







Comune di Verbania

PROVINCIA DI VERBANO CUSIO OSSOLA

PROGETTAZIONE DEFINITIVA PER APPALTO INTEGRATO DELLE OPERE DI "VARIANTE ALL'ABITATO DI VERBANIA" DELLA S.S. N.34 - 1° LOTTO

STUDI E INDAGINI GEOTECNICA RELAZIONE GEOTECNICA

Mandataria:  IL PROGETTISTA: Dott. Ing. Alberto Checchi	Mandanti:  IL RESPONSABILE : Dott. Ing. G.S. Kalamaras	 IL RESPONSABILE E COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE : Dott. Ing. A. Salvago de Gennaro	 IL GEOLOGO : Dott. Carlo Alessio
--	---	--	--

COMMESSA	FASE	COMPARTO	DOCUMENTO	REV	SCALA	FILE
B357	PD	GEO	OG03RT0101	0	—	GE0OG03RT01010.DOC

3						
2						
1						
0	30/05/2012	PRIMA EMISSIONE	A. K.	G. KALAMARAS	C. ALESSIO	A. CHECCHI
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	AUTORIZZATO



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

SOMMARIO

SOMMARIO	I
NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	VI
[1] D.M.LL.PP. 11 Marzo 1988 <i>"Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate naturali, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"</i> Gazzetta Ufficiale 1.6.1988	VI
[2] D.M. 14 Gennaio 2008 <i>"Nuove norme tecniche per le costruzioni"</i> Gazzetta Ufficiale 4.2.2008	VI
[3] Circolare Ministero dei Lavori Pubblici del 24.9.1988, n. 30483. <i>Legge 3 febbraio 1974 n.64, art. 1 - D.M. 11 marzo 1988 Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. istruzioni per l'applicazione.</i>	VI
[4] Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 2.02.2009, n. 617 C.S.LL.PP. <i>Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.</i>	VI
1 Introduzione.....	1-1
2 Inquadramento generale dell'opera.....	2-2
3 Inquadramento geologico	3-3
3.1. Geologia dell'area	3-3
3.2. Geomorfologia dell'area	3-4
3.3. Idrogeologia dell'area	3-5
4 Studi effettuati per la progettazione definitiva.....	4-7
Tabella 4.1 : riepilogo elaborati geologici.	4-7
5 Indagini geognostiche, geofisiche e prove in situ	5-8
5.1. Sintesi delle indagini geognostiche e geofisiche pregresse	5-8
Tabella 5.1 : stratigrafia di sintesi del sondaggio S.03.	5-8
Tabella 5.2 : stratigrafia di sintesi del sondaggio S.04.	5-9
Tabella 5.3 : stratigrafia di sintesi del sondaggio S.06.	5-9
5.2. Sintesi delle indagini geognostiche, geofisiche e delle prove in situ realizzate per il Progetto Definitivo	5-9



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

5.3. Sondaggi a carotaggio continuo.....	5-10
Tabella 5.4 : riepilogo dei caratteri principali dei sondaggi geognostici del Progetto Definitivo.....	5-11
Tabella 5.5 : stratigrafie di sintesi dei sondaggi geognostici del Progetto Definitivo.....	5-12
Tabella 5.6 : valori medi degli RQD misurati nei sondaggi geognostici del Progetto Definitivo.....	5-13
5.4. Indagini geofisiche.....	5-15
Tabella 5.7 :tabella riassuntiva delle indagini geofisiche eseguite.	5-16
Tabella 5.8 : tabella di sintesi dei risultati della prova Down Hole eseguita nel sondaggio S.PD.05.....	5-20
5.5. Prove in situ	5-20
Tabella 5.9 :tabella riassuntiva delle prove dilatometriche eseguite nei sondaggi S.PD.04 e S.PD.05.....	5-21
Tabella 5.10 :tabella riassuntiva delle prove penetrometriche eseguite nel sondaggio S.PD.01_PZ.....	5-21
Tabella 5.1 :tabella riassuntiva delle prove penetrometriche eseguite nel sondaggio S.PD.06_PZ.....	5-21
6 Prove di laboratorio	6-22
6.1. Prove di laboratorio su campioni rocciosi.....	6-22
Tabella 6.1 :tabella riassuntiva delle prove di compressione monoassiale eseguite.....	6-22
6.2. Prove di laboratorio su terreni	6-24
Tabella 6.2 :tabella riassuntiva dei campioni di terreni sottoposti a prove di laboratorio.	6-24
Tabella 6.3 :tabella riassuntiva delle prove di laboratorio eseguite sui campioni del sondaggio S.PD.06_PZ.....	6-25
6.2.1. Classificazione dei terreni.....	6-25
Misure del peso dell'unità di volume.....	6-25
Tabella 6.4: peso dell'unità di volume	6-25
Misure del contenuto d'acqua.....	6-25
Tabella 6.5: contenuto d'acqua naturale	6-26
Tabella 6.6: risultati analisi granulometrica condotta secondo la specifica ASTM D421-93/D422-90	6-26
Limiti di consistenza.....	6-27
Tabella 6.7: risultati delle determinazioni dei limiti di Atterberg.....	6-27
Tabella 6.8: interpretazione dei risultati ottenuti della carta della plasticità	6-28
6.2.2. Caratteristiche di resistenza al taglio	6-28



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Prove di taglio diretto consolidata e drenata.....	6-28
Tabella 6.9: parametri di resistenza ottenuti dalla prova di taglio diretto effettuata in condizioni drenate e consolidate	6-28
Tabella 6.10: parametri di resistenza ottenuti dalla prova triassiali non consolidata e non drenata (UU).....	6-28
6.2.3. Caratteristiche di compressibilità e deformazione	6-28
Prova edometrica	6-28
Tabella 6.11: risultati delle prove edometriche	6-29
7 Rilievi geostretturali di superficie	7-30
8 Caratteristiche geologiche ed idrogeologiche dei terreni interessati dall'opera	8-35
9 Modello geologico ed idrogeologico delle zone omogenee individuate lungo il tracciato	9-38
Tabella 9.1 : schema riassuntivo dei caratteri geologici previsti nelle varie tratte del tracciato previsto dal Lotto n°1.....	9-38
10 Caratterizzazione geotecnica di dettaglio dei materiali interessati dallo scavo	10-40
10.1. Definizione delle unità geotecniche.....	10-40
10.1.1. Unità geotecnica Sc	10-40
10.1.2. Unità geotecnica GL	10-40
10.1.3. Unità geotecnica FL	10-41
10.1.4. Unità geotecnica EC	10-41
10.2. Caratterizzazione geotecnica della massa rocciosa e dei terreni.....	10-41
10.2.1. Indici di qualità della massa rocciosa.....	10-42
Tabella 10.1 :calcolo deterministico dell'indice BRMR per le diverse unità geotecniche.....	10-43
10.2.2. Caratterizzazione geomeccanica della massa rocciosa.....	10-45
Tabella 10.2 : campo di variabilità dei parametri delle unità geotecniche litoidi.	10-47
10.2.3. Condizioni geomeccaniche delle discontinuità.....	10-48
Tabella 10.3 : valori di resistenza al taglio sulle discontinuità.	10-48
10.2.4. Caratterizzazione geotecnica dei terreni.....	10-48
Tabella 10.4 : Parte I - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.01_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,4 m dal piano campagna.....	10-49



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 10.5 : Parte II - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.01_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,4 m dal piano campagna.....	10-49
Tabella 10.6 : Parte I - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.06_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,2 m dal piano campagna.....	10-49
Tabella 10.7 : Parte II - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.06_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,2 m dal piano campagna.....	10-50
Tabella 10.8 : Legenda delle interpretazioni delle prove SPT.....	10-50
Tabella 10.9: Sintesi dei principali parametri geotecnici derivati dalle prove di laboratorio e dalle prove in situ per l'unità FL.....	10-50
Tabella 10.10: parametri di progetto per l'unità geotecnica U.G. FL.....	10-51
Tabella 10.11 : parametri di progetto per le unità geotecniche U.G. GL ed U.G. EC.....	10-52
10.3. Stato tensionale in sito.....	10-52
11 Analisi del profilo di scavo in relazione alla situazione geostrutturale.....	10-53
11.1. Individuazione e caratterizzazione geomeccanica delle tratte omogenee.....	10-53
11.2. Ricostruzione degli schemi di fratturazione.....	10-54
11.3. Influenza delle discontinuità sul profilo di scavo.....	10-54
Tabella 11.1 :Tabella riassuntiva delle diverse tratte schematizzate.....	10-55
11.3.1. Tratte T1÷T6.....	10-56
11.3.2. Tratte T7 e T8.....	10-63
11.3.3. Tratta T9.....	10-66
11.3.4. Tratta T10.....	10-68
11.3.5. Tratta T11.....	10-70
12 Valutazione parametrica della capacità portante dei pali di fondazione.....	10-72
12.1. Capacità portante verticale pali di fondazione.....	10-72
$Q_{lim} = Q_B + Q_L$	10-72
$Q_B = (N_q * \sigma'_{v0}) * A_B$	10-72
$Q_L = k * \sigma'_{v0} * \tan\delta * A_L$	10-72
12.2. Resistenza laterale teorica pali di fondazione.....	10-75



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

13	rilevato stradale – verifiche geotecniche	13-77
13.1.	Metodo di calcolo	13-77
13.2.	Modello di calcolo.....	13-77
13.3.	Simulazione delle fasi esecutive.....	13-77
13.4.	Modelli di calcolo	13-78
13.5.	Risultati delle analisi in termini di cedimenti	13-79
Tabella 13.1: valori dei cedimenti immediati, di consolidazione e totali e loro andamento nel tempo.		13-79
13.6.	Valutazione dei risultati delle analisi e definizione degli interventi necessari a ridurre i cedimenti 13-79	
13.7.	Dimensionamento dei dreni verticali.....	13-79
13.8.	Interventi di consolidamento colonnare mediante tecnologia deep mixing.....	13-80
13.9.	Risultati delle analisi effettuate con gli interventi atti a ridurre i cedimenti	13-82
Tabella 13.2: valori dei cedimenti immediati, di consolidazione e totali e andamento nel tempo in presenza di dreni verticali e deep mixing (quest'ultimo intervento messo in opera per rilevati di altezza $\geq 6\text{m}$).....		13-82
ALLEGATO		13-83

ALLEGATO.....Elaborazioni dei dati delle stratigrafie dei sondaggi.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Leggi e decreti

- [1] D.M.LL.PP. 11 Marzo 1988
"Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e delle scarpate naturali, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"
Gazzetta Ufficiale 1.6.1988

- [2] D.M. 14 Gennaio 2008
"Nuove norme tecniche per le costruzioni"
Gazzetta Ufficiale 4.2.2008

Circolari

- [3] Circolare Ministero dei Lavori Pubblici del 24.9.1988, n. 30483.
Legge 3 febbraio 1974 n.64, art. 1 - D.M. 11 marzo 1988
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii e naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. istruzioni per l'applicazione.

- [4] Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 2.02.2009, n. 617 C.S.LL.PP.
Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

1 INTRODUZIONE

La presente relazione è redatta dal Raggruppamento Temporaneo di Progettisti (RTP) costituito da Systra Sotecn S.p.A. mandataria, MSM Ingegneria SNC, AK Ingegneria Geotecnica S.r.l. mandanti, nell'ambito del Progetto Definitivo per l'appalto integrato dei lavori della "Variante all'abitato di Verbania della S.S. n° 34" (in seguito indicata con il termine di Variante), commissionato dal Comune di Verbania.

In questo documento vengono presentate ed analizzate le risultanze degli studi di carattere geotecnico e delle indagini di corredo alla progettazione definitiva del tracciato della Variante all'abitato di Verbania della S.S. N. 34 – Lotto 1; tali studi sono stati eseguiti in conformità a quanto previsto dalle disposizioni legislative vigenti (D.M. 11.03.88, NTC2008 – Norme Tecniche delle costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008, L. 109/94 e s.m.i e D.P.R. 554/99) e hanno permesso di giungere alla ricostruzione di un modello geotecnico di riferimento per la progettazione dell'opera.

Il tratto stradale in progetto insiste nei comuni di Verbania e San Bernardino Verbano che, con riferimento alla D.G.R. n° 11-13058 del 19/01/2010 ricadono in zona sismica 4.

La relazione è strutturata in quattro capitoli, oltre a questo introduttivo, articolati con i seguenti contenuti principali:

- il secondo capitolo fornisce una descrizione sintetica degli interventi in progetto;
- il terzo fornisce una sintesi del modello geologico, geomorfologico ed idrogeologico di riferimento;
- il quarto riassume e descrive gli studi effettuati per la progettazione definitiva;
- il quinto capitolo illustra le indagini e le prove condotte in questa fase progettuale e quelle pregresse disponibili nell'area di progetto;
- il sesto descrive le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche dei terreni interessati dall'opera;
- il settimo capitolo introduce il modello geologico e idrogeologico dell'area studiata ed individua le zone omogenee e le unità geotecniche presenti lungo il tracciato.
- L'ottavo capitolo riporta la caratterizzazione geotecnica e la definizione dei parametri di progetto da impiegarsi nella progettazione delle diverse tipologie di opere, definiti a partire dall'elaborazione dei dati relativi alle prove di laboratorio ed in sito.
- Il nono effettua una analisi del profilo di scavo in relazione all'assetto geostrutturale dell'ammasso roccioso.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

2 INQUADRAMENTO GENERALE DELL'OPERA

L'opera in progetto è ubicata nella parte settentrionale del Piemonte, all'interno dei confini provinciali del Verbano-Cusio-Ossola e interessa i territori dei Comuni di Verbania e San Bernardino Verbano.

Nel dettaglio l'area è situata prevalentemente in prossimità della frazione Fondotoce del Comune di Verbania, mentre nel tratto posto all'interno del Comune di San Bernardino Verbano è situata in prossimità della frazione di Moncucca.

Nello specifico l'opera sarà composta, da Est verso Ovest, da un primo tratto in rilevato che partendo dal cimitero di Fondotoce, immediatamente prima del raccordo della S.S.n°33 con la S.S.n°34 del Lago Maggiore, raggiungerà il Canale di Mergozzo che supererà con un ponte raggiungendo la S.P. n°54, ossia Via Turati in comune di Verbania, approssimativamente all'altezza del civico n° 30.

Da qui l'opera procederà con una galleria in sotterraneo di 2103 m di lunghezza che sottopasserà la frazione di Moncucca e la S.P. n°61 (ossia Via Fondotoce nel comune di San Bernardino approssimativamente all'altezza del civico n°12). Nella parte terminale del suo tracciato la galleria si ricongiungerà con la S.S.n°34 nel margine orientale della frazione di Fondotoce del Comune di Verbania, in prossimità di Villa Esperia e del civico n°2 di Via Quarantadue Martiri.

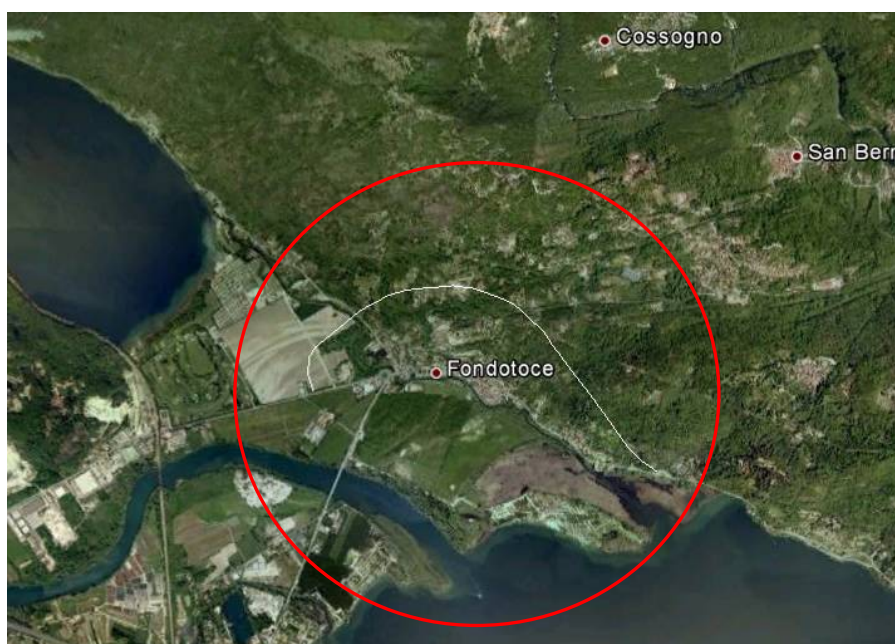


Figura 2.1 : Inquadramento geografico comunale, la linea bianca all'interno del cerchio rosso indica la posizione approssimativa del tracciato dell'opera.



3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

3.1. Geologia dell'area

Le opere previste nel Lotto n°1 verranno realizzate in ambienti molto diversi tra loro, rappresentati dalla pianura alluvionale del Fiume Toce e da un versante montuoso/collinare impostato in rocce metamorfiche.

A partire dal cimitero di Fondotoce infatti sia il rilevato stradale che il viadotto di attraversamento del Canale di Mergozzo interesseranno i depositi alluvionali depositi dal delta del Toce. Tali depositi definiscono un'area pianeggiante che separa il Lago di Mergozzo dal Lago Maggiore e sono generalmente costituiti da sabbie e limi debolmente ghiaiosi, in cui possono essere intercalati dei livelli di limi argillosi di origine fluviolacustre. L'età di tali sedimenti è molto recente in quanto essi si sono depositi successivamente al ritiro delle ultime masse glaciali, avvenuto indicativamente circa 10000-12000 anni fa'. Grazie a testimonianze storiche è inoltre possibile affermare che la separazione tra il Lago di Mergozzo e il Lago Maggiore rappresenta un fenomeno relativamente recente, avvenuto a partire dal XIV – XV secolo D.C.

La galleria Fondotoce si sviluppa in un contesto completamente diverso rispetto al precedente, in quanto interessa un versante montuoso o collinare in cui il litotipo prevalente è rappresentato da micascisti e paragneiss appartenenti agli Scisti dei Laghi. Tale unità tettonostratigrafica fa parte della Serie dei Laghi, che rappresenta un'estesa sezione del basamento polimetamorfico appartenente alla porzione più occidentale del dominio Sudalpino. Al suo interno si osservano anche dei corpi filoniani a chimismo acido o basico, immersione verso NNW a medio/alto angolo ed età probabilmente tardo Paleozoica, intrusi all'interno degli Scisti dei Laghi. Tali corpi intrusivi appartengono probabilmente alla serie di filoni, stock e dicchi a composizione basaltico-granitica denominati Appinniti e intrusi in una cintura situata prevalentemente lungo la linea tettonica Cossato-Mergozzo-Brissago.

Da un punto di vista litologico gli Scisti dei Laghi sono costituiti da micascisti e paragneiss intensamente foliati e deformati, la cui paragenesi è rappresentata da: quarzo, muscovite, biotite, plagioclasio, \pm granato, \pm cianite e \pm staurolite. Entro gli Scisti dei Laghi è inoltre possibile individuare dei livelli di anfiboliti disposti parallelamente alle superfici di scistosità.

I corpi filoniani acidi sono invece costituiti da apliti leucocratiche a struttura equidimensionale e grana fine, formate prevalentemente da quarzo e feldspato (probabilmente albite o K-feldspato). Nella massa cristallina sono inoltre presenti delle subordinate miche chiare e scure (biotite probabilmente retrocessa in clorite) e degli aggregati melanocratici arricchiti in biotite/clorite.

I filoni basici presentano una massa di fondo microcristallina di colore verde scuro, entro tale massa di fondo non è possibile riconoscere alcuna fase mineralogica utile ad effettuare una classificazione petrografica, ad esclusione della clorite in quanto evidenziata dalla debole resistenza alla scalfitura da parte di punte metalliche.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Nella tratta in oggetto l'ammasso roccioso si presenta da poco a mediamente fratturato. Il grado di fratturazione aumenta in prossimità delle zone caratterizzate da disturbo tettonico dove l'ammasso risulta essere maggiormente disarticolato e, talora, classificabile come proto o ultra milonite foliata e coesiva. Quest'ultima tipologia di rocce, soprattutto in profondità, potrebbe essere caratterizzata da una matrice microcristallina prevalente derivante dalla ricristallizzazione. I materiali presenti in tali tratte, inoltre, possono rappresentare dei corpi idrogeologici caratterizzati da una maggiore permeabilità rispetto all'ammasso sano quasi impermeabile.

Per quanto riguarda i depositi quaternari, il versante è principalmente caratterizzato dalla presenza di discontinue coperture detritiche di origine glaciale preservate soprattutto in prossimità dell'imbocco lato Mergozzo, unite a diffuse e sottili coltri di depositi di origine eluvio colluviale. In corrispondenza di settori lontani dal tracciato della galleria o dagli imbocchi affiorano inoltre delle limitate coperture detritiche di origine alluvionale, lacustre o gravitativa che, non interessando lo scavo, non sono state trattate dalla presente relazione geotecnica.

I depositi glaciali possono raggiungere una potenza massima superiore a 19 m osservata in corrispondenza del sondaggio S.PD.02_PZ e sono costituiti da matrice sabbiosa e sabbioso limosa con clasti poligenici ed eterometrici (dimensioni variabili da centimetriche a metriche) più o meno spigolosi a seconda che si tratti di depositi fluvioglaciali o di ablazione. I depositi osservati presentano generalmente un buon addensamento ed una parte superiore fortemente ossidata, mentre non sono stati trovati indizi di cementazione.

Le coltri eluvio-colluviali sono invece caratterizzate da una matrice limoso-sabbiosa di colore screziato variabile dal grigio al rosso cupo, in cui sono presenti clasti eterometrici monogenici disposti con una stratificazione parallela al versante. Questi depositi si presentano scarsamente addensati e ospitano falde temporanee in occasione delle precipitazioni.

3.2. Geomorfologia dell'area

L'area interessata dall'opera è prevalentemente costituita dal settore collinare di raccordo tra i versanti montuosi del Monte Rosso e del Monte Castello e le aree pianeggianti site a bordo dei laghi di Mergozzo e Maggiore e formate dal delta del fiume Toce. La maggior parte dell'opera in sotterraneo è ubicata in un settore in cui il principale elemento morfogenetico, costituito dal ghiacciaio impostato in corrispondenza della valle dove sono ubicati gli abitati di Bieno e Moncucca, ha prodotto una morfologia da fondovalle glaciale caratterizzata dalla presenza di dossi montonati, spillway, soglie, scarpate e terrazzi di origine glaciale.

Particolare rilevanza ai fini progettuali riveste la presenza in prossimità dell'imbocco Mergozzo di una incisione fluvioglaciale o spillway colmata individuata nel corso del rilevamento e poi confermata dai dati del sondaggio S.PD.02_PZ appositamente ubicato il quale conferma come questa forma causi in questo settore la presenza di rilevanti spessori di depositi e di limitati spessori di substrato al di sopra della volta della galleria.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Visto l'assetto geostrutturale dell'ammasso roccioso e la buona qualità geomeccanica che lo contraddistingue, non si evidenziano fenomeni di dissesto in atto a spese del substrato roccioso. A livello generale infatti la qualità dell'ammasso roccioso garantisce buone condizioni di stabilità e consente di escludere lo sviluppo di processi evolutivi dei versanti e/o deformazioni gravitative profonde tali da pregiudicare la stabilità e la durevolezza delle opere in progetto. In prossimità dell'imbocco lato Verbania sono stati unicamente segnalati dei distacchi di blocchi rocciosi originatisi dalle pareti sovrastanti la SS. n° 34 a causa della sfavorevole orientazione della scistosità principale parallela alla parete rocciosa che è approssimativamente perpendicolare alla parete di imbocco.

Gli unici potenziali dissesti in atto sono rappresentati da modeste nicchie di erosione accelerata sviluppate a spese dei depositi glaciali situati in prossimità dell'imbocco lato Mergozzo.

3.3. Idrogeologia dell'area

A livello idrogeologico l'area in esame è suddivisibile in due settori principali:

- un settore di versante caratterizzato da un substrato roccioso permeabile per fratturazione e ricoperto da ridotti spessori di coperture di depositi permeabili per porosità;
- un settore di pianura caratterizzato da spessori anche elevati di depositi permeabili per porosità.

Il principale sistema di fratturazione sviluppato all'interno del substrato roccioso affiorante nell'area esaminata è rappresentato dalle superfici di scistosità Sp immergenti verso SSE con inclinazione compresa tra 50 e 80°. Tale evidenza permette di ipotizzare che la circolazione idrica avvenga prevalentemente con moti paralleli alle fratture associate alle superfici di scistosità, inibendo quindi l'alimentazione dagli alti versanti del Monte Castello e del Monte Faie, per facilitarla invece dall'isolato rilievo del Monte Rosso, con conseguente tendenza a diminuire il massimo carico idraulico possibile. Grazie alle osservazioni effettuate durante il rilievo di terreno è possibile affermare che l'ammasso roccioso entro cui verrà scavata la galleria non è sede di importanti falde idriche permanenti, in quanto:

- Non si sono mai osservate, lungo i tratti degli alvei impostati in roccia, delle significative diminuzioni di portata attribuibili ad una infiltrazione consistente all'interno dell'ammasso roccioso;
- Non si sono osservate delle diffuse emergenze idriche in corrispondenza di scarpate rocciose ripide o comunque di variazioni di pendenza rilevanti;
- Nella prevalenza dei sondaggi le fratture osservate non presentano tracce di circolazione di acque non essendo caratterizzate né da ossidazione né da deposizione di minerali, fa eccezione il sondaggio S.PD.05.

Per quanto riguarda l'assetto idrogeologico della pianura alluvionale del Toce (denominata Piano Grande) su cui insiste il primo tratto dell'opera compreso tra il cimitero di Fondotoce e il Canale di Mergozzo, grazie alle caratteristiche dei corsi d'acqua e dei bacini lacustri limitrofi è stato definito il livello e l'andamento della falda idrica superficiale. Questo settore di pianura, formato dai recenti depositi del delta del Toce, è infatti quasi completamente compreso tra il Fiume Toce stesso, il Lago di Mergozzo, il Lago Maggiore ed il Canale di Mergozzo. Per tale ragione data la differenza di quota esistente, in condizioni normali, tra il Lago di Mergozzo



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

(posto alla quota di 197 m s.l.m.) e il Lago Maggiore (posto alla quota di 194 m s.l.m.) è stato ipotizzato un flusso di acqua sotterranea e superficiale (visibile nel Canale di Mergozzo) diretto dal Lago di Mergozzo al Lago Maggiore, generato dal dislivello tra i bacini lacustri. La presenza di possibili fenomeni di alimentazione della falda a opera dei due corsi d'acqua limitrofi, comporta inoltre la concavità diretta verso il Lago Maggiore delle isopieze. In questo settore i sondaggi S.PD.01_PZ e S.PD.06_PZ sono stati attrezzati con un piezometri a tubo aperto che per il sondaggio S.PD.01_PZ a fine Gennaio 2012 ha fornito un valore di 2,4 m di soggiacenza mentre per il sondaggio S.PD.06_PZ a fine aprile 2012 ha fornito un valore di 2,2 m di soggiacenza.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

4 STUDI EFFETTUATI PER LA PROGETTAZIONE DEFINITIVA

L'area su cui è stato effettuato il rilevamento geologico (eseguito nei periodi compresi tra il 24-27/1/2012 e il 6-10/2/2012) presenta un'estensione di circa 2,6 km² e comprende una fascia di versante a direzione WNW-ESE, disposta lungo la S.S. n° 34 a partire da Villa Esperia fino a oltre l'abitato di Fondotoce. In aggiunta all'area collinare è stata mappata anche la corrispondente porzione di fondovalle sviluppata alla base del versante e compresa tra la S.S. n° 34 e il Fiume Toce.

Il rilevamento geologico ha avuto la finalità principale di acquisire un adeguato grado di conoscenza diretta dei luoghi e dei terreni, è stato eseguito ad un livello di dettaglio sufficiente a garantire la redazione di una cartografia in scala 1:5000 ed ha permesso di apportare informazioni aggiuntive rispetto al quadro conoscitivo delineato dagli studi del Progetto Preliminare.

Il rilevamento geologico in senso stretto è stato accompagnato dall'esecuzione di una serie di rilievi geostrutturali di dettaglio finalizzati ad approfondire la caratterizzazione geomeccanica della massa rocciosa, in aggiunta ai dati geomeccanici rilevabili dai sondaggi geognostici.

L'insieme degli studi eseguiti in questa fase ha portato alla redazione di una serie di elaborati geologici e geotecnici a corredo del progetto della galleria Fondotoce, di seguito elencati:

Tabella 4.1 : riepilogo elaborati geologici.

