sono in realtà campioni di marna calcarea, che, essendo una roccia tenera, è stata in questo caso sottoposta a prove tipiche di materiali sciolti.

Le prove sui materiali lapidei sono consistite in:

- determinazione del contenuto in acqua, della massa volumica, della velocità di propagazione delle onde soniche
- esecuzione di una prova di compressione monoassiale con determinazione della resistenza a compressione monoassiale, del coefficiente di Poisson tangente, del modulo elastico tangente e del modulo elastico secante.

Le prove sui materiali sciolti sono consistite in:

- determinazione dell'umidità naturale, del peso di volume naturale, del peso di volume secco, del peso di volume saturo, del peso dell'unità di volume della parte solida, dell'indice dei vuoti, della porosità, del grado di saturazione
- analisi granulometriche per setacciatura e per sedimentazione
- determinazione dei Limiti di Atterberg
- prove di taglio diretto consolidate drenate.

I risultati delle prove di laboratorio sono riportate nella Tabella 4-7 (per i materiali lapidei) e nelle Tabella 4-8 e 4-9 (per i materiali sciolti).

Tabella 4-7 – Zona gabbionata – Prove in laboratorio su materiali lapidei

Calcarenite

Sond.	Camp.	Tipo	Profondità (m)	Contenuto in acqua (Umidità media) (%)	Massa volumica (g/cm ³)	Velocità di propagazione delle onde soniche (m/s)	Prova monoassiale			
							σ_r (MPa)	ν (-)	Et (MPa)	Es (MPa)
S1	R2	Rimaneggiato	12.0-12.5	3.8	24.8	1 673	10.28	n.d.	2 791	1 575

Legenda:

- σ_r Resistenza a compressione monoassiale
- ν Coefficiente di Poisson tangente
- Et Modulo elastico tangente
- Es Modulo elastico secante

Tabella 4-8 – Zona gabbionata – Prove di classificazione in laboratorio su materiali sciolti

Sondaggio	Campione	Tipo	Profondità (m)	W (%)	γ_v (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	e (-)	n (%)	Sr (%)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Descrizione (AGI, 1977)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
S1	1	Indisturbato	9.0-9.3	7.0	22.1	20.7	22.6	26.2	0.242	19.5	75.7	1.7	21.3	38.1	38.9	Argilla con limo sabbiosa	36.3	28.0	8.3
S1	R1	Rimaneggiato	4.4-4.8	-	20.40	-	-	26.40	-	-	-	20.10	31.10	27.00	21.80	Sabbia con limo argillosa ghiaiosa	30.3	22.0	8.3

Legenda:

- W Umidità naturale
- γ_v Peso di volume naturale
- γ_d Peso di volume secco
- γ_{sat} Peso di volume saturo
- γ_s Peso dell'unità di volume della parte solida
- e Indice dei vuoti
- n Porosità
- Sr Grado di saturazione
- LL Limite liquido
- LP Limite plastico
- IP Indice plastico

Tabella 4-9 – Zona gabbionata – Prove meccaniche di laboratorio su materiali sciolti

Sondaggio	Campione	Tipo	Profondità (m)	Prove di taglio diretto consolidate drenate - TG-CD	
				σ'_n (kPa)	τ (kPa)
S1	1	Indisturbato	9.0-9.3	100.00	150
				200.00	197
				300.00	224

Legenda:

- σ'_n Pressione verticale efficace
- τ Sforzo di taglio a rottura

4.2.3 INDAGINI GEOFISICHE

Come detto in precedenza, in questa zona sono state eseguite le seguenti indagini geofisiche:

- n. 1 sezione tomografica di resistività elettrica
- n. 1 sezione sismiche tomografica a rifrazione in onde di compressione
- n. 1 sezione sismiche tomografica a rifrazione in onde di taglio

Come per la zona della galleria, gli stendimenti geofisici hanno consentito, unitamente ai dati di rilievo in sito e alle risultanze del sondaggio geognostico, di valutare gli spessori delle coperture detritiche e degli accumuli gravitativi in appoggio sul substrato roccioso e di definire caratteristiche e distribuzione delle principali litologie che caratterizzano il contesto litostratigrafico della zona oggetto di studio. Hanno inoltre permesso di evidenziare le principali faglie e zone di taglio, nonché le principali zone di discontinuità. I risultati sono riportati nella Relazione geologica – Elaborato R.050, nonché sulle Sezioni geologiche – Elaborato D.151.

4.2.4 STAZIONE DI RILIEVO GEOSTRUTTURALE

Nella zona della gabbionata, in corrispondenza di un affioramento di marne calcaree (v. Elaborato D.150 – Carta geologica e geomorfologica), è stata effettuata una stazione di rilievo geostrutturale denominata St3, in corrispondenza della quale è stato stimato un GSI (Geological Strength Index) di 55÷60 (per i dettagli si rimanda alla scheda di rilievo riportata nell'Elaborato R.001 – Rilievi geo-strutturali).

