

S.S. 45bis - Gardesana Occidentale

Opere di costruzione della galleria in variante tra il km 86+567 e il km 88+800 finalizzata a sottendere le attuali gallerie ogivali a sezione ristretta

PROGETTO DEFINITIVO

COD. MI92

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA:

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

IL GEOLOGO

*Dott. Geol. Serena Majetta
Ordine Geol. di Roma n. 928*

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.

*Dott. Ing. Laura Troiani
Ordine Ing. di Roma n. 31890*

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Geom. Fabio Quondam

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Giancarlo Luongo

PROTOCOLLO

DATA

STUDI GENERALI

GEOTECNICA

Relazione geotecnica generale

CODICE PROGETTO

PROGETTO

LIV. PROG.

DPM10092 D 18

NOME FILE

T00GE00GETRE01A

REVISIONE

SCALA

CODICE ELAB.

T00GE00GETRE01

A

-

D

C

B

A

EMISSIONE

Gen 2020

REV.

DESCRIZIONE

DATA

REDATTO

VERIFICATO

APPROVATO

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
1.1	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	3
2.	RIFERIMENTI NORMATIVI E BIBLIOGRAFICI	4
2.1	NORMATIVA E RACCOMANDAZIONI TECNICHE.....	4
2.2	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E PROGETTUALI	4
3.	INDAGINI ESEGUITE.....	5
3.1	CAMPAGNA INDAGINI 2017 (PFTE).....	5
3.1.1	Sondaggi geognostici.....	5
3.1.2	Prove in situ, campionamento e rilievo geomeccanico dei giunti.....	5
3.1.2.1	Prove di permeabilità e dilatometriche	6
3.1.2.2	Prelievo di campioni di terreno rimaneggiati.....	6
3.1.2.3	Prelievo di campioni lapidei	6
3.1.2.4	Esecuzione di rilievo geomeccanico di dettaglio in cassetta	7
3.1.3	Indagini geofisiche	8
3.2	CAMPAGNA INDAGINI 2019.....	8
3.2.1	Sondaggi geognostici.....	9
3.2.2	Prove in situ, campionamento e rilievo geomeccanico dei giunti.....	9
3.2.3	Indagini geofisiche	10
4.	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	11
5.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	12
5.1	DESCRIZIONE DELLE UNITÀ LITOLOGICHE	13
5.1.1	Successione stratigrafica pre-aternaria	13
5.1.2	Depositi quaternari e recenti	15
6.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	16
6.1	DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE	16
6.2	UNITÀ GEOTECNICA A – COLTRE ELUVIO COLLUVIALE E DETRITI DI CONOIDE	16
6.2.1	Granulometria e peso dell'unità di volume.....	16
6.2.2	Modello di comportamento e involuppi di rottura.....	17
6.2.3	Parametri di resistenza.....	17
6.2.4	Rigidità	17
6.3	UNITÀ GEOTECNICA B – DETRITO CEMENTATO	19
6.3.1	Modello di comportamento e involuppi di rottura.....	19

6.3.2	Peso dell'unità di volume	19
6.3.3	Resistenza a compressione uniassiale e modulo elastico della roccia intatta	19
6.3.4	GSI.....	19
6.4	UNITÀ GEOTECNICA C – AMMASSO CALCAREO	23
6.4.1	Modello di comportamento e involucchi di rottura	23
6.4.2	Peso dell'unità di volume	23
6.4.3	Resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta	23
6.4.4	GSI ₂₇	
6.4.5	Rigidezza	43
6.4.5.1	Rigidezza della roccia intatta	43
6.4.5.2	Rigidezza ad ampia scala	45
6.4.6	Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso	48
7.	PARAMETRI GEOTECNICI	50
8.	REGIME DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI	51

1. PREMESSA

La presente relazione geotecnica generale si inserisce nell'ambito del *Progetto Definitivo* della *Variante alla S.S.45 bis "Gardesana occidentale" tra il km 86+567 ed il km 88+800* nei comuni di Gargnano e Tignale in provincia di Brescia.

Il progetto prevede lo scavo di una galleria naturale che ospiterà la carreggiata in direzione Nord-Sud della futura S.S.45 bis. La sede attuale della viabilità sarà impiegata esclusivamente come carreggiata in direzione Sud-Nord.

In corrispondenza dell'imbocco Sud della galleria è prevista la realizzazione di un tombino in c.a..

In corrispondenza dell'imbocco Nord sarà realizzata una rotatoria dove convergeranno entrambe le corsie dell'attuale Strada Provinciale per Tignale, la futura carreggiata Sud-Nord in sede all'attuale S.S.45 bis e la nuova carreggiata Nord-Sud.

Nell'area d'intervento, inoltre, in alcune aree considerate esposte al rischio caduta massi, saranno realizzate opere di protezione impiegando tecnologie di difesa passiva e attiva, costituite da reti metalliche in aderenza rinforzate con funi e opportunamente chiodate alle pareti e barriere paramassi dislocate nei pendii a valle dei costoni lapidei.

Le finalità del presente rapporto tecnico possono così riassumersi:

- Breve descrizione dal punto di vista geologico delle formazioni interessate dalle opere in progetto.
- Sintesi delle campagne geognostiche eseguite.
- Definizione e caratterizzazione dei parametri geotecnici medi attribuibili alle unità geologiche interessate dalle opere.

1.1 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

L'analisi è stata svolta tenendo conto dei seguenti dati:

- Analisi delle risultanze delle indagini geognostiche eseguite in sede di Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica (PFTE).
- Analisi delle risultanze delle indagini geognostiche eseguite per la progettazione definitiva in esame.

2. RIFERIMENTI NORMATIVI E BIBLIOGRAFICI

2.1 NORMATIVA E RACCOMANDAZIONI TECNICHE

- [1] D.M. del 17.01.2018 "Aggiornamento delle *Norme Tecniche per le costruzioni*".
- [2] Circolare 21 gennaio 2019 n.7/C.S:LL:PP: "*Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni*".

2.2 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E PROGETTUALI

- [3] AGI – Associazione Geotecnica Italiana (1997) "*Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche*".
- [4] AGI – Associazione Geotecnica Italiana (1994) "*Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio*".

3. INDAGINI ESEGUITE

L'ammasso roccioso/terroso interessato dal progetto della variante in galleria è stato oggetto di due campagne di indagini geognostiche e geofisiche tale da definirne in maniera accettabile, i parametri necessari per la progettazione:

- Campagna indagini 2017, condotta preliminarmente alla redazione del PTFE (Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica).
- Campagna indagini 2019, condotta a integrazione della campagna 2017, finalizzata dalla Progettazione Definitiva, oggetto del presente studio.

3.1 CAMPAGNA INDAGINI 2017 (PFTE)

Nella campagna 2017 sono stati effettuati:

- Sondaggi a tecnica mista (distruzione di nucleo e carotaggio continuo), di cui due orizzontali, due inclinati e uno verticale
- Prove di permeabilità in foro tipo "Lugeon" all'interno dei sondaggi.
- Prove dilatometriche in foro all'interno dei sondaggi.
- Esecuzione di rilievi geomeccanici di dettaglio delle discontinuità dell'ammasso roccioso.
- Prove di laboratorio su campioni di roccia prelevati dai sondaggi.
- Indagini geofisiche costituite dall'esecuzione di linee a sismica a riflessione eseguite al fine di esplorare il sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici.

3.1.1 Sondaggi geognostici

I sondaggi eseguiti nell'area d'intervento sono 5 e di seguito se ne riporta la descrizione sommaria:

- Sondaggio S_{1h}, orizzontale, posto in corrispondenza dell'imbocco sud, lungo 120 m, interamente a carotaggio continuo.
- Sondaggio S_{2h}, orizzontale, lungo 70 m, dei quali 40 m a distruzione di nucleo e 30 m a carotaggio continuo.
- Sondaggio S_{3in}, inclinato, lungo 80 m, dei quali 40 m a distruzione di nucleo e 40 m a carotaggio continuo.
- Sondaggio S_{4in}, inclinato, lungo 125 m, dei quali 80 m a distruzione di nucleo e 45 m a carotaggio continuo.
- Sondaggio S₅, verticale, attrezzato con piezometro per il monitoraggio dell'eventuale falda acquifera, lungo 100 m, dei quali 60 m a distruzione di nucleo e 40 m a carotaggio continuo.

Il materiale prelevato durante le perforazioni eseguite a carotaggio continuo è stato depositato, in modo continuo e ordinato, in apposite cassette catalogatrici in PVC.

Per quanto riguarda le porzioni di sondaggio a distruzione di nucleo, sono stati prelevati campioni di cuttings di perforazione ogni 5 m di avanzamento per successiva analisi e interpretazione stratigrafica.

3.1.2 Prove in situ, campionamento e rilievo geomeccanico dei giunti

Nei fori di sondaggio sono state eseguite prove di permeabilità in avanzamento di tipo "Lugeon" utilizzata per la valutazione della permeabilità, o anche solo della fatturazione degli ammassi rocciosi e prove dilatometriche in risalita.

Dalle cassette catalogatrici sono stati prelevati campioni rimaneggiati di terreno e campioni di roccia (spezzoni di carote) da sottoporre a prove di laboratorio; inoltre sono stati eseguiti rilievi geomeccanici di dettaglio delle discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso.

3.1.2.1 Prove di permeabilità e dilatometriche

Le prove di permeabilità sono state condotte in corrispondenza di tutti e 5 i sondaggi:

- Nel sondaggio S_{1h} sono state effettuate 8 prove.
- Nel sondaggio S_{2h} sono state effettuate 2 prove.
- Nel sondaggio S_{3in} sono state effettuate 3 prove.
- Nel sondaggio S_{4in} sono state effettuate 3 prove.
- Nel sondaggio S₅ sono state effettuate 3 prove.

Le prove dilatometriche effettuate sono 6 (da D₁ a D₆) e hanno interessato solamente il sondaggio S_{1h}. Per tutte le prove eseguite sono stati calcolati i seguenti moduli sia singolarmente (per ogni trasduttore), sia sul valore medio delle deformazioni (media delle misure ai tre trasduttori):

- Modulo di deformazione: calcolato in fase di carico tra la minima pressione di prova e la massima pressione raggiunta a ogni ciclo;
- Modulo di scarico (elastico): calcolato in fase di scarico tra la massima pressione raggiunta a ogni ciclo e la minima pressione di prova;
- Modulo di primo carico: calcolato in fase di carico tra la massima pressione raggiunta nel ciclo in esame e quella raggiunta nel ciclo precedente;
- Modulo di ricarico: calcolato tra la minima pressione del ciclo in esame ed il massimo raggiunto nel ciclo precedente.

Contestualmente a ciascuna prova sono state condotte anche prove di creep, nelle quali si mantiene la pressione costante e si misurano le deformazioni diametrali a intervalli prefissati.

3.1.2.2 Prelievo di campioni di terreno rimaneggiati

Dal sondaggio S_{1h} sono stati prelevati 2 campioni di terreno rimaneggiati CR₁ e CR₂ sui quali sono state condotte le seguenti analisi:

- Apertura e descrizione del campione, compresa fotografia.
- Analisi granulometrica per setacciatura.
- Analisi granulometrica per sedimentazione con aerometro.
- Determinazione del peso specifico dei granuli.

3.1.2.3 Prelievo di campioni lapidei

Dai 5 sondaggi sono stati prelevati spezzoni di carota di lunghezza tale da poter eseguire le seguenti prove:

- Prove di compressione a carico concentrato (Point Load Test).
- Prova di compressione uniassiale con e senza rilievo di deformazioni.
- Prova di compressione triassiale.
- Analisi micropaleontologica (non rilevante ai fini della caratterizzazione geomeccanica).

In particolare, sotto il dettaglio del numero di carote estratte:

- Dal sondaggio S_{1h} sono stati estratti 12 spezzoni di carota.
- Dal sondaggio S_{2h} sono stati estratti 8 spezzoni di carota.
- Dal sondaggio S_{3in} sono stati estratti 8 spezzoni di carota.
- Dal sondaggio S_{4in} sono stati estratti 7 spezzoni di carota.

- Dal sondaggio S₅ sono state estratti 7 spezzoni di carota.

3.1.2.4 Esecuzione di rilievo geomeccanico di dettaglio in cassetta

Il rilievo geomeccanico di dettaglio è stato effettuato sugli spezzoni di carota contenuti nelle cassette catalogatrici successivamente all'esecuzione delle foto delle stesse.

È stato stimato il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso per ogni metro di perforazione tramite il calcolo dell'indice R.Q.D. (Rock Quality Designation), definito come la percentuale di recupero di carotaggio in roccia di spezzoni con lunghezza superiore ai 10 cm rispetto alla lunghezza perforata.

L'indice RQD varia dallo 0% (ammasso roccioso estremamente fratturato) al 100% (ammasso roccioso poco fratturato) e su questa base è stata proposta una prima classificazione della qualità dell'ammasso (Deere, 1963), riportata nella tabella seguente.

QUALITA'	RQD %
Molto scadente	0-25
Scadente	25-50
Discreta	50-75
Buona	75-90
Ottima	90-100

Successivamente sono stati codificati tutti i giunti osservati e sono state distinte fra loro le discontinuità di strato-scistosità, le discontinuità legate a fratturazione naturale e le discontinuità indotte dalle operazioni di perforazione (fratture meccaniche).

Per ogni giunto di origine naturale osservato è stata rilevata la profondità da p.c. in corrispondenza dell'asse delle carote, l'inclinazione rispetto alla direzione orizzontale, la forma e il grado di alterazione delle superfici di discontinuità; inoltre, dove possibile, è stata rilevata la rugosità mediante profilometro ("pettine di Barton"), la resistenza delle pareti mediante martello di Schmidt (espressa in termini di rimbalzo riferito alla direzione orizzontale), l'apertura e il riempimento (indicandone la natura e lo spessore).

Per quanto riguarda le fratture meccaniche sono state rilevate unicamente la profondità da p.c., l'inclinazione e la forma della superficie; tutte le altre informazioni non sono state annotate in quanto ininfluenti per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

Nella tabella seguente è sinteticamente riportata la simbologia utilizzata durante l'esecuzione del rilievo geomeccanico.

TIPO DI GIUNTO	FORMA	APERTURA
S – Giunto di strato-scistosità	P - Planare	C – Chiusa (0.1-0.5 mm)
FR – Giunto naturale	O - Ondulata	B – Beante (0.5-10.0 mm)
M – Frattura meccanica	IR- Irregolare	A – Aperta (>10.0 mm)

L'analisi dei rilievi strutturali ha consentito di definire la distribuzione dei valori di GSI per l'ammasso roccioso in funzione della profondità, passando per l'individuazione dei valori di RMR.

3.1.3 Indagini geofisiche

Le indagini geofisiche sono state effettuate in sismica a riflessione mediante l'esecuzione di n.4 linee di rilievo.

ID Sezione	Lunghezza (m)
SR1a	289
SR1b	306
SR2a	355
SR2b	355

Le linee SR2a e SR2b sono sovrapposte di 55 m, pertanto è stato possibile restituire il risultato mediante l'unione delle stesse in un'unica sezione di rilievo della lunghezza totale di circa 655 m.

Le indagini a riflessione hanno consentito di definire lungo un profilo indagato, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche presenti e la loro geometria (spessori e superfici di contatto).

3.2 CAMPAGNA INDAGINI 2019

La campagna indagini 2019 è stata condotta al fine di indagare in maniera più esaustiva i terreni e gli ammassi rocciosi interessati dagli imbocchi della galleria di progetto e di definire lo stato di consistenza delle gallerie naturali esistenti e dell'ammasso immediatamente a tergo.

A tali scopi sono state effettuate indagini all'aperto e indagini in galleria.

Le indagini all'aperto sono le seguenti:

- Sondaggi a carotaggio continuo di cui uno verticale e due orizzontali.
- Esecuzione di rilievi geomeccanici di dettaglio delle discontinuità dell'ammasso roccioso in cassetta.
- Esecuzione di rilievi geomeccanici areali su ammasso affiorante.
- Prove di laboratorio su campioni di roccia/terra prelevati dai sondaggi.
- Indagini sismiche a riflessione rifrazione lungo stendimenti nelle aree di imbocco e una prova di tipo Down-Hole attrezzata in uno dei sondaggi.

Le indagini all'interno delle gallerie esistenti sono le seguenti:

- Sondaggi a carotaggio continuo di cui quattro orizzontali e uno subverticale in direzione della fondazione della galleria.
- Carotaggi orizzontali (*).
- Endoscopie (*).
- Indagine georadar (*).
- Martinetti piatti (*).
- Esecuzione di rilievi geomeccanici di dettaglio delle discontinuità dell'ammasso roccioso.
- Esecuzione di un rilievo geomeccanico areale su ammasso affiorante.
- Prove di laboratorio su campioni di roccia e cls prelevati dai sondaggi e dai carotaggi (*).

L'esito delle indagini contrassegnate con l'asterisco () hanno carattere strutturale ed è riportato in apposita relazione.*

Di quanto effettuato in galleria, nel seguito, si descrivono solamente le prove effettuate sull'ammasso roccioso interagente con le opere esistenti e di progetto.

3.2.1 Sondaggi geognostici

Sono stati condotti complessivamente 8 sondaggi, dei quali, 3 all'aperto nelle zone d'imbocco e 5 all'interno delle gallerie esistenti.

Di seguito si riporta la descrizione sommaria dei sondaggi all'aperto:

- Sondaggio S10, verticale, posto in corrispondenza dell'imbocco sud, lungo 18 m, a carotaggio continuo.
- Sondaggio S7, orizzontale, posto in corrispondenza dell'imbocco nord, lungo 10 m, a carotaggio continuo.
- Sondaggio S9, verticale, posto in corrispondenza dell'imbocco nord, lungo 2.1 m, a carotaggio continuo.