Elaborato	N° tavole	scala
Planimetria con ubicazione delle indagini	1	1:5.000
Carta geologica	1	1:5.000
Carta geomorfologica	1	1:5.000
Carta idrogeologica	1	1:5.000
Profilo geologico	3	1:2.000
Profilo geomeccanico	3	1:2.000
Sezioni geologiche trasversali	2	1:500 e 200
Planimetria classificazione sismica del territorio	1	1:25000



5 INDAGINI GEOGNOSTICHE, GEOFISICHE E PROVE IN SITU

Al fine di approfondire le conoscenze in merito alle caratteristiche litostratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche dei terreni in corrispondenza delle principali opere previste, si è provveduto alla realizzazione di una campagna d'indagine geognostica e geofisica in alcuni settori di tracciato.

Per la definizione dei settori indagati si è tenuto conto dei punti di maggiore incertezza presentati dal modello geologico del Progetto Preliminare nonché delle effettive accessibilità della superficie. Prima di programmare la nuova campagna d'indagine è stata eseguita una ricerca bibliografica di indagini geognostiche disponibili per l'area, che ha permesso di individuare alcuni sondaggi a carotaggio continuo eseguiti lungo le rive del Fiume Toce. Nel seguito viene quindi riportata una sintesi sia delle informazioni disponibili dalle indagini pregresse, sia una descrizione delle indagini geognostiche, geofisiche e di laboratorio eseguite durante questa fase progettuale lungo il tracciato della galleria Fondotoce.

5.1. Sintesi delle indagini geognostiche e geofisiche pregresse

Per la redazione del Progetto Preliminare dell'opera non sono state realizzate delle specifiche indagini geognostiche; consultando il database sulle indagini geotecniche predisposto da A.R.P.A. Piemonte è stato tuttavia possibile individuare n°3 sondaggi geognostici a carotaggio continuo ubicati entro la pianura alluvionale del Toce, lungo le rive del corso d'acqua.

Le indagini distano circa 950 m verso SW rispetto alla spalla destra del ponte in progetto ma, essendo state realizzate entro il medesimo corpo sedimentario (costituito dal delta del Toce), permettono comunque di trarre informazioni utili per la definizione dell'assetto stratigrafico della pianura alluvionale, entro cui sarà realizzato il ponte di attraversamento del Canale di Mergozzo.

Per l'ubicazione si rimanda alla consultazione della Relazione Geologica (cod. el. B357PDGEOOG02RT01010), mentre nelle tabelle seguenti sono state riportate le stratigrafie di sintesi dei diversi sondaggi.

Tabella 5.1 : stratigrafia di sintesi del sondaggio S.03.

S.03 (codice 103517)	
Profondità (m)	Descrizione
0-7,5	Sabbia media o fine debolmente limosa o limosa, inglobante resti vegetali, ghiaietto o livelli di torbe.
7,5-7,9	Sabbia grossolana inglobante ghiaietto e ghiaia.
7,9-23	Sabbia fine o limi sabbiosi inglobanti talora ghiaietto



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 5.2 : stratigrafia di sintesi del sondaggio S.04.

S.04 (103519)	
Profondità (m)	Descrizione
0-3,6	Sabbia fine inglobante resti vegetali.
3,6-5,6	Sabbia medio grossolana inglobante ghiaietto.
5,6-13,2	Sabbia fine limosa a tratti torbosa inglobante raro ghiaietto.
13,2-13,5	Limo sabbioso.
13,5-20,5	Sabbia fine limosa micacea con presenza di resti torbosi.

Tabella 5.3 : stratigrafia di sintesi del sondaggio S.06.

S.06 (codice 103518)	
Profondità (m)	Descrizione
0-4,7	Sabbia fine inglobante resti vegetali.
4,7-5,1	Sabbia medio grossolana inglobante raro ghiaietto e ghiaia.
5,1-15,7	Sabbia fine o media debolmente limosa inglobante raro ghiaietto.

5.2. Sintesi delle indagini geognostiche, geofisiche e delle prove in situ realizzate per il Progetto Definitivo

Le indagini finalizzate alla stesura del progetto definitivo del Lotto n°1 della Variante alla S.S. n° 34 sono state effettuate nel periodo Gennaio-Maggio 2012 a causa di una serie di interruzioni per problematiche di accessibilità alle aree.

La tipologia di indagini e l'ubicazione è stata fortemente condizionata dalla morfologia in cui si inserisce il progetto, in quanto caratterizzata da versanti boscati e da aree residenziali fortemente antropizzate.

In particolare la campagna di approfondimento d'indagine ha comportato la realizzazione di:

- n°4 sondaggi verticali a distruzione/carotaggio continuo distribuiti lungo l'asse della galleria;
- n° 2 sondaggi verticali a carotaggio continuo sulla pianura alluvionale



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

- n°5 linee di prospezione sismica tomografica a rifrazione distribuite lungo l'asse della galleria;
- n°1 linea di sismica MASW;
- n°1 prova geofisica in foro (Down Hole) eseguita nel sondaggio S.PD.05;
- n°2 prove dilatometriche in foro eseguite nei sondaggi S.PD.04 ed S.PD.05;
- n°9 prove penetrometriche standard (SPT) eseguite nei sondaggi S.PD.01_PZ e S.PD.06_PZ.

5.3. Sondaggi a carotaggio continuo

Lungo il tracciato della galleria Fondotoce sono stati eseguiti 4 sondaggi a carotaggio continuo, ubicati in corrispondenza sia delle tratte a debole copertura situate nei pressi degli imbocchi, sia in particolari contesti geologici sede di notevole incertezza. La campagna di perforazioni è stata realizzata dalla Citiemme S.r.l. di Torino. La Tabella 5.4 riporta una sintesi delle principali caratteristiche delle indagini eseguite, mentre nella



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 5.5 sono state riassunte le stratigrafie di sintesi.

Tabella 5.4 : riepilogo dei caratteri principali dei sondaggi geognostici del Progetto Definitivo.

Sondaggio	Profondità (m dal p.c.)	Tipologia di indagine	Ubicazio ne	Fuori asse (m)	Attrezzatura	Prove eseguite in foro	Campioni per prove di laboratorio
S.PD.01_PZ	18	S.car.cont.	Sponda Canale di Mergozzo	29	Piezometro	Prove penetrometriche SPT	-
S.PD.02_PZ	25	S.car.cont.	Imbocco Mergozzo	10	Piezometro	-	-
S.PD.03	75	S. distr. 0-35 e S.car.cont. 35-75	Pk 1+500 m	11	-	-	5 campioni di roccia
S.PD.04	50	S. distr. 0-20 e S.car.cont. 20-50	Pk 1+875 m	178,5	-	Prova dilatometrica	3 campioni di roccia
S.PD.05	30	S.car.cont.	Imbocco Verbania	21,5	-	Prova dilatometrica e prova sismica Down Hole	3 campioni di roccia
S.PD.06_PZ	30	S.car.cont.	Pianura alluvional e, rilevato stradale	0	Piezometro	Prove penetrometriche SPT	3 campioni di terreni



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 5.5 : stratigrafie di sintesi dei sondaggi geognostici del Progetto Definitivo.

Sondaggio	Stratigrafia sintetica		Soggiacenza della falda superficiale (m dal p.c.)
	Profondità (m)	Litotipo	
S.PD.01_PZ	0-9	Sabbie fini debolmente limose.	2,4
	9-13,7	Limi argillosi con resti vegetali.	
	13,7-15	Miscascisti fortemente fratturati e alterati.	
	15-18	Miscascisti.	
S.PD.02_PZ	0-4,8	Ghiaia e blocchi in matrice limoso-sabbosa	2.2
	4,8-11,7	Clasti rocciosi in matrice sabbioso-limosa	
	11,7-19,3	Clasti rocciosi e ciottoli in matrice sabbioso-limosaa	
	19,3-25	Miscascisti	
S.PD.03	0-7	Limi sabbiosi con clasti rocciosi e ciottoli.	6
	7-36,40	Miscascisti.	
	36,40 -38,60	Metabasite - probabile livello anfibolitico	
	38,6-49	Miscascisti.	
	49-51,4	Miscascisti con zone di taglio a giacitura sub verticale.	
	51,4-57,7	Protomilonite foliata e coesiva.	
	57,7-75	Miscascisti.	
S.PD.04	0-3,5	Limi sabbiosi e ciottoli.	1,5
	3,5-37,7	Miscascisti.	
	37,7-38,7	Metabasite litoide. Probabile livello anfibolitico.	
	38,7-50	Miscascisti.	
S.PD.05	0-2,5	Limi sabbiosi e ciottoli.	10
	2,5-10	Miscascisti con fratture ossidate.	
	10-30	Miscascisti.	
S.PD.06_PZ	0-3,6	Sabbia molto fine limosa	2,2
	3,6-8,7	Sabbia eterometrica limosa	
	8,7-16	Sabbia molto fine limosa con livelli di limo	
	16-30	Limo debolmente sabbioso e organico	

Le perforazioni eseguite a carotaggio continuo, oltre a fornire delle utili informazioni sull'assetto geologico strutturale dell'ammasso roccioso hanno permesso di ricavare informazioni circa la qualità dell'ammasso roccioso, mediante l'elaborazione dell'indice RQD e la caratterizzazione delle superfici di discontinuità. I valori minimi, massimi e medi ricavati dai sondaggi eseguiti sono stati riassunti in Tabella 5.6,



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

mentre nella successiva Figura 5.1 è stato diagrammato l'andamento dell'RQD lungo le perforazioni. Grazie a queste informazioni è possibile notare che i sondaggi S.PD.03 e 04 presentano un andamento irregolare dell'RQD lungo tutta la perforazione, in quanto intervallano tratte caratterizzate da alti valori a parti in cui il parametro scade notevolmente. In dettaglio inoltre si osserva che il sondaggio S.PD.04 presenta un RQD medio significativamente inferiore (45/50 %) rispetto allo 03 (60 %). Tali andamenti possono essere ricondotti alla presenza di fasce di fratturazione dell'ammasso roccioso associate alle due strutture dislocative osservate nell'area. Il sondaggio S.PD.05 evidenzia invece un RQD medio elevato (75/80 %), con un andamento che tende a migliorare gradualmente con la profondità, segno di ammasso sano e non tettonizzato; uguale analisi, pur se per uno spessore di roccia indagato molto minore, può essere fatta per il sondaggio S.PD.02_PZ che presenta un livello superiore più fratturato, derivante probabilmente dagli effetti dell'azione erosionale glaciale e fluvioglaciale, e un livello sottostante caratterizzato da un RQD medio elevato (80%).

Tabella 5.6 : valori medi degli RQD misurati nei sondaggi geognostici del Progetto Definitivo

Sondaggio	RQD medio (%)	RQD max (%)	RQD min (%)
S.PD.01_PZ	60	80	35
S.PD.02_PZ	80	90	0
S.PD.03	60	85	0
S.PD.04	45/50	90	0
S.PD.05	75/80	100	0

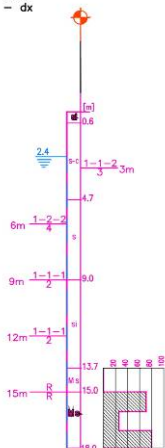


COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

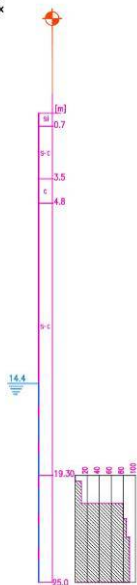
Sondaggio S.PD.01_PZ

S.PD.01_pz - (18.0m verticale con piezometro)
Q: 197 m s.l.m.
f.a. 29 m - dx



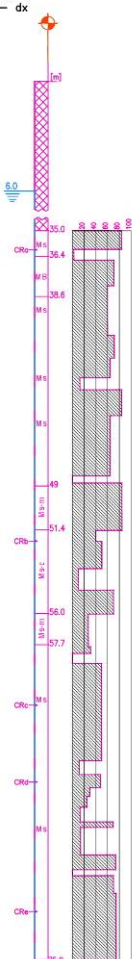
Sondaggio S.PD.02_PZ

S.PD.02_pz - (25.0m verticale con piezometro)
Q: 239 m s.l.m.
f.a. 10 m - sx



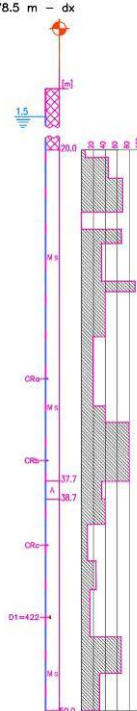
Sondaggio S.PD.03

S.PD.03 - (75.0m verticale)
Q: 278 m s.l.m.
f.a. 11 m - dx



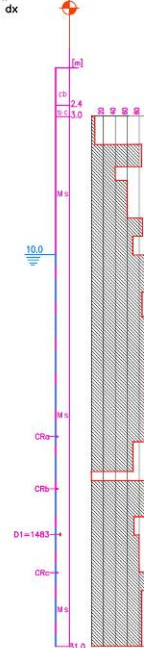
Sondaggio S.PD.04

S.PD.04 - (50.0m verticale)
Q: 250 m s.l.m.
f.a. 178.5 m - dx



Sondaggio S.PD.05

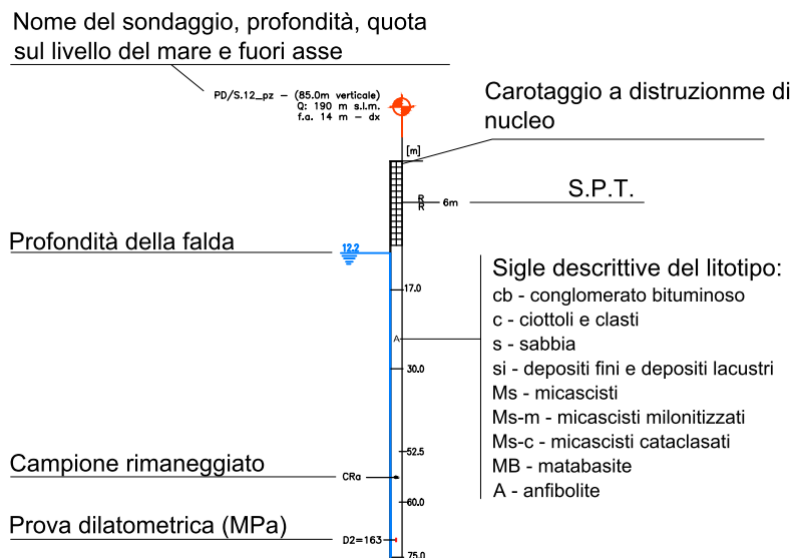
S.PD.05 - (30.0m verticale)
Q: 226 m s.l.m.
f.a. 21.5 m - dx





COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15





COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

carattere fragile quali faglie o zone di taglio. La presenza di un approfondimento delle zone a bassa velocità osservato nella parte sinistra della sezione LS.PD.04 potrebbe tuttavia indicare la presenza della zona di taglio a comportamento duttile osservata nelle vicinanze della sezione; tale indizio tuttavia è condizionato dagli effetti di bordo presenti nelle ricostruzioni tomografiche.

Tabella 5.7 :tabella riassuntiva delle indagini geofisiche eseguite.

Indagine	Tipologia	Lunghezza (m)	Ubicazione approssimativa rispetto alla galleria	Stratigrafia di sintesi	Vp orizzonti (m/s)
LS.PD.01	Tomografia a rifrazione	150	Tra le pk 0+753 m - 0+894 m -	0-4/5 m: discontinue coltri eluvio colluviali; nel primo tratto seguono 20 m di depositi glaciali, nel secondo tratto seguono 4/5 m: micascisti alterati; 5/10 m: micascisti compatti	Coltri eluvio colluviali e depositi glaciali 0-1500; substrato alterato 1500-3300; substrato compatto > 3300.
LS.PD.02	Tomografia a rifrazione	260	Tra le pk 0+901 m - pk 1+149 m	0-3/4 m: discontinue coltri eluvio colluviali; 3/4-10 m: micascisti mediamente alterati; > 10 m: micascisti compatti.	Coltri eluvio colluviali e depositi glaciali 0-1000; substrato alterato 1000-3300; substrato compatto > 3300.
LS.PD.03	Tomografia a rifrazione	230	Tra le pk 1+609 m - pk 1+823 m	0-4/5 m: discontinue coltri eluvio colluviali e/o depositi glaciali; 4/5 - 10/20 m: micascisti mediamente alterati; > 10/20 m micascisti compatti.	Coltri eluvio colluviali e depositi glaciali 0-1000; substrato alterato 1000-3300; substrato compatto > 3300.
LS.PD.04	Tomografia a rifrazione	140	Tra le pk 1+921m - pk 2+062 m	0-4/5 m: discontinue coltri eluvio colluviali e/o depositi glaciali; 4/5 - 15/25 m: micascisti mediamente alterati; > 15/25 m micascisti compatti.	Coltri eluvio colluviali e depositi glaciali 0-1000; substrato alterato 1000-3300; substrato compatto > 3300.
LS.PD.05	Tomografia a rifrazione	160	Tra le pk 1+085 m - pk 1+238 m	0-6/7 m: discontinue coltri eluvio colluviali e/o depositi glaciali; 6/7 - 10/12 m: micascisti mediamente alterati; > 10/12 m micascisti compatti.	Coltri eluvio colluviali e depositi glaciali 0-1000; substrato alterato 1000-3300; substrato compatto > 3300.
MA.PD.01	MASW	70	Pianura antistante l'imbocco Mergozzo lungo le sponde del canale.	0-10 m: depositi caratterizzati da Vs di circa 130 m/s; 10 - 15 m: depositi caratterizzati da Vs di circa 330 m/s; > 15 substrato roccioso caratterizzato da Vs di circa 1020 m/s.	Coltri eluvio colluviali e depositi glaciali 0-1000; substrato alterato 1000-3300; substrato compatto > 3300.

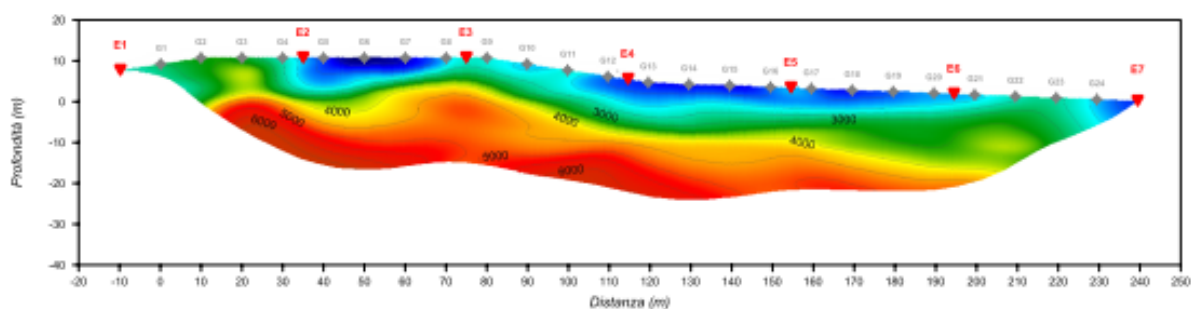
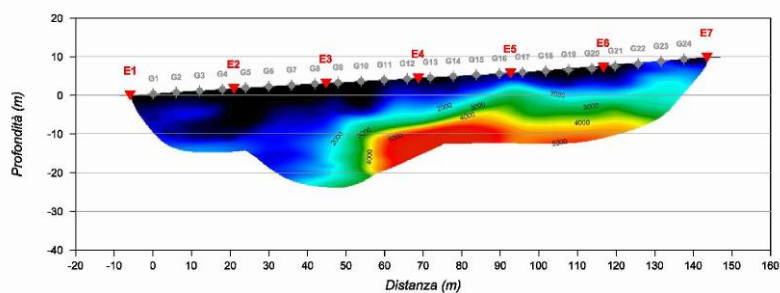


COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Indagine	Tipologia	Lunghezza (m)	Ubicazione approssimativa rispetto alla galleria	Stratigrafia di sintesi	Vp orizzonti (m/s)
DH.PD.01	Down Hole	30 (In S.PD.05)	Sondaggio S.PD.05	0-4 m : depositi detritici o substrato fratturato; 4-30 m : substrato roccioso.	Coltri eluvio colluviali e/o depositi glaciali 0-1000; substrato alterato 1000-3300; substrato compatto > 3300.

A livello generale l'indagine sismica tomografica a rifrazione ha quindi permesso di accertare valori di velocità delle onde sismiche per il substrato sano e compatto dell'ordine di 3000-6000 m/s, mentre per le zone fratturate o alterate i valori scendono a 1000-3000m/s. I depositi detritici presentano invece velocità sismica inferiore a 1000 m/s.





COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

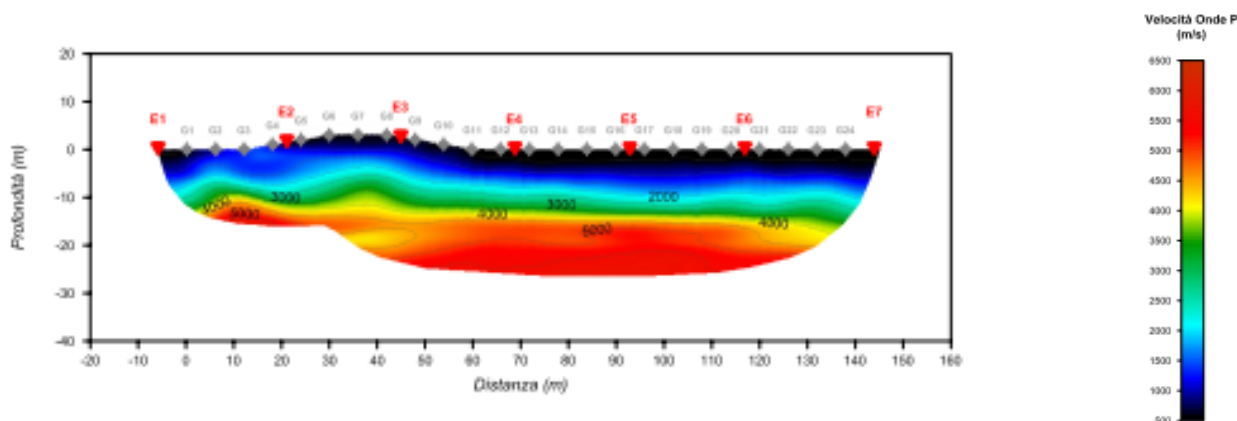
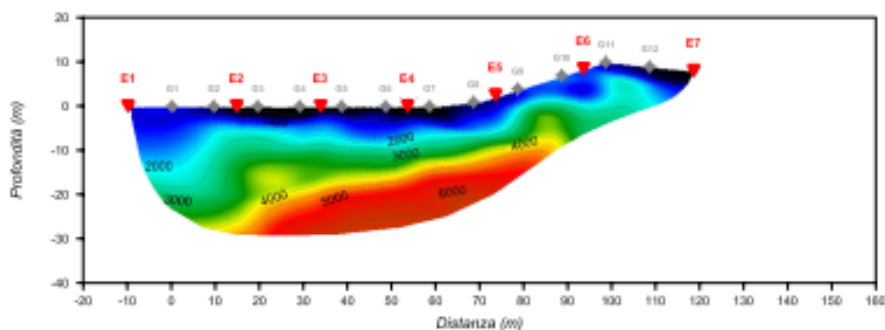
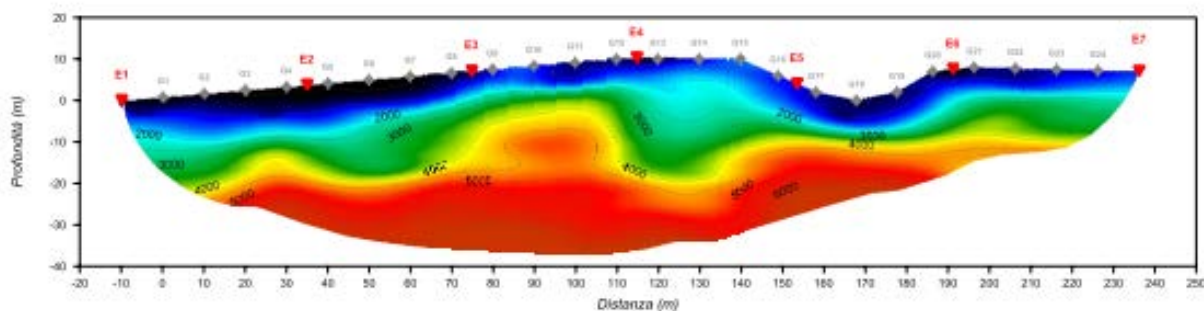


Figura 5.2 : sezioni sismiche tomografiche a rifrazione. Dall'alto verso il basso sono state riportate le linee LS.PD.01, 02, 03, 04 e 05. Insieme alla linea LS.PD.05 è stata inoltre riportata la legenda delle velocità utilizzata per le elaborazioni tomografiche. Le sezioni LS.PD. 03 e 04 sono orientate con il lato sinistro verso NW e quello destro verso SE, le LS.PD.02 e 05 presentano lato sinistro verso WNW e destro verso ESE, la sezione LS.PD.01 presenta lato sinistro verso ESE e destro verso WNW.

L'indagine sismica MASW (Figura 5.3) ha permesso di indagare ulteriormente la porzione di pianura alluvionale nella zona di attraversamento del Canale di Mergozzo, tale prova ha evidenziato un primo tratto, fino



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

alla profondità di 10 m, caratterizzato prevalentemente da V_s basse di 138 m/s, corrispondente ai depositi fluviolacustri meno addensati; successivamente si individua un secondo tratto fino alla profondità di 15 m caratterizzato da V_s di 326 m/s, corrispondente ai depositi fluviolacustri più addensati e più fini e alla parte superiore alterata e fratturata del substrato roccioso; dalla profondità di 15 m fino alla fine della profondità di indagine della prova, corrispondente a 30 m dal piano campagna, si osserva un tratto caratterizzato da V_s di 1022 m/s corrispondente al substrato roccioso inalterato.

Grazie a questa prova è stato possibile ricavare la V_{s30} della zona indagata. Il valore ricavato, pari a 283 m/s è tuttavia la media tra le basse velocità espresse dai depositi alluvionali e fluviolacustri del delta del Toce e il substrato roccioso.

La prova sismica Down Hole ha invece permesso di ricostruire il profilo di velocità lungo il volume indagato dal sondaggio S.PD.05. Grazie alle risultanze della prova è stato possibile ricavare la variazione dei parametri riportati nella Tabella 5.8.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 5.8 : tabella di sintesi dei risultati della prova Down Hole eseguita nel sondaggio S.PD.05.

Prof. (m)	Litotipo	Vp media (m/s)	Vs media (m/s)	Vp/Vs medio	Coeff. Di Poisson dinamico medio	Modulo di Young dinamico medio (Mpa)	Modulo di taglio dinamico medio (Mpa)
0-4	Depositi detritici e substrato fratturato.	650	270	2,3	0,38	380	138
4-22	Miscascisti	1900	1000	1,9	0,33	5000	1900/2000
22-30	Miscascisti	2480	1170	2,2	0,38	7200	2900/3000

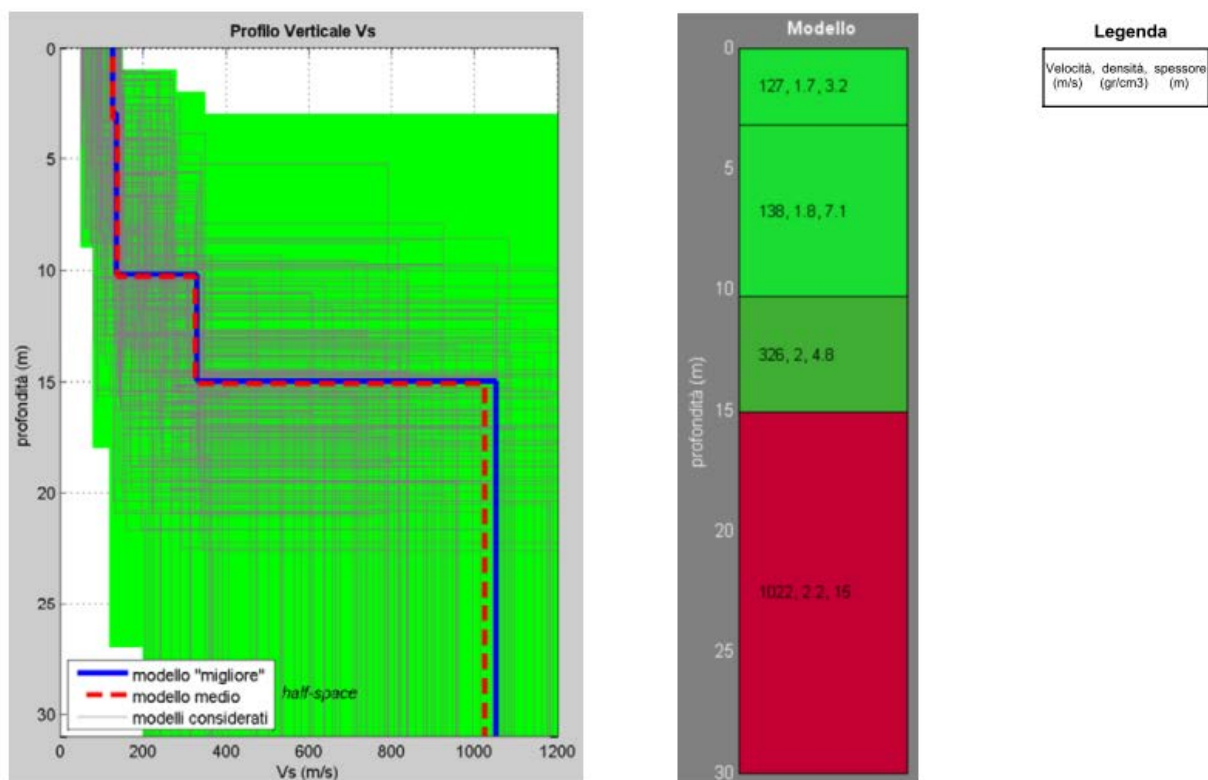


Figura 5.3 : stratigrafia schematica ricavata dall'interpretazione della sezione sismica MASW MA.PD.01.