5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELLA ZONA DEL NUOVO TRATTO IN VARIANTE DELLA GALLERIA DI DERIVAZIONE

Il nuovo tratto in variante della galleria di derivazione attraverserà i seguenti litotipi:

- da pk 0.00 a pk 25.88: depositi detritici
- da pk 25.88 a pk 37.99: argille limose disarticolate
- da pk 37.99 a pk 329.88: calcari marnosi
- da pk 329.99 a pk 357.19: calciruditi
- da pk 357.19 a pk 397.35 (fine tratta in variante): marne calcaree.

All'interno dell'ammasso roccioso più o meno fratturato sono state riconosciute zone di faglia, zone tettonizzate e superfici di taglio (si vedano le Sezioni Geologiche e il Profilo geomeccanico in asse – Elaborati D.151 e D.155 rispettivamente).

Nel seguito viene riportata la caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso e dei materiali sciolti basata sull'interpretazione delle indagini eseguite e prima descritte.

5.1 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

La caratterizzazione geotecnica dei litotipi rocciosi è stata condotta in riferimento a un mezzo continuo equivalente, omogeneo ed isotropo, con modello costitutivo elasto-plastico ideale, le cui caratteristiche di resistenza sono quantificate in riferimento al criterio non lineare di Hoek-Brown (Hoek e Brown, 1988; Hoek et al., 2002), espresso dalla relazione:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (5-1)$$

essendo m_b , s e a dei fattori di scala legati all'indice GSI (Geological Strength Index) e definiti, rispettivamente, mediante le seguenti espressioni empiriche:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D} \right)} \quad (5-2)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D} \right)} \quad (5-3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{-GSI/15} - e^{-203} \right) \quad (5-4)$$

dove:

- m_i è un parametro che consente di rappresentare l'incremento di resistenza al crescere della pressione di confinamento laterale σ_3 e viene ricavato dall'interpretazione di prove a compressione triassiale e monoassiale in laboratorio
- σ_{ci} è la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta, ricavabile da prove di laboratorio
- D è il grado di disturbo dell'ammasso roccioso, assunto uguale a 0.

I valori del modulo di deformabilità E_d dei litotipi rocciosi sono stati ricavati in funzione dell'indice GSI (Geological Strength Index) secondo la seguente relazione di Hoek e Diederichs (2006):

$$E_d = E_i \cdot \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{((60+15 \cdot D - GSI)/11)}} \right) \text{ (GPa)} \quad (5-5)$$

dove:

- E_d è il modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso
- E_i è il modulo elastico della roccia intatta, ricavabile da prove di laboratorio

assumendo D uguale a 0.

5.1.1 PARAMETRI GEOTECNICI DELLA ROCCIA INTATTA

Nel seguito si riportano i parametri della roccia intatta per i tre litotipi che saranno interessati dallo scavo del tratto in variante della galleria:

- calcari marnosi
- calciruditi
- marne calcaree.

Per la determinazione dei parametri di resistenza e di deformabilità si è fatto riferimento ai risultati delle prove di laboratorio riportate nel Capitolo 4 (Tabella 4-4).

In particolare, per quanto concerne i parametri di resistenza, si è fatto riferimento ai risultati delle prove di compressione monoassiale e triassiale ove disponibili (calciruditi e marne calcaree). Le Figure 5-1 e 5-2 riportano l'interpretazione dei risultati di tali prove effettuata secondo il criterio di Hoek e Brown (1980, 1988, 1997, 2002) su roccia intatta e utilizzando il codice di calcolo RocLab di Rocscience Ltd. Il criterio di resistenza di Hoek e Brown per roccia intatta è espresso come segue:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_i \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (5-6)$$

dove:

$\sigma_1 =$ tensione principale massima a rottura;

- σ_3 = tensione principale minima a rottura;
- σ_{ci} = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- m_i = costante del materiale per roccia intatta;
- s = 1 per roccia intatta.

Come si può notare, per il caso in esame, la costante m_i è pari a 50.0 per le calciruditi e a 41.968 per le marne calcaree, mentre il valore di σ_{ci} è pari a 14.416 MPa per le calciruditi e a 14.832 per le marne calcaree.

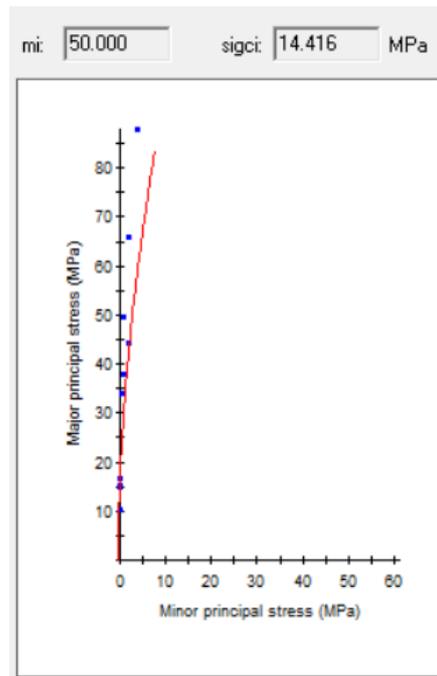


Figura 5-1 – Zona galleria di derivazione. Inviluppo di resistenza di Hoek e Brown per roccia intatta (calciruditi)