Di seguito si riporta la descrizione sommaria dei sondaggi in galleria:

- Sondaggio S2, verticale, all'interno della galleria D'Acli, lungo 2.7 m, a carotaggio continuo.
- Sondaggio S8, inclinato a 18° verso la verticale, all'interno della galleria D'Acli, lungo 1.5 m, a carotaggio continuo.
- Sondaggio S4, verticale, all'interno della galleria Eutenia, orizzontale, lungo 2.5 m, a carotaggio continuo.
- Sondaggio S5, verticale, all'interno della galleria Dei Ciclopi, lungo 3.8 m, a carotaggio continuo.
- Sondaggio S6, verticale, all'interno della galleria Dei Ciclopi, lungo 4.2 m, a carotaggio continuo.

Il materiale prelevato durante le perforazioni eseguite a carotaggio continuo è stato depositato, in modo continuo e ordinato, in apposite cassette catalogatrici in PVC.

3.2.2 Prove in situ, campionamento e rilievo geomeccanico dei giunti

Dalle cassette catalogatrici sono stati prelevati campioni rimaneggiati di terreno e campioni di roccia (spezzoni di carote) da sottoporre a prove di laboratorio; inoltre sono stati eseguiti rilievi geomeccanici di dettaglio delle discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso.

3.2.2.1.1 *Prelievo di campioni di terreno rimaneggiati*

Dal sondaggio S10 sono stati prelevati 4 campioni di terreno rimaneggiati sui quali sono state condotte le seguenti analisi:

- Analisi granulometrica per sedimentazione.
- Determinazione del peso specifico dei granuli.

Su 2 dei quattro campioni estratti sono state effettuate prove di taglio CD.

3.2.2.1.2 *Prelievo di campioni lapidei*

Dai sondaggi sono stati prelevati spezzoni di carota di lunghezza tale da poter eseguire le seguenti prove:

- Prove di compressione a carico concentrato (Point Load Test).
- Prova di compressione uniassiale con e senza rilievo di deformazioni.

3.2.2.1.3 *Esecuzione di rilievo geomeccanico di dettaglio in cassetta*

Il rilievo geomeccanico di dettaglio è stato effettuato sugli spezzoni di carota contenuti nelle cassette catalogatrici secondo le modalità descritte nel paragrafo 3.1.2.4

3.2.2.1.4 *Esecuzione di rilievo geomeccanico areale su ammasso affiorante*

Sono stati eseguiti 3 rilievi geomeccanici areali al fine di descrivere le proprietà meccaniche dell'ammasso quali le caratteristiche della roccia intatta e le caratteristiche delle discontinuità:

1. In corrispondenza del tratto della Galleria Dei Ciclopi non rivestito.
2. In corrispondenza dell'imbocco nord della Galleria Dei Ciclopi.
3. In corrispondenza dell'imbocco sud della Galleria D'Acli.

Per il rilievo sono state caratterizzate tutte le discontinuità in una finestra rettangolare di dimensioni pari a 1.5 x 1.5 m.

3.2.3 **Indagini geofisiche**

All'aperto, in corrispondenza degli imbocchi della galleria naturale di progetto sono state effettuate le seguenti indagini geofisiche:

- 2 linee di rilievo L1 e L2 in sismica a rifrazione Vp, sismica a rifrazione Vs e sismica a riflessione con l'obiettivo di esplorare il sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici. La linea di rilievo L1, lunga 94m è ubicata in corrispondenza dell'imbocco Sud e la linea L2, lunga 117.5m è ubicata in corrispondenza dell'imbocco nord, entrambe disposte trasversalmente al tracciato di progetto.
- 1 prova Down-Hole condotta all'interno del sondaggio S10, effettuata al fine di determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, nonché di effettuare una valutazione di parametri quali il rapporto Vp/Vs, coefficiente di Poisson (ρ), modulo di Young (E) e modulo di taglio (G)

4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

L'area oggetto di studio è ubicata nel settore orientale della Lombardia, in provincia di Brescia, lungo la costa occidentale del Lago di Garda e a circa 41 km a nord-est dal suddetto capoluogo di provincia. Il tracciato dell'opera in progetto si sviluppa all'interno del comune di Gargnano, in prossimità della frazione di Muslone.

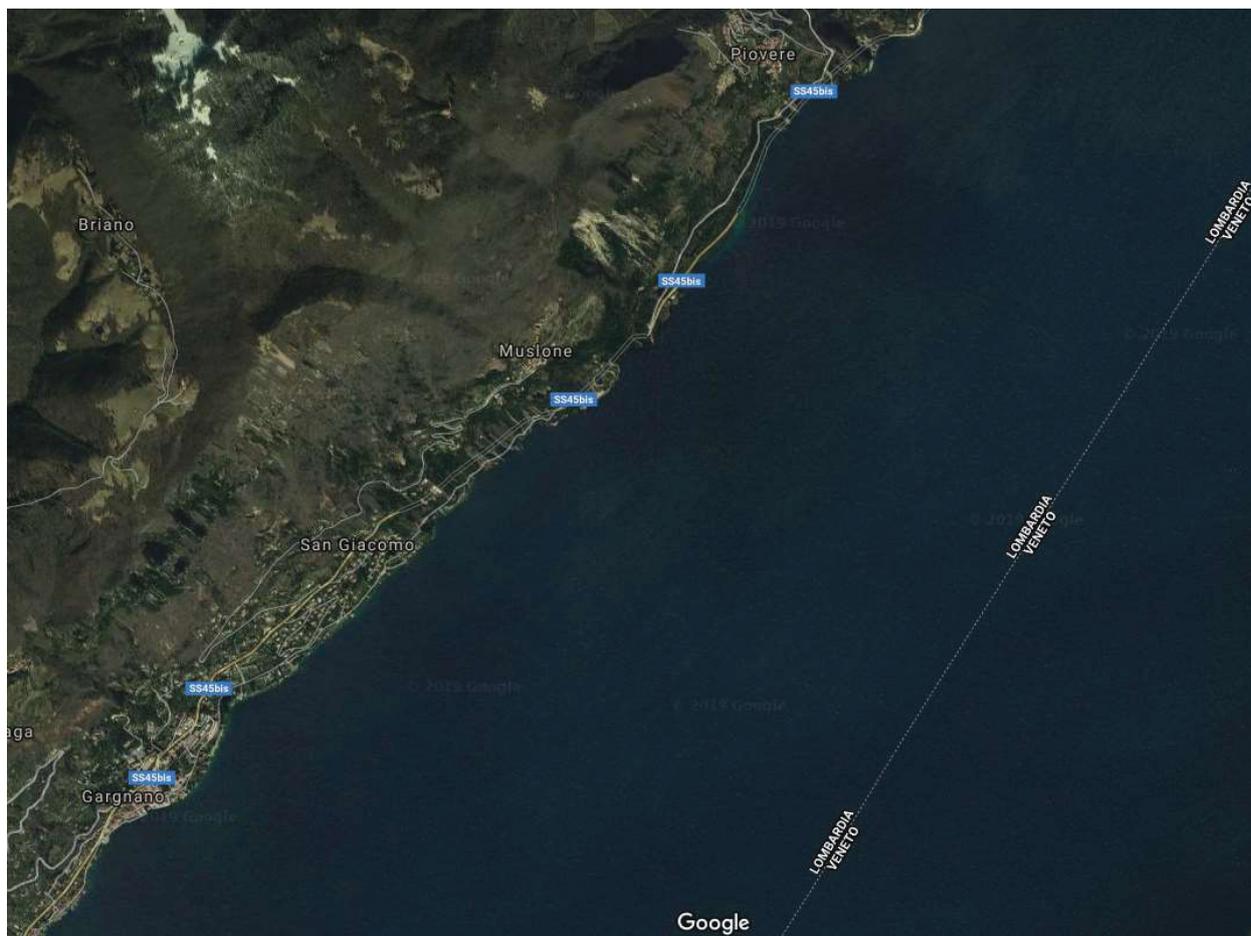


Figura 1 - Inquadramento aerofotogrammetrico del sito di intervento.

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area di studio si inquadra nell'ambito delle Prealpi bresciane, il cui assetto strutturale è caratterizzato da una serie di superfici tettoniche sud e sud-est vergenti che generano sovrascorrimenti di notevole entità delle successioni più antiche, e quindi originariamente più profonde, su quelle più recenti. Pertanto, la caratteristica che risalta maggiormente nell'assetto geometrico delle formazioni rocciose, è costituito dal progressivo ringiovanimento delle successioni procedendo da nord a sud (dalla Formazione della Corna a nord, culminazione del Monte Comero, alla formazione della Scaglia Lombarda a sud, in località Amburana).

A livello geologico-generale, la zona di interesse progettuale è inserita nel sistema del Bacino lombardo orientale, posizionato fra la direttrice della Linea delle Giudicarie Sud e la Linea di Ballino – Garda.

Procedendo da nord-ovest verso sud-est è infatti possibile individuare tre domini geologico-strutturali differenti:

1. Area di affioramento del Basamento cristallino (il sistema è rappresentato dal "Massiccio delle tre valli bresciane" ed è costituito dalle intrusioni magmatiche dell'Adamello e la sua copertura vulcanica);
2. Monoclinal dolomitica sovrascorsa, costituita, a grande scala, da un esteso "piastrone" di dolomie noriche e retiche a comportamento rigido;
3. Fronte di accavallamento Tremosine-Tignale e fascio di pieghe frontali ad esso associato.

Dal punto di vista geodinamico le strutture tettoniche presenti, in generale, si sono originate, secondo le interpretazioni più recenti, da fenomeni essenzialmente compressivi causati principalmente dal movimento (intrusione) verso sud del blocco crostale più rigido costituito dal corpo dell'Adamello, che nella traslazione sarebbe stato delimitato a meridione dalla linea della Val Trompia (essenzialmente compressiva) e verso est dalla linea delle Giudicarie (trascorrente più a nord) e con caratteri transpressivi nella zona del Garda.

Le principali lineazioni tettoniche rilevabili nell'area possono essere raggruppate secondo due principali direzioni strutturali:

1. Un sistema a direzione orobica-valsuganese (con direzioni variabili da E-W a ENEWSW);
2. Un sistema a direzione giudicariense (con direzioni variabili da NNE-SSW a NE-SW).

Andando più nel dettaglio, il più importante lineamento ad andamento giudicariense, rilevabile sulla sponda occidentale del Lago di Garda, è rappresentato dal sovrascorrimento Tremosine-Tignale, vergente verso sud-est che provoca, a grande scala, la sovrapposizione della Dolomia principale sulla successione dei terreni mesozoici.

Alla scala del territorio del Comune di Gargnano (porzione a lago), è presente, in corrispondenza del rilievo del M.te Comero, il sovrascorrimento associato al lineamento di Tremosine-Tignale, ove si rendono manifeste le strutture frontali associate a tale struttura: anticlinale del M.te Comero, in cui la Formazione della Corna appare piegata rigidamente secondo un'ampia struttura plicativa sud – vergente e al letto (fascia montuosa-collinare prospiciente la sponda lacustre) le formazioni via via più recenti in successione rovesciata (Medolo, F.ne di Concesio, Maiolica, Scaglia Lombarda che hanno reagito all'applicazione dello stress deformandosi in pieghe e andando a costituire, dal punto di vista tettonico, il fascio di piegamenti frontali e basali associati alla struttura di compressione principale, di cui la principale è la sinclinale di Muslone.

Le strutture plicative di maggior significato, di dimensioni da ettometriche a chilometriche, evidenziano prevalenti assi a direzione N40°-220° disposte parallelamente al fronte di accavallamento e alla sponda benacense.

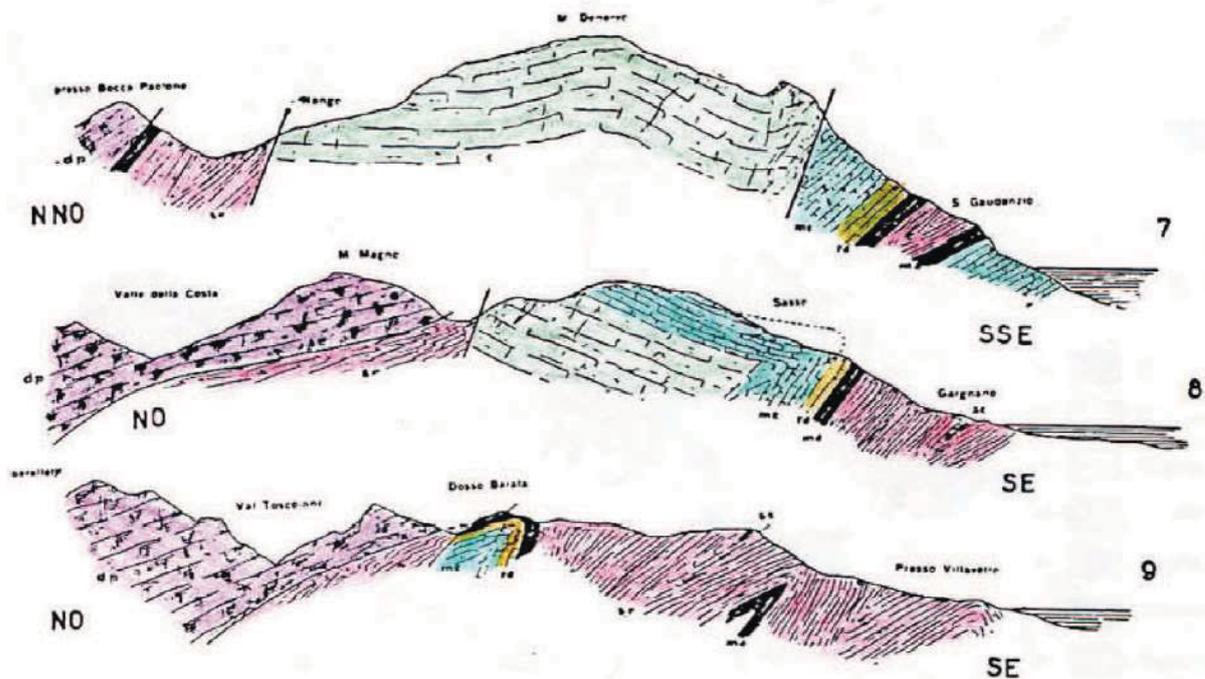


Figura 2. Sezioni geologiche ad orientamento NW-SE da M.te Denervo, M.te Magno e Dosso Barata a lago.

Quest'ultima, caratterizzata, al nucleo, dalla presenza della Scaglia Lombarda mentre i fianchi comprendono le formazioni giurassiche stratificate (dalla Maiolica al Medolo), assume una posizione da inclinata a rovesciata passando da S. Gaudenzio alla zona del Gaz. Contemporaneamente, a monte, il contatto della formazione della Corna con il Medolo in posizione rovesciata si realizza mediante un passaggio stratigrafico nella parte centrale ed evolve in sovrascorrimento sud-est vergente, con l'accavallamento delle masse e rovesciamento completo della sinclinale a livello della località Pis.

5.1 DESCRIZIONE DELLE UNITÀ LITOLOGICHE

Vengono di seguito espone le principali caratteristiche stratigrafiche delle unità formazionali che costituiscono il substrato roccioso meso-cenozoico, con la distinzione tra le diverse formazioni della Successione Stratigrafica Pre-quadernaria e le coperture quadernarie e recenti.

5.1.1 Successione stratigrafica pre-quadernaria

La successione stratigrafica pre-quadernaria affiorante nell'area di stretto interesse progettuale comprende le litologie marine e terrigene ascrivibili ad un intervallo temporale compreso nel Mesozoico – Cenozoico (Eocene). I rapporti geometrici tra le diverse formazioni sono spesso di difficile interpretazione perché nascoste dalle estese coltri dei depositi di copertura.

Di seguito vengono descritte le formazioni pre-quadernarie, dalla più antica alla più recente.

Medolo. Si tratta di calcari per lo più marnosi, di colore chiaro o scuro, ad evidente stratificazione, con letti e noduli di selce e con intercalazioni di più o meno abbondanti di marne fino ad argilliti grigio-verdastre. Localmente è possibile la distinzione nei due membri che la costituiscono: il calcare di Gardone Val Trompia e il Calcare di Domaro. Il limite inferiore è rappresentato dalla Corna o dal Corso o da altre formazioni; il limite superiore è invece rappresentato dalla Formazione di Concesio. La potenza massima stimata è di circa 800 m. La formazione affiora diffusamente lungo tutta l'area, ad una quota che va da quella del Lago di Garda

fino ad un massimo di 210 m nel settore nord. La formazione affiora diffusamente lungo tutta l'area, ad una quota che va da quella del Lago di Garda fino ad un massimo di 210 m nel settore nord. La formazione affiora lungo tutto il taglio stradale della vecchia S.S.45bis Gardesana (Via San Giacomo) che passa a valle delle gallerie esistenti; si presenta come alternanze di calcari selciferi in strati da pochi centimetri a 15 cm di spessore, con marne argillose e scagliose grigio verdastre, fissili. All'interno della formazioni sono presenti liste, arnioni e noduli di selce nera.