5.5. Prove in situ

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono state realizzate le seguenti prove in situ:

- n°2 prove dilatometriche in foro eseguite nei sondaggi S.PD.04 e S.PD.05;



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

- n°5 prove penetrometriche standard (SPT) eseguite nel sondaggio S.PD.01_PZ.
- n°4 prove penetrometriche standard (SPT) eseguite nel sondaggio S.PD.06_PZ.

Tabella 5.9 :tabella riassuntiva delle prove dilatometriche eseguite nei sondaggi S.PD.04 e S.PD.05.

Sondaggio	Ubicazione	Profondità prova (m dal p.c.)	Modulo dilatometrico (media calcolata sul 2° carico) (Mpa)	Modulo elastico (media calcolata sul 2° scarico) (Mpa)
S.PD.04	Pk 1+875 m	45	422	654
S.PD.05	Imbocco Verbania	25	1483	2169

Tabella 5.10 :tabella riassuntiva delle prove penetrometriche eseguite nel sondaggio S.PD.01_PZ.

Sondaggio	Profondità (m dal p.c.)	Litotipo	NSpt ₃₀	Acqua/ profondità sotto falda (m)
S.PD.01_PZ	3	Sabbia fine limosa.	3	Si/0,6
	6	Sabbia fine limosa con livelli limosi.	4	Si/3,6
	9	Limi debolmente sabbioso o argilloso con resti vegetali.	2	Si/6,6
	12	Limi debolmente sabbioso o argilloso con resti vegetali.	2	Si/9,6
	15	Miscascisto alterato.	Rifiuto.	Si/12,6

Tabella 5.1 :tabella riassuntiva delle prove penetrometriche eseguite nel sondaggio S.PD.06_PZ.

Sondaggio	Profondità (m dal p.c.)	Litotipo	NSpt ₃₀	Acqua/ profondità sotto falda (m)
S.PD.06_PZ	9	Sabbia medio fine limosa.	Rifiuto	Si/6,8
	12	Sabbia medio fine limosa.	2	Si/9,8
	25.5	Limo debolmente sabbioso, debolmente organico, con intercalate laminazioni sabbioso fini.	2	Si/23,3
	28.5	Limo debolmente sabbioso, debolmente organico, con intercalate laminazioni sabbioso fini..	1	Si/26,3

I dati ricavati dalle prove dilatometriche evidenziano una notevole differenza tra l'ammasso roccioso campionato dai sondaggi S.PD.04 ed S.PD.05, in quanto si osserva un netto miglioramento delle caratteristiche meccaniche espresse dai micascisti intercettati dal sondaggio S.PD.05 rispetto a quelli intercettati dal sondaggio S.PD.04. Tale evidenza data dalla prova dilatometrica risulta perfettamente in accordo con i valori di RQD ricavati dai medesimi sondaggi.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

6 PROVE DI LABORATORIO

Le prove di laboratorio sono state eseguite sia su campioni di roccia che su campioni indisturbati di terreni. In seguito sono state descritte sinteticamente le diverse tipologie di prove eseguite per caratterizzare le due diverse tipologie di materiali.

6.1. Prove di laboratorio su campioni rocciosi

Sui campioni di roccia estratti dai sondaggi a carotaggio continuo sono state eseguite 11 prove di compressione monoassiale con controllo della deformazione assiale, elaborate statisticamente per poter ottenere dei valori significativi per la progettazione.

Le prove sono state effettuate su campioni di micascisti, anfiboliti o brecce cataclastiche, caratterizzando quindi tutti i litotipi attraversati dai sondaggi. I filoni aplitici e lamprofirici non sono stati invece analizzati dalle prove di laboratorio in quanto non intercettati dai sondaggi; tale aspetto tuttavia non rappresenta una problematica per la progettazione dell'opera, in quanto essi costituiscono un'esigua percentuale dei litotipi che potranno interessare lo scavo.

La Tabella 6.1 riporta la distribuzione dei valori misurati in laboratorio per i micascisti, le anfiboliti e la protomilonite della faglia principale osservata nell'area (vedi Relazione geologica cod. el. B357PDGEOOG02RT01010).

Tabella 6.1 :tabella riassuntiva delle prove di compressione monoassiale eseguite.

Sondaggio	Profondità del campione (m dal p.c.)	Litotipo	Carico di rottura (Co) (Mpa)	Modulo tangente al 50% (E) (Gpa)	Modulo secante al 50% (Gpa)
S.PD.03	36,5-36,75	Anfibolite	13,93	23,66	19,88
	52-52,5	Protomilonite foliata e coesiva	12,39	16,95	8,2
	61-61,34	Micascisto	7,23	3,84	3,84
	65.26-65.50	Micascisto	16,65	14,73	11,19
	72.3-73	Micascisto	15,96	12,45	10,08
S.PD.04	32-32.5	Micascisto	5,14	2,73	2,86
	36,6-37	Micascisto	5,34	1,64	0,99
	41-41,3	Micascisto	13,79	8,68	6,19
S.PD.05	19,8-20	Micascisto	37,67	16,19	12,22
	22,3-22,8	Micascisto	15,08	6,00	5,3
	27,1-28,1	Micascisto	25,89	18,66	15,16

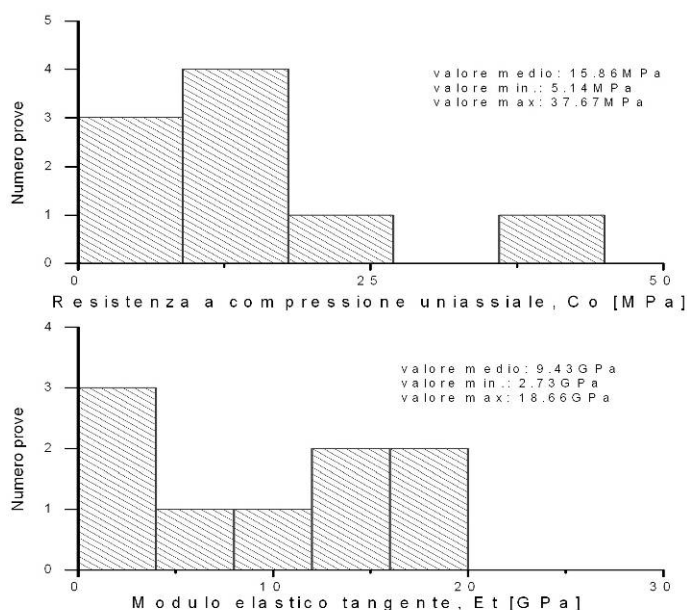


COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Sulla base dei risultati ottenuti dalle prove di compressione monoassiale, riportati in Tabella 6.1 e in Figura 6.1, si può notare che i micascisti presentano bassi valori di resistenza a compressione (C_o) compresi tra 5,14 e 37,67 Mpa, la cui media statistica è circa 16 Mpa. La resistenza è condizionata dalla sfavorevole orientazione delle superfici di scistosità (S_p) rispetto all'asse di applicazione dello sforzo di compressione (parallelo all'asse del sondaggio e quindi del provino); in quanto le due direzioni formano un angolo compreso tra 20 e 40° sulla quale avviene preferenzialmente la rottura. Osservando infatti gli schemi di rottura associati alle prove di compressione risulta evidente che le superfici di rottura si formano generalmente in corrispondenza di superfici di scistosità, che rappresentano quindi le superfici di debolezza preferenziali dell'ammasso roccioso.

I risultati ottenuti dalle prove eseguite sulla protomilonite e sull'anfibolite evidenziano dei valori di C_o molto simili; pari rispettivamente a 13,93 e 12,39 Mpa, in questo caso tuttavia differiscono le orientazioni delle superfici di rottura in quanto la protomilonite si rompe lungo la scistosità di flusso cataclastico (circa 75° di inclinazione rispetto alla verticale), mentre l'anfibolite è caratterizzata dalla tipica fratturazione a clessidra.





COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

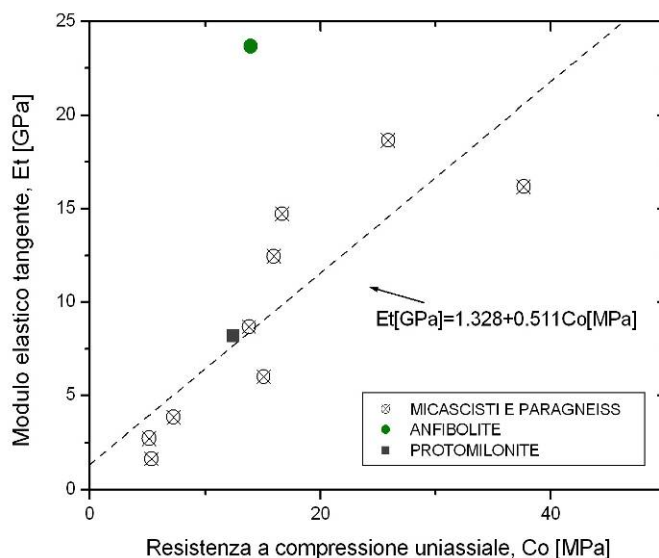


Figura 6.1 : in alto è stata riportata la distribuzione dei valori di Co ed Et nei micascisti, mentre nel diagramma in basso è presente la correlazione tra la resistenza a compressione monoassiale e il modulo di elastico tangente. La retta di regressione presente nel secondo diagramma interpola unicamente i valori misurati nei micascisti.

Per quanto riguarda invece i moduli elastici tangenti (Et) si osserva che per le prove eseguite sui micascisti è possibile ricavare una correlazione lineare tra i valori di Co e i valori di Et (vedi Figura 6.1); i valori associati alla prova eseguita sulla protomylonite si discostano poco dalla retta di interpolazione, mentre quelli associati all'anfibolite si discostano notevolmente.

6.2. Prove di laboratorio su terreni

Sui campioni di terreni prelevati dal sondaggio S.PD.06_PZ sono state eseguite delle prove di laboratorio volte a determinare i principali parametri geotecnici dei depositi fluviolacustri del Fiume Toce. Nella Tabella 6.2 sono stati descritti i caratteri litologici dei campioni sottoposti alle prove di laboratorio.

Tabella 6.2 :tabella riassuntiva dei campioni di terreni sottoposti a prove di laboratorio.

Sigla campione	Tipologia campione	Profondità di prelievo (m)	Descrizione litologica del campione
CI1	Indisturbato	6,0 - 6,5	Sabbia debolmente limosa e raro ghiaietto di colore grigio.
CI2	Indisturbato	22,0 - 22,5	Limo argilloso con sabbia di colore grigio
CI3	Indisturbato	27,0 - 27,5	Limo argilloso e sabbioso di colore grigio



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 6.3 :tabella riassuntiva delle prove di laboratorio eseguite sui campioni del sondaggio S.PD.06_PZ

Sondaggio	S.PD.06_PZ		
Campione	CI1	CI2	CI3
Profondità	6,0 - 6,5 m	22,0 - 22,5 m	27,0 - 27,5 m
Misura del peso dell'unità di volume	✓	✓	✓
Misura del contenuto d'acqua	✓	✓	✓
Analisi granulometrica	✓	✓	✓
Prova di compressione edometrica	-	✓	✓
Prova di taglio diretto consolidata drenata	✓	-	-
Prova di compressione triassiale non consolidata non drenata	-	✓	-
Limiti di Atterberg	✓	✓	✓

Le prove di laboratorio eseguite sui tre campioni raccolti dal sondaggio S.PD.06_PZ sono state raggruppate in tre categorie in funzione delle diverse caratteristiche geotecniche da esse ricavate:

- Classificazione dei terreni.
- Determinazione delle caratteristiche di resistenza al taglio.
- Determinazione delle caratteristiche di compressibilità e deformazione.

6.2.1. Classificazione dei terreni

Misure del peso dell'unità di volume

I risultati delle misure eseguite (secondo il BS 1377 Part 2) sono riportate nella tabella seguente.

Tabella 6.4: peso dell'unità di volume

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	Peso medio dell'unità di volume, γ [kN/m ³]	Unità geotecnica
S.PD.06_PZ	CI1	6 - 6,5	20,3	FL
S.PD.06_PZ	CI2	22 - 22,5	17,4	FL
S.PD.06_PZ	CI3	27 - 27,5	17,3	FL

Come è possibile osservare dai risultati dell'analisi, il valore medio dell'unità FL si attesta in corrispondenza di circa 18 kN/m³.

Misure del contenuto d'acqua

I risultati delle misure eseguite sono riportate nella tabella seguente.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 6.5: contenuto d'acqua naturale

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	Contenuto d'acqua naturale medio, w_n [%]	Unità geotecnica
S.PD.06_PZ	CI1	6 - 6,5	22,6	FL
S.PD.06_PZ	CI2	22 - 22,5	41,3	FL
S.PD.06_PZ	CI3	27 - 27,5	42,5	FL

Analisi granulometriche

Nella tabella seguente sono indicati i sondaggi e i relativi campioni su cui sono state eseguite le prove granulometriche e le rispettive risultanze (vedi Figura 6.2).

Tabella 6.6: risultati analisi granulometrica condotta secondo la specifica ASTM D421-93/D422-90

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo e Argilla [%]	Unità geotecnica
S.PD.06_PZ	CI1	6 - 6,5	0,6	93	6,4	FL
S.PD.06_PZ	CI2	22 - 22,5	0	37,8	62,2	FL
S.PD.06_PZ	CI3	27 - 27,5	0	11,3	88,7	FL

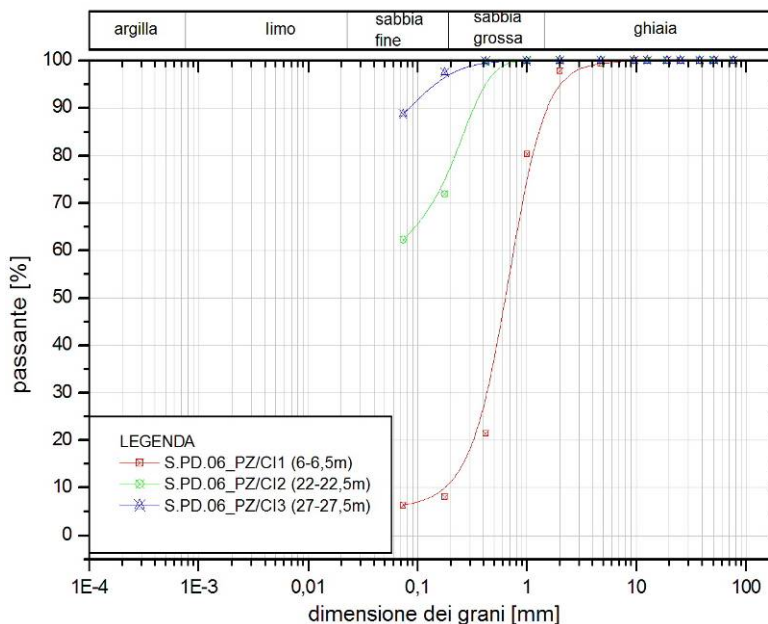


Figura 6.2: curva granulometrica per i campioni dell'unità geotecnica FL

Dalla figura precedente si può osservare che i campioni CI2 e CI3, raccolti a profondità superiori di 20 m, sono caratterizzati da una maggiore componente fine rispetto al campione CI1. I campioni CI2 e CI3



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

evidenziano rispettivamente quindi limi sabbiosi e limi debolmente sabbiosi, mentre il campione CI1 è rappresentativo di una sabbia ben classata.

Limiti di consistenza

Sui campioni prelevati nei sondaggi sono stati determinati il limite liquido, il limite plastico e l'indice di plasticità. I suddetti valori sono riassunti nella tabella seguente. Per i campioni CI1 e CI2 non è stato possibile ricavare il limite plastico a causa della presenza di un eccessivo quantitativo in sabbia.

Tabella 6.7: risultati delle determinazioni dei limiti di Atterberg

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	w _l [%]	w _p [%]	w _n [%]	PI
S.PD.06_PZ	CI1	6 - 6,5	16,2	n.a.	19	n.a.
S.PD.06_PZ	CI2	22 - 22,5	30,3	n.a.	31,3	n.a.
S.PD.06_PZ	CI3	27 - 27,5	33,3	31,3	36	2

LEGENDA

w_l è il limite liquido,

w_p è il limite plastico,

w_n è il contenuto d'acqua iniziale,

PI è l'indice di plasticità

Al fine di classificare i terreni fini, nella figura seguente si riportano i valori sulla carta della plasticità proposta da Casagrande (1948).

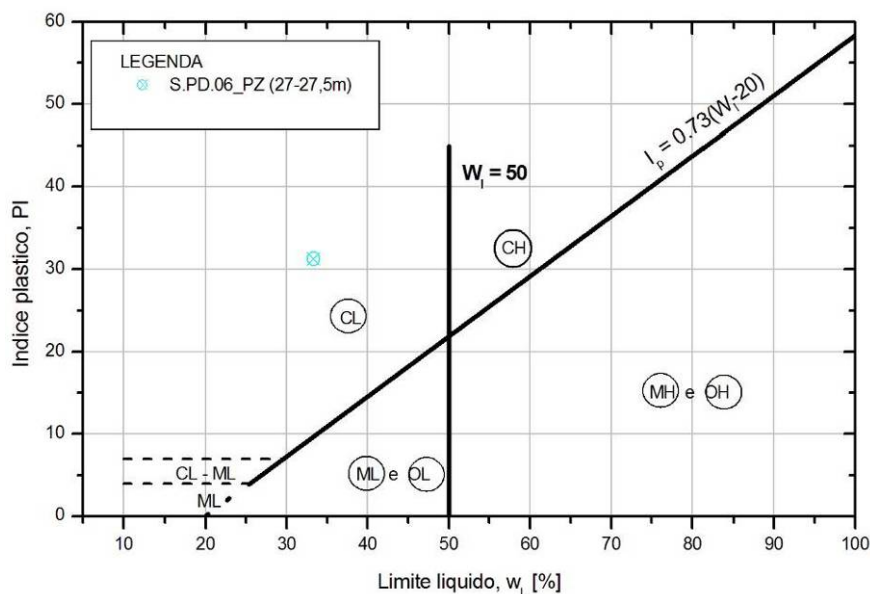


Figura 6.3: carta della plasticità per i campioni dell'unità geotecnica FL



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Nella tabella seguente si riporta l'interpretazione dei risultati ottenuti dalla Carta della plasticità di Casagrande.

Tabella 6.8: interpretazione dei risultati ottenuti dalla carta della plasticità

Gruppo	Sottogruppo	wL	Descrizione
C	CL	<50%	Argille inorganiche
	CH	>50%	
M	ML	<50%	Limi inorganici
O	OL	<50%	Limi e argille organici

6.2.2. Caratteristiche di resistenza al taglio

Prove di taglio diretto consolidata e drenata

La prova di taglio diretto drenata e consolidata ha permesso di ricavare i parametri c' e ϕ' a partire dai valori di sforzo normale e taglio che si registrano al momento della rottura. L'interpretazione delle prove di laboratorio è stata condotta attraverso una restituzione grafica delle coppie di valori ottenuti dai tre provini sottoposti a prova. I provini sono stati prelevati dal campione CI1 (6-6,5 m di profondità) e sono quindi rappresentativi della porzione più sabbiosa dell'unità geotecnica.

Tabella 6.9: parametri di resistenza ottenuti dalla prova di taglio diretto effettuata in condizioni drenate e consolidate

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	ϕ [°]	c [kPa]	Unità geotecnica
S.PD.06_PZ	CI1	6 - 6,5	33,4	7	FL

Prova di compressione triassiale consolidata non drenata (UU)

Dalle prove triassiali non consolidate e non drenate, è stato possibile ottenere la resistenza al taglio non drenata (C_u). Nella tabella seguente si riporta il risultato delle elaborazioni delle due prove triassiali condotte su due provini prelevati dal campione CI2 (22-22,5 m).

Tabella 6.10: parametri di resistenza ottenuti dalla prova triassiali non consolidata e non drenata (UU)

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	c_u [kPa]	Unità geotecnica
S.PD.06_PZ	CI2	22 - 22,5	57	FL

6.2.3. Caratteristiche di compressibilità e deformazione

Prova edometrica



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Lo scopo della presente prova di laboratorio è la riproduzione dei processi di consolidazione monodirezionale in condizioni di deformazione laterale impedita al fine di determinare i parametri utili a una modellazione del fenomeno.

A partire dalle diverse curve ottenute dalla prova, è stato valutato, il modulo edometrico e il relativo coefficiente di compressibilità, infine la permeabilità k ricavata a partire dal coefficiente di consolidazione primaria c_v a sua volta ottenuto attraverso il metodo grafico di Taylor (1948).

I risultati delle prove, per ciascun campione esaminato, sono riportati nella Tabella 6.11.

Tabella 6.11: risultati delle prove edometriche

				Parametri di compressibilità e deformabilità		Parametri della consolidazione		Unità geotecnica	
Sondaggio	Campione	Profondità [m]		e ₀	m _v [m ² /kN]	M [kPa]	k [m/s]	c _v [cm ² /s]	
S.PD.06_PZ	CI2	22	22,5	0,918	3,6×10 ⁻⁴	2770	1,96×10 ⁻⁹	5,1×10 ⁻³	FL
S.PD.06_PZ	CI3	27	27,5	0.809	5,9×10 ⁻⁴	1690	5,08×10 ⁻⁹	7,2×10 ⁻³	FL

LEGENDA

e_0 è l'indice dei vuoti del materiale prima dell'inizio della prova,

m_v è il coefficiente di compressibilità del materiale,

M è il modulo di deformazione edometrico,

k è la permeabilità del materiale,

c_v è il coefficiente di consolidazione primaria.



7 RILIEVI GEOSTRUTTURALI DI SUPERFICIE

Nell'ambito di questa fase progettuale oltre al rilevamento di superficie dell'intero tracciato è stata eseguita una serie di rilievi geostretturali di dettaglio, condotta su affioramenti significativi dal punto di vista geomeccanico.

Rimandando per i dettagli alla specifica relazione illustrativa dei suddetti rilievi, di seguito si riporta una sintesi dei dati principali ottenuti dall'esecuzione di n°7 stazioni geostretturali-geomeccaniche lungo il tracciato della gallerie naturale.

Tabella 7.1 : schema riassuntivo delle stazioni geomeccaniche eseguite.

Num.	Stazione	Litologia	Tipologia	RMR	GSI
1	RG-1	Micascisti	Rilievo completo	49	49
2	RG-2	Micascisti	Rilievo completo	67	62
3	RG-3	Micascisti	Rilievo completo	60	60
4	RG-4_Ms	Micascisti	Rilievo completo	44	56
4bis	RG-04_Fl	Filone aplitico	Rilievo completo	69	69
5	RG-5	Filone aplitico	Rilievo completo	65	67
6	RG-6	Micascisti	Rilievo speditivo	35	45
7	RG-7	Micascisti	Rilievo speditivo	62	62

L'affioramento oggetto del rilievo geomeccanico RG-1 è costituito da micascisti poco fratturati e alterati, con delle patine di ossidazione sulle superfici esposte e privo di tracce di umidità. L'ammasso roccioso si presenta con un volume unitario di circa 20 x 40 x 50 cm con forma tabulare, individuata da 4 famiglie di discontinuità compresa la scistosità, che costituisce il sistema principale, e con circa 12/15 giunti a m³. I valori modalali delle discontinuità presentano una persistenza compresa tra 1 e 4,5 m e una spaziatura compresa tra 10 e 90 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di RMR=49 e di GSI=49.

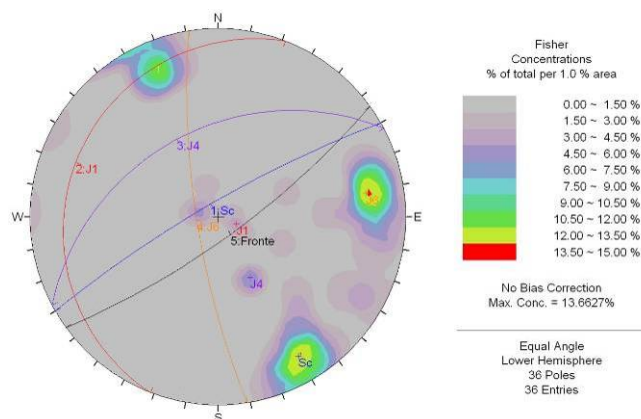
Il rilievo geomeccanico RG-2 è stato realizzato su un affioramento di micascisti poco fratturati, caratterizzati da una diffusa patina di ossidazione presente sulle superfici esposte e privo di tracce di umidità. L'ammasso roccioso si presenta con un volume unitario di circa 40 x 50 x 100 cm con forma prismatica, individuata da 4 famiglie di discontinuità, comprensive della scistosità, e con circa 5-6 giunti a m³. I valori modalali delle discontinuità presentano una persistenza compresa tra 1,2 e 3,5 m e una spaziatura compresa tra 45 e 150 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di RMR=67 e di GSI=62.



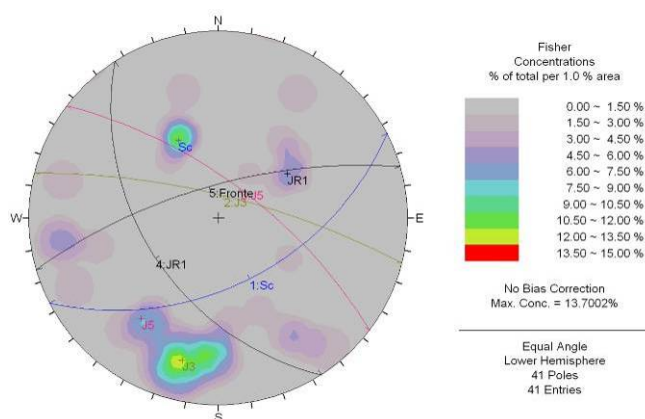
COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

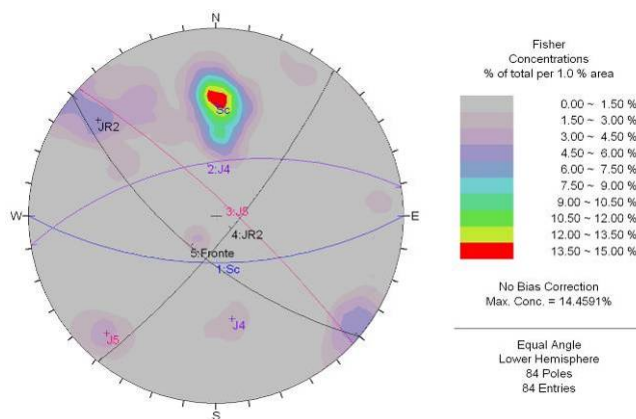
RG-1



RG-2



RG-3



RG-4_Ms (Micascisto)

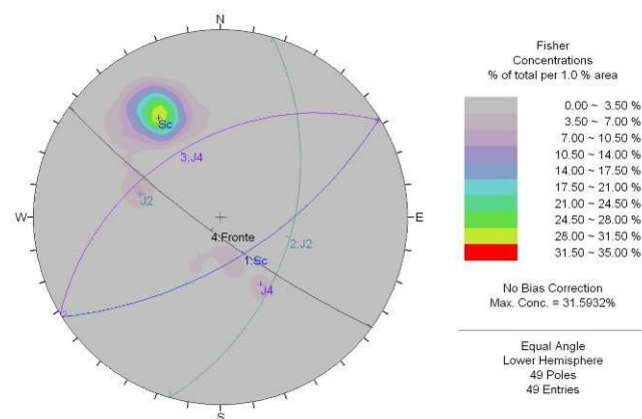


Figura 7.1 : diagrammi di densità delle stazioni geomeccaniche realizzate – Parte I.