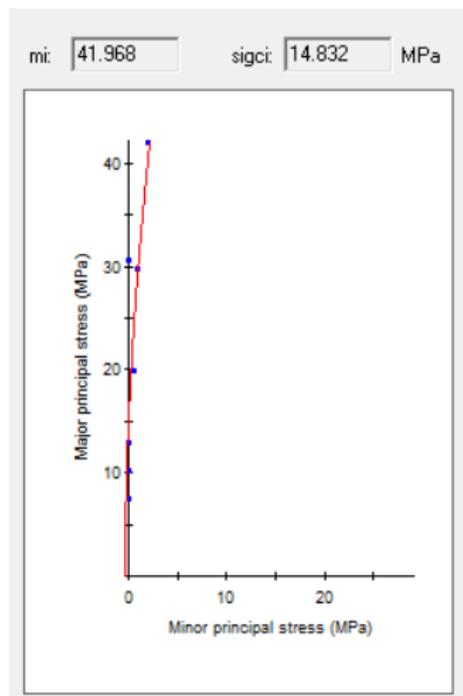


Figura 5-2 – Zona galleria di derivazione. Involuppo di resistenza di Hoek e Brown per roccia intatta (marne calcaree)

Per i calcari marnosi si hanno a disposizione prove di compressione monoassiale mentre non sono disponibili prove di compressione triassiale. Per questo litotipo come valore di σ_{ci} si è assunto il valore medio dei valori di resistenza a compressione monoassiale ricavati dalle prove di laboratorio, quindi il valore 17.71 MPa; per la costante m_i è stato assunto un valore analogo a quello dei calcari marnosi: 42.

Per il modulo di deformabilità (E_i) e il peso di volume (γ) sono stati assunti i valori medi ottenuti dalle prove di laboratorio; per il modulo di deformabilità è stato considerato il modulo tangente. Nella Tabella 5-1 sono riepilogati i parametri della roccia intatta per i litotipi considerati.

Tabella 5-1 – Zona galleria di derivazione – Parametri della roccia intatta

Litotipo	γ (kN/m ³)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)
Calcari marnosi	26.0	24449	17.710	42
Calciruditi	26.0	20328	14.416	50
Marne calcaree	25.9	18315	14.832	42

5.1.2 PARAMETRI GEOTECNICI DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Dato il valore di GSI (Geological Strength Index), utilizzando le relazioni (5-2), (5-3), (5-4) e (5-5) si ottengono i parametri geotecnici di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso partendo dai parametri della roccia intatta prima definiti.

I valori di GSI sono stati ricavati in funzione dei dati ottenuti dai rilievi geostrutturali in superficie e dai dati geostrutturali ottenuti in profondità nei sondaggi S1 e S2 (per maggiori dettagli si veda la Relazione geologica – Elaborato R.050), passando attraverso la determinazione dell'indice RMR (Rock Mass Rating) e applicando la classificazione di Bieniawski (1989).

L'indice RMR (Rock Mass Rating) viene determinato sulla base della somma dei coefficienti numerici associati alla valutazione delle seguenti caratteristiche (Tabella 5-2):

- resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta σ_{ci}
- RQD (Rock Quality Designation)
- spaziatura delle discontinuità
- condizione delle discontinuità
- presenza d'acqua
- orientazione delle discontinuità rispetto alla direzione del pendio.

Tabella 5-2 – Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso (Bieniawski, 1989)

A. Classification parameters and their ratings							
PARAMETER		RANGES OF VALUES					
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 compressive test is preferred	
	Uniaxial compressive strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	0
	Drill core quality RQD	90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%	
	Rating	20	17	13	8	3	
	Spacing of discontinuities	> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Rating	20	15	10	8	5	
	Condition of discontinuities	Very rough surfaces. Not continuous. No separation. Unweathered wall rock.	Slightly rough surfaces. Separation < 1mm. Slightly weathered walls.	Slightly rough surfaces. Separation < 1mm. Highly weathered walls.	Slickensided surfaces. OR Gouge < 5mm thick OR Separation 1-5mm. Continuous.	Soft gouge > 5mm thick or Separation > 5mm Continuous	
	Rating	30	25	20	10	0	
Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	None	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min	
	Ratio joint water pressure major principal stress	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
	General conditions	completely dry asciutto	Damp	Wet	Dripping	Flowing	
	Rating	15	10	7	4	0	
B. Rating adjustment for discontinuity orientations							
Strike and dip orientation of joints		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	
Effect of discontinuity strike and dip orientation in tunnelling							
Strike perpendicular to tunnel axis	Drive with dip	Dip 45°-90°				Very favourable	
		Dip 20°-45°				Favourable	
		Dip 45°-90°				Fair	
Strike parallel to tunnel axis	Drive against dip	Dip 20°-45°				Unfavourable	
		Dip 20°-45°				Fair	
		Dip 45°-90°				Very Unfavourable	
Irrespective of strike					Dip 0°-20°		Unfavourable
C. Rock mass classes determined from total ratings							
Class No.	I	II	III	IV	V		
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
Rating	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20		
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 to 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°		