Formazione di Concesio. E' costituita da calcari, anche marnosi, e talora più o meno detritici, da grigiastri a nocciola, frequentemente selciosi, a stratificazione evidente, con intercalazioni di marne grigio-verdastre talora abbondanti. Localmente sono distinguibili due membri: i calcari nocciola e calcari medoloidi. La formazione appare molto simile alla F.ne del Medolo, da cui spesso non è facilmente distinguibile. La potenza è variabile fra i 100 e i 300 m, il limite inferiore è rappresentato in generale dal Medolo, mentre superiormente passa alla Formazione di Navone o al Selcifero lombardo. Nell'area di studio la formazione affiora diffusamente al di sopra del Medolo, fino ad una quota massima di 370 m slm nel settore nord. Essa costituisce le imponenti pareti sub-verticali che sovrastano l'imbocco sud della galleria esistente.

Formazione di Navone. La formazione è costituita da calcari marnoso silicei, da grigio chiari a grigio scuri, con selci in prevalenza grigiastre in noduli liste o letti, localmente molto abbondanti, ad evidente stratificazione; sono presenti veli o intercalazioni di litotipi marnoso-argillosi grigio-verdolini. La potenza non raggiunge mai valori molto elevati con caratteri di transizione tra i calcari medoloidi della F.ne di Concesio, coincidente con il limite inferiore, ed il Selcifero lombardo (limite superiore). Nell'area di studio la formazione assume uno spessore medio di 20/25 m e viene dislocata dalle faglie ad alto angolo trasversali alla struttura plicativa; la formazione affiora ad una quota compresa tra un minimo di 270 m slm all'imbocco sud e un massimo 400 m slm nell'area dell'imbocco nord, sempre superiore alla quota di scavo della galleria in progetto.

Selcifero Lombardo. Si tratta di una formazione costituita da radiolariti identificate con selci policrome, con colore che va dal bruno, giallastro, grigio e rosso ruggine, con intercalate marne calcaree e silicee, grigio scuro e grigio verdastro, e selci nere, passanti a marne calcareo-silicee con colorazione grigio verdi, giallastre, e selci verde oliva e arancioni con bordi neri. La formazione si colloca superiormente alla Formazione di Navone ed ha un'età compresa tra il Bajociano superiore e il Titoniano inferiore. Nell'area della galleria in progetto assume uno spessore medio di circa 40 m, affiorando da una quota minima di 270 m slm all'imbocco sud, fino ad una quota massima di 420 m slm nell'area dell'imbocco nord.

Maiolica. Si tratta di calcari bianchi e biancastri, grigi esternamente e bianco latte all'interno, compatti, microcristallini a frattura concoide, ben stratificati, con selci grigio scure e azzurrine in orizzonti o noduli; sono interessate diffusamente da suture stilolitiche e minute fessure riempite di calcite secondaria; il contenuto paleontologico si riferisce a microfossili come Calpionelle e radiolari. Presenza locale di intercalazioni argillose a volte bituminose, nerastre, frequentemente fogliettate, di differente spessore. La Maiolica si colloca al di sopra del Selcifero Lombardo, con una potenza media nell'area di progetto di circa 65 m. Lungo la strada che sale verso l'abitato di Muslone, la Maiolica affiora lungo i tagli di sbancamento di monte, a luoghi ricoperta da una spessa coltre di depositi detritici di alterazione.

Scaglia Lombarda. Suddivisa in tre unità Scaglia Variegata, Scaglia Rossa e Scaglia Cinerea, caratterizzate da marne fogliettate, di colore in prevalenza grigiastro e nerastro, alternatisi inizialmente con altre rosso vinate e grigio verdastre (SV) passante a marne e marne argillose rosa salmone intenso e rosso mattone, con intercalazioni di calcari marnosi compatti e di calcari arenacei (Scaglia rossa-SR); la scaglia cinerea (SC) è rappresentata da marne argillose grigio giallastre, marne, marne calcaree sino a calcari marnosi, ad alterazione grigio cenere, localmente con calcareniti ad elementi organogeni e con quarzo ed olivina. Nell'area di studio, la Formazione è rappresentata esclusivamente dal termine più basso riferito alla Scaglia

Rossa. Essa affiora principalmente, in maniera discontinua, lungo i tagli stradali di Via Muslone, spesso ricoperta dai depositi di alterazione detritica. A tergo del muro della galleria artificiale che si trova prima dell'abitato di San Gaudenzio, realizzata a protezione della caduta massi dalle pareti rocciose sovrastanti, affiora il limite stratigrafico tra la Maiolica e la Scaglia Rossa.

5.1.2 Depositi quaternari e recenti

Depositi morenici. Sono depositi di origine glaciale, costituiti da sedimenti massivi privi di orientazione degli elementi litoidi in forza al meccanismo di messa in posto (ghiacciaio). Si tratta, in generale, di terreni misti, costituiti da ghiaie sabbiose con ciottoli e trovanti esotici e di natura poligenica immersi in una matrice limosa. In generale le morene sormontano il substrato roccioso afferente alla Scaglia lombarda/Maiolica, con spessori modesti. In generale, i depositi morenici sormontano il substrato roccioso afferente alla Scaglia lombarda/Maiolica, ad una quota variabile con potenze variabili, da pochi metri a circa 15-20 m.

Detrito cementato. E' rappresentato da un'alternanza di orizzonti e lenti prevalentemente ghiaiose e/o sabbiose, con ciottoli e trovanti a basso grado di arrotondamento, soggetti a cementazione, che fornisce al deposito una consistenza litoide o pseudolitoide. Questi depositi affiorano limitatamente nella zona dello svincolo della S.P. che sale per Tignale, per uno spessore di circa 2 m, poggianti direttamente sul Medolo. A tratti, sono ricoperti in superficie da una coltre detritica sciolta, di modesto spessore. L'età di riferimento è olocenica.

Coltre eluvio-colluviale e detriti di conoide. Si tratta di terreni eterogenei, a granulometria da ghiaioso-sabbiosa a limoso-argillosa, talvolta anche ciottolosa, con colorazioni variabili da rossastro a bruno giallastro, a basso grado di addensamento, derivati dall'alterazione e smantellamento dei rilievi rocciosi rappresentati dal substrato pre-quaternario (calcari dolomitici, calcari e marne) e dai depositi morenici. In questo gruppo sono stati accorpati anche i depositi di conoide pedemontana, che hanno subito trasporto per opera dei corsi d'acqua e successivo deposito per gravità, generando una tipica forma a cono/ventaglio. Tali depositi affiorano diffusamente in tutta l'area di studio, principalmente nelle aree a minore pendenza, con spessori variabili da qualche metro a decine di metri. I depositi detritici sono riferiti, anch'essi, all'Olocene.

Depositi antropici. Si tratta di materiali di riporto, eterogeneo e incoerente, costituenti i riempimenti di antiche depressioni morfologiche e i rilevati stradali esistenti.

6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

6.1 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

Sulla base delle indagini condotte emerge che le unità geotecniche interessate dalle opere previste in progetto sono sostanzialmente tre, una di natura terrosa e due di natura rocciosa:

- **Unità A**, costituita dalla Coltre eluvio-colluviale e detriti di conoide.
- **Unità B**, costituita dal Detrito cementato a comportamento essenzialmente litoide.
- **Unità C**, costituita dall'Ammasso calcareo interessato dalle opere, nel quale rientrano il Medolo e la formazione di Concesio.
- **Unità D** nella quale sono raggruppate Scaglia rossa, Maiolica, Selcifero Lombardo e Formazione di Navone. Per questa unità non viene fornita caratterizzazione in quanto le non interessata dalle opere in progetto.

In particolare, la galleria in esame è interessata principalmente dall'unità geotecnica **C** e in misura minima, solo in corrispondenza dell'imbocco sud dall'unità geotecnica **A**.

L'unità geotecnica **B** è presente in corrispondenza della trincea a monte della sistemazione della SP che conduce all'abitato di Tignale.

Il tombino idraulico previsto in corrispondenza dell'imbocco sud interessa l'unità **A**.

L'unità D non è interessata dalle opere in oggetto.

6.2 UNITÀ GEOTECNICA A – COLTRE ELUVIO COLLUVIALE E DETRITI DI CONOIDE

La **coltre eluvio colluviale** e i **detriti di conoide** presenti in corrispondenza dell'imbocco Sud della galleria di progetto costituiscono l'unità A e la caratterizzazione in termini granulometrici, di resistenza e rigidezza è stata condotta con riferimento al sondaggio [S10_2019](#), un sondaggio verticale e posto nella zona del piazzale antistante il futuro imbocco sud della galleria di progetto. Anche il sondaggio orizzontale [S1h_2017](#) ha interessato l'unità in oggetto, ma non sono stati estratti campioni utili per la caratterizzazione.

6.2.1 Granulometria e peso dell'unità di volume

La **coltre eluvio colluviale** e i **detriti di conoide** si presentano come sabbia ghiaiosa, ghiaia e sabbia e ghiaia.

descrizione AGI	ghiaia	sabbia	limo	argilla
	(%)	(%)	(%)	(%)
Ghiaia con sabbia limosa	47	29	24	-
Ghiaia limosa sabbiosa	67	16	17	-
Ghiaia ciottolosa, deb limosa	78	5	6	-
Ghiaia sabbiosa limosa	63	21	16	-

Si tratta pertanto di depositi sostanzialmente granulari caratterizzabili da un peso dell'unità di volume pari a 20 kN/m³.

6.2.2 Modello di comportamento e involucchi di rottura

Per caratterizzare il comportamento della terre a rottura è stato utilizzato il criterio di Mohr-Coulomb, che schematizza l'ammasso come mezzo continuo ed isotropo.

Il criterio di rottura è definito dalla seguente relazione nel piano τ - σ :

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

Dove c è la coesione, determinata dall'intercetta della retta d'involuppo con l'ordinata, e ϕ l'angolo di attrito interno, determinato dall'angolo che forma la retta d'involuppo dei cerchi con l'ascissa.

6.2.3 Parametri di resistenza

Al fine di determinare le caratteristiche di **resistenza** sono state effettuate prove di taglio diretto su due campioni rimaneggiati estratti dal sondaggio S10_019.

Le prove sul primo campione, estratto a quota 2.5-2.7 m da quota boccaforo, hanno fornito i seguenti valori di coesione e angolo d'attrito:

- Coesione drenata $c' = 2.6$ kPa
- Angolo d'attrito $\phi' = 32^\circ$

Le prove sul secondo campione, estratto a quota 13.5-13.7 m da quota boccaforo, hanno fornito i seguenti valori di coesione e angolo d'attrito:

- Coesione drenata $c' = 1.2$ kPa
- Angolo d'attrito $\phi' = 34^\circ$

In via cautelativa si assume un valore di calcolo per l'angolo d'attrito pari a 32° per l'intera unità e coesione nulla.

6.2.4 Rigidezza

La caratterizzazione della rigidezza dell'unità A si è basata sull'esito della prova sismica Down-Hole eseguita all'interno del sondaggio S10_2019 lungo 18 m.

Di seguito l'esito completo della Down-Hole in termini di distribuzione delle velocità delle onde di compressione, di taglio e di moduli elastici a piccole deformazioni ricavati (E_{din} e G_{din}).

Depth	D	T_p	T_s	V_p	V_s	V_p/V_s	γ	ν	E_{din}	G_{din}
1.0	1.41	0.0010	0.0181	697	214	3.26	20.0	0.45	269	93
2.0	2.24	0.0022	0.0219	707	216	3.28	20.0	0.45	275	95
3.0	3.16	0.0034	0.0269	766	185	4.14	20.0	0.47	206	70
4.0	4.12	0.0045	0.0310	829	235	3.52	20.0	0.46	329	113
5.0	5.10	0.0056	0.0339	899	334	2.69	20.0	0.42	647	228
6.0	6.08	0.0066	0.0361	979	451	2.17	20.0	0.37	1134	415
7.0	7.07	0.0076	0.0385	1051	410	2.57	20.0	0.41	965	342
8.0	8.06	0.0084	0.0407	1139	451	2.53	20.0	0.41	1167	415
9.0	9.06	0.0092	0.0424	1208	602	2.01	20.0	0.33	1972	738
10.0	10.05	0.0100	0.0439	1312	637	2.06	20.0	0.35	2224	826
11.0	11.05	0.0105	0.0449	2011	1008	1.99	20.0	0.33	5518	2071
12.0	12.04	0.0110	0.0459	1973	996	1.98	20.0	0.33	5378	2023
13.0	13.04	0.0115	0.0468	2100	1108	1.90	20.0	0.31	6539	2501
14.0	14.04	0.0119	0.0477	2239	1121	2.00	20.0	0.33	6823	2560
15.0	15.03	0.0123	0.0484	2696	1386	1.95	20.0	0.32	10337	3914
16.0	16.03	0.0127	0.0491	2525	1444	1.75	20.0	0.26	10690	4252
17.0	17.03	0.0130	0.0497	3055	1666	1.83	20.0	0.29	14586	5661
18.0	18.03	0.0133	0.0502	3391	1997	1.70	20.0	0.23	20072	8128

L'unità A è presente fino a circa 15 m di profondità, tuttavia, cautelativamente, si considerano solamente i primi 5 m per il calcolo del valore medio del modulo di rigidezza dinamico.

STRATO	E_{din} [MPa]	$E_{din-medio}$ [MPa]
1	269	
2	275	
3	206	345
4	329	
5	647	

Per condurre i calcoli di dimensionamento delle paratie provvisorie d'imbocco della galleria, del tombino e delle opere provvisorie necessarie per lo scavo del tombino e dell'adiacente vasca di sicurezza idraulica, si è impiegato un valore del modulo operativo pari a 1/10 del valore del modulo a piccole deformazioni precedentemente calcolato:

$$E_{op} = 35 \text{ MPa}$$

6.3 UNITÀ GEOTECNICA B – DETRITO CEMENTATO

L'unità B è costituita da **Detrito cementato** presente a ricoprimento dell'ammasso calcareo in corrispondenza della trincea all'imbocco nord e la caratterizzazione in termini di resistenza e rigidità è stata condotta con riferimento al sondaggio Sg_2019.

Di seguito si riportano i valori dei parametri necessari per la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso.

6.3.1 Modello di comportamento e involuppi di rottura

L'ammasso roccioso è schematizzato attraverso un mezzo continuo equivalente a comportamento isotropo. Tale assunzione risulta lecita essendo le dimensioni dei blocchi, individuati dai giunti e dalle discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso, piccole rispetto alle dimensioni della galleria.

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso si è fatto riferimento al criterio di rottura sviluppato da Hoek-Brown nella formulazione del 2002 (Hoek, Carranza, Torres et al.) nel quale la resistenza al taglio è rappresentata da un involuppo di rottura non lineare e fortemente curvilineo in presenza di bassi livelli tensionali.

Il criterio di rottura è definito dalla seguente relazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (mb \sigma_3 / \sigma_1 + s)^a$$

con:

- σ_1, σ_3 tensioni principali effettive a rottura;
- mb costante di Hoek-Brown relativa all'ammasso roccioso;
- s ed a costanti dipendenti dalle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso;
- σ_{ci} resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

6.3.2 Peso dell'unità di volume

Il peso dell'unità di volume dell'unità B può essere assunto pari a 24 kN/m³.

6.3.3 Resistenza a compressione uniassiale e modulo elastico della roccia intatta

Dal sondaggio Sg_2019 è stato estratto un solo campione in corrispondenza del detrito cementato, sul quale è stata effettuata una prova di Compressione Uniassiale, dalla quale sono stati ricavati la **resistenza a compressione uniassiale** e il **modulo elastico della roccia intatta**.

La resistenza a compressione è risultata essere pari a:

$$\sigma_{ci} = 8 \text{ MPa.}$$

Il modulo elastico è risultato essere pari a:

$$E_i = 3.9 \text{ GPa.}$$

6.3.4 GSI

Il GSI (Geological Strength Index), è un indice che caratterizza la qualità intrinseca dell'ammasso roccioso, ovvero la qualità dell'ammasso indipendentemente dalla specifica opera da realizzare.

La Tabella sotto indica la variabilità dell'indice GSI in funzione della qualità dell'ammasso.