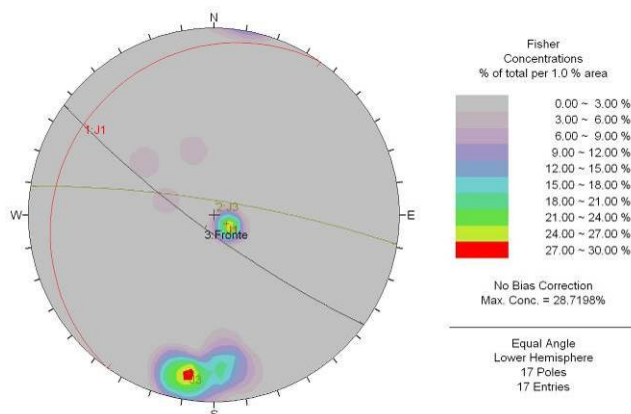
Il rilievo geomeccanico RG_03 è stato realizzato su un affioramento non alterato e asciutto di micascisti a tratti passanti a paragneiss. Le parti formate da micascisti sono mediamente più fratturate rispetto alle porzioni gneissiche, così come evidenziato dal parametro Jv. L'ammasso roccioso si presenta con un volume unitario di circa 15 x 50 x 60 cm con forma tabulare, individuata da 4 famiglie di discontinuità compressive della scistosità e con circa 3-5 giunti a m³ per le parti gneissiche e circa 10-15 giunti a m³ per i micascisti. I valori modali delle discontinuità presentano una persistenza compresa tra 1,4 e 17 m e una spaziatura compresa tra 25 e 60 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di RMR=60 e di GSI=60.



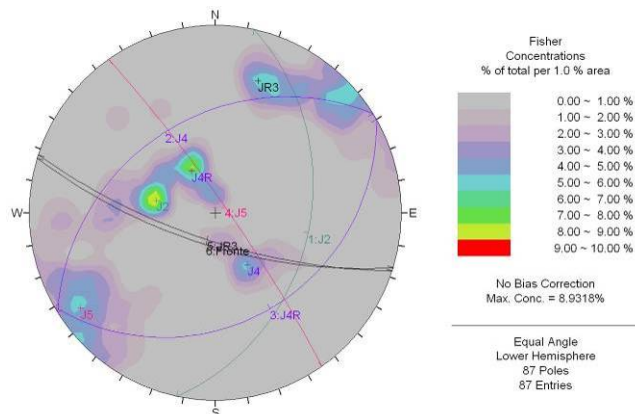
COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

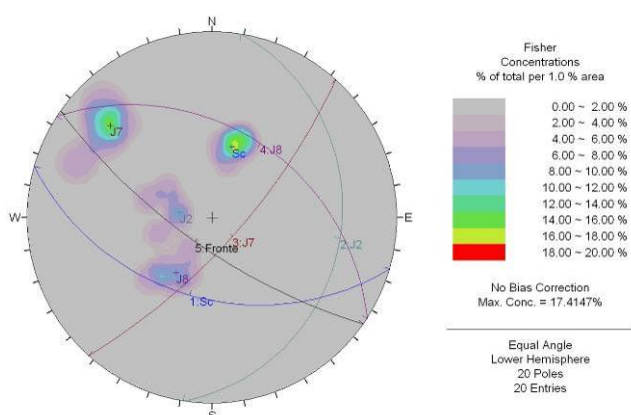
RG-4_FI (Filone)



RG-5



RG-6



RG-7

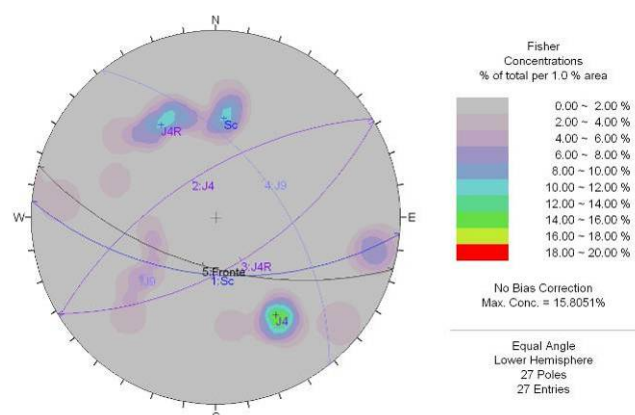


Figura 7.2 : diagrammi di densità delle stazioni geomeccaniche realizzate – Parte II.

Il rilievo geomeccanico RG-4 è stato eseguito in corrispondenza di un taglio stradale costituito da micascisti e da un filone aplitico-pegmatitico a quarzo prevalente. Lo stendimento, di lunghezza complessiva pari a 19 m, per i primi 16 metri ha interessato i micascisti (oggetto del rilievo RG-4_Ms) mentre negli ultimi 3 metri è stato intercettato un filone (rilievo RG-4_FI). Il contatto tra il filone e i micascisti incassanti è marcato da due piccole zone di faglia a comportamento fragile/duttile che hanno prodotto delle piccole protomiloniti potenti circa 50 cm e caratterizzate dallo sviluppo di "slip cleavage" anastomosato. L'ammasso si presenta umido ed eterogeneamente alterato, con parti più alterate intervallate a porzioni più intatte. I filoni sono mediamente più fratturati rispetto ai micascisti, così come evidenziato dal parametro Jv. I micascisti sono caratterizzati da un volume unitario di circa 25 x 30 x 60 cm con forma tabulare/prismatica, individuata da 3 famiglie di discontinuità, comprensive della scistosità che rappresenta la famiglia principale, e con circa 10 giunti a m³. I valori modali



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

delle discontinuità misurate nei micascisti presentano una persistenza compresa tra 1,6 e 1,9 m e una spaziatura di 30 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di $RMR=44$ e di $GSI=56$. Il filone è invece caratterizzato da un volume unitario di circa $15 \times 20 \times 25$ cm con forma prismatica, individuata da 2 famiglie di discontinuità e con circa 15 giunti a m^3 . I valori modal delle discontinuità misurate nel filone presentano una persistenza compresa tra 0,45 e 1,5 m e una spaziatura compresa tra 8 e 18 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di $RMR=69$ e di $GSI=69$.

Il rilievo geomeccanico RG-5 è stato realizzato su un filone aplitico poco alterato ma interessato da stillicidi di acqua. Il filone presenta un contatto sub verticale con i micascisti a direzione circa ENE-WSW ed è caratterizzato da un grado di fratturazione eterogeneo. Le parti più fratturate dell'ammasso roccioso presentano un volume unitario di circa $2 \times 3 \times 5$ cm, mentre quelle più intatte hanno dimensione di circa $30 \times 30 \times 50$ cm; entrambe isolano blocchi di forma prismatica o romboidale individuata da 4 famiglie di discontinuità. Il numero di discontinuità per m^3 rispecchia i diversi volumi unitari osservati in quanto sono presenti rispettivamente 5-10 giunti a m^3 per le parti più compatte e 25-45 giunti a m^3 per le parti più fratturate. I valori modal delle discontinuità presentano una persistenza compresa tra 1 e 1,7 m e una spaziatura compresa tra 25 e 35 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di $RMR=65$ e di $GSI=67$.

Il rilievo geomeccanico speditivo RG-6 è stato effettuato in corrispondenza di uno sbancamento retrostante un'abitazione in cui affiorano micascisti molto fratturati e arricchiti in mica. L'elevato grado di fratturazione è riconducibile alla presenza di numerose superfici di scistosità persistenti e pervasive che rendono i micascisti particolarmente fissili. L'ammasso si presenta debolmente alterato ed è caratterizzato dalla presenza di stillicidi. Il volume unitario osservato è pari a circa $6 \times 25 \times 30$ cm con forma tabulare individuata da 4 famiglie di discontinuità e con circa 25-30 giunti a m^3 . I valori modal delle discontinuità presentano una persistenza compresa tra 0,4 e 10 m e una spaziatura compresa tra 6 e 40 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di $RMR=35$ e di $GSI=45$.

Il rilievo geomeccanico speditivo RG-7 ha interessato un'estesa parete rocciosa situata a margine della S.S. n° 34 e costituita esclusivamente da micascisti asciutti e poco alterati. La parete esaminata è stata oggetto di interventi di protezione contro la caduta massi, attuati tramite la posa di reti metalliche aderenti. Durante il sopralluogo non sono stati osservati accumuli di materiale lapideo distaccatosi dalla parete e arrestato dalle reti. L'ammasso roccioso si presenta con un volume unitario di circa $30 \times 50 \times 60$ cm con forma tabulare, individuata da 3 famiglie di discontinuità comprensive della scistosità e con circa 5-6 giunti a m^3 . I valori modal delle discontinuità presentano una persistenza compresa tra 2 e 3 m e una spaziatura compresa tra 30 e 60 cm. Dalla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso si sono ottenuti i valori di $RMR=62$ e di $GSI=62$.

I diagrammi realizzati (vedi Figura 7.1) hanno permesso di evidenziare che lo stato di fratturazione dell'ammasso è caratterizzato sia da sistemi di discontinuità comuni a tutti i rilievi, sia da sistemi presenti solo in determinate stazioni geomeccaniche.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Il sistema più diffuso tra le stazioni realizzate è la scistosità Sc in quanto superfici appartenenti ad essa sono state osservate in tutti i rilievi eseguiti nei micascisti.

Il secondo sistema per diffusione è rappresentato dalla famiglia J4 e dalla rispettiva coniugata J4R, in quanto sono state osservate nelle stazioni RG-1, 3, 4, 5 e 7. Il sistema J2 è stato osservato in corrispondenza delle stazioni RG-4, 5 e 6, mentre il sistema J5 è stato osservato nelle stazioni RG-2, 3 e 5. Il sistema a basso angolo J1 è stato misurato solamente in due stazioni (RG-1 e RG-4), così come il sistema J3 è stato osservato solo nelle stazioni RG-2 e 4. I restanti sistemi J6, J7, J8, JR1, JR2 e JR3 sono stati osservati solamente in stazioni singole e costituiscono quindi dei sistemi di discontinuità locali caratterizzati da peso minore rispetto a quelli precedentemente enunciati.

In conclusione si può affermare che tutte le stazioni eseguite in corrispondenza di micascisti hanno evidenziato che la superficie di discontinuità prevalente è rappresentata dai giunti (Sc) che si formano lungo la scistosità principale Sp, mentre nei rilievi effettuati in corrispondenza dei filoni aplitici sono risultate prevalenti i sistemi di fratture a basso angolo.



8 CARATTERISTICHE GEOLOGICHE ED IDROGEOLOGICHE DEI TERRENI INTERESSATI DALL'OPERA

Nell'ambito delle opere previste per il Lotto n°1, sulla base dei rilevamenti di terreno e delle informazioni ricavate per il sottosuolo dalle indagini dirette ed indirette sono state identificate le seguenti unità geolitologiche che saranno interessate dagli interventi in progetto.

Depositi glaciali indifferenziati (gc): Distribuiti in corrispondenza di isolate plaghe caratterizzate da estensione e potenza variabile, affiorano dei depositi glaciali caratterizzati da matrice sabbiosa e sabbioso limosa con clasti poligenici ed eterometrici più o meno spigolosi a seconda che si tratti di depositi fluvioglaciali o di ablazione con dimensioni variabili da centimetriche a metriche. I depositi osservati presentano generalmente un buon addensamento ed una parte superiore fortemente ossidata, mentre non sono stati trovati indizi di cementazione. I depositi glaciali possono raggiungere spessori superiori ai 19 m come osservato in corrispondenza del sondaggio S.PD.02_PZ che attraversa il riempimento di una valle di incisione fluvioglaciale colmata in prossimità dell'imbocco Mergozzo. Questi depositi presentano permeabilità per porosità medio bassa e possono ospitare falde acquifere temporanee o stagionali. L'unità mostra un comportamento d'insieme stabile evidenziato da affioramenti costituiti da pareti acclivi; l'unica eccezione è rappresentata dallo sviluppo di processi erosivi superficiali operanti in presenza di acque ruscianti e tagli esposti.

I depositi glaciali sono stati inseriti in una sola unità geotecnica denominata **GL**.

Depositi alluvionali (al1) e fluviolacustri (al1_f): si tratta di sedimenti depositi dal Fiume Toce e, subordinatamente, dai rii minori, costituiti da sabbie, sabbie fini e subordinate ghiaie. Localmente, come evidenziato dal sondaggio S.PD.01_PZ e S.PD.06_PZ, data la natura della deposizione deltizia i depositi del Fiume Toce possono essere alternati a depositi argillosi o limosi con contenuto organico variabile derivanti da episodi di deposizione lacustre e, anche se non osservati direttamente nei sondaggi, dato l'ambiente deposizionale è probabile la presenza di livelli torbosi. I depositi dei rii minori si presentano molto più grossolani data la maggiore pendenza del bacino idrografico e la minore maturità del corso dell'alveo, essi formano dei ridotti fondovalle alluvionali e, nel loro tratto terminale, dei conoidi coalescenti con i depositi del Fiume Toce o con i depositi lacustri.

L'unità non mostra alcun indizio di propensione al dissesto ed è caratterizzata da un grado di permeabilità differente in funzione della granulometria; se infatti le parti più grossolane (appartenenti principalmente ai conoidi dei corsi d'acqua minori) sono caratterizzate da permeabilità medio/alta, quelle più fini (appartenenti ai depositi fluviolacustri del delta del Toce) presentano una bassa permeabilità.

I depositi grossolani in generale ospitano sui versanti, dove sono caratterizzati da spessori minori, falde temporanee o stagionali, mentre in corrispondenza dei conoidi di fondovalle presentano una falda perenne in contatto con i bacini del Lago Maggiore e di Mergozzo. I depositi fluviolacustri più fini e sottoconsolidati, diffusi in località Piano Grande, ospitano una falda perenne con un lievissimo gradiente verso il Lago Maggiore.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

I depositi alluvionali e fluviolacustri, ai fini della classificazione geotecnica dei terreni, sono stati unificati all'interno dell'unità **FL**.

Coltre eluvio-colluviale (ec): In corrispondenza degli imbocchi, sovrapposta sia ai depositi glaciali, sia al substrato roccioso, si rinviene una coltre eluvio-colluviale, costituita da blocchi angolari di rocce del substrato, immersi in una matrice sabbiosa e limo-sabbiosa poco addensata e a stratificazione parallela al pendio. L'unità non mostra alcun indizio di propensione al dissesto, mentre può risultare soggetta a locali fenomeni erosivi. Presenta una permeabilità media, ma comunque piuttosto variabile in funzione della maggiore o minore incidenza percentuale delle frazioni granulometriche limo-argillose e dello stato di addensamento.

Le coltri eluvio colluviali sono state inserite entro una singola unità geotecnica denominata **EC**.

Miscascisti e paragneiss (SL): Comprende micascisti e subordinati paragneiss appartenenti agli Scisti dei Laghi in cui possono essere presenti dei livelli di **anfiboliti (Af)** disposti parallelamente alla scistosità principale Sp. L'ammasso roccioso è stato inoltre ulteriormente differenziato in funzione della possibile presenza di porzioni maggiormente fratturate e alterate (**SL_a**) in virtù della presenza di particolari processi glaciali, strutture tettoniche o di alterazione superficiale maggiormente sviluppata.

L'indice di qualità dell'ammasso roccioso poco alterato si mantiene costantemente, salvo rari casi, su valori medi e talora elevati, come confermato dalla stima dell'indice RMR secondo Bieniawski che oscilla tra un minimo di 35 e un massimo di 67, con un valore medio pari a 53. Tale classificazione, effettuata in corrispondenza dei rilievi geomeccanici eseguiti lungo il tracciato, fornisce valori che corrispondono, in prevalenza, alle classi geomeccaniche III e II, e in un solo caso IV (rilievo RG-6 con RMR pari a 35).

Nel complesso gli Scisti dei Laghi sono interessati dalla presenza di due strutture tettoniche principali costituite dalla faglia a comportamento fragile/duttile situata lungo la strada che collega Fondotoce-Bieno e intercettata tra le pk 1+495 m e pk 1+525 e dalla zona di taglio duttile intercettata tra le pk 1+910 m e la pk 1+923 m. Le caratteristiche della compagine integra dell'ammasso, dedotte da prove di compressione uniassiale, sono sintetizzate da un valore medio Co di resistenza a compressione uniassiale di circa 15 MPa, per le ragioni precedentemente esposte nel paragrafo 6. In corrispondenza delle zone tettonizzate individuate dal modello geologico si verifica ovviamente uno scadimento delle proprietà geomeccaniche dell'ammasso roccioso, costituito sia da ultramiloniti che da protomiloniti entrambe foliate e coesive. Le prove di compressione monoassiale eseguite in corrispondenza del secondo tipo di roccia di faglia hanno fornito un valore di Co pari a circa 12 MPa, quindi leggermente inferiore alla media presentata dai campioni di micascisti.

Dal punto di vista idrogeologico gli Scisti dei Laghi possono essere assimilati ad un substrato caratterizzato da una permeabilità di tipo secondario per fratturazione; l'ammasso presenta quindi una disomogenea permeabilità in gran parte limitata ad alcune fasce maggiormente fratturate sia per la presenza di strutture tettoniche, sia per la presenza di fenomeni di detensionamento post glaciale o di dissesti di gravitativi. In relazione allo scavo in galleria quindi, nelle tratte scavate interamente entro i micascisti, non si prevedono significative manifestazioni acquifere, essendo in maggior parte prevedibili condizioni di roccia asciutta.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Condizioni di tipo bagnato, con eventuali venute di acqua localizzate in limitati settori, potranno verificarsi durante l'attraversamento delle due faglie individuate nell'area o attraversando dei corpi filoniani particolarmente fratturati.

Lo studio geologico ha evidenziato la presenza di due diverse tipologie di filoni intrusi all'interno degli Scisti dei Laghi, rappresentati da **filoni aplitici (FA)** (chimismo acido e mineralogia prevalente a quarzo e feldspati) e **filoni lamprofirici (FB)** (chimismo basico e mineralogia di difficile valutazione data la grana fine della roccia). Entrambe le tipologie di filoni individuate entro l'area, intrusi con direzione prevalentemente WSW-ENE, immersione verso NNW ad alto/medio angolo, sono caratterizzati da scarsa alterazione e grado di fratturazione eterogeneo in cui sono cioè presenti porzioni molto compatte alternate a parti maggiormente fratturate rispetto agli scisti incassanti. Il maggior grado di fratturazione osservato in alcune parti degli affioramenti di filoni è riconducibile al diverso comportamento reologico espresso da tali corpi intrusivi rispetto ai micascisti incassanti, in quanto i filoni (soprattutto quelli aplitici), sono maggiormente competenti e rispondono alle deformazioni tardive osservate nell'area (Fase Sp+2) in modo essenzialmente fragile, sviluppando quindi numerosi set di fratture. Nonostante tale risposta alla deformazione, i valori di RMR ricavati dai rilievi geomeccanici RG-4_FI e RG-5, eseguiti rispettivamente su un piccolo filone aplitico di 3 m a quarzo prevalente e sul maggior filone aplitico osservato nell'area potente circa 20-30 m, hanno fornito valori di 69 e 65 pari alla classe di scavo II.

Sulla base del modello geologico (vedi Carta geologica, Profilo geologico e geomeccanico, cod el B357PDGEOOG02CO04010, B357PDGEOOG03PR0201-2 e B357PDSTRGN01PR01010) è tuttavia possibile ipotizzare che lo scavo della galleria interesserà essenzialmente un modesto filone lamprofirico caratterizzato da potenza non superiore a 50 cm - 1 m, mentre non coinvolgerà il filone aplitico di potenza 20-30 m. Sulla base di tale evidenza e data l'esigua potenza del filone lamprofirico non si è quindi ritenuto necessario istituire una specifica unità geolitologica, né conseguentemente una unità geotecnica. Attualmente è tuttavia possibile ipotizzare che lo scavo della galleria Fondotoce possa attraversare altri filoni non osservati né dal rilievo geologico di dettaglio, né dalla campagna di indagine geognostica condotta, caratterizzati da potenza non superiore a 5 m e composizione sia aplitica che lamprofirica.

In conclusione, come successivamente articolato nel Capitolo 10, gli Scisti dei Laghi sono stati suddivisi in diverse unità geotecniche in funzione delle differenti caratteristiche geomeccaniche previste; per tale ragione le parti non alterate (SL) sono state incluse nella classe **Sc1**, mentre le parti maggiormente alterate e fratturate (SL_a) sono state ulteriormente suddivise in due diverse unità **Sc2** ed **Sc3**.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

9 MODELLO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO DELLE ZONE OMOGENEE INDIVIDUATE LUNGO IL TRACCIATO

In questo capitolo viene presentata la suddivisione in tratte omogenee operata lungo il tracciato della galleria in funzione delle condizioni geomeccaniche ed idrogeologiche attese in fase di scavo.

Tabella 9.1 : schema riassuntivo dei caratteri geologici previsti nelle varie tratte del tracciato previsto dal Lotto n°1.

Tratta (pk in m)	Lunghezza (m)	Condizioni litologiche prevalenti	Unità geotecnica	Classe geomeccanica prevalente	Condizioni idrogeologiche prevalenti
0+000 – 0+524	524	al1	FL	-	-
0+524 – 0+575	31	ec	EC	-	-
0+575 – 0+602	27	ec – SL	EC – Sc3	-	-
0+602 - 0+629	27	SL	Sc3	IV	Stillicidi
0+629 - 0+745	116	SL	Sc1	II	Asciutto/Umido
0+745 – 0+803	58	SL	Sc1 - Sc2	III	Venute/Stillicidi
0+803 – 1+497	694	SL	Sc1	II	Asciutto
1+497 – 1+524	27	SL	Sc3	IV	Venute
1+524 – 1+894	370	SL	Sc1	II	Asciutto
1+894 – 1+934	40	SL	Sc3	IV	Stillicidi
1+934 – 2+539	605	SL	Sc1	II	Asciutto
2+539– 2+589	50	SL	Sc3	IV	Stillicidi
2+589 - 2+633	44	SL	Sc1	II	Umido
2+633- 2+709	76	SL	Sc2	III	Umido
2+709- 2+743	34	al1	FL	-	-

In relazione alle caratteristiche della massa rocciosa attese lungo il tracciato si prevede, per lo scavo della galleria Fondotoce, l'impiego sistematico di abbattimento mediante esplosivo con impiego di tecniche per la riduzione delle vibrazioni trasmesse in superficie.

Le caratteristiche della massa rocciosa attraversata sono tali da far prevedere il mantenimento del cavo in condizioni elastiche a seguito dello scavo per la quasi totalità del tracciato. L'unica zona in cui è possibile raggiungere le condizioni di plasticizzazione del cavo è rappresentata dall'attraversamento della faglia tra la pk 1+497 m e la pk 1+524 m, la successiva faglia, a comportamento duttile-fragile compresa tra le progressive pk 1+894 e pk 1+934 è stata valutata come non in grado di generare uno stato di fratturazione tale da causare plasticizzazione del cavo.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

In corrispondenza delle tratte di imbocco e nelle tratte di attraversamento dei filoni si prevedono condizioni di alterazione e fratturazione più elevate, tali da comportare una riduzione del tempo di autoportanza, con conseguente necessità di adozione di sostegni immediatamente a seguito dello scavo.

Lo scavo del pozzo di ventilazione interesserà un ammasso poco fratturato di buone caratteristiche geomeccaniche (Sc1) in grado quindi di mantenere le condizioni elastiche a seguito dello scavo e di prevedere quindi uno scavo meccanizzato tramite raise-boring.



10 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DI DETTAGLIO DEI MATERIALI INTERESSATI DALLO SCAVO

10.1. Definizione delle unità geotecniche

Sulla base del modello geologico di riferimento, sintetizzato nei paragrafi precedenti, sono state individuate sei unità geotecniche, delle quali tre afferenti la categoria dei terreni e tre che costituiscono la suddivisione degli ammassi rocciosi in funzione delle caratteristiche di fratturazione ed alterazione.

10.1.1. Unità geotecnica Sc

L'unità Sc include il substrato roccioso appartenente agli Scisti dei Laghi, costituito da micascisti e paragneiss con possibili livelli di anfiboliti e l'intrusione di piccoli filoni aplitici o lamprofirici inferiori a 5 m.

Spessore massimo dell'unità: n.a.

Caratteristiche: micascisti e paragneiss a struttura scistosa, sano o debolmente alterato. In funzione del grado di fratturazione e alterazione delle superfici si differenzia in:

- Unità Geotecnica Sc1 (grado di alterazione e fratturazione basso);
- Unità Geotecnica Sc2 (grado di alterazione e fratturazione medio);
- Unità Geotecnica Sc3 (grado di alterazione e fratturazione alto).

L'unità Sc è distribuita lungo tutta la galleria Fondotoce e il pozzo di aerazione, mentre le diverse sottounità in dettaglio vengono intercettate dallo scavo nelle seguenti tratte (le lunghezze sono espresse in metri):

- Unità Geotecnica Sc1. Distribuita tra le progressive pk: 0+629÷0+745; 0+803÷1+497; 1+524÷1+894, 1+934÷2+539, 2+589 2+633.
- Unità Geotecnica Sc2. Distribuita tra le progressive pk: 2+633÷2+709;
- Unità Geotecnica Sc3. Distribuita tra le progressive pk: 0+602÷0+629; 1+497÷1+524; 1+894÷1+934; 2+663÷2+709.

Le unità Sc1 ed Sc2 costituiscono inoltre un fronte misto tra le progressive pk 0+745 ÷ 0+803 m, mentre l'unità Sc3 costituisce fronte misto con l'unità EC tra le progressive pk 0+575 e 0+602 m.

10.1.2. Unità geotecnica GL

L'unità GL include i depositi glaciali indifferenziati formati da facies di ablazione o fluvioglaciali.

Spessore massimo dell'unità: lo spessore massimo è stato osservato in corrispondenza al sondaggio S.PD.02_PZ posto in prossimità dell'imbocco lato Mergozzo ed è superiore a 19 m.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Caratteristiche: depositi caratterizzati da matrice sabbiosa e sabbioso limosa con clasti poligenici ed eterometrici più o meno spigolosi a seconda che si tratti di depositi fluvioglaciali o di ablazione con dimensioni variabili da centimetriche a metriche.

L'unità GL non viene attraversata dal il tracciato del Lotto n°1 ma è presente a meno di 3 metri al di sopra della calotta della galleria naturale tra le progressive pk: 0+672÷0+797 m.

10.1.3. Unità geotecnica FL

Tale unità include i depositi alluvionali e fluviolacustri depositi dal Fiume Toce e dai rii minori.

Spessore massimo dell'unità: > 30 m osservati nel sondaggio S.PD.06_PZ, lo spessore massimo è sicuramente maggiore di questo valore in quanto la pianura alluvionale e i corrispettivi depositi fluviolacustri hanno colmato una precedente valle glaciale di profondità non accertata.

Caratteristiche: depositi compressibili costituiti da sabbie, sabbie fini e subordinate ghiaie. Localmente possono essere alternati a depositi argillosi o limosi derivanti da episodi di deposizione lacustre con percentuali variabili di materia organica; anche se non osservati direttamente nei sondaggi, dato l'ambiente deposizionale è probabile la presenza di livelli torbosi.

L'unità FL è distribuita in tutte le tratte non interessate dallo scavo delle gallerie artificiali o naturali, essa viene intercettata dal tracciato in corrispondenza delle progressive pk (espresse in metri): 0+000÷0+524 corrispondenti al tratto del tracciato che attraversa la pianura alluvionale compresa tra i laghi Maggiore e Mergozzo; e delle progressive 2+709 ÷ 2+743 corrispondenti al tratto del tracciato che attraversa il terrazzo alluvionale su cui è impostata la rotonda che raccorda il tracciato con la SS. n°34 in prossimità della località "Villa Esperia"

10.1.4. Unità geotecnica EC

L'unità EC comprende tutti i depositi detritici di origine eluvio-colluviale affioranti nell'area.

Spessore massimo dell'unità: 5 m

Caratteristiche: depositi costituiti da blocchi angolari di rocce del substrato, immersi in una matrice sabbiosa e limoso-sabbiosa poco addensata a stratificazione parallela al pendio.