Ponendo il coefficiente relativo alla presenza di acqua nei giunti pari a 15 e 0 il coefficiente relativo alla giacitura dei giunti rispetto alla direzione della galleria, si ottiene l'indice BRMR (Basic Rock Mass Rating) dal quale si ricava direttamente l'indice GSI (Geological Strength Index) mediante la seguente correlazione:

$$GSI = BRMR - 5 \tag{5-7}$$

I dati di rilievo geologico-strutturale eseguiti nelle stazioni di superficie e in profondità nei fori di sondaggio S1 e S2 sono stati elaborati per la determinazione di BRMR e GSI. Nell'Appendice 1 sono riportati i risultati ottenuti per ogni stazione di rilievo e per i due sondaggi. Nella Tabella 5-3 sono riportati gli intervalli dei valori di GSI associati ai litotipi interessati dalla galleria.

Tabella 5-3 – Zona galleria di derivazione – Valori di GSI

Litotipo	GSI
Calcari marnosi	45÷55
Calcari marnosi in zona di faglia	35÷45
Calciruditi	45÷55
Marne calcaree	40÷50

Dati i valori di GSI e i parametri della roccia intatta, utilizzando le relazioni (5-2), (5-3), (5-4) e (5-5) sono stati definiti i parametri geotecnici dell'ammasso roccioso riportati nella Tabella 5-4. Si può notare che i valori del modulo di deformabilità dei calcari marnosi sono in linea con i valori di modulo determinati con le prove dilatometriche (Capitolo 4, Tabella 4-3).

Tabella 5-4 – Zona galleria di derivazione – Parametri geotecnici della roccia intatta e dell'ammasso roccioso

Calcari marnosi - Condizioni geomeccaniche "intermedie": GSI=45

γ (kN/m ³)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)	GSI (-)	m_b (-)	s (-)	a (-)	E_d (MPa)
26.0	24 449	17.710	42	45	5.891	0.0022	0.508	5 468

Calcari marnosi - Condizioni geomeccaniche "migliori": GSI=55

γ (kN/m ³)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)	GSI (-)	m_b (-)	s (-)	a (-)	E_d (MPa)
26.0	24 449	17.710	42	45	8.419	0.0067	0.504	9 982

Calcari marnosi in zona di faglia: GSI=35

γ (kN/m ³)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)	GSI (-)	m_b (-)	s (-)	a (-)	E_d (MPa)
26.0	24 449	17.710	42	35	4.122	0.0007	0.516	2 773

Calciruditi - GSI=50

γ (kN/m ³)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)	GSI (-)	m_b (-)	s (-)	a (-)	E_d (MPa)
26.0	20 328	14.416	50	50	8.384	0.0039	0.506	6 244

Marne calcaree: GSI=45

γ (kN/m ³)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)	GSI (-)	m_b (-)	s (-)	a (-)	E_d (MPa)
25.9	18 315	14.832	42	45	5.886	0.0022	0.508	4 096

5.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI SCIOLTI

Come detto, nella zona dell'imbocco di monte il tratto in variante della galleria incontra per circa 26 m depositi detritici e per i successivi 12 m circa argille limose disarticolate ⁽¹⁾.

Per le argille limose sono disponibili prove di classificazione e prove meccaniche.

⁽¹⁾ Questo litotipo è denominato "argille limose". In realtà le analisi granulometriche eseguite (Tabella 4- 5 del Capitolo 4) indicano che si tratta di limi sabbiosi argillosi a tratti debolmente ghiaiosi.

La caratterizzazione meccanica di resistenza di questi materiali sciolti è stata condotta in riferimento a un mezzo continuo equivalente, omogeneo ed isotropo, con modello costitutivo elasto-plastico ideale, le cui caratteristiche di resistenza sono quantificate in riferimento al criterio lineare di Mohr-Coulomb, espresso dalla relazione:

$$\tau = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi' \quad (5-8)$$

dove:

- τ = tensione tangenziale sul piano di taglio
- σ'_n = tensione efficace normale al piano di taglio
- c' = coesione efficace.

Nel seguito si riporta la caratterizzazione geotecnica dei litotipi sopracitati.

5.2.1 ARGILLE LIMOSE

Il litotipo denominato “argille limose” è costituito da limi sabbiosi argillosi a tratti debolmente ghiaiosi (v. Tabella 4-5 nel Capitolo 4).

Nelle Figure 5-3 e 5-4 sono riportate la Carta di Plasticità di Casagrande (Figura 5-3) e la Carta di Plasticità adattata al Sistema Unificato (Figura 5-4) ottenute dall'elaborazione dei dati delle prove di classificazione. Come si può notare dalla Carta di Plasticità di Casagrande il litotipo in esame è classificabile come limi inorganici di media compressibilità e limi organici, mentre, dal punto di vista del Sistema Unificato, si tratta di Limi inorganici e Limi e argille organici con limite di liquidità inferiore al 50%.