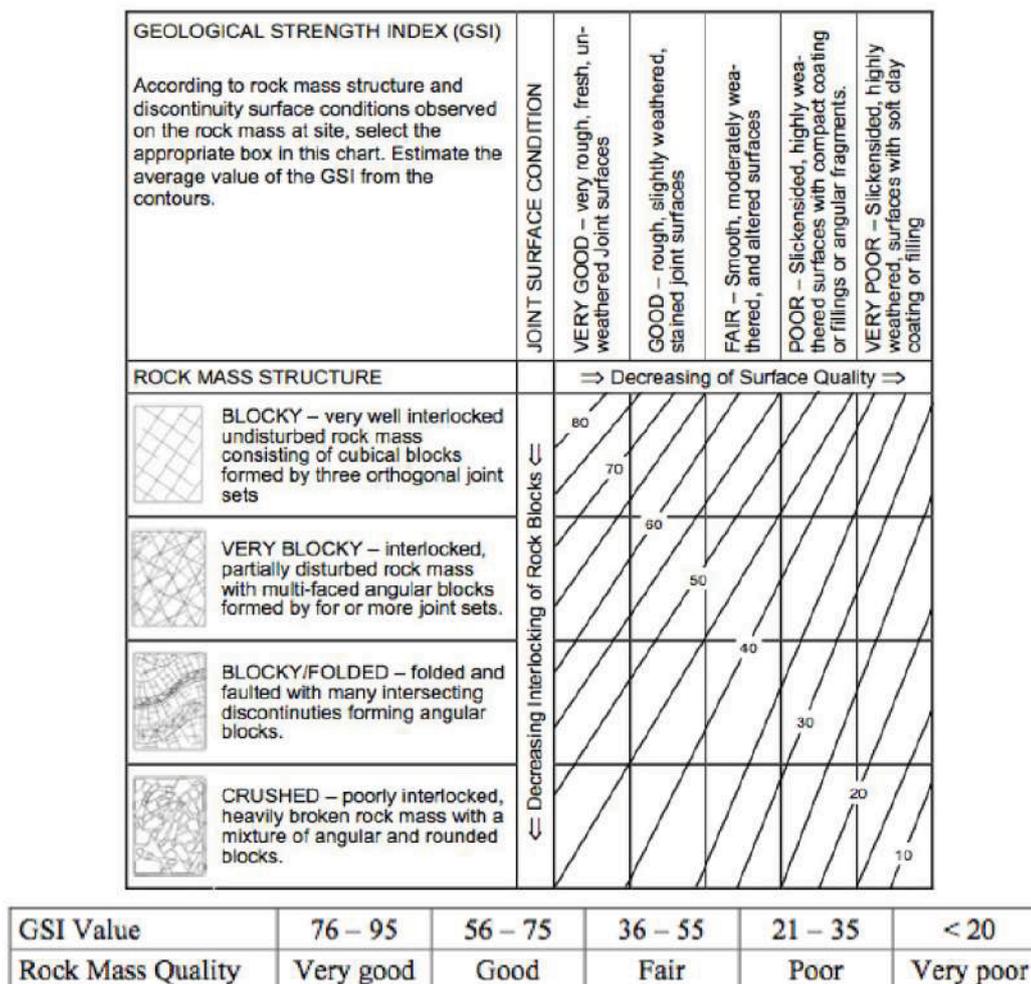


Figura 3 – Individuazione dell'indice GSI

Il GSI è ottenuto come somma di 5 indici parziali, stimati sulla base di:

- Resistenza a compressione uniaassiale, σ_c – Indice R₁;
- Indice di qualità, RQD (Rock Quality Designation) – Indice R₂;
- Spaziatura delle discontinuità, J_s – Indice R₃;
- Condizione delle discontinuità (persistenza, apertura, scabrezza, riempimento, alterazione delle pareti) – Indice R₄;
- Condizioni idrauliche – Indice R₅.

La tabella sotto riporta lo schema per la valutazione dei cinque indici a partire dai dati rilevati.

1. c_f (MPa)	> 200	200 ÷ 100	100 ÷ 50	50 ÷ 25	25 ÷ 10	10 ÷ 3	3 ÷ 1
Indice parziale	15	12	7	4	2	1	0
2. RQD (%)	100 ÷ 90	90 ÷ 75	75 ÷ 50	50 ÷ 25	< 25		
Indice parziale	20	17	13	8	3		
3. J_z (m)	> 3	3 ÷ 1	1 ÷ 0.3	0.3 ÷ 0.06	< 0.06		
Indice parziale	30	25	20	10	5		
4. Condizione delle discontinuità	Pareti molto scabre, giunti non continui, chiusi, roccia non alterata	Pareti poco scabre, apertura < 1 mm, roccia poco alterata	Pareti poco scabre, apertura < 1 mm, roccia molto alterata	Pareti laminate, riempimento < 5 mm, apertura 1 ÷ 5 mm, giunti continui	Riempimento mat. sciolto > 5 mm, apertura > 5 mm, giunti continui		
Indice parziale	25	20	12	6	0		
5. Condizioni idrauliche							
Indice parziale	10						

Figura 4 – Schema per la valutazione degli indici parziali A1 - A5

I dati necessari alla valutazione del GSI sono stati ricavati tramite rilievo geomeccanico di dettaglio in cassetta per il sondaggio *Sog_2019*. In particolare il detrito cementato è presente nel primo metro di sondaggio.

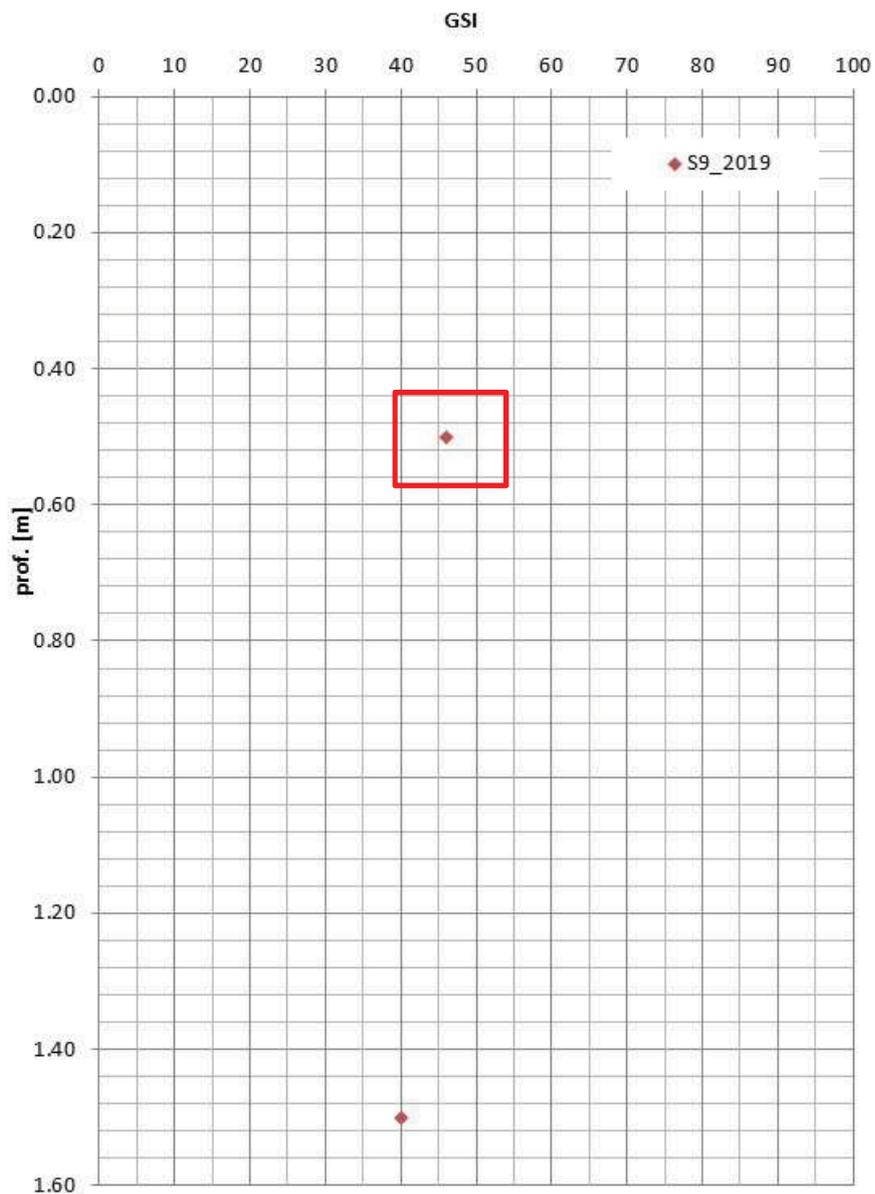


Figura 5 – GSI per sondaggio S9_2019

Per l'unità in esame si è stimato un valore di GSI:

$$\text{GSI} = 45$$

6.4 UNITÀ GEOTECNICA C – AMMASSO CALCAREO

La formazione di **Concesio** e la formazione denominata **Medolo** e costituiscono l'unità C.

Di seguito si riportano i valori dei parametri necessari per la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso.

E' importante sottolineare, che, ai fini del progetto delle opere che interessano l'unità C, si è scelto di definire degli intervalli di variabilità dei parametri che la caratterizzano. In questi intervalli, i valori di minimo si posizionano in prossimità dei minimi riscontrati tramite le prove delle campagne geognostiche. I valori massimi, invece, non coincidono con i valori massimi riscontrati tramite le prove, bensì con i valori medi. Di conseguenza, l'assunzione di parametri di progetto prossimi a questi ultimi possono comunque essere considerati accettabilmente cautelativi.

6.4.1 Modello di comportamento e involuppi di rottura

L'ammasso roccioso è schematizzato attraverso un mezzo continuo equivalente a comportamento isotropo. Tale assunzione risulta lecita essendo le dimensioni dei blocchi, individuati dai giunti e dalle discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso, piccole rispetto alle dimensioni della galleria.

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso si è fatto riferimento al criterio di rottura sviluppato da Hoek-Brown nella formulazione del 2002 (Hoek, Carranza, Torres et al.) nel quale la resistenza al taglio è rappresentata da un involuppo di rottura non lineare e fortemente curvilineo in presenza di bassi livelli tensionali.

Il criterio di rottura è definito dalla seguente relazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} (mb \sigma_3 / \sigma_1 + s)^a$$

con:

- σ_1, σ_3 tensioni principali effettive a rottura;
- mb costante di Hoek-Brown relativa all'ammasso roccioso;
- s ed a costanti dipendenti dalle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso;
- σ_{ci} resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

6.4.2 Peso dell'unità di volume

Il peso dell'unità di volume dell'unità C è assunto pari a 26 kN/m³.

6.4.3 Resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta

Mediante le prove di Compressione Uniassiale e Rottura a compressione tipo Point Load Test eseguite sui campioni lapidei prelevati durante le due campagne d'indagine, è stata ricavata la **resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta** dell'unità geotecnica in esame.

L'esito delle PLT è stato utilizzato solamente al fine di avere un termine di confronto qualitativo e non quantitativo, considerata la maggiore affidabilità delle prove di compressione diretta, uniassiale. I valori di resistenza a compressione ricavati dalle prove tipo PLT sono stimati ipotizzando un rapporto cautelativo tra la resistenza stessa e l'indice di punzonamento pari a 20, tarato tramite confronto con le prove di compressione uniassiale effettuate.

I risultati di tutte le prove sono riportati di seguito in tabelle e grafici di sintesi.

PROVE DI COMPRESSIONE MONOASSIALE		
Sondaggio	Distanza da boccaforo (m)	Resistenza a compressione [MPa]
S1h_2017	26.75	64.10
	51.75	106.00
	61.25	52.78
	66.80	104.64
	100.55	38.63
	112.65	154.97
	119.30	51.32
S2h_2017	41.50	66.20
	45.80	26.33
	48.85	68.30
	51.85	82.90
	57.65	69.20
	61.70	29.40
S3in_2017	47.40	60.60
	53.80	30.30
	58.40	38.50
	77.60	39.11
S4in_2017	110.65	33.25
S5_2017	71.60	38.84
	81.15	112.00
	86.15	46.86
	90.50	69.20
S10_2019	15.60	46.80
S7h_2019	1.45	63.83
	9.75	36.50
S2_2019	1.15	42.80
S4_2019	1.90	73.13
S5_2019	1.60	39.90
S6_2019	2.60	43.30
S8_2019	1.60	47.25

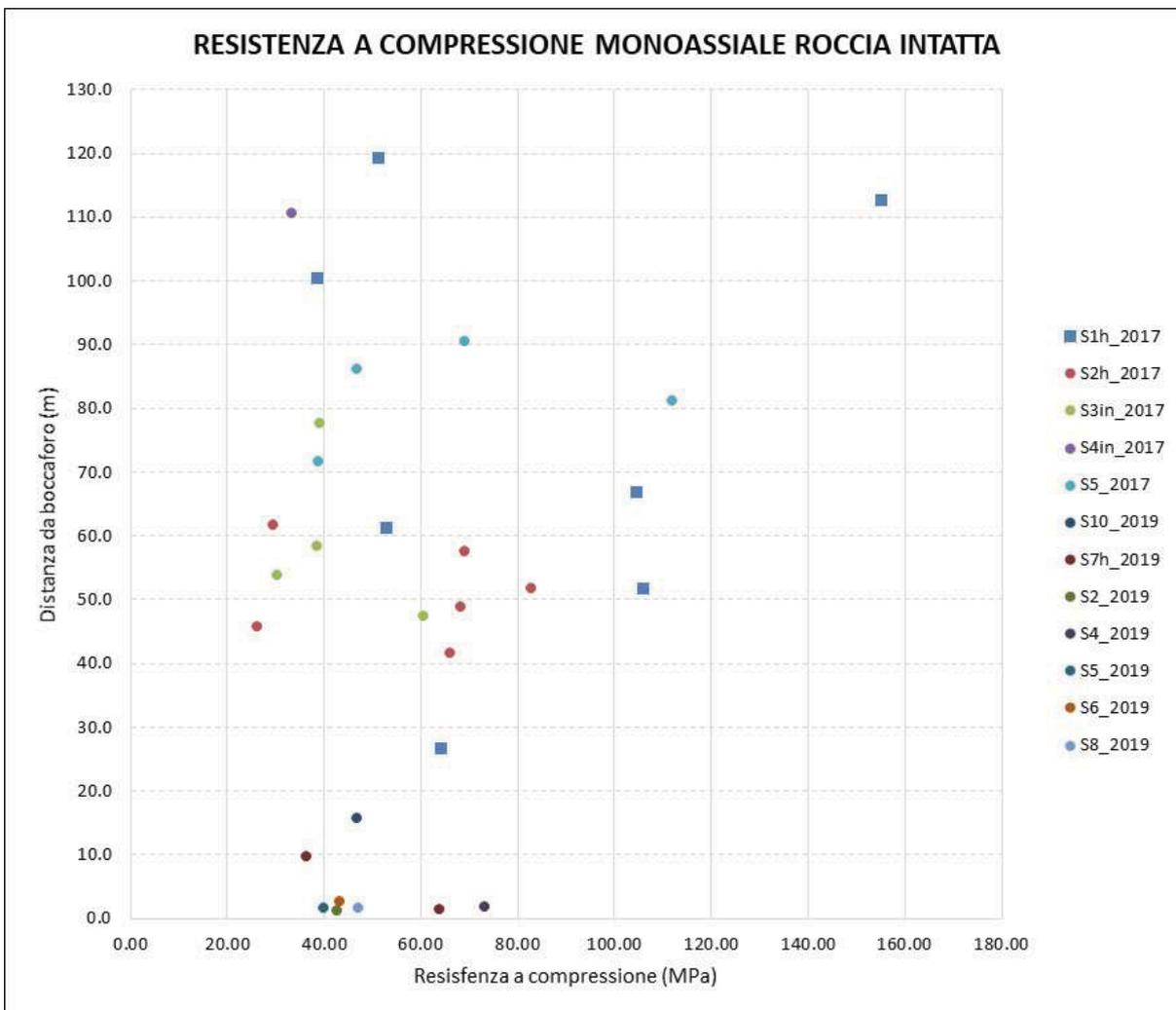


Figura 6 – Resistenza a compressione della roccia intatta ricavata da prove a COMPRESSIONE MONOASSIALE

POINT LOAD TEST			
Sondaggio	Distanza da boccaforo (m)	Indice di Punzonamento [MPa]	Resistenza a compressione stimata (*) [MPa]
S1h_2017	20.85	0.10	2.00
	41.60	0.27	5.40
	86.15	0.06	1.20
	94.10	0.09	1.80
S2h_2017	40.15	8.96	179.20
	66.60	4.11	82.20
S3in_2017	43.25	7.38	147.60
	61.30	2.19	43.80
	66.70	3.43	68.60
	71.10	4.10	82.00
S4in_2017	86.30	1.19	23.80
	92.50	4.29	85.80
	114.10	3.58	71.60
	122.10	5.13	102.60
S5_2017	61.15	4.75	95.00
	79.70	11.13	222.60
	95.50	5.01	100.20
S10_2019	15.60	2.10	42.00
	15.90	2.60	52.00
S7h_2019	1.45	2.20	44.00
	9.75	1.50	30.00

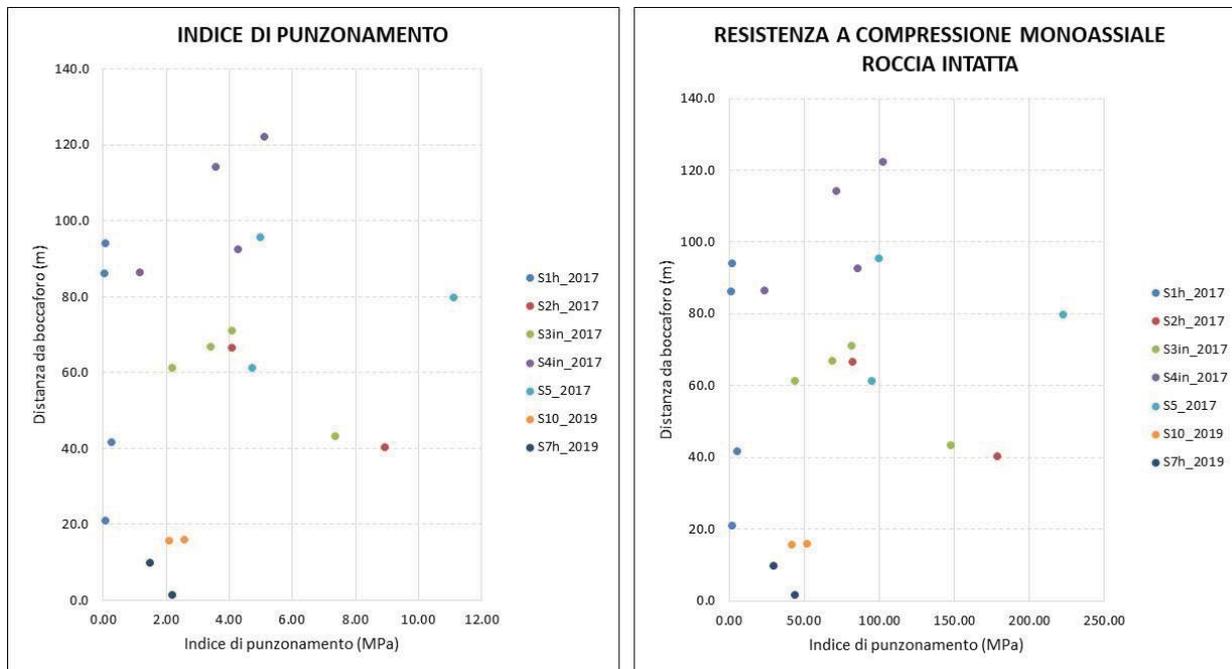


Figura 7 – Resistenza a compressione della roccia intatta ricavata da prove tipo POINT LOAD TEST

Come si può osservare, la resistenza ricavata dalle prove a compressione uniassiale varia tra i 30-35 MPa e i 105-110 MPa (escludendo il valore massimo isolato dove si raggiungono i 155 MPa). La maggior parte dei valori si addensa in una fascia a cavallo dei 50 MPa.