Lungo il tracciato del Lotto n°1 l'unità EC è distribuita tra le pk (espresse in metri): 0+524÷0+575 e costituisce fronte misto con l'unità Sc3 tra le progressive pk 0+575 e 0+602 m.

10.2. Caratterizzazione geotecnica della massa rocciosa e dei terreni

Nel seguito sono valutate, sulla base dei risultati delle prove geotecniche disponibili e di esperienze precedenti nell'ambito di terreni ed ammassi rocciosi simili, le caratteristiche geotecniche delle 4 unità



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

descritte al paragrafo precedente (e relative sotto unità), valutando per ognuna di esse i parametri più rappresentativi.

La definizione dei parametri geomeccanici della massa rocciosa è stata effettuata in funzione del tipo di intervento previsto in progetto nelle diverse unità geotecniche litoidi. Per quanto riguarda gli ammassi rocciosi interessati da interventi a cielo aperto, quali riprofilatura di scarpate per adeguamenti della sede stradale o preparazione di imbocchi di gallerie si è fatto riferimento ai parametri delle discontinuità presenti nell'ammasso, in quanto i possibili meccanismi di instabilità degli scavi tendono a manifestarsi prevalentemente per lo sviluppo di cinematismi lungo i piani di fratturazione o di scistosità.

Nel caso dello scavo in sotterraneo si sono invece analizzati, oltre ai parametri delle discontinuità, anche quelli della massa rocciosa, i quali, in funzione delle tensioni agenti alle diverse profondità, della resistenza della roccia intatta, dello stato di fratturazione e del metodo di scavo, regolano il comportamento del cavo e del fronte della galleria a seguito dello scavo.

Per la definizione del criterio di rottura della massa rocciosa si è fatto riferimento al criterio di Hoek e Brown (Hoek et al., 2002), che consente di tener conto in maniera esplicita, attraverso l'apposito fattore D, del disturbo provocato dalle diverse modalità di scavo.

10.2.1. Indici di qualità della massa rocciosa

Per le unità geotecniche interessate dallo scavo della galleria e costituite da materiali litoidi è stata eseguita una classificazione geomeccanica tramite il sistema RMR di Bieniawski (RMR-System 1989). In particolare si è fatto riferimento all'indice BMR'89 che tiene conto di quattro parametri determinabili sull'ammasso roccioso quali:

- resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta;
- indice RQD (Rock Quality Designation);
- spaziatura dei giunti;
- condizioni dei giunti (alterazione delle pareti, scabrezza, persistenza, apertura e materiale di riempimento).

A ciascun parametro, valutato in modo quantitativo, è assegnato un indice parziale secondo le tabelle e i grafici proposti dall'Autore. Per quanto concerne la classificazione geomeccanica delle unità geotecniche, diversamente da quanto effettuato in corrispondenza delle stazioni geostrutturali (dove è stato valutato l'indice RMR), si è deciso di non considerare né l'effetto del quinto parametro relativo alla condizione idrogeologica, né l'effetto del parametro che considera l'orientazione dello scavo. Tale scelta è stata adottata in quanto:

- le unità geotecniche identificate entro l'ammasso sono poco permeabili e quindi mediamente prive di acqua;
- data la presenza di permeabilità secondaria per fratturazione all'interno degli Scisti dei Laghi, si è ritenuto opportuno non considerare la possibile presenza di venute d'acqua localizzate in corrispondenza di precisi canali maggiormente permeabili;



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

- non si è voluto determinare l'RMR in funzione di una precisa direzione di scavo.

Per indicare condizioni "anidre" dell'ammasso roccioso, alla somma algebrica dei quattro precedenti indici si sommerà quindi il massimo valore disponibile per il quantitativo in acqua, pari a 15, mentre per non considerare la direzione di scavo si sommerà un valore costante pari a 0. In seguito a tali correzioni si otterrà quindi l'indice complessivo BMR'_{89} .

Al fine di considerare la naturale eterogeneità dei materiali geologici, per ciascuno dei litotipi individuati nella zona della galleria, è stato riportato un possibile campo di variazione dell'indice BMR'_{89} . La stima di tale indice, riportata nella Tabella 10.1, è stata effettuata sia sulla base dei dati ricavati dalle stazioni geostrutturali di superficie, sia sulla base delle informazioni ricavate dai sondaggi geognostici. Le ragioni di tale scelta risiedono nella difficoltà di poter osservare direttamente in superficie le rocce dell'unità Sc3 in quanto, date le scadenti qualità geomeccaniche, risultano mascherate da ingenti spessori di coperture eluvio-colluviali. Per tale ragione la classificazione geomeccanica dell'unità Sc3 è stata effettuata principalmente basandosi sia sui campioni di protomilnite ricavati dal sondaggio S.PD.03, sia sulla base di lavori precedenti in cui fossero presenti analoghi contesti litologici e strutturali.

Per la valutazione della resistenza a compressione monoassiale (Co) ci si è riferiti ai risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni di micascisti prelevati dai sondaggi geognostici.

Tabella 10.1 :calcolo deterministico dell'indice $BRMR$ per le diverse unità geotecniche.

Parametro	Unità geotecnica Sc1	Unità geotecnica Sc2	Unità geotecnica Sc3
Co (MPa)	15-30	15-30	12-15
Rating	2-4	2-4	2-4
RQD (%)	50-75	10-30	10-25
Rating	10-15	4-6	4-6
Spaziatura (cm)	60-200	20-60	3,5-12
Rating	12-20	8-12	5-6
Persistenza (m)	1-3	3-10	10-20
Rating	2-4	1-2	1-2
Apertura	0.1-1mm	0.1-1mm	1-5mm
Rating	2-4	2-4	1-2
Scabrezza	Deb rugosa-rugosa	Deb rugosa-rugosa	Liscia Deb rugosa -
Rating	3-5	3-5	1-3
Alterazione	Debole- assente	Moderata-debole	Molto alterato-Mediamente alterato
Rating	5-6	3-5	1-3
Riempimento	Assente-quarzo	Assente-quarzo	Soffice < 5mm
Rating	4-6	4-6	0-2
Acqua	-	-	-
Rating	15	15	15
BMR	55-79	42-59	30-43
GSI	50-74	37-54	25-38



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Per le caratteristiche di resistenza degli ammassi rocciosi si è utilizzato il criterio "generalizzato" proposto da Hoek e Brown (2002).

I valori del Geological Strength Index caratterizzanti i diversi gruppi geomeccanici sono stati ricavati servendosi della classificazione di Hoek e Marinos, (2000) che, a partire dalle condizioni delle superfici di discontinuità e dalla struttura dell'ammasso roccioso, permette di ricavare il valore del GSI.

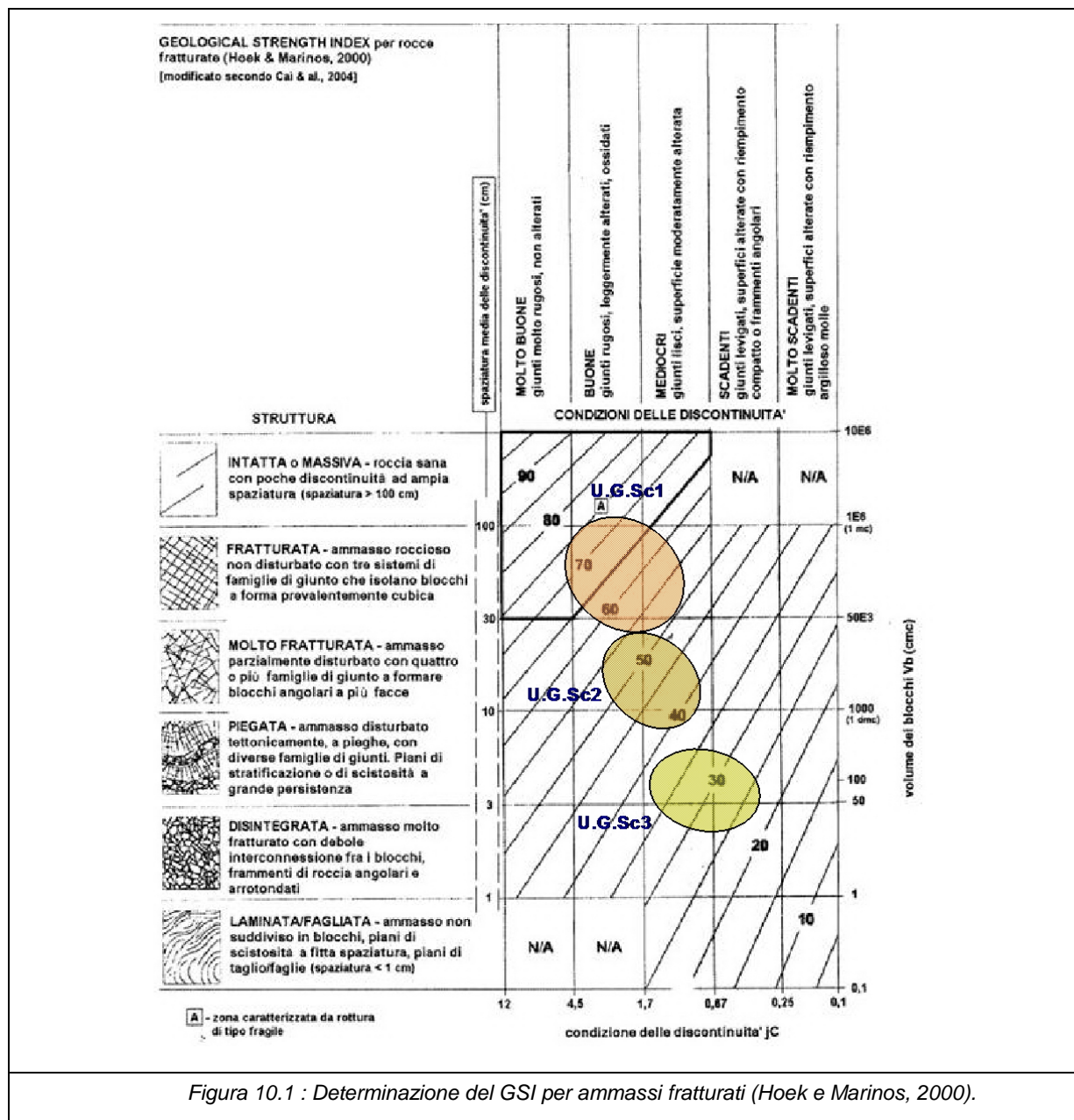


Figura 10.1 : Determinazione del GSI per ammassi fratturati (Hoek e Marinos, 2000).



10.2.2. Caratterizzazione geomeccanica della massa rocciosa

I parametri di resistenza dell'ammasso roccioso adottati sono stati valutati servendosi del criterio di Hoek e Brown (Hoek e Brown, 1997). I domini di rottura (σ_3 - σ_1 , τ - σ_N) per i gruppi geomeccanici considerati sono riportati nelle figure seguenti. Per la stima dei parametri di resistenza dell'ammasso ci si è avvalso prevalentemente dei dati ricavati in seguito agli approfondimenti d'indagine eseguiti durante il presente studio opportunamente corretti e modificati, in particolare:

- Per l'indicazione della resistenza a compressione uniassiale (σ_c) i valori di riferimento sono rappresentati dai risultati delle prove di laboratorio eseguite su campioni di roccia intatta. In particolare per i micascisti il valore medio ricavato dall'analisi statistica dei risultati (pari a 16 MPa) è stato elevato a 25 MPa. Tale valore, compreso comunque nel range fornito dalle prove di laboratorio pari a 5,14-37,7 MPa, intende mitigare parzialmente gli effetti di forma del campione e la sfavorevole orientazione della scistosità. Per quanto concerne invece la protomilonite è stato adottato il valore di σ_c fornito dalla prova di laboratorio e pari a 12,4 MPa;
- Il valore di GSI è stato assunto pari a 65 per l'unità Sc1, 35 per l'unità Sc2 e 20 per l'unità Sc3.

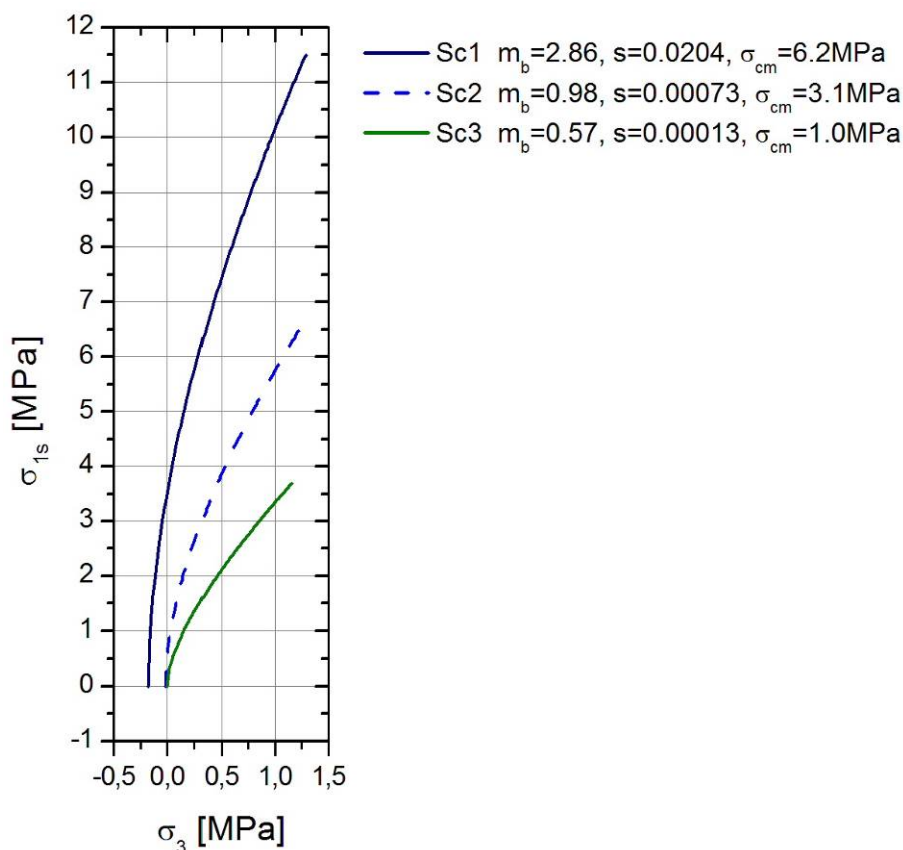


Figura 10.2 : involucro di rottura di Hoek e Brown – dominio σ_3 - σ_1 .



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

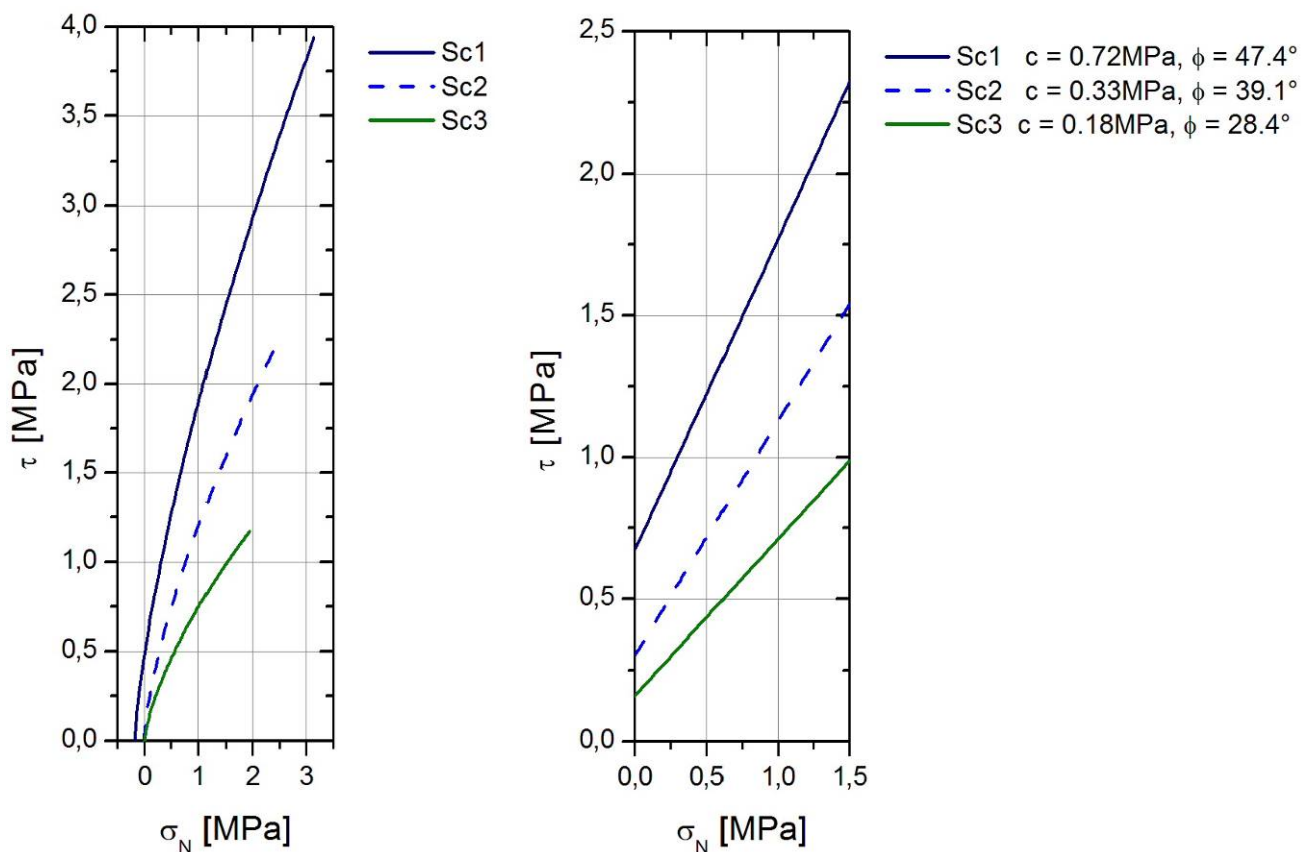


Figura 10.3 : inviluppi di rottura di Hoek e Brown (a sinistra) e Mohr-Coulomb (a destra) – dominio σ_N - τ .

Nella Tabella 10.2 sono raccolti i valori dei principali parametri di calcolo adottati per ciascuna unità geotecnica in cui è stato suddiviso l'ammasso roccioso individuato per il tracciato del Lotto n°1. Per quanto riguarda i parametri residui per le unità U.G.Sc1 e U.G.Sc2 sono stati utilizzati i valori dell'unità inferiore. Per quanto riguarda l'unità U.G. 3 è stato assunto un comportamento elasto-plastico ideale senza decadimento post rottura. I valori riportati tra parentesi corrispondono ai risultati delle prove di laboratorio o delle prove in situ eseguite. In particolare:

- per quanto concerne la resistenza a compressione monoassiale (σ_c) è stato riportato il valore medio delle prove eseguite sui micascisti e il valore della prova eseguita sulla protomilonite;
- per quanto riguarda il modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso (E_d) sono stati riportati i valori del modulo di deformazione (calcolato sulla base del secondo carico) ricavati dalle prove dilatometriche.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

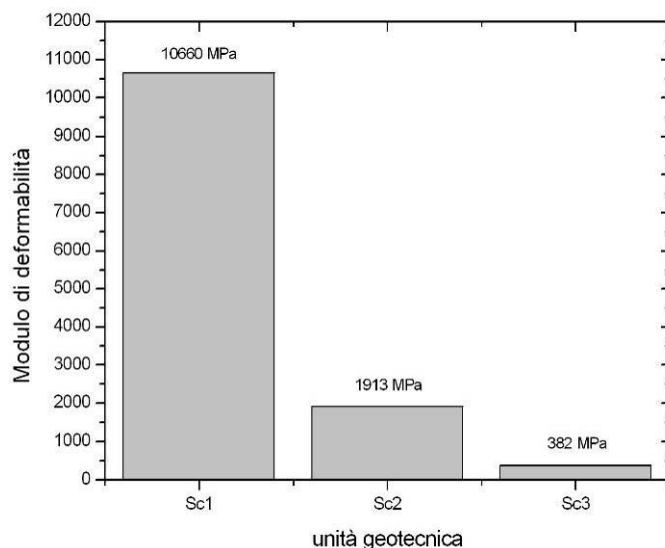


Figura 10.4 : modulo di deformabilità della massa rocciosa ricavato mediante le formulazioni di Hoek e Brown.

Tabella 10.2 : campo di variabilità dei parametri delle unità geotecniche litoidi.

Unità geotecnica	GSI	RMR	σ_c (MPa)	E_d (MPa)	ν	γ (kN/m ³)	m_b picco (-)	s_{picco} (-)	ϕ' [°]	c' [kPa]
Sc1	50-74	55-79	25 – (media 16)	10660	0.25	26	2,865	0,0205	47	720
Sc2	37-54	42-59	25 – (media 16)	1913- (1480)	0.25	26	0,981	0,000730	39	330
Sc3	25-38	30-43	(12,4)	382-(422)	0.3	25	0,574	0,000138	28	180

LEGENDA

σ_c : resistenza a compressione uniassiale

GSI: Geological Strength Index (Hoek et al., 1995 e pubblicazioni seguenti)

γ : peso di volume naturale

E_d : modulo di deformabilità

ν : rapporto di Poisson

m_b , s : coefficienti di Hoek e Brown

c' : coesione efficace

ϕ' : angolo di attrito efficace



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

10.2.3. Condizioni geomeccaniche delle discontinuità

Le discontinuità sono state caratterizzate sulla base dei parametri di scabrezza (JRC) e resistenza alla compressione (JCS).

Tabella 10.3 : valori di resistenza al taglio sulle discontinuità.

Litologia	Sistema	JRC	JCS [MPa]	ϕ_b [°]	c [MPa]	ϕ [°]
Micascisti e paragneiss non alterati	Sc	12-14	10-20	35	0	45-50
Micascisti e paragneiss alterati	Sc	8-10	5-10	30	0	30-35

JRC: Joint Roughness Coefficient

JCS: Joint Compressive Strength

ϕ_b : angolo d'attrito di base

c: coesione (equivalente)

ϕ : angolo d'attrito (equivalente)

10.2.4. Caratterizzazione geotecnica dei terreni

Nel presente paragrafo sono state valutate le caratteristiche geotecniche delle tre unità costituite da depositi detritici, valutando per ognuna di esse i seguenti parametri rappresentativi:

- Proprietà fisiche – Peso di volume.
- Caratteristiche di resistenza al taglio drenata e non drenata – Coesione e angolo di attrito interno efficaci e/o drenati.
- Caratteristiche di deformabilità – Modulo di deformabilità e rapporto di Poisson.
- Comprimibilità

Per effettuare la caratterizzazione geotecnica dei terreni e la conseguente stima dei parametri sopracitati sono state utilizzate:

- prove di laboratorio;
- prove geotecniche eseguite in situ;
- esperienze precedenti nell'ambito di terreni ed ammassi rocciosi simili.

Per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio efficaci dell'unità geotecnica FL sono stati considerati sia i risultati delle prove SPT effettuate nei sondaggi S.PD.01_PZ ed S.PD.06_PZ (elaborando le correlazioni con il valore di NSPT), sia il risultato della prova di taglio diretto e della triassiale. L'elaborazione completa dei dati ricavati dalle prove SPT effettuate è stata riportata nelle tabelle seguenti.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 10.4 : Parte I - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.01_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,4 m dal piano campagna.

Prof. (m)	Litotipo	SPT 15cm	SPT 15cm	N-value	Correzione per la profondità, C_N	Po' (KPa)	N ₇₀	N ₆₀
3,0	Sabbia fine limosa debolmente ghiaiosa e con ciottoli	1	2	3	1,79	30	5	6
6,0	Sabbia fine limosa	2	2	4	1,26	60	5	6
9,0	Limi debolmente sabbiosi e argillosi	1	1	2	1,03	90	2	2
12,0	Limi debolmente sabbiosi e argillosi	1	1	2	0,89	120	2	2

Tabella 10.5 : Parte II - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.01_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,4 m dal piano campagna.

Prof. (m)	Dr [%] (Yoshida, et al., 1988)	Dr [%] (Skempton, 1986)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Yoshida)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Skempton)	ϕ [deg] Jap.Railw.Stand. Buildings, 1959)	Es [MPa] (gravelly sand, Bowles, 1997)	Es [MPa] (sabbia e ghiaia, Denver, 1982)	Es [Mpa] (limi, limi argillosi o limi sabbiosi, Bowles, 1997)	Cu [kPa] Bowles 1997
3,0	39	32	34	33	29	15	23	4	32
6,0	35	31	33	33	29	15	23	4	30
9,0	22	20	31	31	28	10	20	3	12
12,0	20	19	31	31	28	10	20	2	11

Tabella 10.6 : Parte I - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.06_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,2 m dal piano campagna.

Prof. (m)	Litotipo	SPT 15cm	SPT 15cm	N-value	Correzione per la profondità, C_N	Po' (KPa)	N ₇₀	N ₆₀
9,0	Sabbia medio fine limosa poco addensata	1	2	3	1,03	90	3	4
12,0	Sabbia molto fine, limosa e poco addensata	2	1	3	0,89	120	3	3
25,5	Limo debolmente sabbioso	2	3	5	0,61	255	3	4
28,5	Limo debolmente sabbioso	1	2	3	0,58	285	2	2



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 10.7 : Parte II - risultati delle prove penetrometriche SPT realizzate nel sondaggio S.PD.06_PZ. La profondità della falda acquifera si colloca a circa 2,2 m dal piano campagna.

Prof. (m)	Dr [%] (Yoshida, et al., 1988)	Dr [%] (Skempton, 1986)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Yoshida)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Skempton)	ϕ [deg] Jap.Railw.Stand. Buildings, 1959)	Es [MPa] (gravelly sand, Bowles, 1997)	Es [MPa] (sabbia e ghiaia, Denver, 1982)	Es [Mpa] (limi, limi argillosi o limi sabbiosi, Bowles, 1997)	Cu [kPa] Bowles 1997
9,0	26	25	32	32	28	12	21	3	19
12,0	24	23	32	31	28	11	21	3	16
25,5	23	24	31	32	28	12	21	3	18
28,5	18	18	31	31	28	10	20	2	10

Tabella 10.8 : Legenda delle interpretazioni delle prove SPT.

LEGENDA prove SPT

D_r è la densità relativa del materiale calcolato secondo le relazioni di diversi Autori,

ϕ è l'angolo di attrito calcolato secondo le relazioni di due Autori, ma utilizzando i diversi valori di D_r calcolati precedentemente,

E_s è il modulo di deformabilità del terreno; la formulazione di Bowles è valida solo per ghiaie e sabbie, mentre quella di Jamiolkowski per terreni fini,

c_u è la coesione non drenata.

Per poter agevolare la sintesi dei parametri di resistenza al taglio dell'unità geotecnica FL i valori ricavati dalle diverse prove di laboratorio e in situ sono stati riassunti nella tabella seguente.

Tabella 10.9: Sintesi dei principali parametri geotecnici derivati dalle prove di laboratorio e dalle prove in situ per l'unità FL

Parametri geotecnici	SPT	Prova di taglio diretto consolidata e drenata	Prova triassiale non consolidata e non drenata
ϕ' (°)	31 (sabbie limose) e 30 (limi sabbiosi)	33,4 (sabbie limose)	-
c' (KPa)	-	7 (sabbie limose)	-
c_u (KPa)	24,5 (sabbie limose) e 12,8 (limi sabbiosi)	-	57 (limi sabbiosi)
Dr (%)	29 (sabbie limose) e 20,5 (limi sabbiosi)	-	-

Confrontando i valori dell'angolo di attrito (ϕ') riportati in Tabella 10.9 e ricavati dalle diverse prove eseguite nell'unità FL, si può osservare che sia la facies costituita da sabbie limose (31°), che la facies di limi



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

sabbiosi (30°) presentano un valore molto simile a quello ricavato grazie alla prova di taglio diretto ($33,4^\circ$). I valori di resistenza al taglio non drenata differiscono sensibilmente tra le due tipologie di prove in quanto la prova triassiale ha fornito risultati superiori rispetto alle SPT. In questo caso è tuttavia possibile ritenere più affidabile la misurazione diretta ottenuta dalla prova triassiale.

Per quanto riguarda invece i valori di coesione efficace (c') e densità relativa (D_r) non si dispongono di termini di confronto tra le diverse prove eseguite in quanto essi sono stati ricavati rispettivamente dalla prova di taglio e dalle SPT.