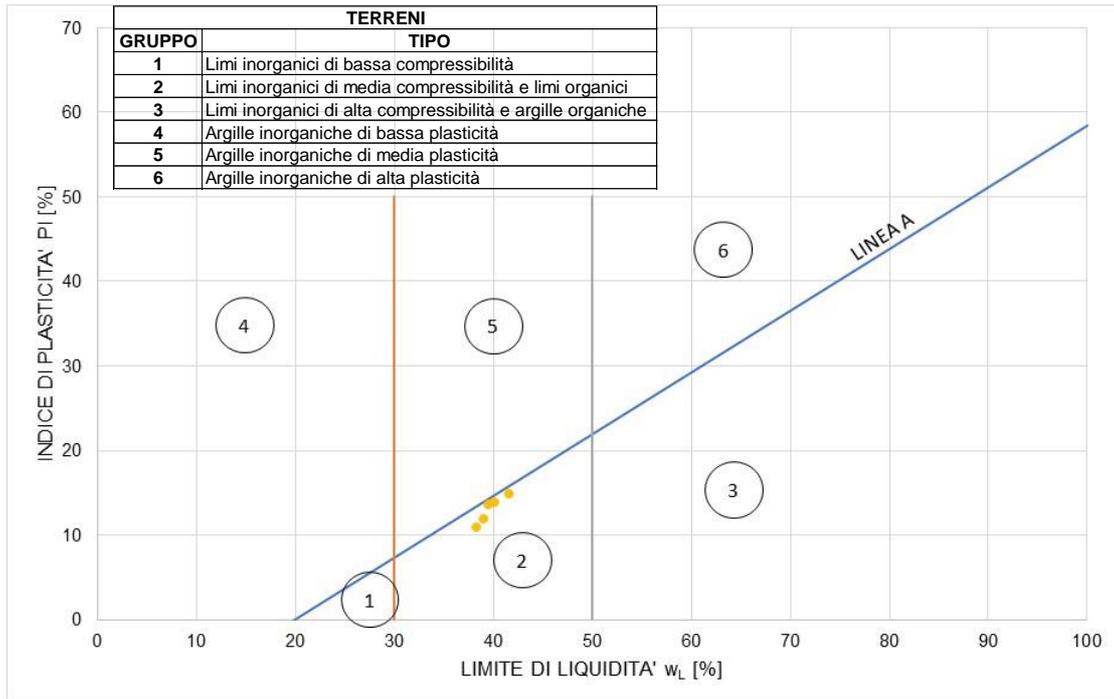


Figura 5-3 – Zona galleria di derivazione. Argille limose. Carta di Plasticità di Casagrande