Per l'unità in esame si assume il seguente intervallo:

$$\sigma_c = 30 \div 60 \text{ MPa}$$

6.4.4 GSI

Il GSI (Geological Strength Index), è un indice che caratterizza la qualità intrinseca dell'ammasso roccioso, ovvero la qualità dell'ammasso indipendentemente dalla specifica opera da realizzare.

La Tabella sotto indica la variabilità dell'indice GSI in funzione della qualità dell'ammasso.

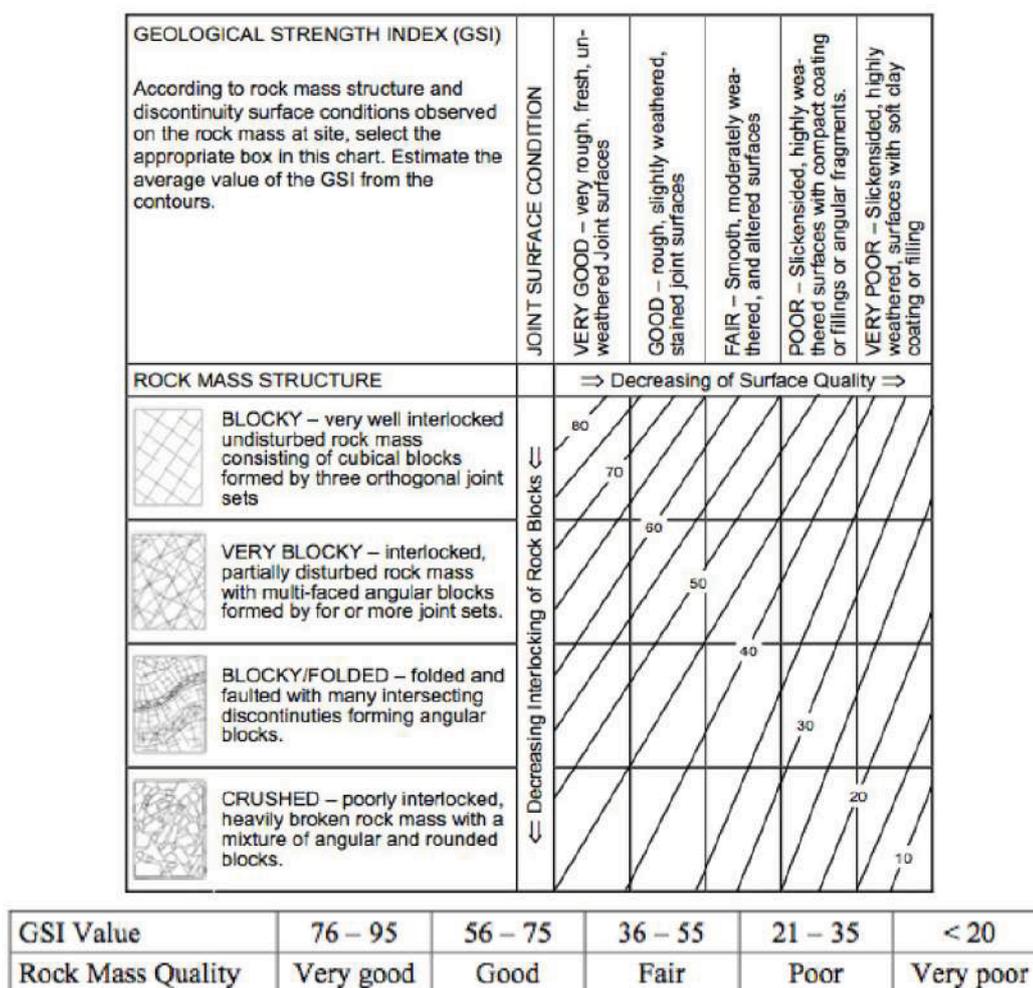


Figura 8 – Individuazione dell'indice GSI

Il GSI è ottenuto come somma di 5 indici parziali, stimati sulla base di:

- Resistenza a compressione uniassiale, σ_c – Indice R1;
- Indice di qualità, ROD (Rock Quality Designation) – Indice R2;
- Spaziatura delle discontinuità, J_s – Indice R3;
- Condizione delle discontinuità (persistenza, apertura, scabrezza, riempimento, alterazione delle pareti) – Indice R4;
- Condizioni idrauliche – Indice R5.

La tabella sotto riporta lo schema per la valutazione dei cinque indici a partire dai dati rilevati.

1. σ_c (MPa)	> 200	200 ÷ 100	100 ÷ 50	50 ÷ 25	25 ÷ 10	10 ÷ 3	3 ÷ 1
Indice parziale	15	12	7	4	2	1	0
2. ROD (%)	100 ÷ 90	90 ÷ 75	75 ÷ 50	50 ÷ 25	< 25		
Indice parziale	20	17	13	8	3		
3. J_s (m)	> 3	3 ÷ 1	1 ÷ 0,3	0,3 ÷ 0,06	< 0,06		
Indice parziale	30	25	20	10	5		
4. Condizione delle discontinuità	Pareti molto scabre, giunti non continui, chiusi, roccia non alterata	Pareti poco scabre, apertura < 1 mm, roccia poco alterata	Pareti poco scabre, apertura < 1 mm, roccia molto alterata	Pareti laminate, riempimento < 5 mm, apertura 1 ÷ 5 mm, giunti continui	Riempimento mat. sciolto > 5 mm, apertura > 5 mm, giunti continui		
Indice parziale	25	20	12	6	0		
5. Condizioni idrauliche							
Indice parziale	10						

Figura 9 – Schema per la valutazione degli indici parziali A1 - A5

I dati necessari alla valutazione del GSI sono stati ricavati tramite rilievo geomeccanico di dettaglio in cassetta per ciascun sondaggio e tramite rilievi areali su ammassi affioranti.

Nei grafici sotto sono riportate le distribuzioni dei GSI stimati tramite rilievo di cassetta.