Diversamente da quanto disponibile per l'unità FL, per le unità geotecniche GL ed EC non è stato possibile prelevare campioni indisturbati di tali materiali sui quali eseguire prove di laboratorio; pertanto per la caratterizzazione e la stima dei parametri geotecnici delle unità geotecniche EC e GL si è fatto riferimento a studi reperiti in letteratura per condizioni simili a quelle osservate nell'area.

Nella Tabella 10.10 sono stati riportati i parametri di progetto dell'unità geotecnica FL, mentre nella successiva Tabella 10.11 sono stati riportati i parametri per le restanti unità EC e GL. La scelta di separare i parametri delle diverse unità è giustificata dalla differenza di parametri geotecnici a disposizione per la loro caratterizzazione, in quanto per l'unità FL si dispone di maggiori informazioni rispetto alle unità EC e GL. Tale differenza è motivata in quanto l'unità FL è più estesa rispetto alle altre due e accoglierà sia il rilevato stradale che le opere di fondazione del viadotto.

Si precisa che in Tabella 10.10 i valori dell'angolo di attrito e della coesione efficace sono stati cautelativamente ridotti per poter considerare eventuali eterogeneità litologiche all'interno dell'unità stessa in grado di peggiorarne sensibilmente le caratteristiche geomeccaniche.

Tabella 10.10: parametri di progetto per l'unità geotecnica U.G. FL.

Unità geomeccanica - geotecnica	Descrizione	γ [kN/m ³]	ν [-]	E [MPa]	ϕ' [°]	c' [kPa]	M [MPa]	K [m/s]
FL	Depositi fluviolacustri	18.3	0.45	2.35	22	0	2.23	1E-08

LEGENDA

γ : peso di volume naturale

c' : coesione efficace

ϕ' : angolo di attrito efficace

E: modulo di deformabilità

ν : rapporto di Poisson

M: modulo edometrico

K: conducibilità idraulica



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Tabella 10.11 : parametri di progetto per le unità geotecniche U.G. GL ed U.G. EC.

Unità geotecnica	Descrizione	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	E [MPa]	ν [-]
GL	Depositi glaciali	20.0	30	0	30	0.4
EC	Coltri eluvio-colluviali	19.0	30	0	20	0.4

LEGENDA

γ : peso di volume naturale

ϕ' : angolo di attrito efficace

c' : coesione efficace

E: modulo di deformabilità

ν : rapporto di Poisson

10.3. Stato tensionale in sito

Lo stato tensionale della massa rocciosa è stato assunto di tipo idrostatico nelle parti più profonde della galleria, tenuto conto dell'assenza nell'area di riattivazioni recenti delle strutture geologiche e tettoniche individuate, che possano aver introdotto significative variazioni orientate nelle tensioni principali dell'ammasso.

Nelle zone a bassa copertura ed in prossimità degli imbocchi lo stato tensionale è stato invece posto di tipo gravitativo con $K_0=1-\sin\phi$.



11 ANALISI DEL PROFILO DI SCAVO IN RELAZIONE ALLA SITUAZIONE GEOSTRUTTURALE

Nel presente capitolo vengono analizzate l'orientazione e le caratteristiche geomeccaniche delle principali discontinuità individuate, al fine di fornire gli elementi necessari per una corretta valutazione delle più idonee metodologie di scavo funzionali al contenimento dei possibili sovraprofili di scavo entro i limiti stabiliti dal Capitolato Speciale di Appalto.

Le schematizzazioni forniscono informazioni puramente qualitative circa il possibile controllo delle discontinuità sulla sagomatura del profilo di scavo. Le valutazioni di previsione volumetrica dovranno essere sviluppate nella successiva fase progettuale in funzione dei mezzi d'opera e degli specifici schemi di tiro adottati per lo scavo.

L'analisi è stata articolata come segue:

- suddivisione del tracciato della galleria in tratte a direzione e assetto geostrutturale omogeneo;
- individuazione ed attribuzione a tali tratte dei relativi dati geomeccanici di riferimento;
- ricostruzione grafica dei differenti schemi di fratturazione dell'ammasso roccioso, specifici per le diverse tratte omogenee considerate;
- individuazione dei possibili effetti di controllo delle discontinuità sulla sagomatura del profilo di scavo.

11.1. Individuazione e caratterizzazione geomeccanica delle tratte omogenee

La prima fase ha permesso di suddividere la galleria Fondotoce, caratterizzata da un andamento planimetrico curvo, in una serie di tratte rettilinee di più agevole descrizione. Come precedentemente citato, nell'operare tale suddivisione sono state considerate sia l'andamento planimetrico della galleria, sia le diverse caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso ricavate dagli appositi rilievi geomeccanici eseguiti.

Tale processo ha permesso di individuare 11 differenti tratte omogenee, denominate rispettivamente T1÷T11, la cui distribuzione lungo il tracciato è schematizzata in Figura 11.1.

A partire dall'imbocco Mergozzo e fino a comprendere quasi tutta la prima metà della galleria, sono presenti le prime 6 tratte denominate T1÷T6, il cui stato di fratturazione dell'ammasso è stato descritto dal rilievo geomeccanico RG-4. Le successive tratte T7 e T8 interessano un ammasso roccioso i cui caratteri geomeccanici sono stati descritti dal rilievo RG-2; in seguito le tratte T9, T10 e T11, sebbene presentino un andamento della galleria circa rettilineo, sono state mantenute separate sulla base dei dati raccolti nei rispettivi rilievi RG-1, RG-6 ed RG-3.



11.2. Ricostruzione degli schemi di fratturazione

Dopo aver suddiviso il tracciato in 11 tratte omogenee, per ognuna di esse è stata preparata una sezione trasversale alla galleria, in cui schematicamente è stato riportato lo stato di fratturazione dell'ammasso. La ricostruzione di tali sezioni, basata sui dati raccolti dai rilievi geomeccanici, ha quindi permesso di sintetizzare le informazioni raccolte in superficie evidenziando lo stato di fratturazione atteso in corrispondenza del cavo della galleria.

Tale procedura è stata condotta considerando principalmente le superfici di discontinuità a direzione parallela o trasversale rispetto all'asse della galleria, in quanto esse esercitano la maggior influenza sulla forma del profilo di scavo. Sono state invece trascurate le famiglie con immersione circa parallela alla direzione di avanzamento della galleria, quindi parallele al fronte stesso, ed inclinazione subverticale, in quanto meno influenti nei confronti della sagomatura finale del cavo.

La preparazione degli schemi di fratturazione ha richiesto, per ogni singola tratta omogenea, i seguenti parametri giaciturali e geomeccanici:

- giacitura della galleria;
- giacitura e spaziatura delle discontinuità;
- distribuzione delle discontinuità in corrispondenza dell'ammasso roccioso su cui è stato eseguito il rilievo geomeccanico considerato.

In particolare è stato necessario correggere i valori di inclinazione e spaziatura delle diverse famiglie di discontinuità considerando i valori apparenti invece di quelli realmente misurati; tale operazione ha permesso di ottenere una situazione realistica delle condizioni del cavo, considerando quindi anche la differente orientazione delle sezioni schematiche rispetto alle famiglie di giunti.

La distribuzione delle discontinuità osservata in corrispondenza dell'ammasso roccioso su cui sono stati realizzati i rilievi geomeccanici, ha condizionato la disposizione delle tracce delle superfici di frattura in corrispondenza delle sezioni in quanto esse possono essere:

- presenti diffusamente entro l'ammasso roccioso, come nel caso della scistosità Sc;
- concentrate in fasce come nel caso delle famiglie ad importanza minore.

In ultimo si evidenzia che la persistenza delle discontinuità non è stata considerata direttamente durante la realizzazione delle sezioni in quanto di difficile rappresentazione grafica.

Per quanto riguarda la famiglia Sc ad essa è stata attribuita sistematicamente un'elevata persistenza in quanto si tratta di una famiglia di superfici primarie molto diffuse nell'ammasso.

11.3. Influenza delle discontinuità sul profilo di scavo

L'influenza delle discontinuità sul profilo di scavo è stata valutata considerando i valori medi di inclinazione, spaziatura, persistenza e rugosità delle superfici di frattura. In seguito verranno descritte



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

singolarmente le diverse sezioni, indicando gli effetti sul profilo di scavo ipotizzabili con i dati attualmente in possesso. Negli schemi seguenti le tratte del profilo di scavo influenzabili dall'assetto geostrutturale sono state indicate in grigio scuro.

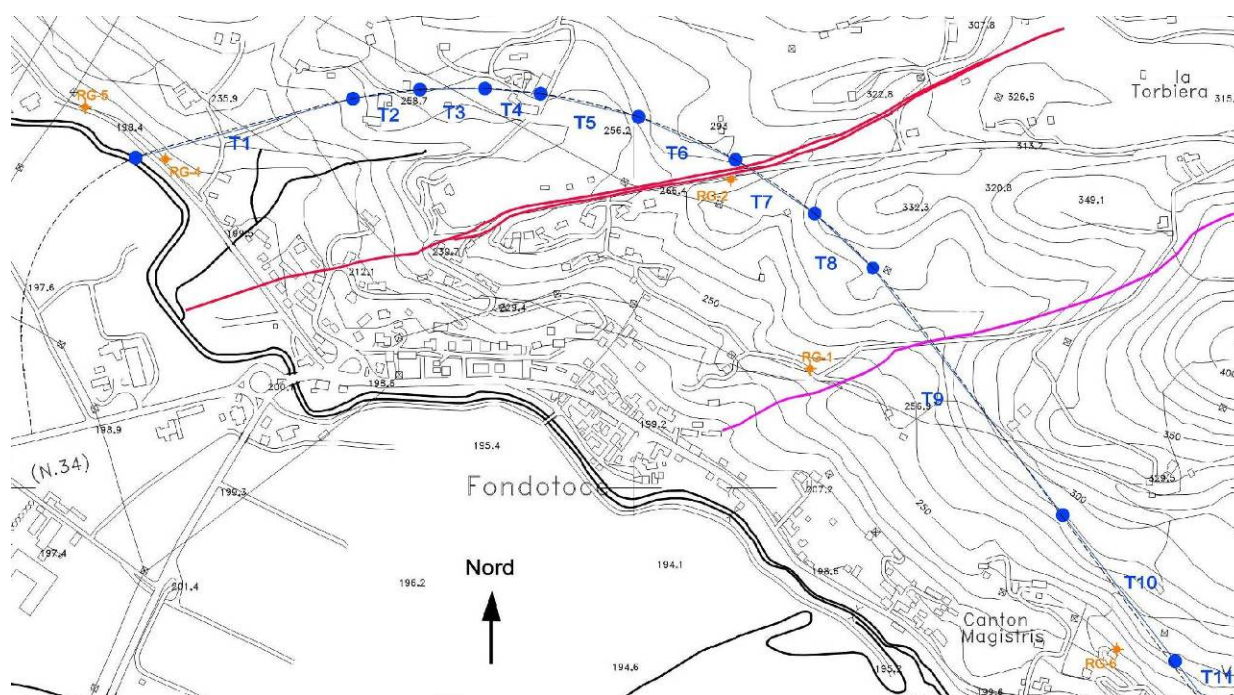


Figura 11.1: Schema non in scala della distribuzione delle tratte T1-T11 lungo il tracciato del Lotto I. In rosso è stata evidenziata la faglia fragile-duttile, in viola la zona di taglio, in blu le tratte schematizzate e in arancio la posizione dei rilievi geomeccanici eseguiti.

Tabella 11.1 :Tabella riassuntiva delle diverse tratte schematizzate.

Tratta	Progressiva inizio (m)	Progressiva fine (m)	Lunghezza tratta tracciato (m)
T1	0+000	0+517	360
T2	0+517	0+877	108
T3	0+877	0+981	104
T4	0+981	1+070	89
T5	1+070	1+231	161
T6	1+231	1+401	170
T7	1+401	1+554	153
T8	1+554	1+681	127
T9	1+681	2+177	496
T10	2+177	2+470	293
T11	2+470	2+575	105



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

11.3.1. Tratte T1÷T6

Le tratte T1÷T6, differiscono singolarmente in virtù della diversa orientazione del tracciato in quanto, sebbene la direzione di avanzamento sia la medesima (dall'imbocco lato Mergozzo), la direzione della galleria varia passando da circa N165°E, a Est-Ovest, fino a circa N204°E. Per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso sono stati utilizzati i dati del rilievo RG-4.

In tutte le tratte considerate l'ammasso è principalmente condizionato dalla presenza della scistosità principale Sc, che costituisce una famiglia di superfici diffusa omogeneamente all'interno dei micascisti, mentre le restanti famiglie (J1, J2, J3 e J4) sono caratterizzate da importanza minore e distribuzione irregolare.

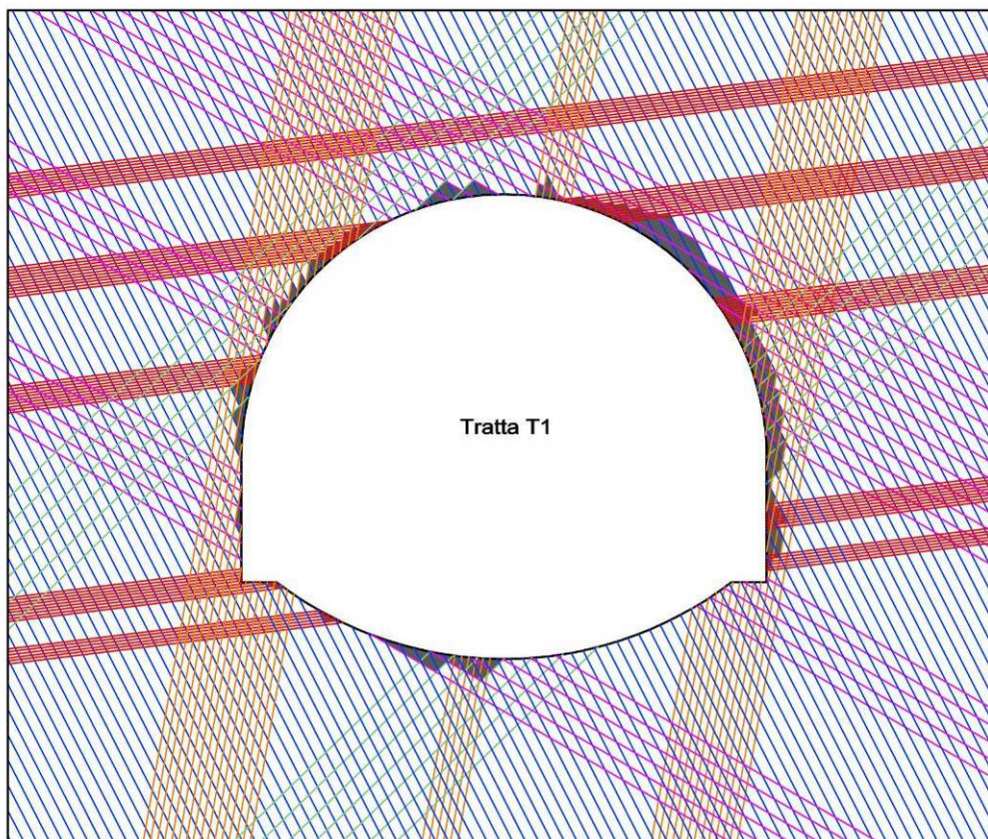
Analizzando le sezioni prodotte si può notare che in corrispondenza del rene destro e di parte del corrispondente piedritto, il profilo di scavo potrà essere influenzato principalmente dalla giacitura della scistosità Sc, intersecata localmente dagli altri sistemi di frattura individuati. In particolare l'intersezione tra le famiglie Sc - J1 - J2 influenza il rene destro e parte della calotta, mentre l'intersezione tra la Sc e la J3 condiziona il piedritto destro. Nel restante perimetro di scavo le intersezioni possibili tra la scistosità Sc e le altre famiglie presenti possono localmente condizionare lo scavo in prossimità della calotta, del rene sinistro e di entrambi i piedritti. In questo caso tuttavia l'influenza è mediamente più contenuta, in quanto si tratta di sistemi caratterizzati da diffusione e importanza minore rispetto alla scistosità Sc.

La presenza in calotta o poco sopra la calotta, di superfici suborizzontali appartenenti alla famiglia J1 e marginalmente alla J2 costituisce una condizione giacitoriale sfavorevole per il profilo di scavo della galleria. Il caso è stato schematizzato nelle sezioni T3 e T6, nelle quali si può notare che tali superfici possono indurre una diversa sagomatura della calotta (vedi Figura 11.4 e Figura 11.7).



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T1
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-4_Tot
Direzione di avanzamento	ENE
Orientazione asse galleria (°)	N165E

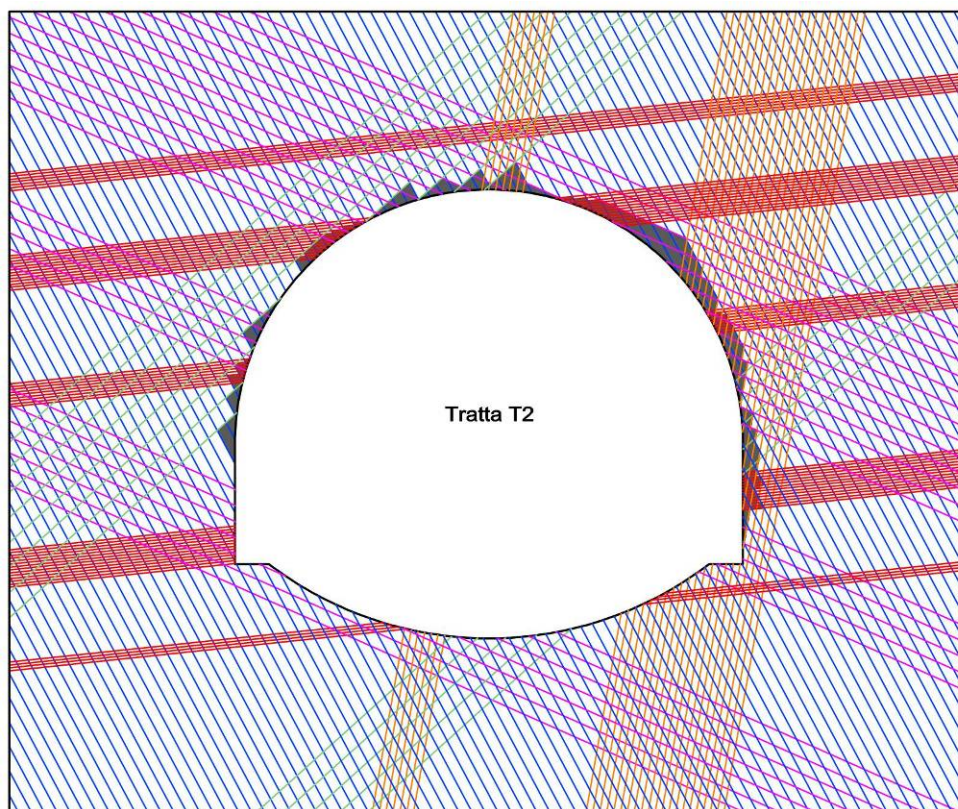
Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	148/64	0,3	1,7	12
—	J1	305/9	0,08	0,45	10
—	J2	106/48	0,3	1,6	14
—	J3	9/81	0,18	1,5	16
—	J4	329/45	0,5	1,9	2

Figura 11.2: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T1.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T2
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-4_Tot
Direzione di avanzamento	ENE
Orientazione asse galleria (°)	N172E

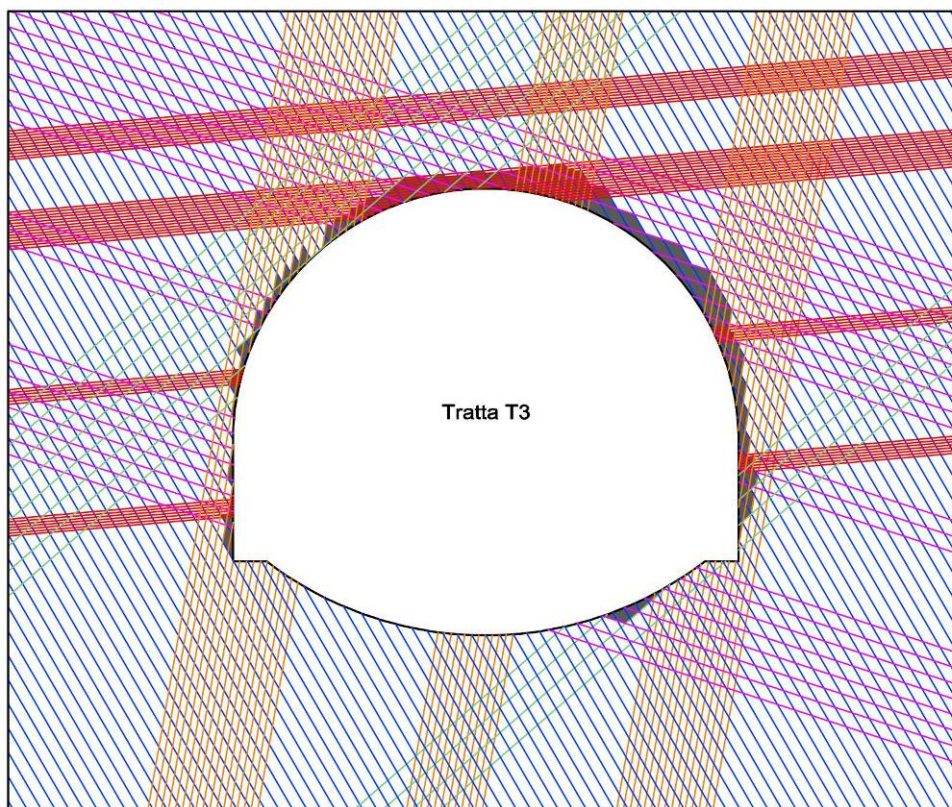
Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	148/64	0,3	1,7	12
—	J1	305/9	0,08	0,45	10
—	J2	106/48	0,3	1,6	14
—	J3	9/81	0,18	1,5	16
—	J4	329/45	0,5	1,9	2

Figura 11.3: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T2.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T3
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-4_Tot
Direzione di avanzamento	E
Orientazione asse galleria (°)	N179E

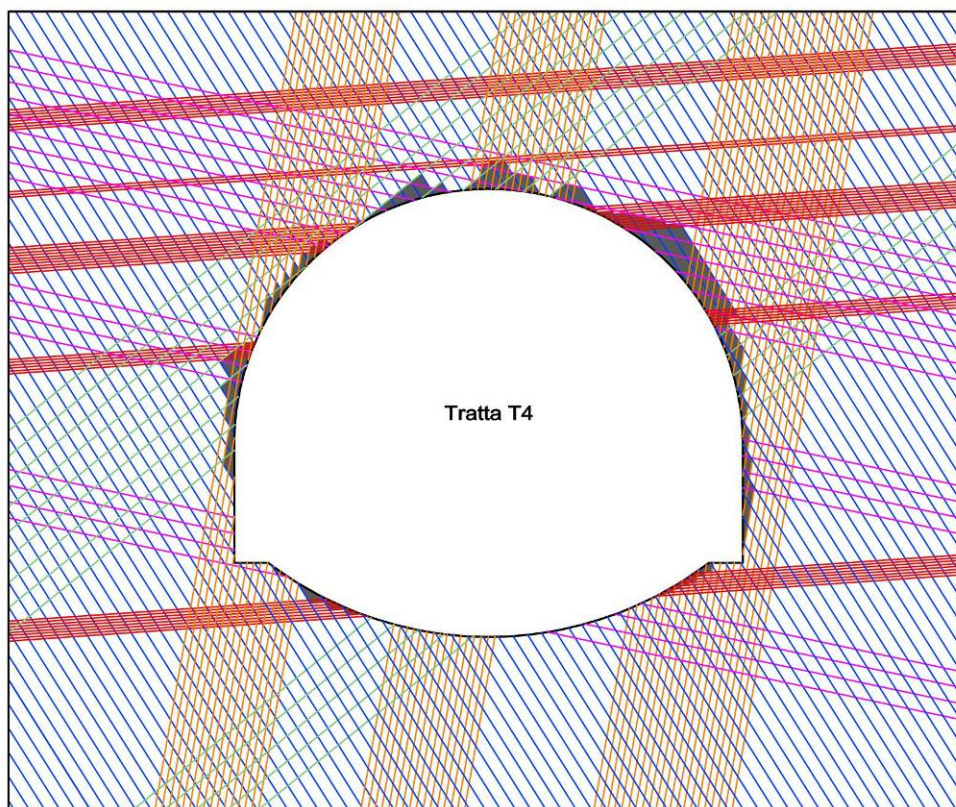
Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	148/64	0,3	1,7	12
—	J1	305/9	0,08	0,45	10
—	J2	106/48	0,3	1,6	14
—	J3	9/81	0,18	1,5	16
—	J4	329/45	0,5	1,9	2

Figura 11.4: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T3.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T4
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-4_Tot
Direzione di avanzamento	ESE
Orientazione asse galleria (°)	N185E

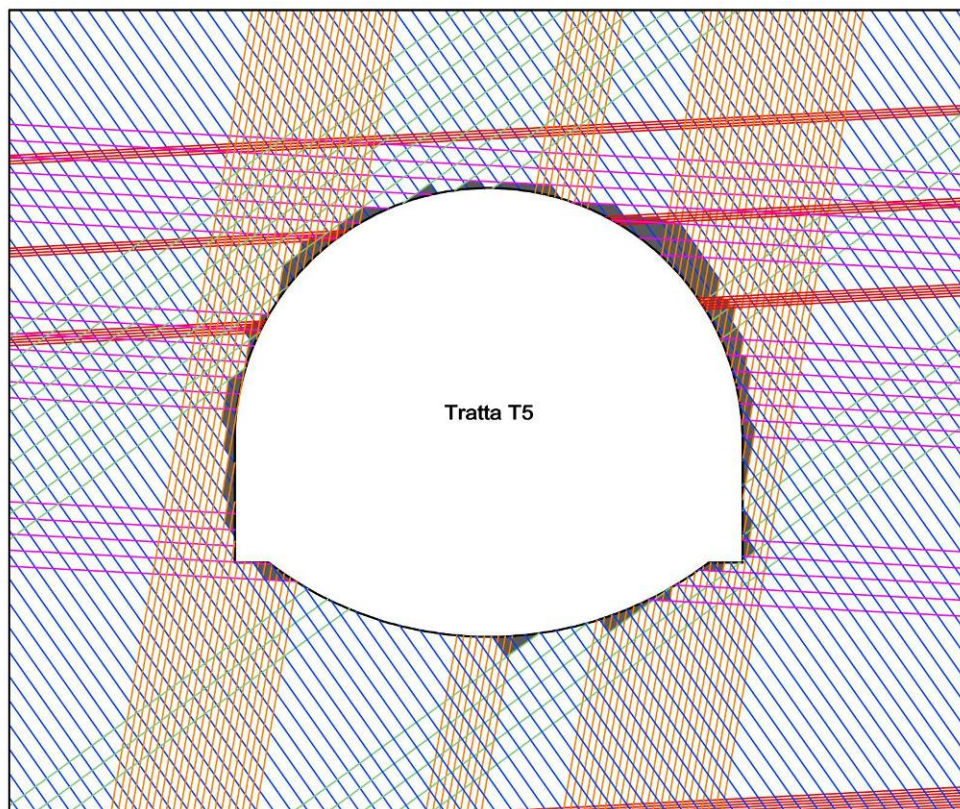
Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	148/64	0,3	1,7	12
—	J1	305/9	0,08	0,45	10
—	J2	106/48	0,3	1,6	14
—	J3	9/81	0,18	1,5	16
—	J4	329/45	0,5	1,9	2

Figura 11.5: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T4.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T5
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-4_Tot
Direzione di avanzamento	ESE
Orientazione asse galleria (°)	N193E

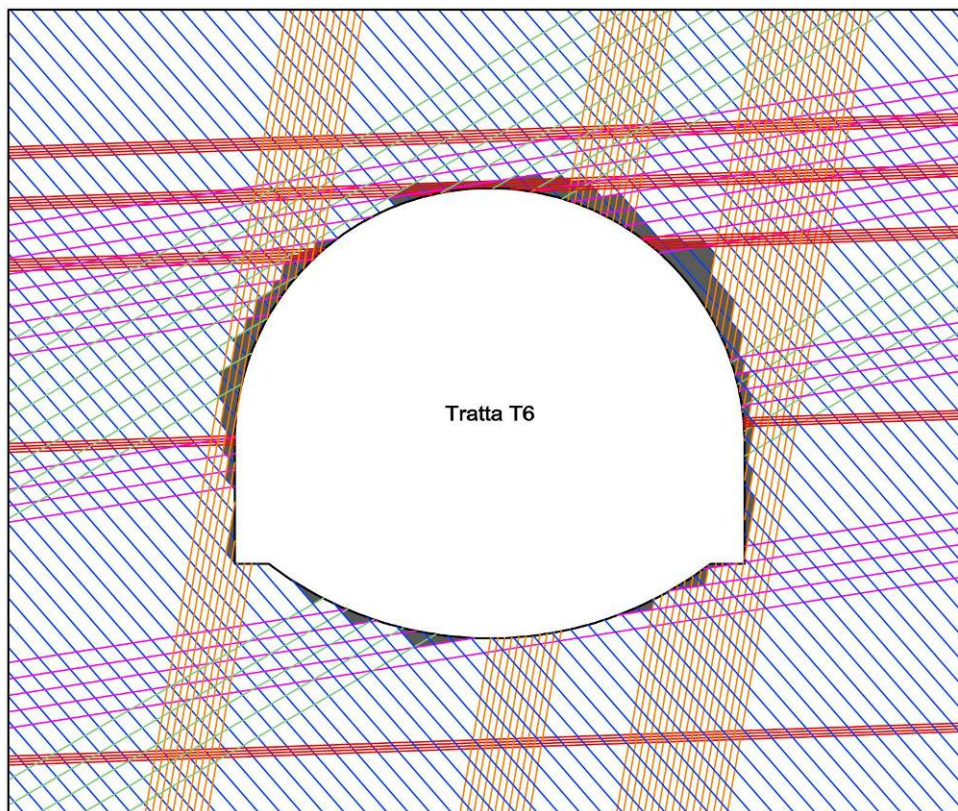
Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	148/64	0,3	1,7	12
—	J1	305/9	0,08	0,45	10
—	J2	106/48	0,3	1,6	14
—	J3	9/81	0,18	1,5	16
—	J4	329/45	0,5	1,9	2

Figura 11.6: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T5.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T6
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-4_Tot
Direzione di avanzamento	ESE
Orientazione asse galleria (°)	N204E

Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	148/64	0,3	1,7	12
—	J1	305/9	0,08	0,45	10
—	J2	106/48	0,3	1,6	14
—	J3	9/81	0,18	1,5	16
—	J4	329/45	0,5	1,9	2

Figura 11.7: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T6.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

11.3.2. Tratte T7 e T8

La tratte in esame sono caratterizzate dal medesimo stato di fratturazione dell'ammasso, descritto dal rilievo RG-2, e dalla differente direzione di avanzamento dello scavo orientata a partire dall'imbocco Mergozzo per la tratta T7 (direzione tratta N214°E), a partire dall'imbocco lato Verbania per la tratta T8 (direzione tratta N43°W).