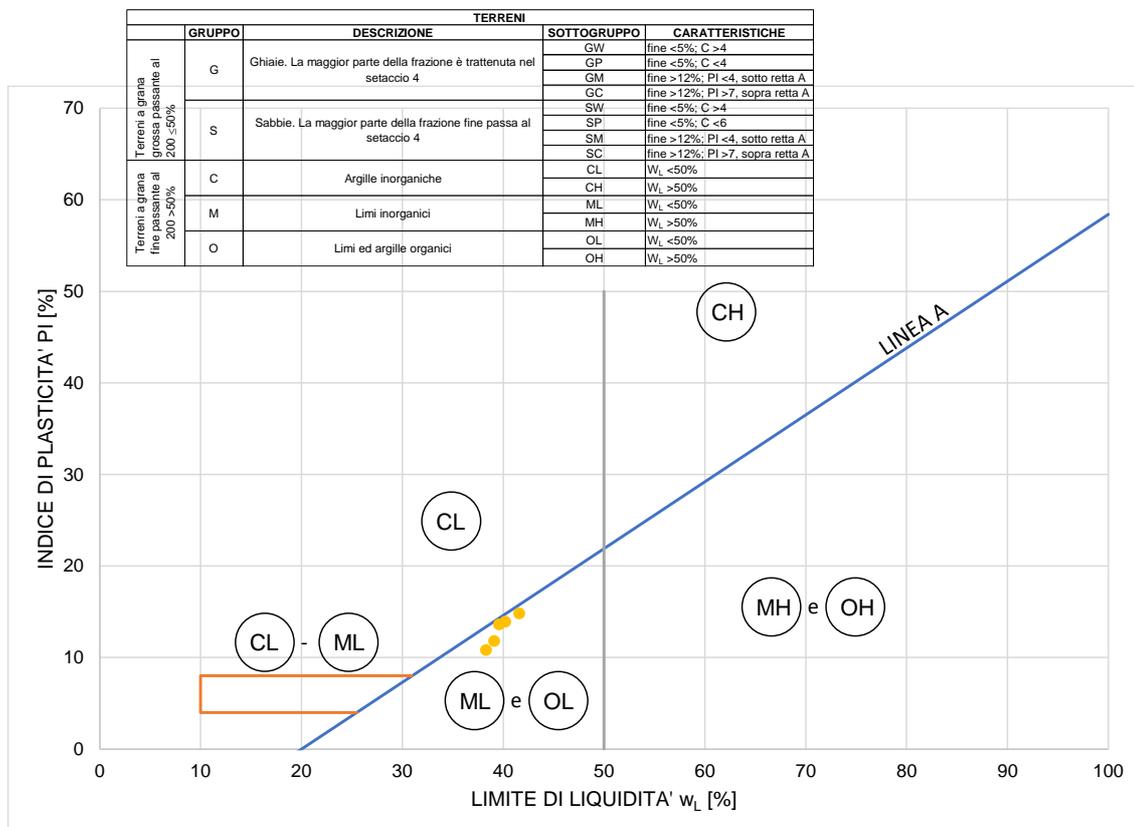


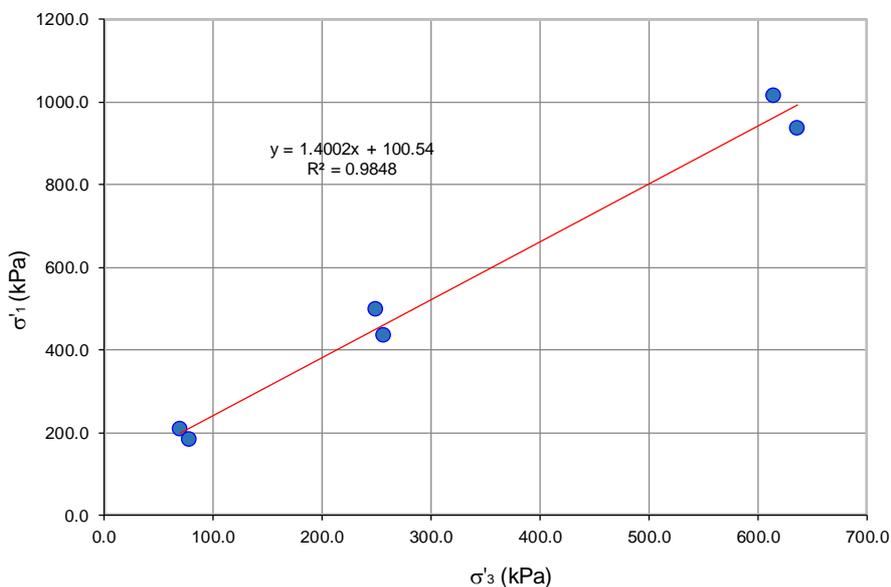
Figura 5-4 – Zona galleria di derivazione. Argille limose. Carta di Plasticità adattata al Sistema Unificato

Nelle Figure 5-5 e 5-6 sono riportati gli involucri di resistenza, secondo il criterio lineare di Mohr-Coulomb, per le argille limose, con riferimento ai risultati delle prove triassiali consolidate isotropicamente non drenate con misura delle pressioni neutre (Figura 5-3) e con riferimento alle prove di taglio diretto consolidate drenate (Figura 5-4). Gli involucri di resistenza sono in termini di tensioni efficaci.

Come si può notare, l'interpretazione delle due tipologie di prova fornisce risultati sensibilmente diversi:

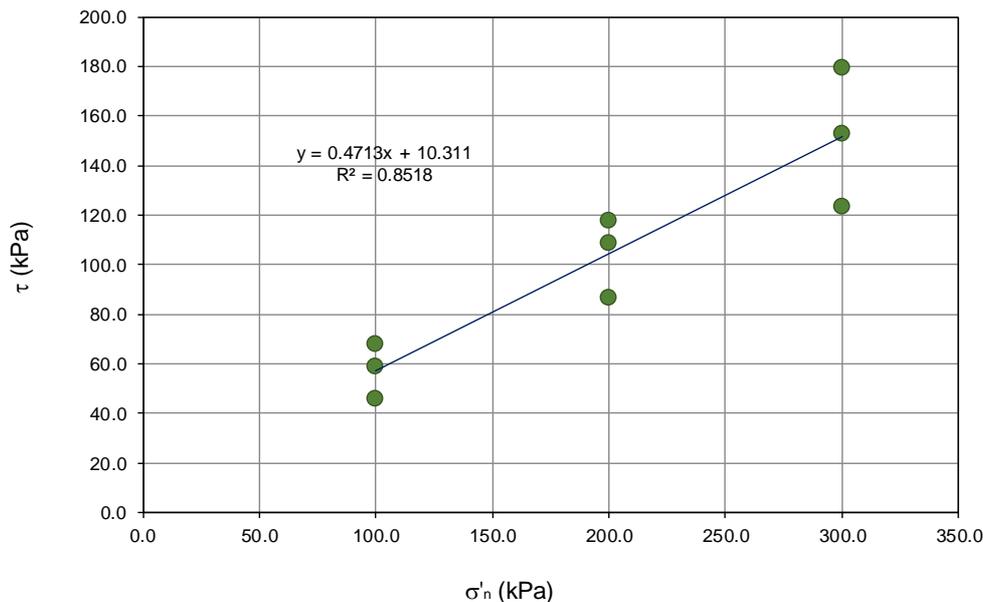
- prove triassiali: $c'=42.48$ kPa; $\phi'=9.60^\circ$
- prove di taglio diretto: $c'=10.31$ kPa; $\phi'=25.24^\circ$.