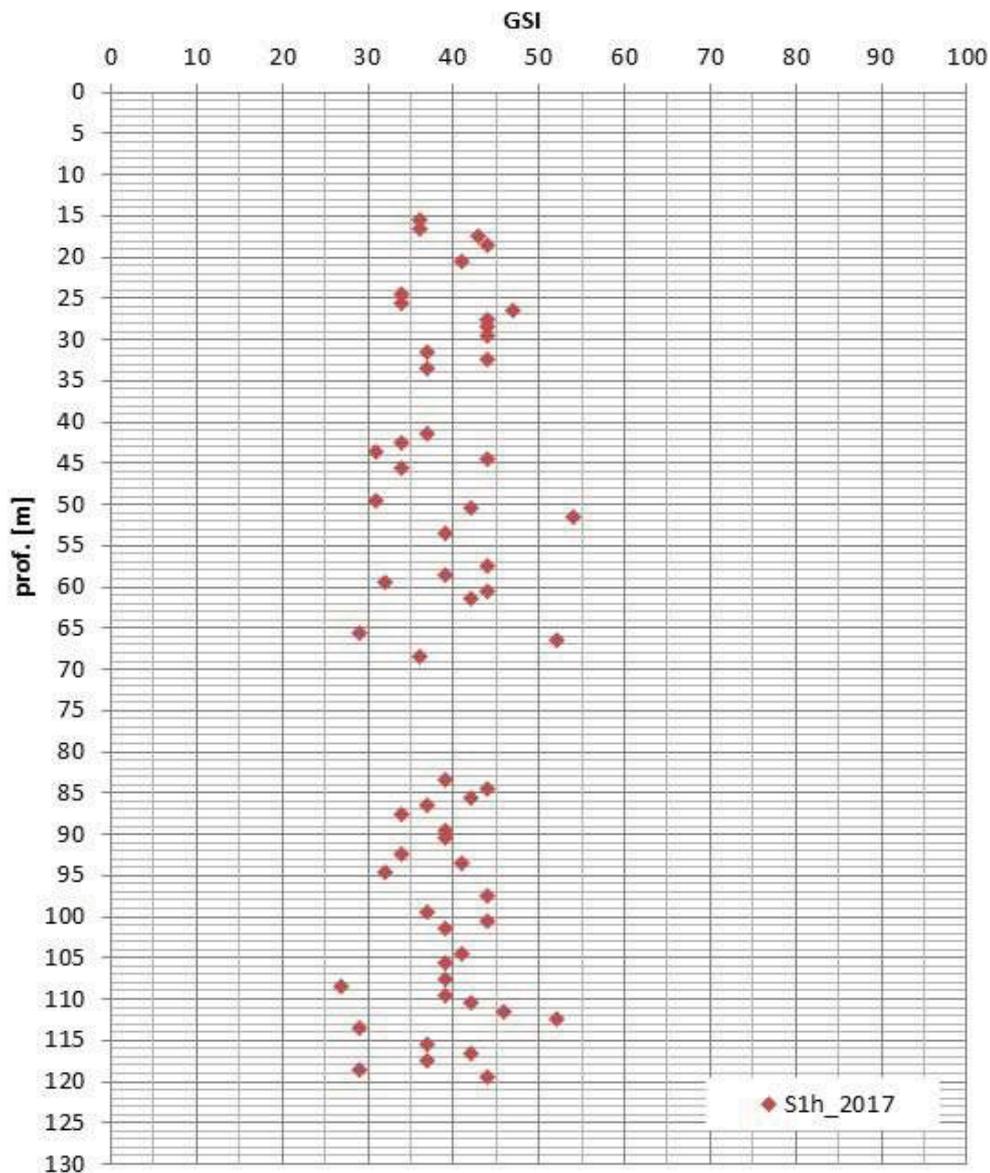


Figura 10 – GSI per sondaggio S1h_2017

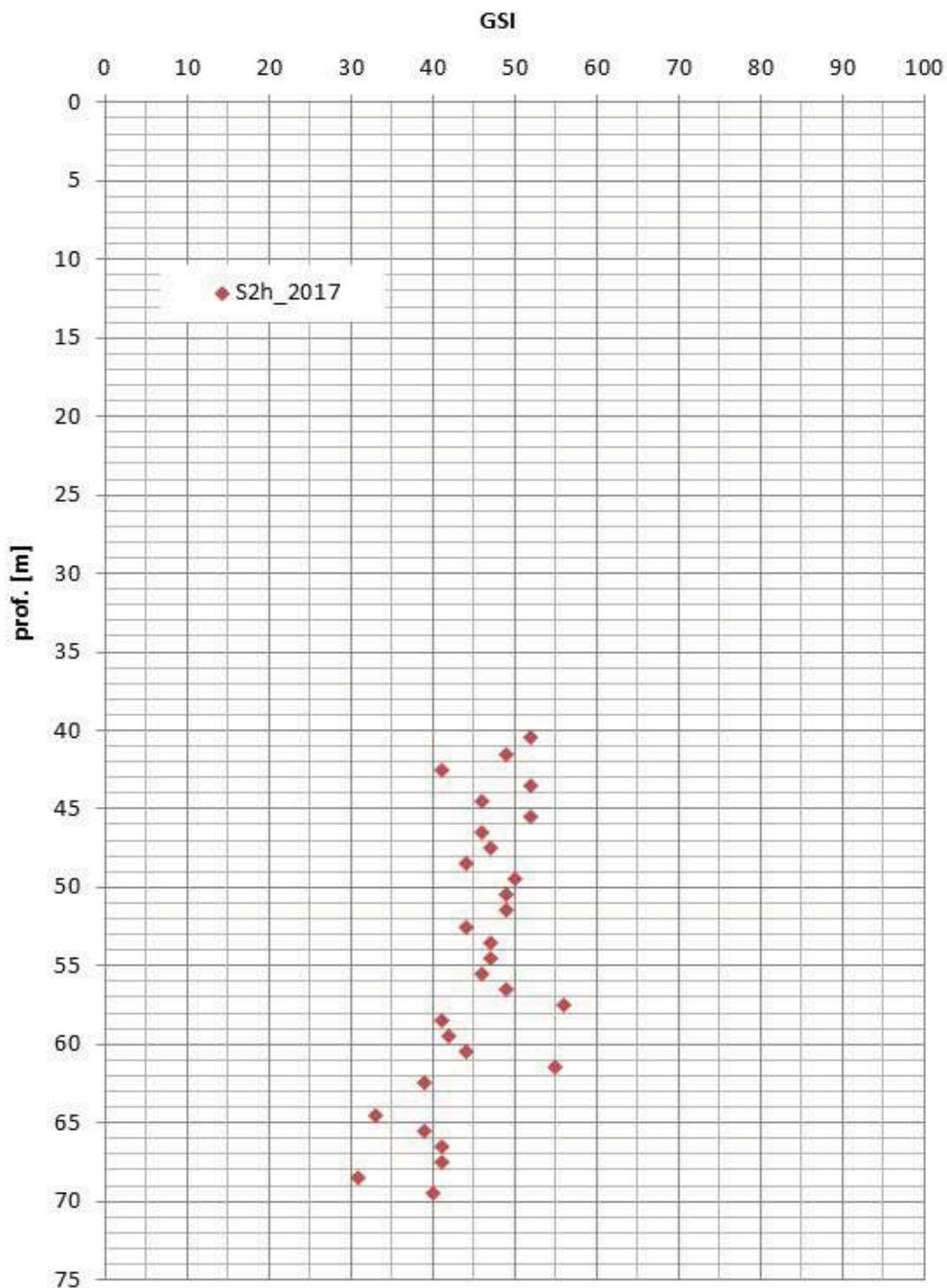


Figura 11 – GSI per sondaggio S2h_2017

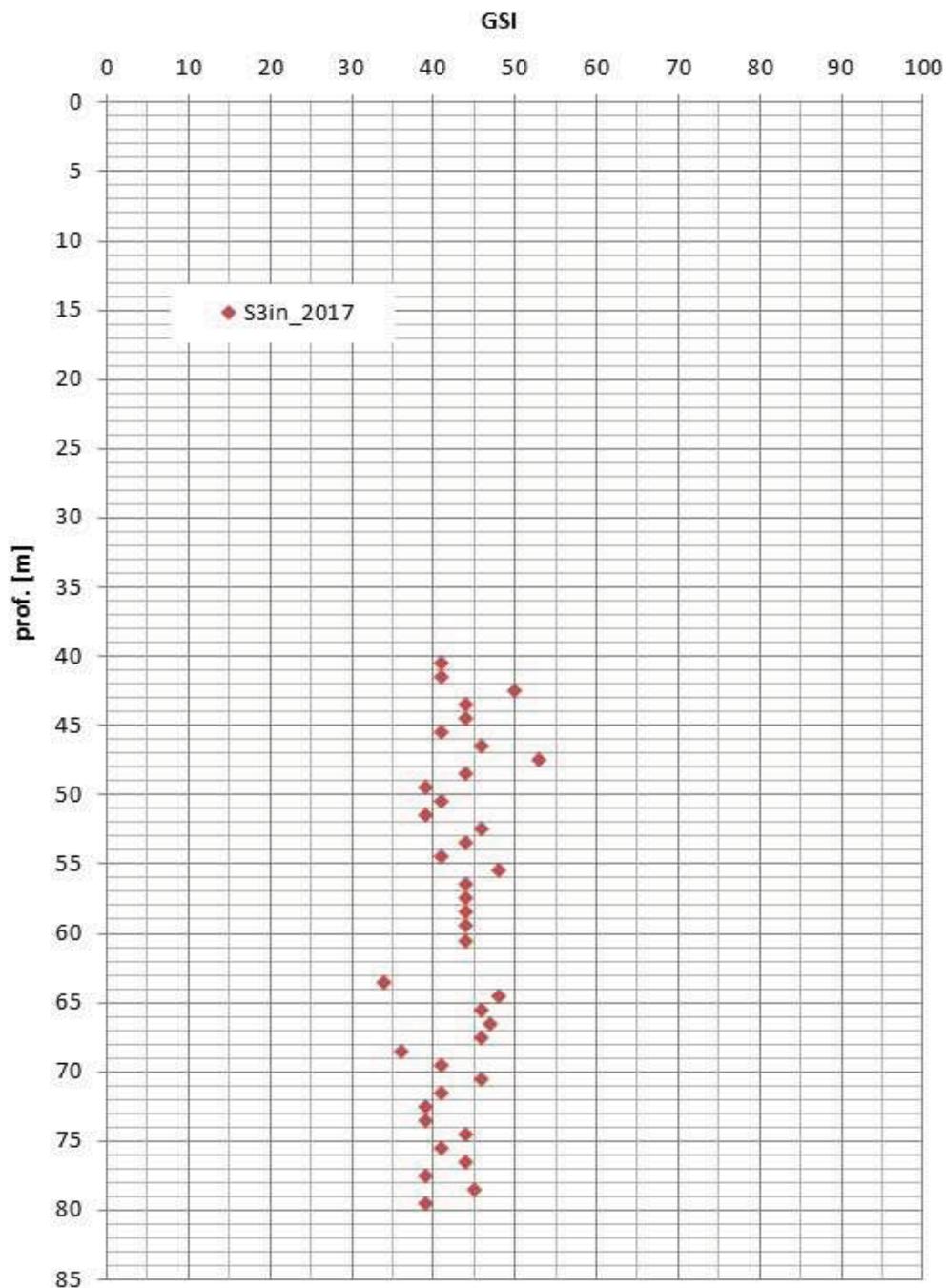


Figura 12 – GSI per sondaggio S3in_2017

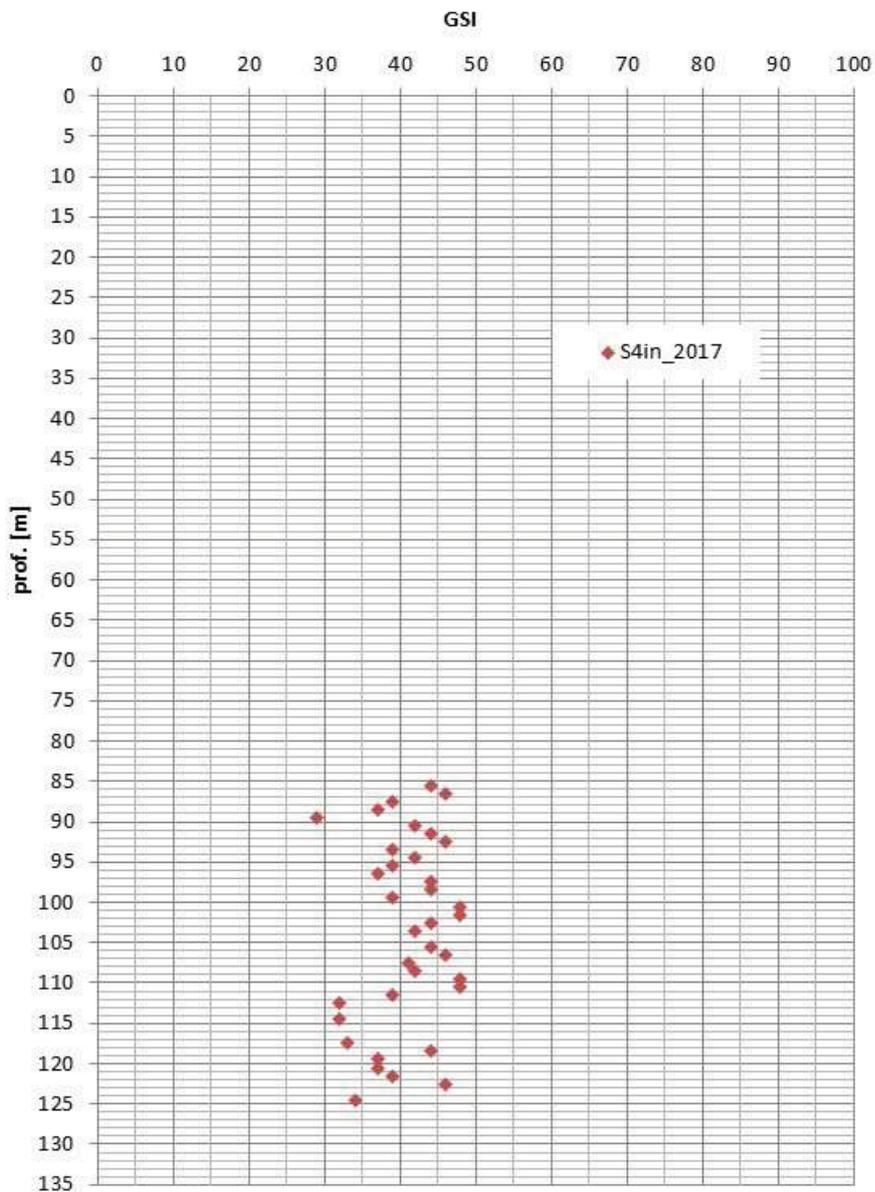


Figura 13 – GSI per sondaggio S4in_2017

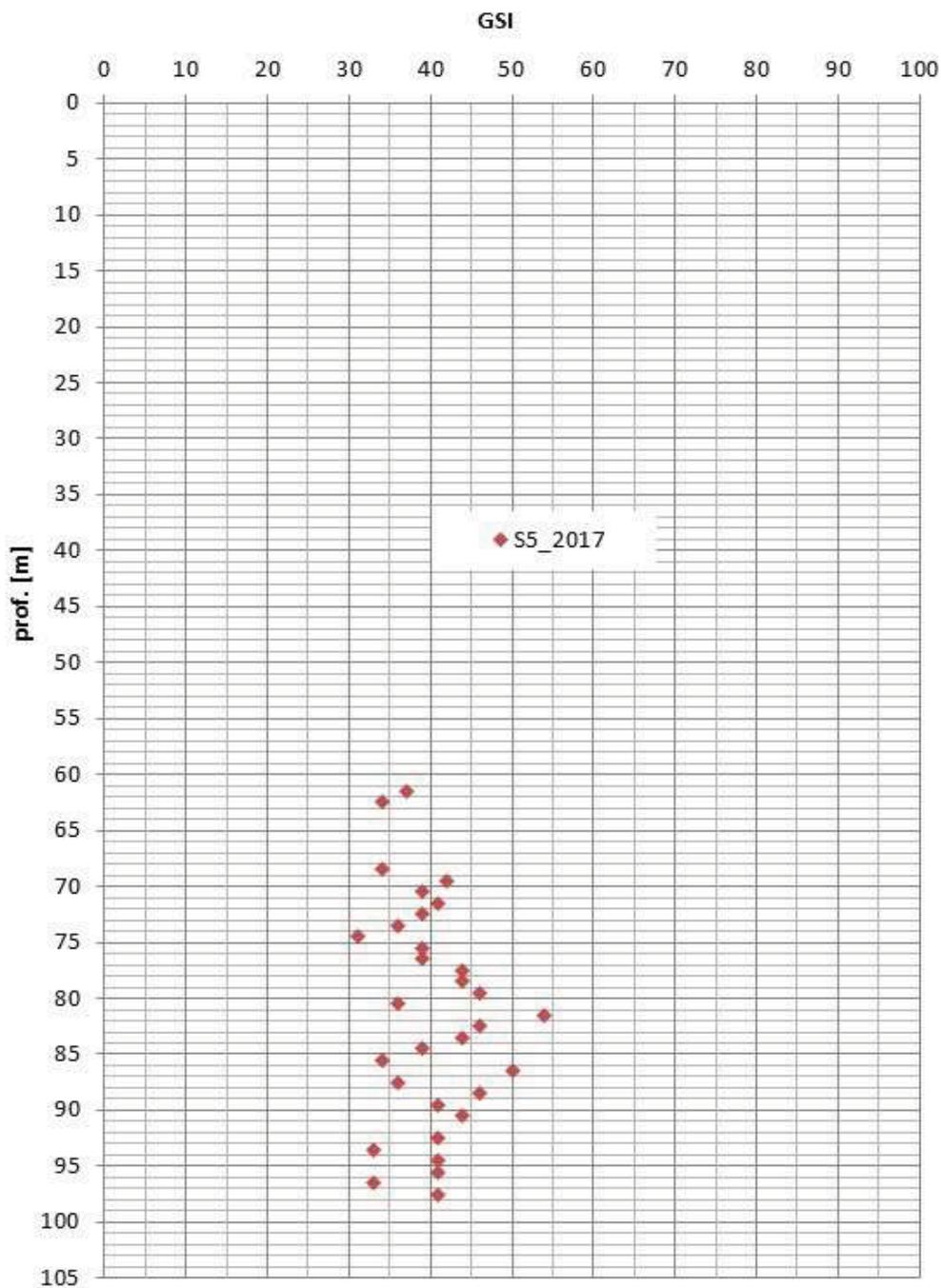


Figura 14 – GSI per sondaggio S5_2017

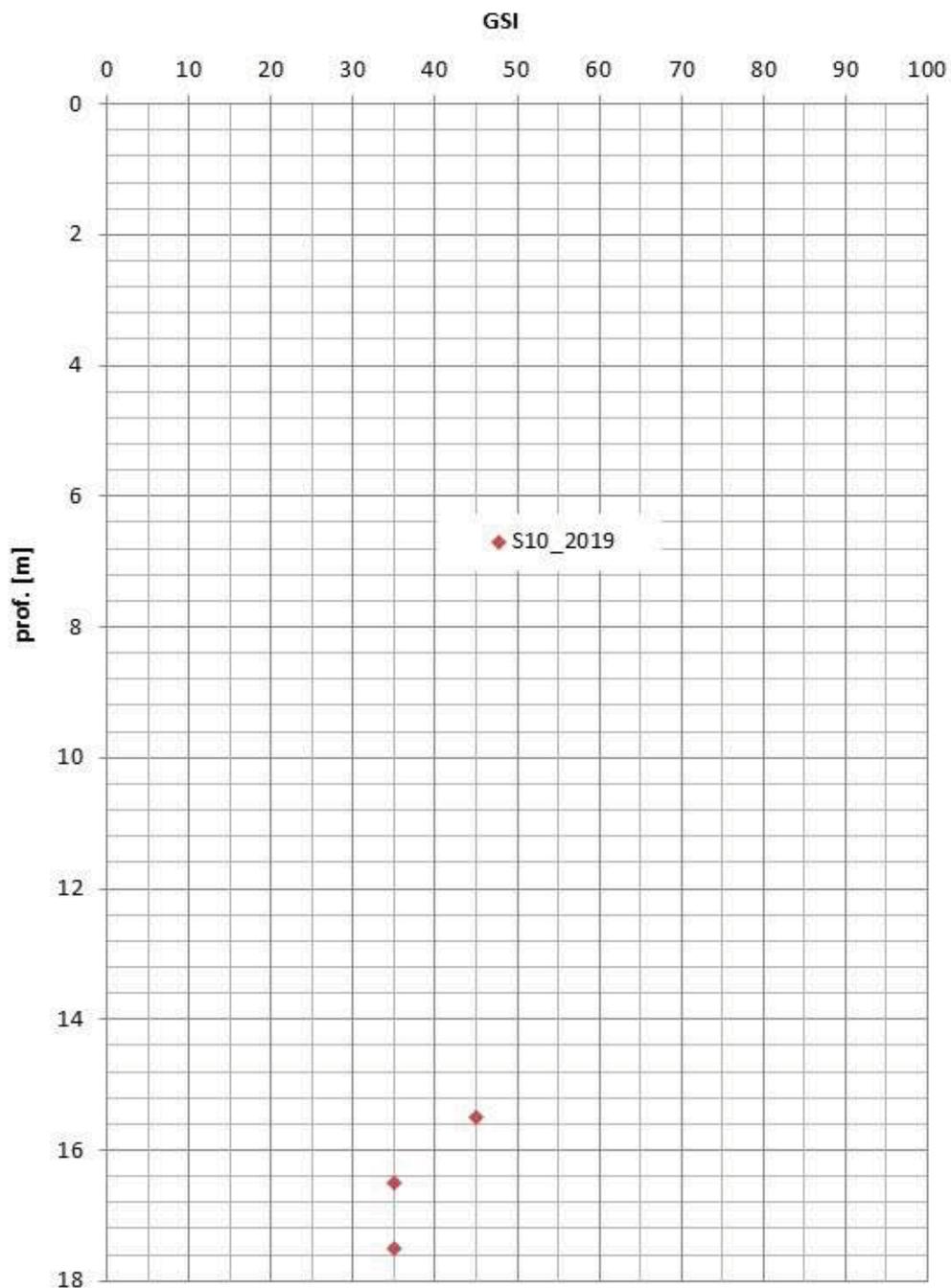


Figura 15 – GSI per sondaggio S10_2019

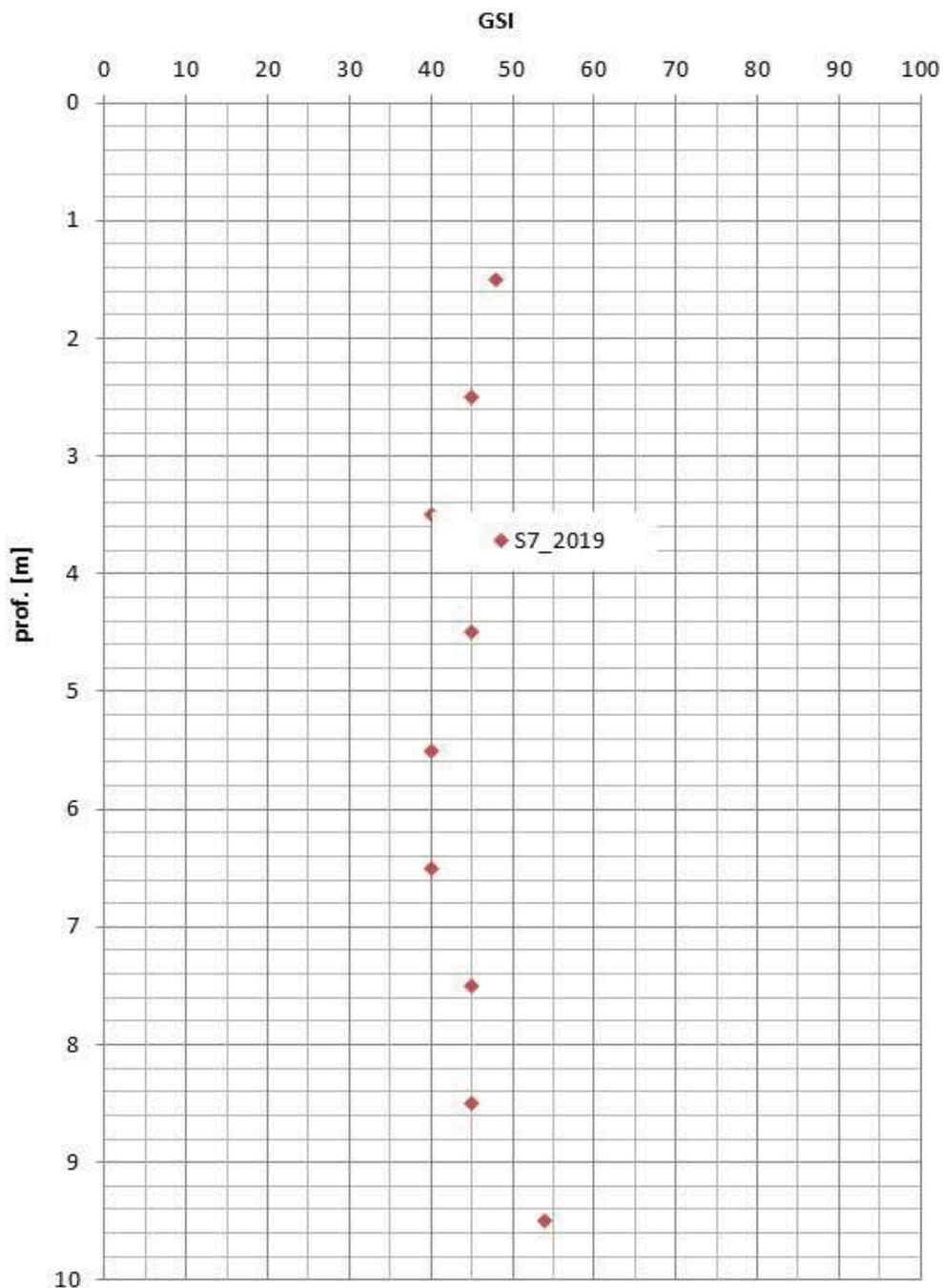


Figura 16 – GSI per sondaggio S7_2019

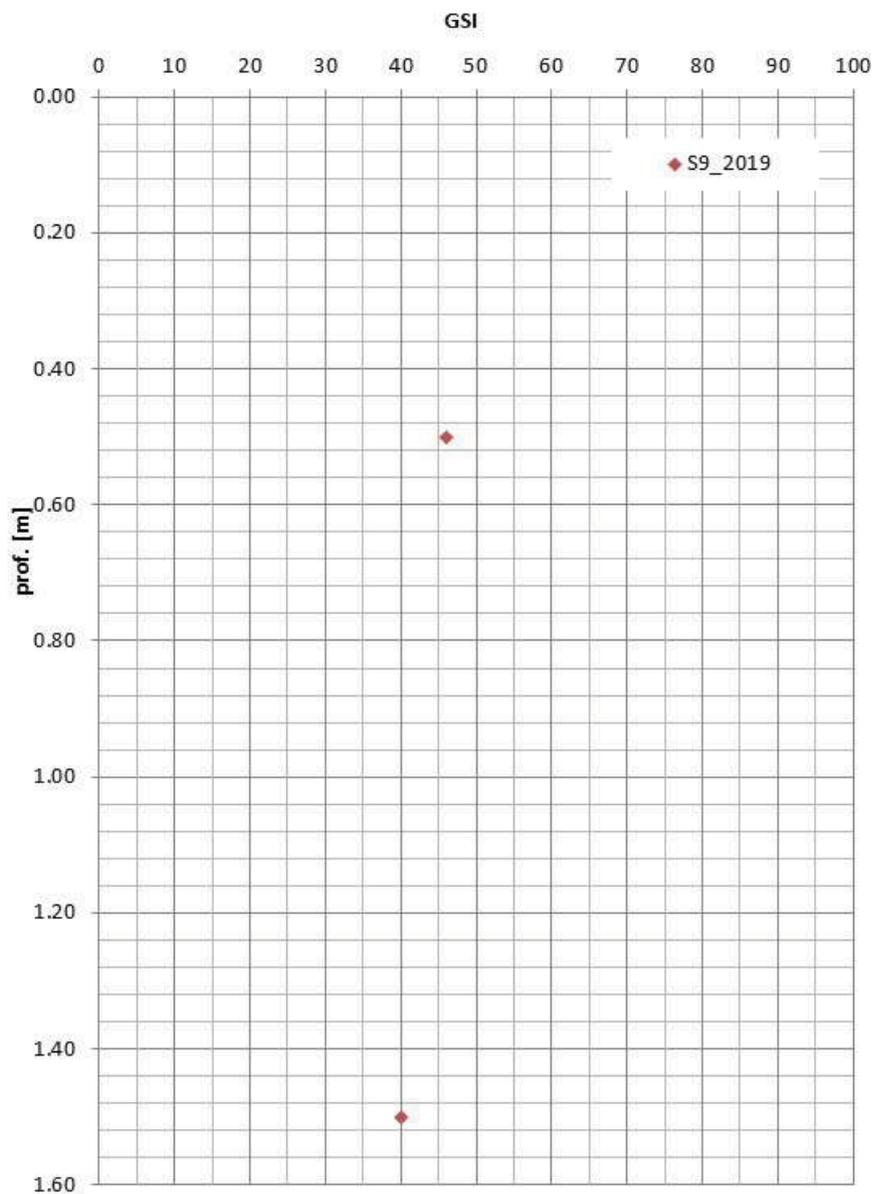