Anche in questo caso il sistema di discontinuità principale è rappresentato dalla scistosità Sc, tuttavia il rilievo RG-2 ha evidenziato che la famiglia J3 è caratterizzata da maggiore importanza rispetto alle famiglie J5 e JR1.

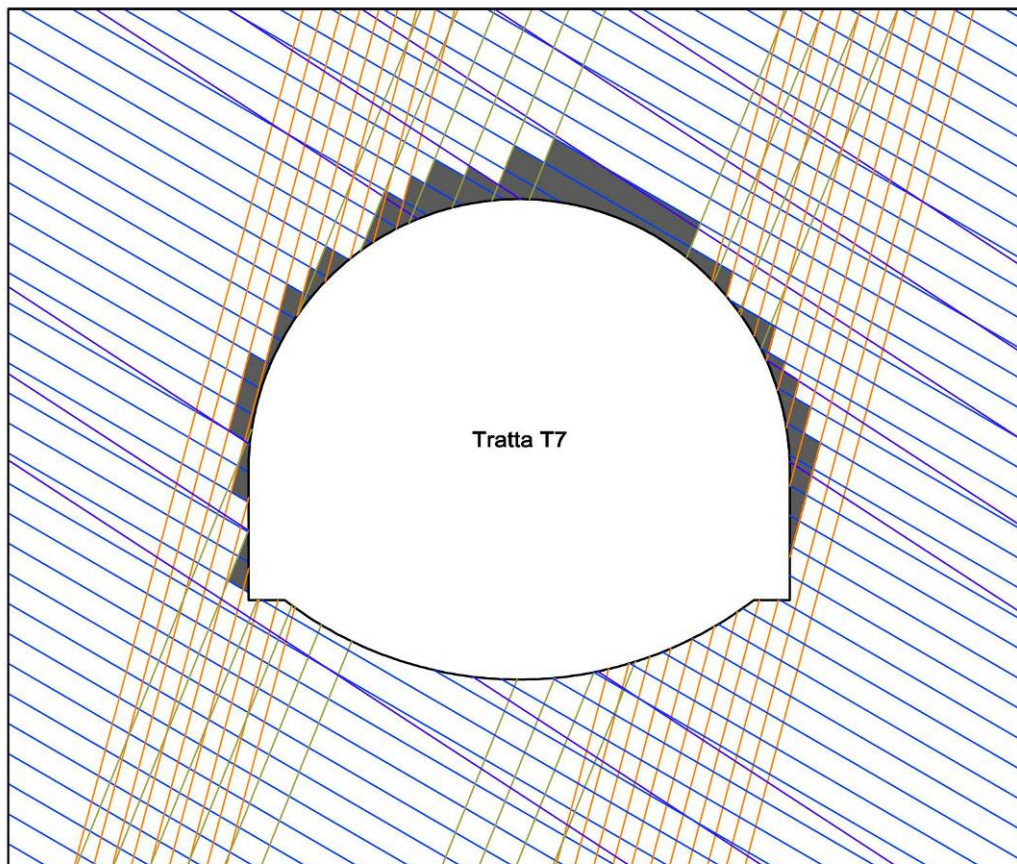
In virtù delle diverse orientazioni di avanzamento assunte nelle due tratte considerate, le influenze del profilo di scavo apportate dalle discontinuità si verificano in posizioni speculari tra la sezione T7 e la T8. Le interferenze più importanti sono prodotte in prossimità della semicalotta destra per la T7 e sinistra per la tratta T9, in quanto l'intersezione tra le superfici Sc-JR1 e quelle della famiglia J5 è particolarmente sfavorevole.

Nelle restanti parti della calotta l'intersezione tra le medesime discontinuità sopracitate può influenzare la forma finale del profilo di scavo, mentre in corrispondenza dei reni e dei piedritti le superfici di discontinuità J3 e in minor parte J5 possono favorire la formazione di irregolarità del profilo di scavo di entità minore.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T7
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-2
Direzione di avanzamento	ESE
Orientazione asse galleria (°)	N214E

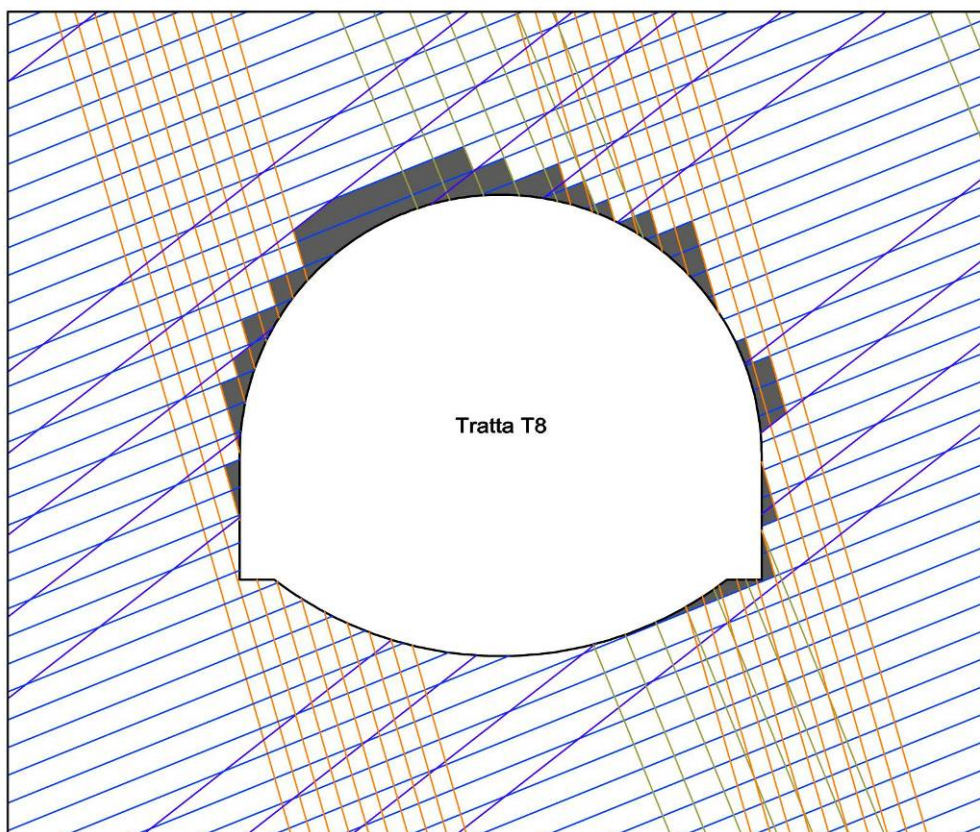
Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	153/50	0,5	1,2	10
—	J3	14/76	0,45	3,5	12
—	J5	37/68	0,9	2,5	18
—	JR1	267/47	1,5	2,2	12

Figura 11.8: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T7.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T8
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-2
Direzione di avanzamento	NW
Orientazione asse galleria (°)	N43W

Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	153/50	0,5	1,2	10
—	J3	14/76	0,45	3,5	12
—	J5	37/68	0,9	2,5	18
—	JR1	267/47	1,5	2,2	12

Figura 11.9: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T8.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

11.3.3. Tratta T9

La tratta T9 è molto estesa, presenta direzione della galleria circa N52°W, avanzamento di scavo a partire dall'imbocco lato Verbania e utilizza i dati del rilievo RG-1.

Il principale sistema di discontinuità è rappresentato dalle superfici di scistosità Sc, che costituisce la famiglia maggiormente diffusa entro l'ammasso roccioso, mentre le famiglie J1, J4 e J6 assumono importanza minore e sono caratterizzate da una distribuzione irregolare.

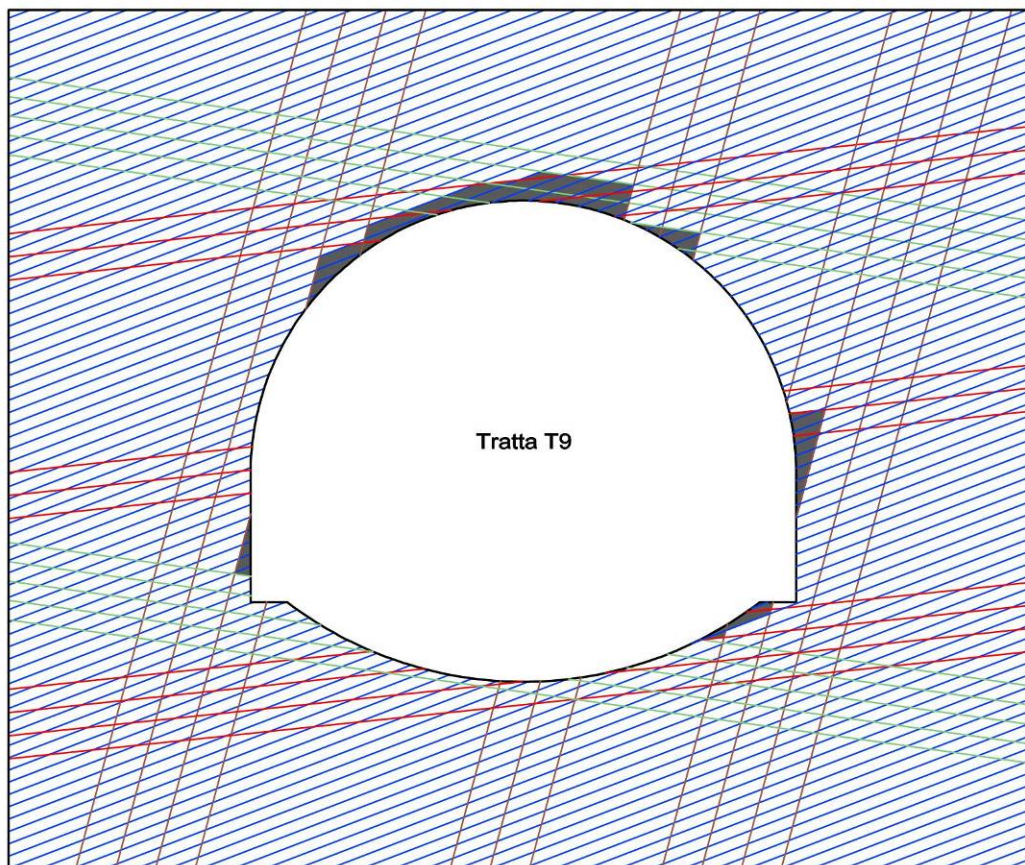
Nella presente sezione le maggiori interferenze sono localizzate in calotta, in tale settore infatti l'intersezione tra la scistosità Sc e le famiglie J1 e J4 è particolarmente sfavorevole.

In corrispondenza dei piedritti la presenza di intersezioni tra il sistema J6 e le altre superfici presenti, può favorire locali irregolarità del cavo.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T9
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-1
Direzione di avanzamento	NW
Orientazione asse galleria (°)	N52W

Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	150/70	0,1	3,5	12
—	J1	291/12	0,6	5	12
—	J4	332/40	0,38	4,5	16
—	J6	261/77	0,9	1	12

Figura 11.10: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T9.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

11.3.4. Tratta T10

La tratta T10 è caratterizzata da direzione N52°W e avanzamento a partire dall'imbocco lato Verbania. La sezione schematica è stata ricostruita a partire dai dati raccolti nel rilievo RG-6.

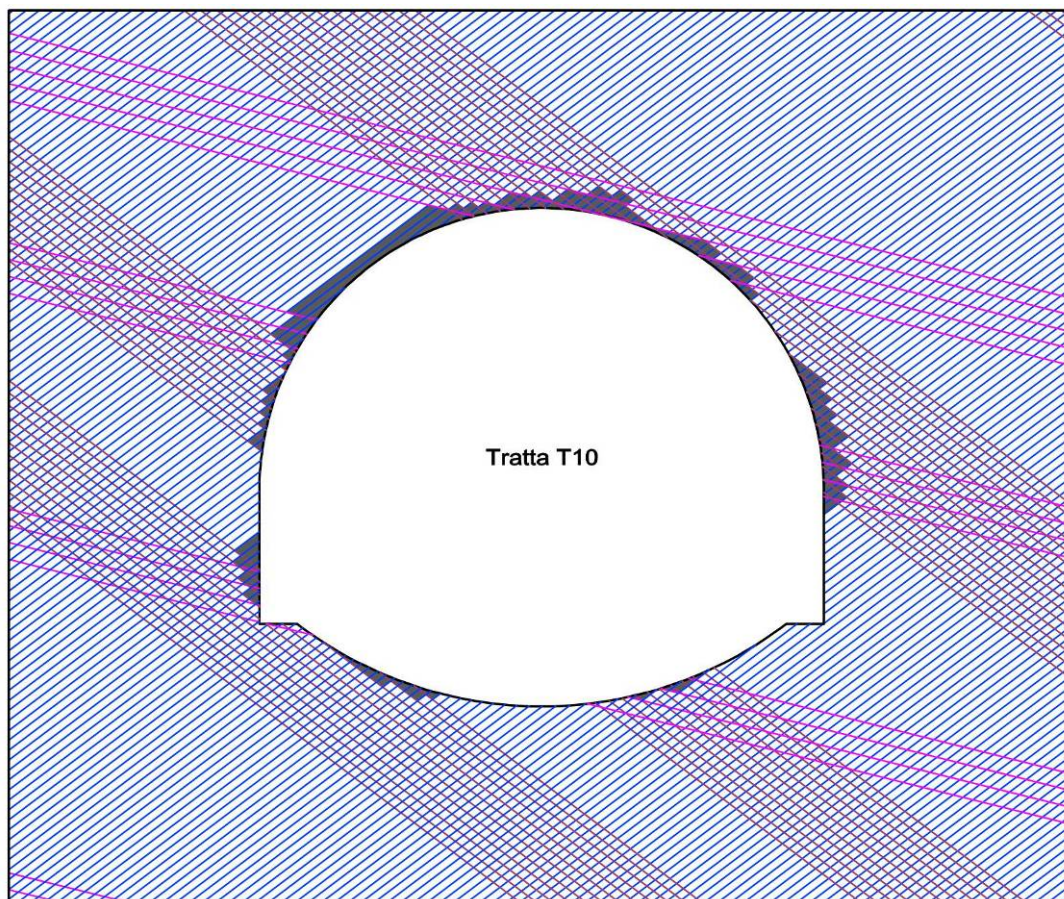
Il principale sistema di discontinuità dell'ammasso è rappresentato dalle superfici di scistosità Sc, mentre le famiglie J2 e J8 assumono importanza minore e sono caratterizzate da una distribuzione più irregolare.

In questo caso le maggiori interferenze tra il profilo di scavo e le superfici di discontinuità sono localizzate in corrispondenza della calotta e del rene sinistro, in quanto in tali settori l'intersezione tra i tre sistemi o la sola presenza della Sc può interferire con lo scavo. Nel restante perimetro del cavo, in presenza di sfavorevoli intersezioni tra le superfici appartenenti alle tre famiglie descritte, è possibile che si sviluppino ulteriori irregolarità del profilo localizzate prevalentemente su entrambi i piedritti.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T10
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-6
Direzione di avanzamento	NW
Orientazione asse galleria (°)	N52W

Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	196/43	0,06	10	10
—	J2	99/20	0,4	5	12
—	J8	33/39	0,25	0,4	2

Figura 11.11: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T10.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

11.3.5. Tratta T11

La tratta T11 è caratterizzata da direzione di scavo N52°W ed avanzamento di scavo a partire dall'imbocco lato Verbania. La sezione schematica è stata ricostruita a partire dai dati raccolti nel rilievo RG-3.

Il principale sistema di discontinuità dell'ammasso è rappresentato dalle superfici di scistosità Sc, mentre le famiglie J4 e J5 assumono importanza minore e sono caratterizzate da una distribuzione più irregolare.

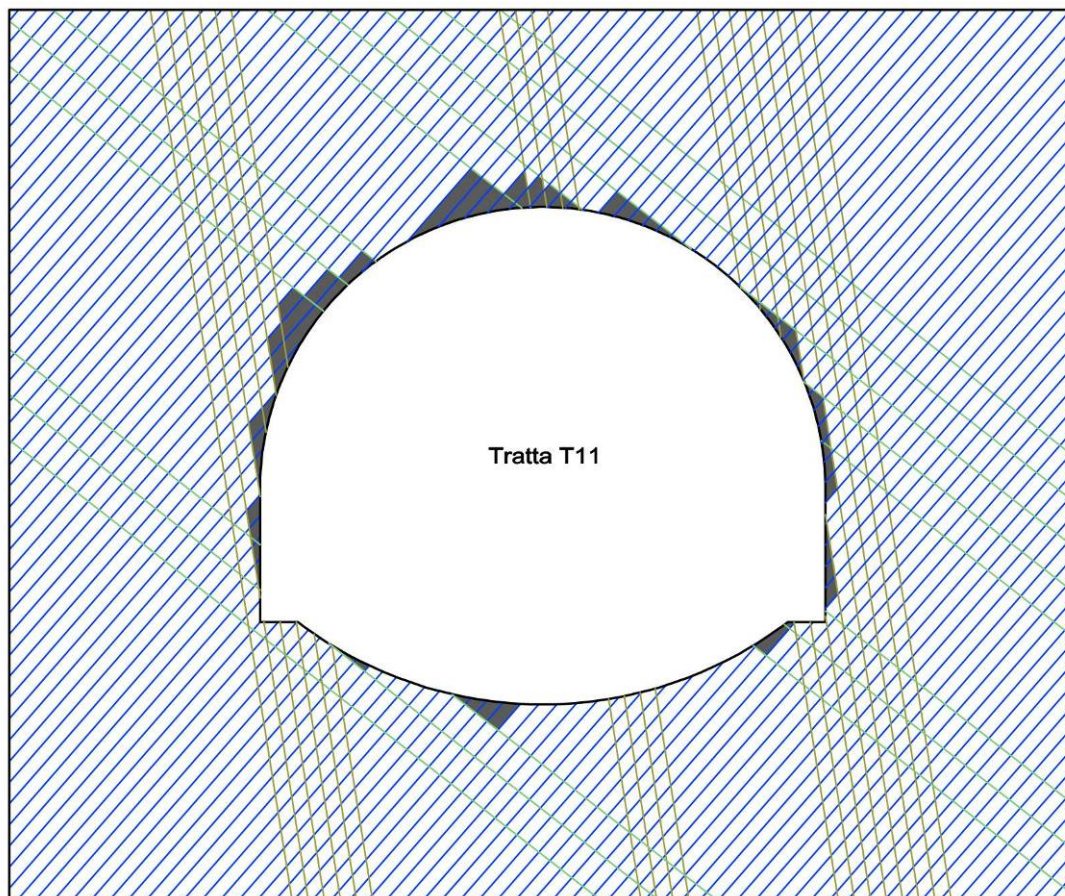
Analizzando la localizzazione delle interferenze tra le discontinuità e il profilo di scavo si osserva che in questo caso i punti più critici sono due e sono localizzati rispettivamente in calotta e in corrispondenza del rene sinistro. In entrambi i casi essi coinvolgono tutti e tre i sistemi di discontinuità considerati.

Nel restante perimetro di scavo è possibile che in corrispondenza dei piedritti si possano verificare locali irregolarità del profilo di importanza minore in presenza di sfavorevoli intersezioni tra le diverse famiglie descritte.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15



Nome tratta schematizzata	T11
Rilievo Geomeccanico di riferimento	RG-3
Direzione di avanzamento	NW
Orientazione asse galleria (°)	N52W

Simbolo famiglia	Famiglia	Giacitura media (°/°)	Spaziatura media (m)	Persistenza media (m)	Rugosità media (JRC)
—	Sc	180/62	0,25	2,2	12
—	J4	351/58	0,6	17	4
—	J5	43/81	0,4	1,4	12

Figura 11.12: Schema di fratturazione corrispondente alla tratta T11.



12 VALUTAZIONE PARAMETRICA DELLA CAPACITÀ PORTANTE DEI PALI DI FONDAZIONE

12.1. Capacità portante verticale pali di fondazione

Si fornisce di seguito una valutazione parametrica della capacità portante dei pali di fondazione nell'ipotesi di realizzazione di fondazioni profonde all'interno delle Unità Geotecniche SC2 e FL in corrispondenza del viadotto all'imbocco Mergozzo. Nelle analisi di capacità portante si è fatto riferimento a pali di grande diametro da 1200mm e 1500mm.

E' stata valutata la capacità portante del singolo palo Q_{lim} , definita come:

$$Q_{lim} = Q_B + Q_L$$

dove:

Q_B indica la portata limite alla base del palo

Q_L indica la portata limite per attrito laterale che si sviluppa all'interfaccia palo-terreno.

Le componenti di portata alla base Q_B e Q_L vengono generalmente supposte tra loro indipendenti, dal momento che la loro mobilitazione richiede cedimenti relativi del palo di entità notevolmente diversa tra loro. Esse sono calcolate in termini di tensioni efficaci facendo riferimento alle condizioni drenate.

La portata di base di un palo in un terreno viene stimata come segue:

$$Q_B = (N_q * \sigma'_{v0}) * A_B$$

dove:

N_q è il coefficiente di capacità portante che è funzione dell'angolo di resistenza al taglio (Viggiani, 1999);

σ'_{v0} è la tensione geostatica verticale efficace nel terreno alla profondità corrispondente alla base del palo;

A_B è l'area di base del palo.

La portata per attrito laterale di un palo in termini di tensioni efficaci è definita come:

$$Q_L = k * \sigma'_{v0} * \tan \delta * A_L$$

dove:

δ è l'angolo di attrito all'interfaccia palo-terreno; esso è assunto pari a $0.8 * \varphi$;

k è il coefficiente di spinta laterale che si assume pari al coefficiente di spinta a riposo del terreno in cui è immerso il palo;

A_L è l'area laterale del palo.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

Gli approcci alternativi di calcolo richiesti dalla vigente normativa (DM Infrastrutture 14 Gennaio 2008) sono:

Approccio 1 - Combinazione 1: A1+M1+R1

Approccio 1 - Combinazione 2: A2+M1+R2

Approccio 2: A1+M1+R3

In cui A1 e A2 sono i coefficienti parziali per le azioni riportati nella tabella 6.2.I; M1 sono i coefficienti parziali per i parametri geotecnici riportati nella tabella 6.2.II; R1, R2 ed R3 sono i coefficienti parziali da applicare alle resistenze caratteristiche (resistenza di base e laterale) riportati nella tabella 6.4.II. Per il calcolo della resistenza si applica inoltre il fattore di correlazione ξ riportato nella tabella 6.4.IV ($\xi=1.7$). Le verifiche di capacità portante sono svolte in riferimento ai coefficienti parziali della Combinazione 2 dell'Approccio 1 e dell'Approccio 2.

La portata totale è così calcolata:

$$Q_{tot} = \frac{\frac{Q_L}{\gamma_{s,R2}} + \frac{Q_B}{\gamma_{b,R2}}}{\xi} = \frac{\frac{Q_L}{1.45} + \frac{Q_B}{1.7}}{1.7} \quad \text{Approccio 1 - Combinazione 2: A2+M1+R2}$$

$$Q_{tot} = \frac{\frac{Q_L}{\gamma_{s,R3}} + \frac{Q_B}{\gamma_{b,R3}}}{\xi} = \frac{\frac{Q_L}{1.15} + \frac{Q_B}{1.35}}{1.7} \quad \text{Approccio 2 - A1+M1+R3}$$

Le due stratigrafie, per le quali si riportano i grafici che definiscono le capacità portanti dei pali in funzione della loro lunghezza, prevedono: per la prima un unico strato appartenente all'unità geotecnica FL; per la seconda uno strato avente potenza 18m appartenente all'unità geotecnica FL e un substrato appartenente all'unità geotecnica SC2. Entrambe le stratigrafie prevedono la quota della falda a -2.5m dal p.c.

Si riporta, di seguito, il grafico che definisce la capacità portante dei pali in funzione della lunghezza dei pali.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

CAPACITÀ PORTANTE PALI DI FONDAZIONE STRATIGRAFIA 1 [kN]

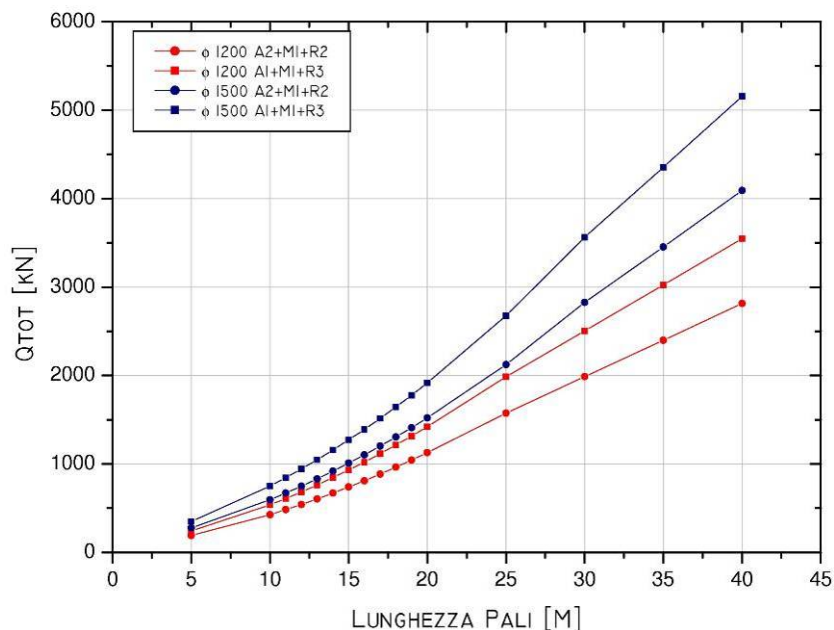


Figura 12.1 : capacità portante stratigrafia 1 (unico strato – unità geotecnica FL, falda -2.5m da p.c.).