Facendo riferimento a dati di letteratura e all'esperienza su materiali analoghi si ritengono più rappresentativi i risultati forniti dalle prove di taglio diretto consolidate drenate. Nella Tabella 5-5 sono riepilogati i parametri geotecnici delle argille limose. I parametri di resistenza (c' e ϕ') derivano, come detto, dall'interpretazione delle prove di taglio diretto consolidate drenate; il valore del peso di volume (γ) è la media dei valori ottenuti in laboratorio; il modulo di deformabilità (E) deriva da dati di letteratura relativi a materiali analoghi.



ϕ' ($^\circ$)	9.60
c' (kPa)	42.48

Figura 5-5 – Zona galleria di derivazione. Argille limose. Prove triassiali consolidate isotropicamente non drenate con misura delle pressioni neutre. Involucro di resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci sul piano delle tensioni principali



ϕ' (°)	25.24
c' (kPa)	10.31

Figura 5-6 – Zona galleria di derivazione. Argille limose. Prove di taglio diretto consolidate drenate. Involuppo di resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci sul piano $\tau-\sigma'_n$

Tabella 5-5 – Zona galleria di derivazione – Parametri geotecnici delle argille limose

Litotipo	γ (kN/m ³)	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Argille limose	19.9	20	10	25

5.2.2 DEPOSITI DETRITICI

Non sono disponibili prove geotecniche sui depositi detritici, anche per la difficoltà a testare con prove attendibili un materiale di questo genere dove si rinvengono grossi blocchi in una matrice più o meno fine.

Con riferimento a dati di letteratura e considerando la composizione di questo materiale sono stati assunti i parametri geotecnici riportati nella Tabella 5-6.

Tabella 5-6 – Zona galleria di derivazione – Parametri geotecnici dei depositi detritici

Litotipo	γ (kN/m ³)	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Depositii detritici	20.5	30	10	32

6 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELLA ZONA DELLA GABBIONATA DI SOSTEGNO NEL TRATTO INIZIALE DELLA STRADA COMUNALE FANO A CORNO – GROTTI DEI MULATTIERI

In questa zona, oltre al materiale di riporto costituente le gabbionate, di potenza variabile tra 2.5 m e 7.5 m circa, sono presenti i seguenti litotipi rocciosi:

- calcareniti
- marne calcaree.

È presente inoltre una coltre di depositi di frana, al piede delle gabbionate, che si estende verso valle (si veda la Carta geologica e geomorfologica – Elaborato D.150).

Nel seguito viene riportata la caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso e dei materiali sciolti presenti in questa zona.

6.1 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

La caratterizzazione geotecnica delle calcareniti è stata condotta in riferimento a un mezzo continuo equivalente, omogeneo ed isotropo, con modello costitutivo elasto-plastico ideale, le cui caratteristiche di resistenza sono quantificate in riferimento al criterio non lineare di Hoek-Brown (Hoek e Brown, 1988; Hoek et al., 2002), espresso come indicato nel Paragrafo 5.1.

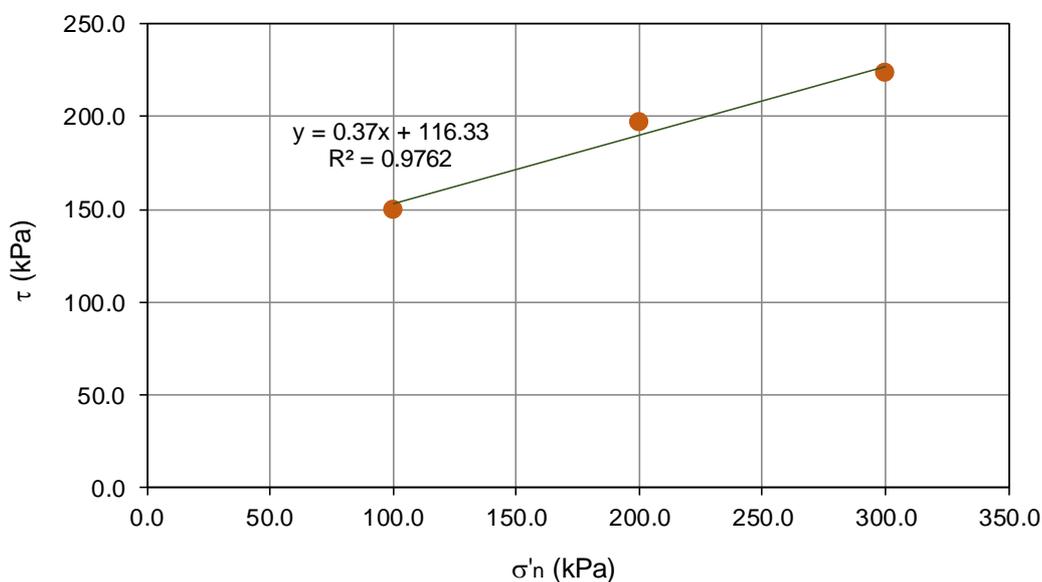
Per questo litotipo è disponibile una prova di compressione monoassiale con determinazione della resistenza a compressione monoassiale e dei moduli elastici tangente e secante (v. Tabella 4-7 al Paragrafo 4.2). Per il GSI (Geological Strength Index) si è assunto l'intervallo di valori 50÷60, in linea con il GSI rilevato per le marne calcaree in corrispondenza della stazione di rilievo geostrutturale St3 (GSI = 55÷60 – v. Paragrafo 4.2.4). Assumendo il valore medio GSI=55 si ottengono i parametri geotecnici riportati nella Tabella 6-1.