Figura 17 – GSI per sondaggio S9_2019

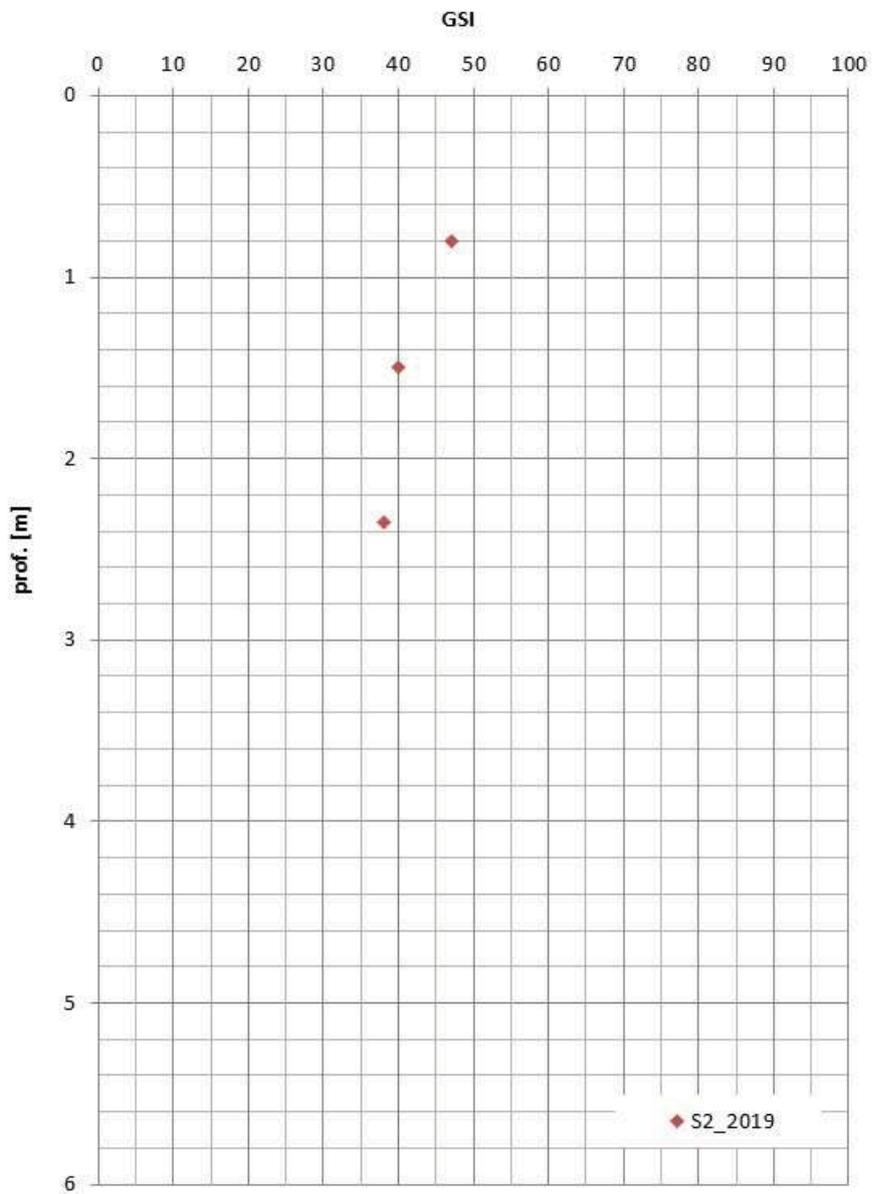


Figura 18 – GSI per sondaggio S2_2019

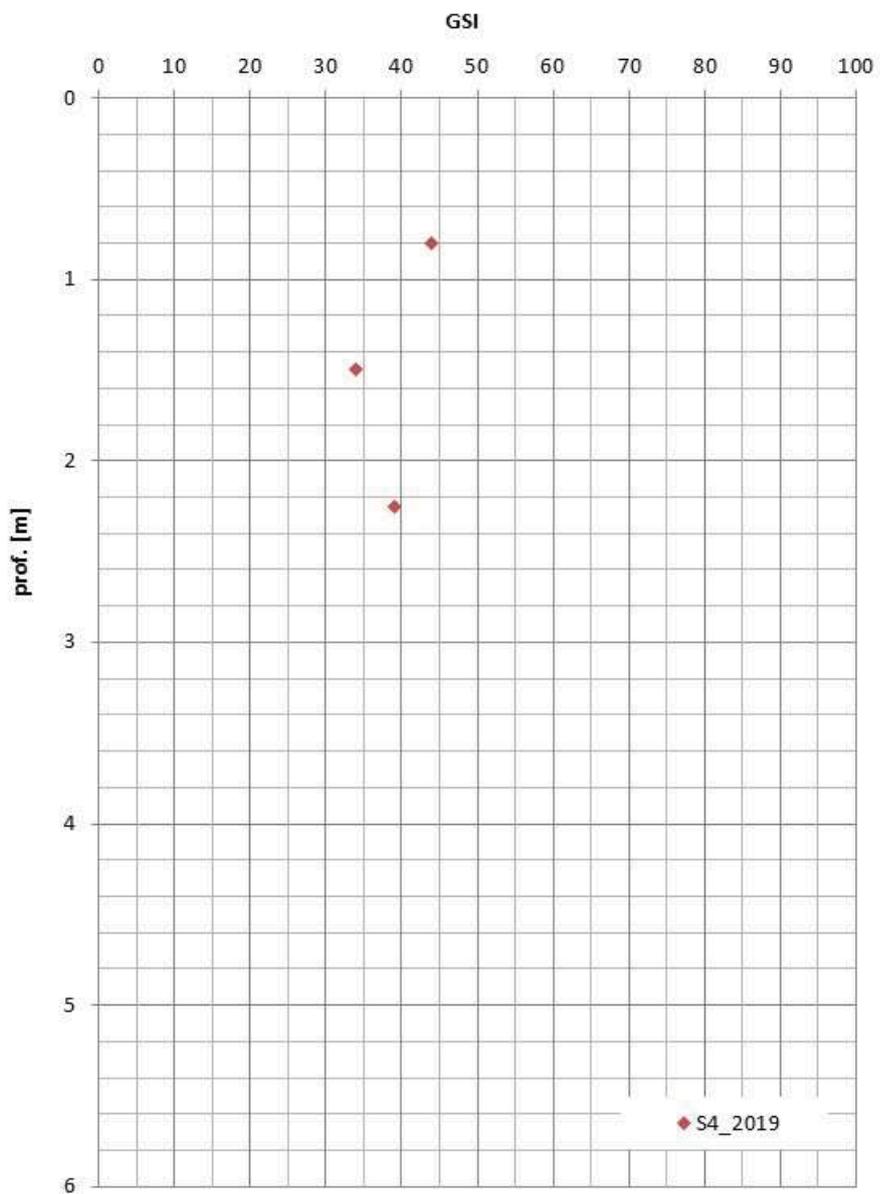


Figura 19 – GSI per sondaggio S4_2019

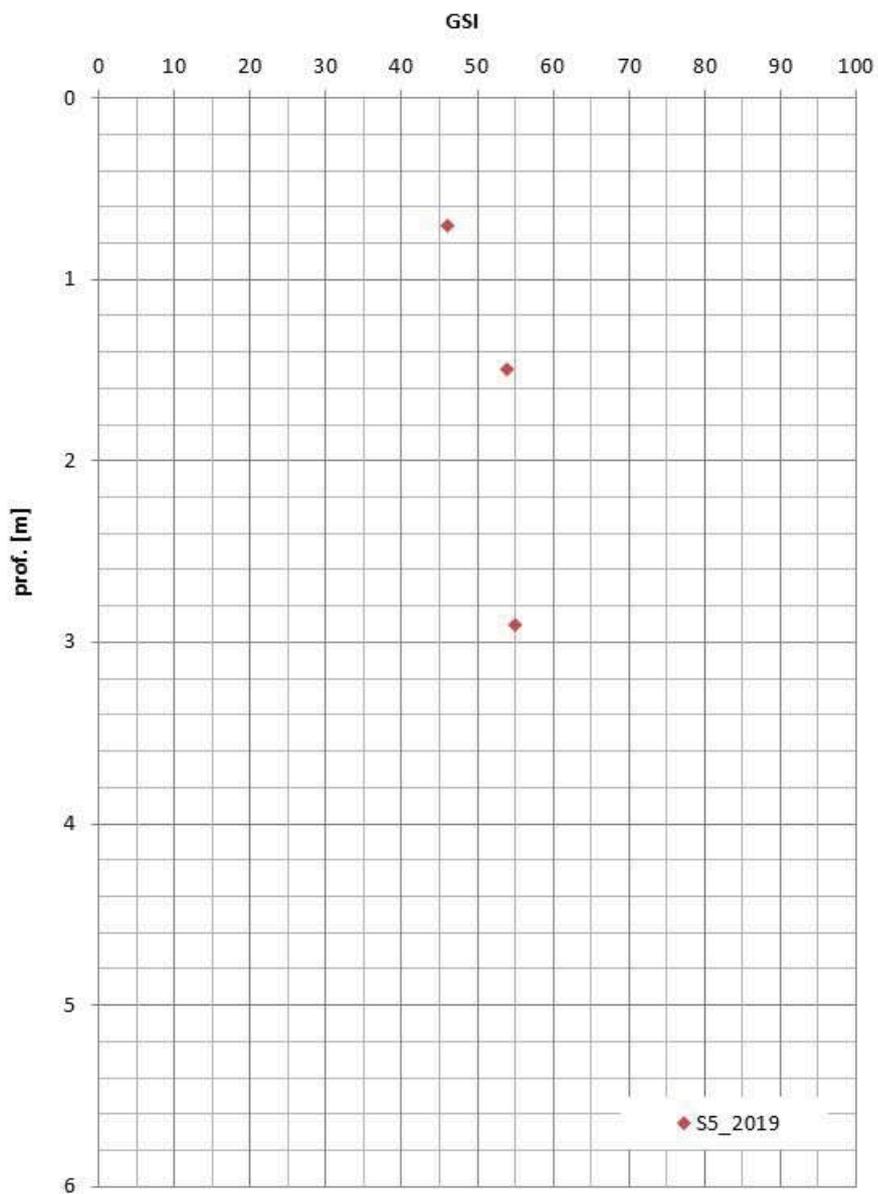


Figura 20 – GSI per sondaggio S5_2019

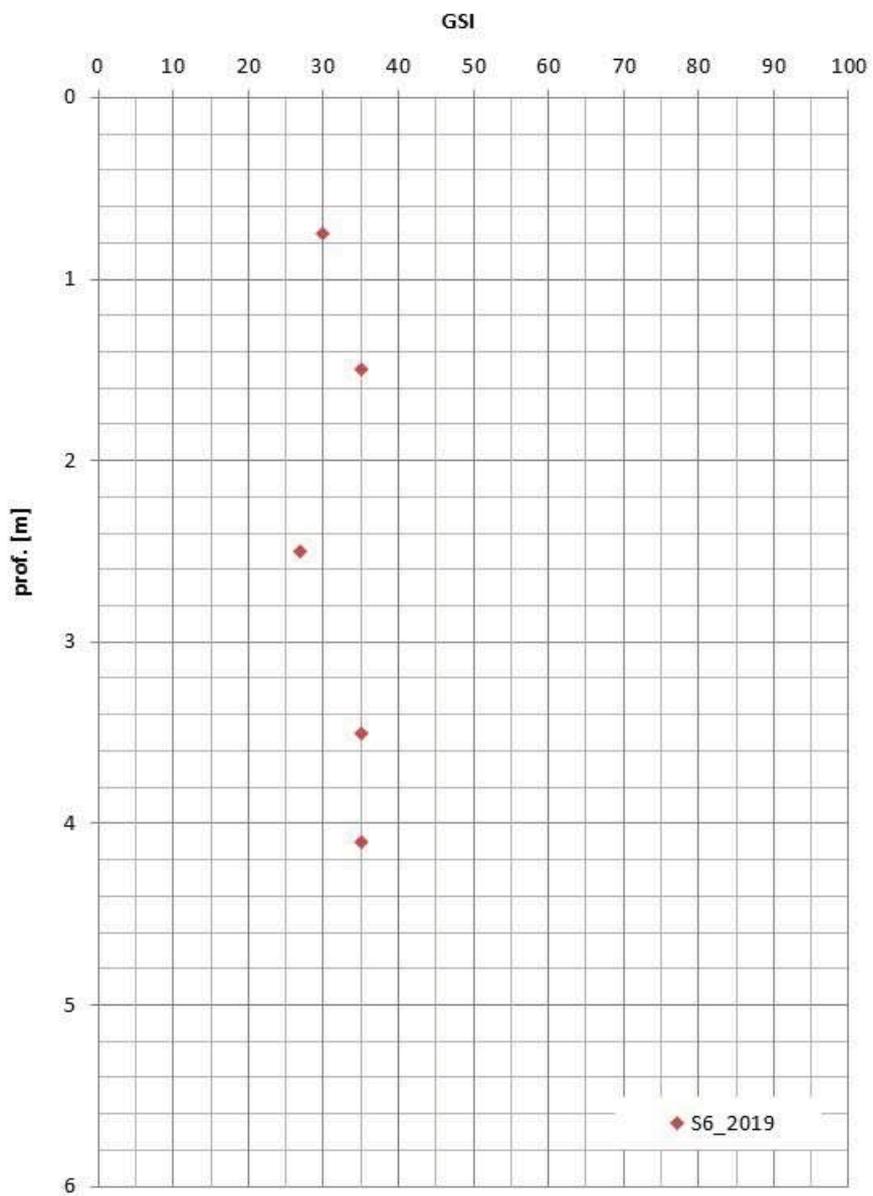


Figura 21 – GSI per sondaggio S6_2019

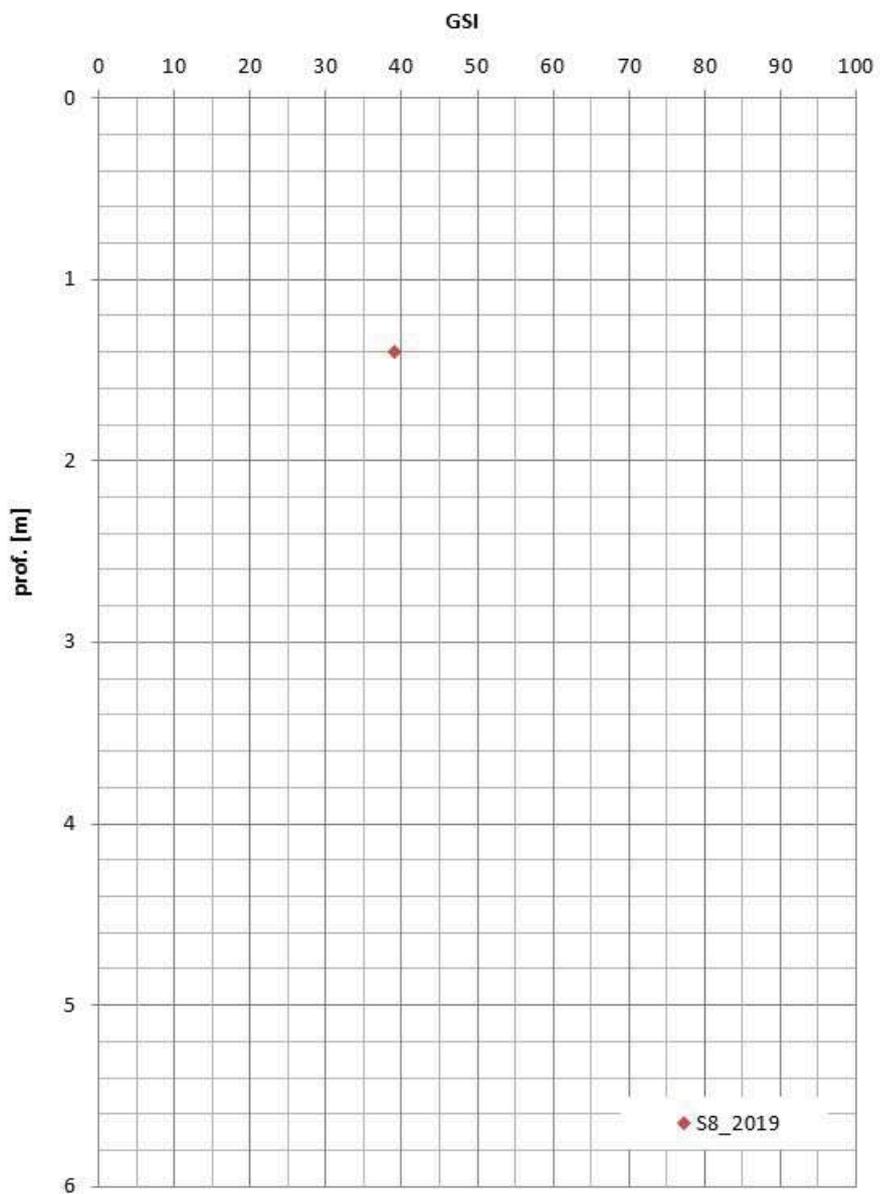


Figura 22 – GSI per sondaggio S8_2019

Nella tabella di seguito si riporta una sintesi dei valori notevoli (valore minimo, valore medio e valore massimo) dei valori stimati per i GSI per tutti i sondaggi.