CAPACITÀ PORTANTE PALI DI FONDAZIONE STRATIGRAFIA 2 [kN]

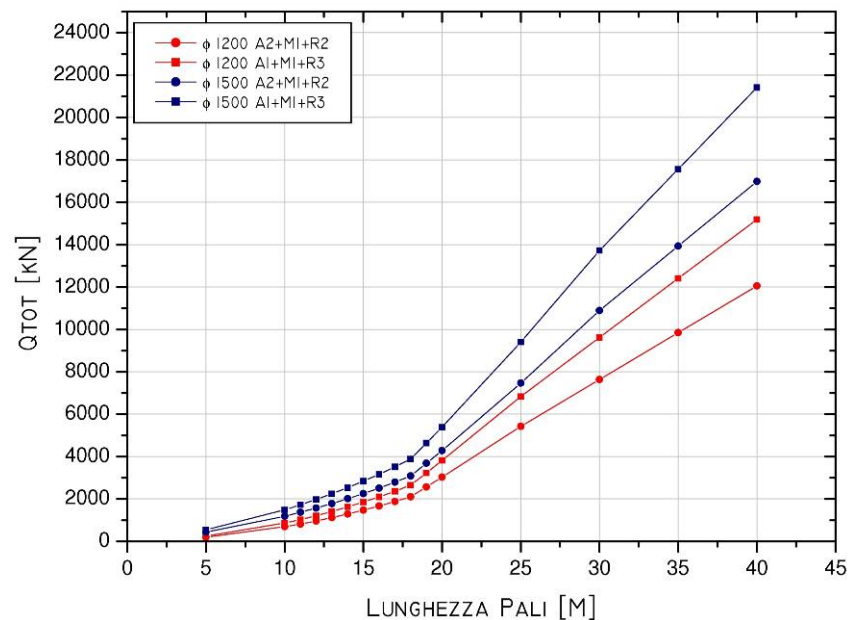


Figura 12.2 : capacità portante stratigrafia 2 (strato superiore – unità geotecnica FL, substrato a -18m da p.c. – unità geotecnica SC2, falda -2.5m da p.c.).



12.2. Resistenza laterale teorica pali di fondazione

Si fornisce di seguito una valutazione parametrica della resistenza laterale teorica dei pali di fondazione nell'ipotesi di realizzazione di fondazioni profonde all'interno delle Unità Geotecniche SC2 e FL in corrispondenza del viadotto all'imbocco Mergozzo. Nelle analisi di resistenza laterale si è fatto riferimento a pali di grande diametro da 1200mm e 1500mm.

I possibili modi di rottura e le distribuzioni della resistenza del terreno e dei momenti flettenti agenti sono funzione della lunghezza del palo. Si considerano in questo caso solo le resistenze dei pali lunghi. Il valore della resistenza laterale geotecnica H_u (Poulos, 1980) è espresso dalla seguente equazione che tiene conto delle caratteristiche geomeccaniche del terreno:

$$H_u = \frac{0.5 \cdot \gamma' \cdot d \cdot L^3 \cdot K_p}{e + L}$$

dove:

γ' è il peso di volume del materiale;

d è il diametro del palo;

L è la lunghezza del palo;

$K_p = (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi')$;

e è l'eccentricità del carico H orizzontale al di sopra della testa del palo (assunta pari a 0 poiché la testa del palo è immersa nel plinto).

Le condizioni stratigrafiche prevedono un unico strato appartenente all'unità geotecnica FL e la falda posizionata a -2.5m dal p.c..

La stima della resistenza laterale geotecnica è accompagnata nel grafico seguente dalla valutazione degli spostamenti orizzontali in testa al palo in funzione del solo carico orizzontale H applicato. Tali spostamenti sono valutati a partire dalla seguente espressione:

$$u = F \left[0.27 H \left(\frac{l_c}{2} \right)^{-1} \right]$$

dove:

$F = \{E_{palo} / [G(1+0.75v)]\}^{1/7} / [G(1+0.75v)]$ dove G è il modulo di taglio del terreno;

l_c è la lunghezza critica pari a $D \{E_{palo} / [G(1+0.75v)]\}^{2/7}$ dove D è il diametro del palo.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

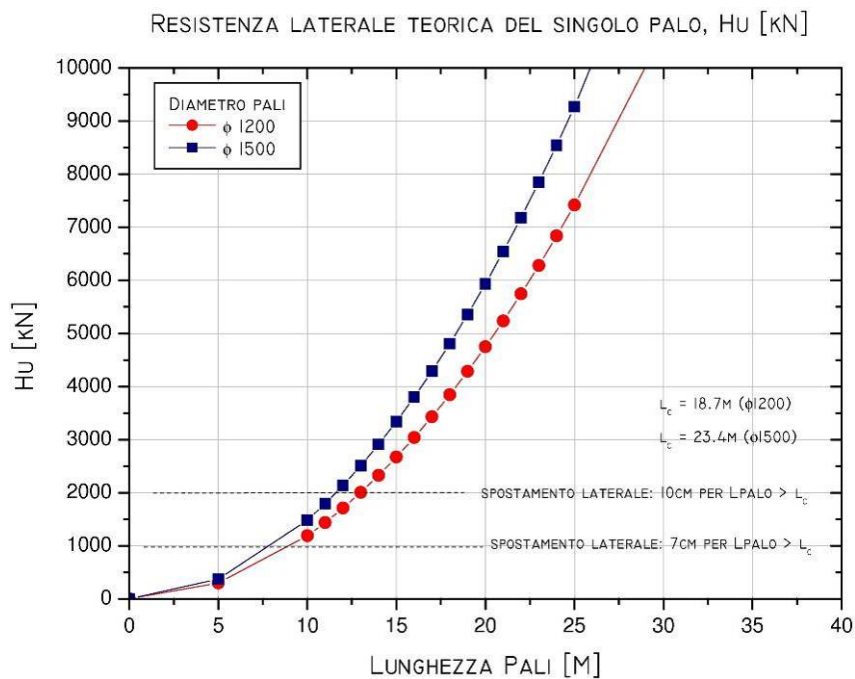


Figura 12.3 : resistenza laterale teorica del singolo palo (stratigrafia con unico strato – unità geotecnica FL, falda -2.5m da p.c.).



13 RILEVATO STRADALE – VERIFICHE GEOTECNICHE

Si riportano di seguito le verifiche relative alla valutazione dei cedimenti del rilevato presente tra le pk 0+000 e pk 0+450.

La valutazione dei cedimenti è effettuata per le differenti altezze e larghezze del rilevato e comprende il dimensionamento degli eventuali interventi atti a limitare gli stessi dove necessario.

13.1. Metodo di calcolo

Il metodo di calcolo impiegato è sviluppato tramite il codice commerciale Settle3D v.1.013, programma tridimensionale per le analisi di consolidazione e cedimento sotto fondazioni, rilevati e scavi superficiali prodotto dalla Rocscience di Toronto (Canada).

13.2. Modello di calcolo

Il modello di calcolo è realizzato in steps temporali successivi che simulano dapprima la costruzione del rilevato e in seguito sono utili a valutare l'andamento dei cedimenti di consolidazione e la dissipazione delle sovrappressioni al di sotto del rilevato nel tempo. Il modello tiene conto della falda, posta a -2.5m dal p.c.. e si è considerata una conducibilità idraulica media k_m pari a 1×10^{-8} m/s per tenere conto dell'alternanza tra strati sabbiosi e limosi-argillosi.

13.3. Simulazione delle fasi esecutive

Il modello è costituito da 13 fasi progressive che comprendono la costruzione del rilevato e la valutazione nel tempo dei cedimenti di consolidazione:

- Fase 1 condizione esistente
- Fase 2 costruzione primo strato rilevato (1 giorno)
- Fase 3 costruzione strato intermedio rilevato (2 giorni)
- Fase 4 costruzione strato di completamento del rilevato (3 giorni)
- Fase 5 condizione a 30gg
- Fase 6 condizione a 60gg
- Fase 7 condizione a 100gg
- Fase 8 condizione a 200gg
- Fase 9 condizione a 1 anno
- Fase 10 condizione a 3 anni



- Fase 11 condizione a 5 anni
- Fase 12 condizione a 10 anni
- Fase 13 condizione a 20 anni

13.4. Modelli di calcolo

I modelli di calcolo analizzati si riferiscono ad altezze H e larghezze L differenti del rilevato e sono stati analizzati i cedimenti al di sotto del rilevato con seguenti caratteristiche geometriche:

- $H = 2\text{m}$, $L = 20\text{m}$;
- $H = 4\text{m}$, $L = 24.2\text{m}$;
- $H = 5\text{m}$, $L = 28.6\text{m}$;
- $H = 6\text{m}$, $L = 37\text{m}$;
- $H = 7\text{m}$, $L = 41\text{m}$;
- $H = 8.41\text{m}$, $L = 44.81\text{m}$;

Di seguito il modello di calcolo adottato per la sezione di rilevato avente altezza H massima.

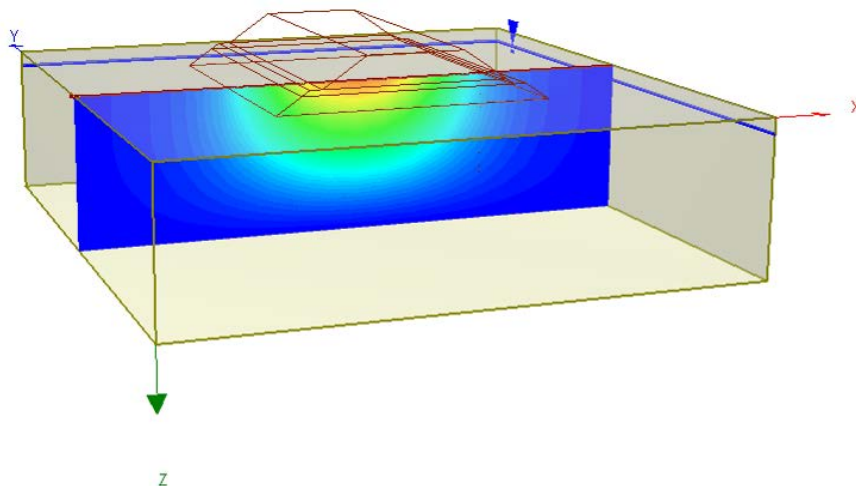


Figura 13.1: modello di calcolo adottato per il rilevato avente $H = 8.41\text{m}$ e $L = 44.81\text{m}$.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

13.5. Risultati delle analisi in termini di cedimenti

Di seguito si riportano i cedimenti ottenuti dalle analisi per i modelli descritti nel paragrafo precedente.

Tabella 13.1: valori dei cedimenti immediati, di consolidazione e totali e loro andamento nel tempo.

H rilevato [m]	S _i [cm]	S _c [cm]	S _{tot} [cm]	1 _{gg}	2 _{gg}	3 _{gg}	30 _{gg}	60 _{gg}	100 _{gg}	200 _{gg}	1 _{anno}	3 _{anni}	5 _{anni}	10 _{anni}
2	26.07	27.46	53.53	29%	57%	58%	64%	67%	69%	74%	78%	89%	95%	100%
4	53.28	56.11	109.39	30%	57%	58%	64%	66%	69%	74%	78%	89%	95%	100%
5	70.26	73.99	144.25	20%	39%	57%	63%	66%	68%	73%	77%	89%	95%	100%
6	92.22	97.12	189.34	19%	38%	56%	62%	65%	67%	72%	76%	88%	94%	100%
7	109.86	115.69	225.55	19%	38%	56%	62%	64%	67%	71%	76%	88%	94%	100%
8.41	129.44	136.32	265.76	19%	26%	56%	62%	64%	67%	71%	76%	88%	94%	100%

13.6. Valutazione dei risultati delle analisi e definizione degli interventi necessari a ridurre i cedimenti

I risultati delle analisi illustrate nella precedente tabella mostrano cedimenti immediati elevati e decorso nel tempo prolungato, situazione non compatibile con i tempi di costruzione e utilizzo dell'opera. Risulta quindi necessario realizzare degli interventi atti a ridurre i cedimenti immediati e abbreviare i tempi di sviluppo dei cedimenti di consolidazione.

Si prevedono quindi due tipologie di intervento:

- installazione di drenaggi verticali;
- consolidazione del terreno tramite deep mixing;

dove la prima tipologia di intervento ha l'obiettivo di ridurre i tempi di sviluppo dei cedimenti di consolidazione, mentre la seconda tipologia permette di limitare fortemente i cedimenti immediati. Nei due paragrafi successivi si analizzerà nel dettaglio il dimensionamento dei suddetti interventi.

13.7. Dimensionamento dei dreni verticali

Si prevede di adottare un intervento con dreni verticali lungo tutto il tracciato del rilevato al fine di rendere la consolidazione più rapida nel tempo. I dreni verticali hanno altezza di 12m e sono disposti a quinconce con interasse 3m. La figura seguente mostra la disposizione planimetrica e l'area di influenza dei dreni verticali.

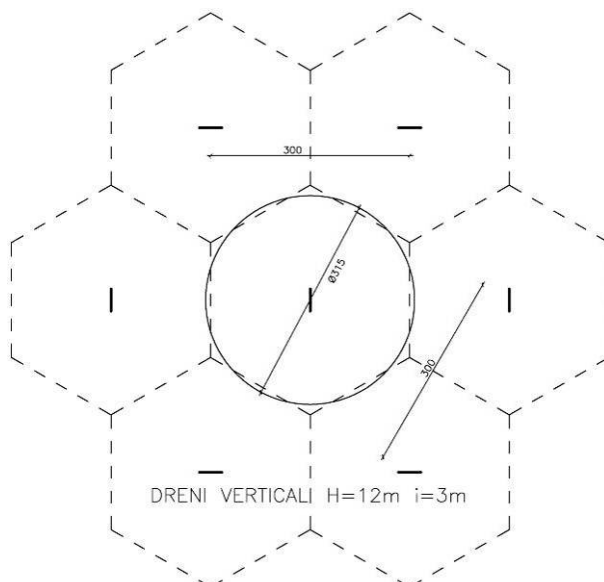


Figura 13.2: disposizione planimetrica dei dreni verticali e area di influenza di ciascun dreno.

13.8. Interventi di consolidamento colonnare mediante tecnologia deep mixing

Dove l'intervento con dreni verticali non risulta sufficiente a causa dei cedimenti immediati elevati, è necessario affiancare a questo un intervento aggiuntivo, previsto dalla pk 0+350 alla pk 0+450, che prevede il consolidamento del terreno mediante colonne di materiale trattato per miscelazione per via umida di cemento con il terreno in situ. Le colonne di terreno trattato hanno diametro pari a 1m, altezza pari a 12m e sono disposte a quinconce con interasse 3m. Il trattamento è effettuato con modalità tali da assicurare alle colonne il conseguimento delle seguenti caratteristiche meccaniche:

$$E_{col} \geq 200000 \text{ kPa},$$

$$\sigma_c \geq 2000 \text{ kPa}$$

ove E è il modulo di deformabilità di Young (valore assunto cautelativamente rispetto ai valori sperimentali ottenibili), e σ_c è il limite di sforzo di compressione corrispondente a condizioni di elasticità della colonna. Tutti i risultati sperimentali dimostrano che il blocco costituito dalle colonne di trattamento e dal terreno tra queste compreso cede come un'unica unità. La distribuzione del carico tra colonne di trattamento e terreno intercluso non trattato dipende quindi unicamente dal rapporto tra i moduli di compressibilità delle colonne e del terreno naturale, purché le colonne siano sollecitate da tensioni inferiori al limite di plasticizzazione indicato (σ_c).

Il materiale trattato è caratterizzato da valori equivalenti di modulo elastico e modulo edometrico secondo la seguente equazione:



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

$$E_{eq} = \frac{A_{col} \cdot N \cdot E_{col} + (A_{tot} - A_{col} \cdot N) \cdot E_t}{A_{tot}} = 22MPa$$

dove

A_{col} è l'area di ciascuna colonna

N è il numero delle colonne funzione dell'interasse della maglia quadrata scelta

E_{col} è il modulo di deformabilità della colonna

A_{tot} è la superficie da trattare su cui poggia il rilevato

E_t è il modulo di deformabilità del terreno naturale

allo stesso modo si ottiene un modulo di deformazione edometrica equivalente M_{eq} pari a 24MPa.

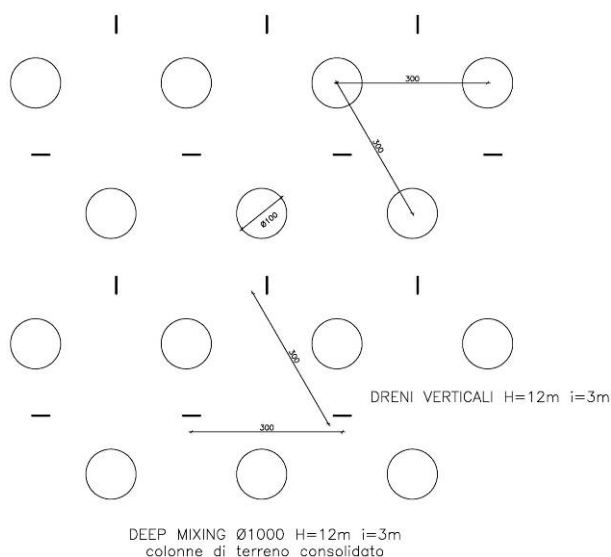


Figura 13.3: disposizione planimetrica delle colonne di terreno consolidato tramite deep mixing.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

13.9. Risultati delle analisi effettuate con gli interventi atti a ridurre i cedimenti

Di seguito si riportano i cedimenti ottenuti dalle analisi effettuate con gli interventi messi in opera per ridurre i cedimenti immediati e di consolidazione.

Tabella 13.2: valori dei cedimenti immediati, di consolidazione e totali e andamento nel tempo in presenza di dreni verticali e deep mixing (quest'ultimo intervento messo in opera per rilevati di altezza $\geq 6\text{m}$).

Interventi	H rilevato [m]	S _i [cm]	S _c [cm]	S _{tot} [cm]	1 _{gg}	2 _{gg}	3 _{gg}	30 _{gg}	60 _{gg}	100 _{gg}	200 _{gg}	1 _{anno}	3 _{anni}	5 _{anni}	10 _{anni}
DRENI VERTICALI		2	26.07	27.47	53.55	29%	69%	81%	85%	86%	88%	91%	94%	99%	100%
		4	53.28	56.14	109.43	30%	69%	81%	84%	86%	88%	91%	94%	99%	100%
		5	70.26	74.03	144.29	20%	47%	72%	84%	85%	87%	90%	94%	99%	100%
	D.M.	6	45.52	47.13	92.64	18%	37%	55%	64%	68%	72%	78%	84%	96%	100%
		7	54.96	56.93	111.9	18%	37%	55%	64%	68%	72%	78%	84%	96%	100%
		8.41	64.15	66.43	130.57	19%	26%	53%	64%	68%	72%	78%	84%	96%	100%

D.M. indica il trattamento del terreno tramite deep mixing.

Come si può osservare dai risultati in tabella le analisi hanno evidenziato:

- Per le tratte ove l'altezza di rilevato è inferiore ai 6m l'intervento, costituito da dreni di altezza pari a 12m disposti a quinconce ad interasse 3m, è adeguato per esaurire i cedimenti di consolidazione in un periodo di 3 anni;
- Per le tratte dove l'altezza supera i 6m la realizzazione in concomitanza dei dreni verticali e delle colonne di deep mixing, di altezza pari a 12m e maglia 3x3m, è adatta per ridurre i cedimenti totali.



COMUNE DI VERBANIA

Palazzo Civico - P.zza Garibaldi, 15

ALLEGATO

Elaborazioni dei dati delle stratigrafie dei sondaggi.

Località Verbania – località Fondotoce

SONDAGGIO N° SP-01_PZ

Coordinate
N= 45° 56.932'
E= 8° 29.162'

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 197 m.s.l.m. **Prof. totale** 18 m **Diametro** 110 mm

PROFONDITA' (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	FRATTURE PER MANOVRA	INCLINAZIONE DELLE STRUTTURE	ALTERAZIONE												RECUPERO DEL NUCLEO		RECUPERO PER MANOVRA (%)	RQD PER MANOVRA (%)	DESCRIZIONE LITOLOGICA E OSSERVAZIONI
																RQD				
																%				
				Ox																
0																		Terreno di copertura vegetale siltoso.		
1																				
2																				
3																		Sabbia fine limosa color nocciola con subordinata frazione ghiaiosa e pochi ciottoli, laminata e con deboli screziature ocre da ossidazione, deposito da poco addensato a sciolto.		
4																				
5																				
6																		Sabbia fine limosa color nocciola-grigiastro con intercalati livelli siltosi, laminata e con ridotte screziature da ossidazione, deposito da poco addensato a sciolto.		
7																				
8																		Sabbia fine limosa color nocciola con intercalate laminazioni limose debolmente argillose con screziature da ossidazione nella sua parte superiore, deposito da poco addensato a sciolto.		
9																				
10																				
11																		Silt argillosi, debolmente sabbiosi, di origine lacustre caratterizzati da colore grigio-nerastro e dalla presenza di frustoli vegetali e orizzonti ridotti, deposito poco consistente, plastico e compressibile.		
12																				
13																				
14																		Coltre di alterazione del substrato roccioso sottostante, costituita da clasti angolosi debolmente classati di dimensioni centimetriche, immersi in una matrice sabbioso-ghiaiosa di colore grigio chiaro.		
15																				
16		15														94	92	Micasisti di colore grigio chiaro caratterizzati da scistosità millimetrica o sub-millimetrica, materializzata da alternanze di livelli fillosilicatici (a prevalente muscovite e clorite) e quarzoso-feldspatici. Si notano talora dei lacci di quarzo di potenza centimetrica, disposti parallelamente alla scistosità principale (Sp). La scistosità Sp è inclinata di circa 50-60° rispetto all'orizzontale.		
17																				
18																				
19																				
20																		Fine sondaggio.		
21																				

SONDAGGIO N° SP-02_PZ

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 253 m.s.l.m **Prof. totale** 25 m **Diametro** 110 mm

PROFONDITA' (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	FRATTURE PER MANOVRA	INCLINAZIONE DELLE STRUTTURE	ALTERAZIONE DEI GIUNTI										RECUPERO DEL NUCLEO										RECUPERO PER MANOVRA (%)	RQD PER MANOVRA (%)	DESCRIZIONE LITOLOGICA E OSSERVAZIONI																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
				0x										RQD																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													

SONDAGGIO N° SP-02_PZ

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 253 m.s.l.m **Prof. totale** 25 m **Diametro** 110 mm

PROFONDITA' (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	FRATTURE PER MANOVRA	INCLINAZIONE DELLE STRUTTURE	ALTERAZIONE DEI GIUNTI										RECUPERO DEL NUCLEO		RECUPERO PER MANOVRA (%)	RQD PER MANOVRA (%)	DESCRIZIONE LITOLOGICA E OSSERVAZIONI		
				0x										RQD						
														0	20				40	60
21		41																		
22																				
23		8																		
24																				
25																				
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
Fine sondaggio.																				

Località Verbania Via Fondotoce

SONDAGGIO N° SP-03

N=	Coordinate 45° 56.937'
E=	8° 29.906'

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 278 m.s.l.m **Prof. totale** 75 m **Diametro** 101 mm

[illegible]

Località Verbania Via Fondotoce

SONDAGGIO N° SP-03

$$\begin{array}{l} X = 45^\circ 56.937' \\ Y = 8^\circ 29.906' \end{array}$$

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 278 m.s.l.m **Prof. totale** 75 m **Diametro** 101 mm

[illegible]

Località San Bernardino

SONDAGGIO N° SP-04

Coordinate
X= 45°56.753'
Y= 8°30.065'

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 226 m.s.l.m. **Prof. totale** 50 m **Diametro** 101 mm

PROFONDITA' (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	FRATTURE PER MANOVRA	INCLINAZIONE DELLE STRUTTURE	ALTERAZIONE DEI GIUNTI										RECUPERO DEL NUCLEO		RECUPERO PER MANOVRA (%)	RQD PER MANOVRA (%)	DESCRIZIONE LITOLOGICA E OSSERVAZIONI
				0x										RQD				

Località Verbania – Via Quarantadue Martiri

SONDAGGIO N° SP-05

N= 45°56.467'
E= 8°30.467'

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota 226 m.s.l.m **Prof. totale** 30 m **Diametro** 101 mm

PROFONDITA' (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	FRATTURE PER MANOVRA	INCLINAZIONE DELLE STRUTTURE	ALTERAZIONE DEI GIUNTI										RECUPERO DEL NUCLEO		RECUPERO PER MANOVRA (%)	RQD PER MANOVRA (%)	DESCRIZIONE LITOLOGICA E OSSERVAZIONI		
														RQD						
				0x										%						
										0	20	40	60	80	100					
0																				
1																	100		Livello di conglomerato bituminoso potente circa 5 cm e terreni di riporto a componente siltoso-sabbiosa, di colore giallo oca o marrone scuro. All'interno sono presenti sporadici clasti angolosi di micascisto e frammenti vegetali.	
2																	100			
3																			Livello sabbioso di colore giallo chiaro-bianco con alcuni clasti angolosi di micascisto.	
4																		100	Micascisti di colore grigio caratterizzati da scistosità millimetrica o sub-millimetrica, costituita da alternanze di livelli fillosilicatici (a prevalente muscovite e clorite) e quarzoso-feldspatici. La scistosità Sp è inclinata di circa 50-60° rispetto all'orizzontale. L'ammasso si presenta fortemente fratturato e alterato.	
5																				
6		10																90		80
7																			Micascisti di colore grigio scuro caratterizzati da scistosità millimetrica o sub-millimetrica, materializzata da alternanze di livelli fillosilicatici (a prevalente muscovite e clorite) e quarzoso-feldspatici. Si notano talora dei lacci di quarzo di potenza centimetrica, disposti parallelamente alla scistosità principale (Sp). Tra 4,2 e 4,8 m è presente un livello maggiormente gneissico in quanto arricchito di feldspato. La scistosità Sp è inclinata di circa 50-60° rispetto all'orizzontale. Le fratture presenti sono fortemente ossidate.	
8		15																92		95
9																				
10																				
11		11																97	92	
12																				
13																			Micascisti di colore grigio chiaro caratterizzati da scistosità millimetrica o sub-millimetrica, materializzata da alternanze di livelli fillosilicatici (a prevalente muscovite e clorite) e quarzoso-feldspatici. Si notano talora dei lacci di quarzo di potenza centimetrica, disposti parallelamente alla scistosità principale (Sp). Tra 14 e 14,6 e tra 19 e 20,8 m sono presenti dei livelli maggiormente gneissici in quanto arricchiti di feldspato. La scistosità Sp è inclinata di circa 50-60° rispetto all'orizzontale. Le fratture presenti sono sporadicamente ossidate.	
14		6																100		95
15																				
16																			Micascisti di colore grigio chiaro caratterizzati da scistosità millimetrica o sub-millimetrica, materializzata da alternanze di livelli fillosilicatici (a prevalente muscovite e clorite) e quarzoso-feldspatici. Si notano talora dei lacci di quarzo di potenza centimetrica, disposti parallelamente alla scistosità principale (Sp). Tra 14 e 14,6 e tra 19 e 20,8 m sono presenti dei livelli maggiormente gneissici in quanto arricchiti di feldspato. La scistosità Sp è inclinata di circa 50-60° rispetto all'orizzontale. Le fratture presenti sono sporadicamente ossidate.	
17		9																100		94
18																				
19																			Micascisti di colore grigio chiaro caratterizzati da scistosità millimetrica o sub-millimetrica, materializzata da alternanze di livelli fillosilicatici (a prevalente muscovite e clorite) e quarzoso-feldspatici. Si notano talora dei lacci di quarzo di potenza centimetrica, disposti parallelamente alla scistosità principale (Sp). Tra 14 e 14,6 e tra 19 e 20,8 m sono presenti dei livelli maggiormente gneissici in quanto arricchiti di feldspato. La scistosità Sp è inclinata di circa 50-60° rispetto all'orizzontale. Le fratture presenti sono sporadicamente ossidate.	
20		16																100		94
21																				

Località Verbania – località Fondotoce

SONDAGGIO N° SP-06_PZ

Coordinate
N= 45° 56.920'
E= 8° 29.124'

Inclinazione Verticale Scala
Quota 197 m.s.l.m Prof. totale 30 m Diametro 110 mm

PROFONDITA' (m)	COLONNA STRATIGRAFICA	FRATTURE PER MANOVRA	INCLINAZIONE DELLE STRUTTURE	ALTERAZIONE DEI GIUNTI										RECUPERO DEL NUCLEO										RECUPERO PER MANOVRA (%)	RQD PER MANOVRA (%)	DESCRIZIONE LITOLOGICA E OSSERVAZIONI																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
														RQD																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
				Ox											0	20	40	60	80	100	%																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	

SONDAGGIO N° SP-06_PZ

Inclinazione Verticale **Scala**

Quota _____ m.s.l.m **Prof. totale** 30 m **Diametro** 110 mm

[illegible]