Tabella 6-1 – Zona della gabbionata – Parametri geotecnici delle calcareniti

γ (kN/m^3)	E_i (MPa)	σ_{ci} (MPa)	m_i (-)	GSI (-)	m_b (-)	s (-)	a (-)	E_d (MPa)
24.8	18 315	10.280	42	55	8.413	0.0067	0.504	7 478

Per quanto riguarda le marne calcaree si è fatto riferimento ai risultati delle prove di laboratorio riportate nella Tabella 4-9 del Paragrafo 4.2. La caratterizzazione meccanica di resistenza delle marne calcaree in questa zona è stata condotta in riferimento a un

mezzo continuo equivalente, omogeneo ed isotropo, con modello costitutivo elasto-plastico ideale, le cui caratteristiche di resistenza sono quantificate in riferimento al criterio lineare di Mohr-Coulomb espresso come indicato nel Paragrafo 5.2. Nella Figura 6-1 è riportato l'involuppo di resistenza, secondo il criterio lineare di Mohr-Coulomb, per le marne calcaree, con riferimento ai risultati delle prove di taglio diretto consolidate drenate (v. Tabella 4-9 del Capitolo 4); l'involuppo di resistenza è in termini di tensioni efficaci. Nella Tabella 6-2 sono riepilogati i parametri geotecnici delle marne calcaree; il peso di volume è quello ottenuto dalle prove di laboratorio (v. Tabella 4-8 del Capitolo 4).



ϕ' (°)	20.30
c' (kPa)	116.33

Figura 6-1 – Zona della gabbionata. Marne calcaree. Prove di taglio diretto consolidate drenate. Inviluppo di resistenza di Mohr-Coulomb in termini di tensioni efficaci sul piano $\tau-\sigma'_n$

Tabella 6-2 – Zona della gabbionata – Parametri geotecnici delle marne calcaree

Litotipo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Marne calcaree	22.1	116.33	20.30

6.2 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI MATERIALI SCIOLTI

Non sono disponibili prove geotecniche sui depositi di frana, anche per la difficoltà a testare con prove attendibili un materiale di questo genere dove si rinvengono grossi blocchi eterometrici (anche maggiori al m³) in scarsa matrice limoso-sabbiosa.

Con riferimento a dati di letteratura e considerando la composizione di questo materiale sono stati assunti i parametri geotecnici riportati nella Tabella 6-3.

Tabella 6-3 – Zona della gabbionata – Parametri geotecnici dei depositi di frana

Litotipo	γ (kN/m³)	E (MPa)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Depositi di frana	20.5	30	5	32

7 BIBLIOGRAFIA

Bieniawski Z.T. (1989). "Engineering Rock Mass Classification", J. Wiley, New York, 1989

Brown E.T.; Hoek E. (1988). (discussion on). "Determination of shear failure envelope in rock masses". ASCE, J. of Geotechnical Engineering Division, 114, 3, 371-376

Hoek E.; Brown E.T. (1980). "Empirical strength criterion for rock masses". J. of Geotechnical Engng., ASCE, Vol. 106, No. GT9, pp. 1013-1035

Hoek E., Brown E.T. (1988). "The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update". Proc. 15th Can. Rock Mechanics Symp., University of Toronto, pp. 31-38

Hoek E.; Brown E.T. (1997). "Practical estimates of rock mass strength". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No 8, pp. 1165-1186

Hoek E. (2002) "A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion"

Hoek E.; Carranza-Torres C.; Corkum B. (2002) "Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition". Proc. North American Rock Mechanics Society meeting, Toronto, July 2002, pp. 267-273

Hoek E., Diederichs M.S. (2006). "Empirical estimation of rock mass modulus" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp. 203-215

Marinos P., Hoek E. (2000). "GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation". Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne, CD-Rom



Tel: +39 030 3702371 – Mail: info@frosionext.com - Sito: www.frosionext.com
Via Corfù 71 - Brescia (BS), CAP 25124



Tel. +39.011.69.60.938 | Fax. +39.011.67.87.086 | Mob. +39.335.76.10.651
Mail: mail@geodes.it – Sito: www.geodes.it
Piazza Arturo Graf, 124 - 10126 Torino (ITALY)