Sondaggio	Orientazione sondaggio	Ubicazione sondaggio	GSI minimo	GSI massimo	GSI medio
S1h_2017	Orizzontale	IMBOCCO SUD	29	54	39
S2h_2017	Orizzontale	CORPO GALLERIA	31	56	45
S3in_2017	Inclinato	CORPO GALLERIA	34	53	43
S4in_2017	Inclinato	CORPO GALLERIA	29	48	41
S5_2017	Verticale	IMBOCCO NORD	27	54	39
S10_2019	Verticale	IMBOCCO SUD	35	45	40
S7_2019	Orizzontale	IMBOCCO NORD	40	54	45
S9_2019	Orizzontale	IMBOCCO NORD	40	46	43
S2_2019	Orizzontale	CORPO GALLERIA	38	47	42
S4_2019	Orizzontale	CORPO GALLERIA	34	44	38
S5_2019	Orizzontale	CORPO GALLERIA	46	55	52
S6_2019	Orizzontale	CORPO GALLERIA	27	35	31
S8_2019	Subverticale	CORPO GALLERIA	39	39	39

Nella campagna di indagini 2019 sono inoltre stati condotti 3 rilievi areali su ammassi rocciosi affioranti dai quali sono stati ricavati i seguenti valori di GSI:

Rilievo areale	Ubicazione rilievo	GSI stimato
Rilievo 01	CORPO GALLERIA	60
Rilievo 02	IMBOCCO NORD	60-65
Rilievo 03	CORPO GALLERIA	45-50

I valori riportati sono più alti di quelli ricavati dai sondaggi e pertanto possono essere considerati limiti superiori.

Le distribuzioni di GSI calcolati e stimati si presentano piuttosto omogenee sia lungo lo sviluppo della galleria che al variare della profondità.

La maggior parte dei valori si addensa in una fascia intorno a 40, considerato rappresentativo dell'intera unità.

Per l'unità in esame si assume il seguente intervallo:

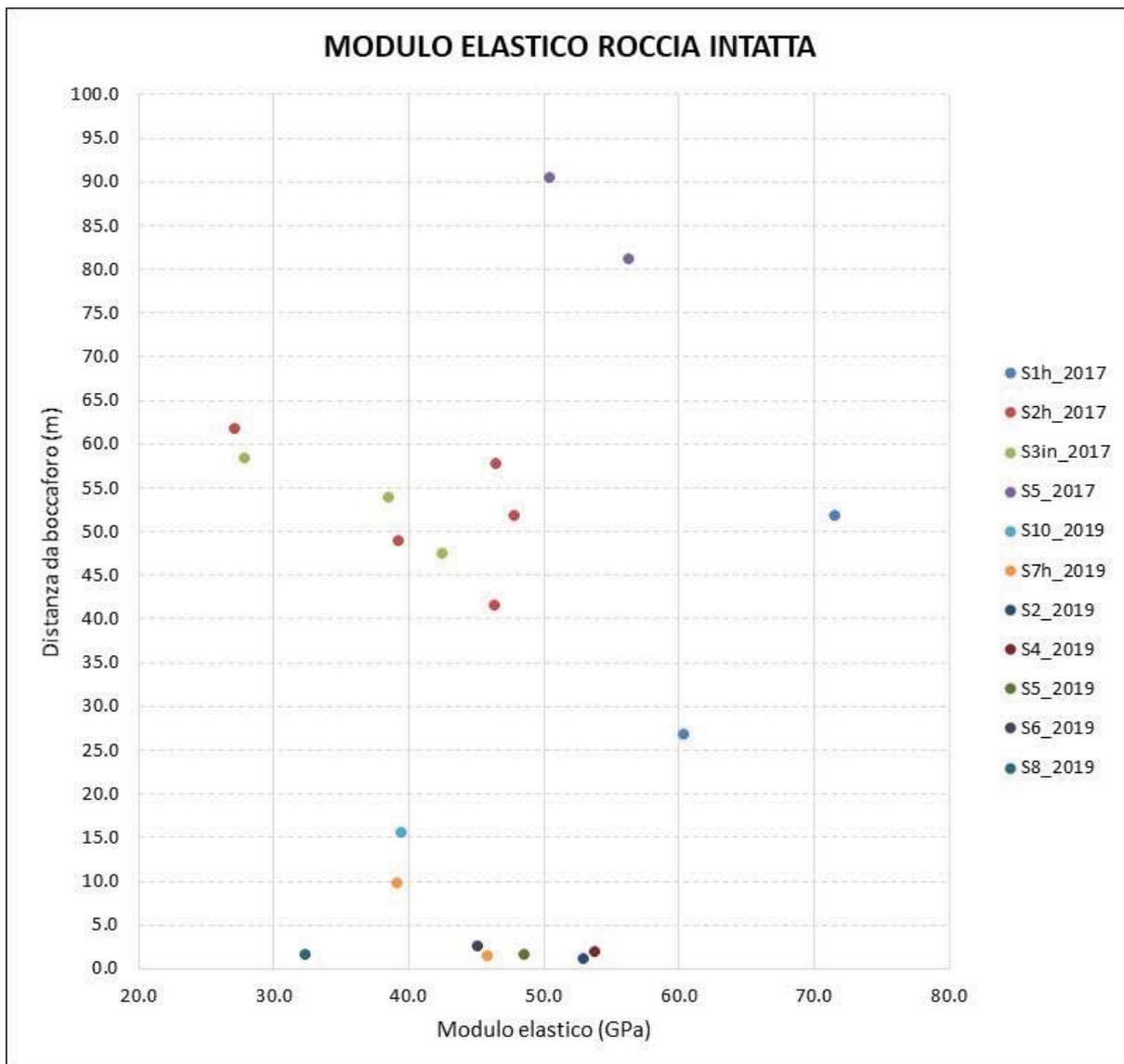
$$GSI = 27 \div 45$$

6.4.5 Rigidezza

6.4.5.1 Rigidezza della roccia intatta

Per quanto riguarda la **rigidezza della roccia intatta**, si è fatto riferimento alle prove di compressione monoassiale sugli spezzoni di roccia normalizzati che hanno fornito i seguenti valori di moduli elastici.

PROVE DI COMPRESSIONE MONOASSIALE			
Sondaggio	Distanza da boccaforno (m)	Modulo elastico [MPa]	Modulo elastico [GPa]
S1h_2017	26.75	60396	60.4
	51.75	71526	71.5
S2h_2017	41.50	46404	46.4
	48.85	39259	39.3
	51.85	47870	47.9
	57.65	46489	46.5
	61.70	27136	27.1
S3in_2017	47.40	42460	42.5
	53.80	38568	38.6
	58.40	27862	27.9
S5_2017	81.15	56247	56.2
	90.50	50469	50.5
S10_2019	15.60	39469	39.5
S7h_2019	1.45	45805	45.8
S7h_2019	9.75	39180	39.2
S2_2019	1.15	53004	53.0
S4_2019	1.90	53776	53.8
S5_2019	1.60	48568	48.6
S6_2019	2.60	45064	45.1
S8_2019	1.60	32411	32.4



Per l'unità in esame si assume il seguente intervallo per il valore di modulo elastico della roccia intatta:

$$E_i = 27 \div 50 \text{ GPa}$$

6.4.5.2 Rigidezza ad ampia scala

Nell'ambito delle campagne di indagine sono state condotte anche prove dilatometriche e prove sismiche (rifrazione e Down-Hole), che hanno fornito indicazioni sulla rigidezza dell'ammasso a una scala più ampia rispetto a quella interessata dalle prove di schiacciamento sui provini.

Le **prove dilatometriche** sono 6 e state tutte condotte all'interno del foro di sondaggio orizzontale S1h di campagna 2017 in corrispondenza dell'imbocco SUD.

Di seguito la distribuzione dei valori di modulo elastico in funzione della distanza da boccaforo.

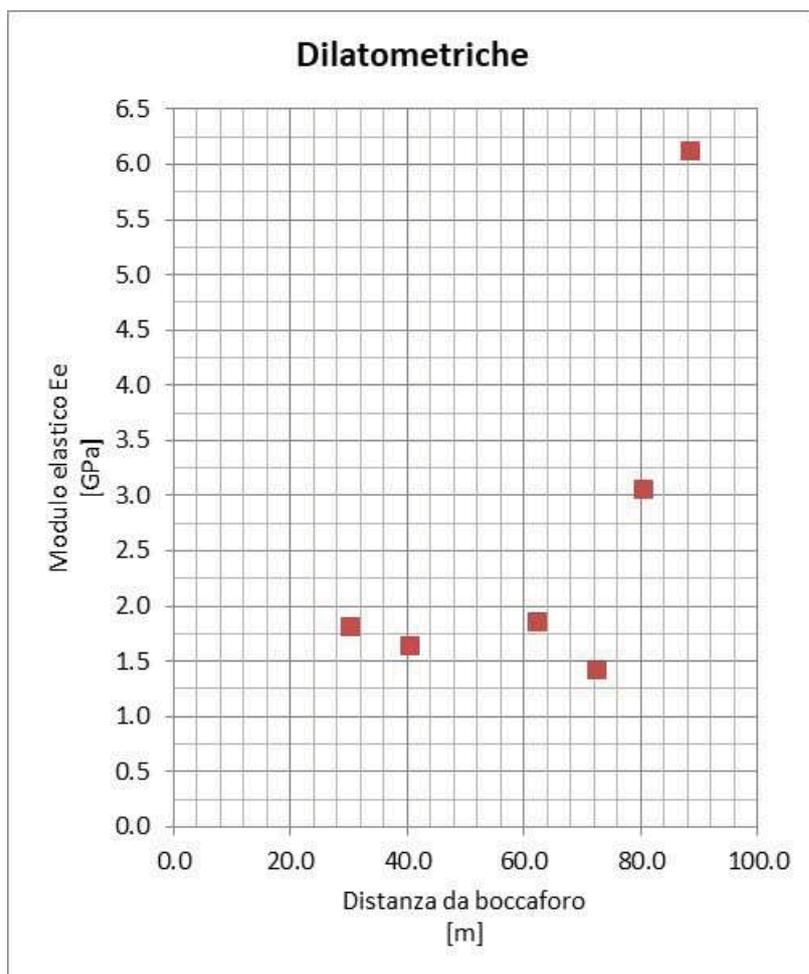


Figura 23 – Moduli elastici desunti dalle prove dilatometriche nel sondaggio S1h_2017

Le prove sismiche di riferimento sono quelle condotte nell'ambito della campagna 2019. Nel dettaglio si hanno 2 linee con sismica a rifrazione agli imbocchi e una Down-Hole all'interno del sondaggio S10 in prossimità dell'imbocco sud.

Nelle figure di seguito si riportano le distribuzioni delle velocità Vs ricavate dalle sismiche a rifrazione.

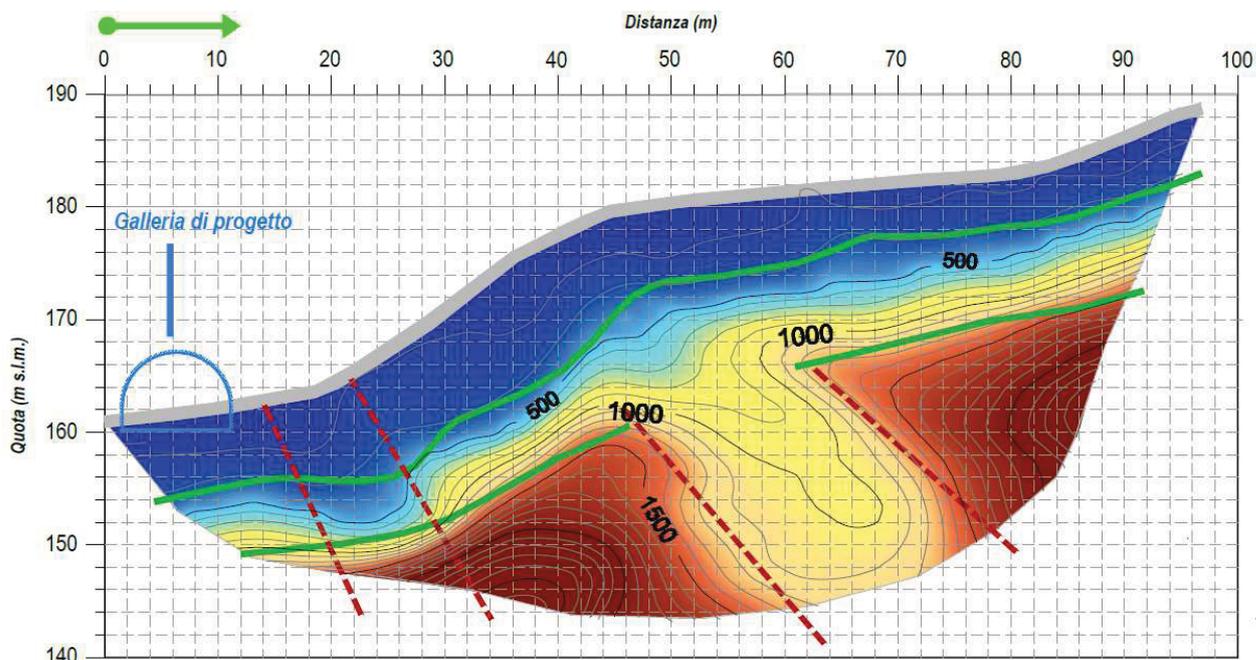


Figura 24 – Distribuzione velocità Vs in corrispondenza della linea L1, all'imbocco SUD

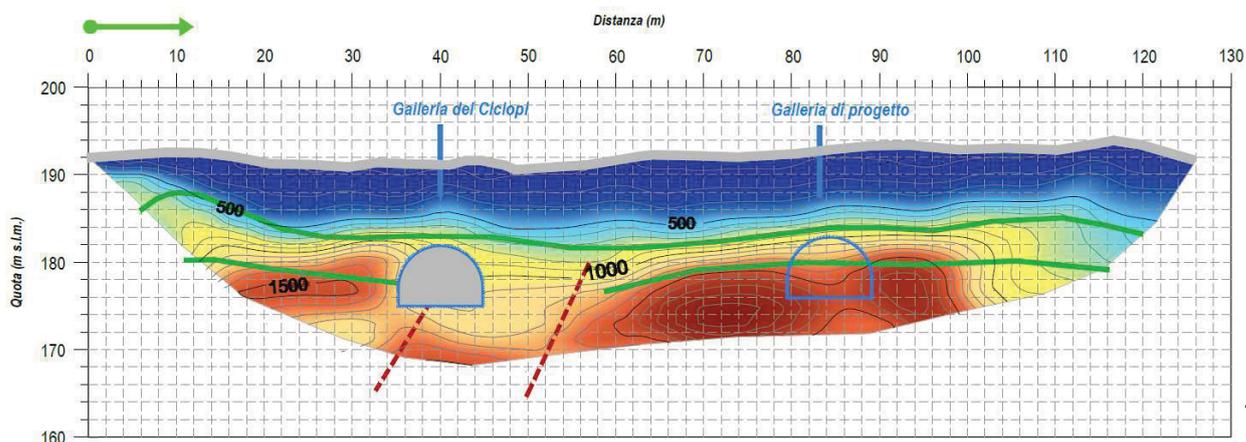


Figura 25 – Distribuzione velocità Vs in corrispondenza della linea L1, all'imbocco NORD

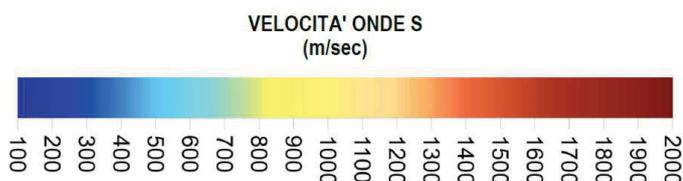


Figura 26 – Legenda velocità Vs

La prova Down-Hole ha indagato fino a una profondità di circa 18 m nella zona del piazzale antistante il futuro imbocco sud della galleria di progetto.

Di seguito l'esito completo della Down-Hole in termini di distribuzione delle velocità di compressione, di taglio e di moduli elastici a piccole deformazioni ricavati (E_{din} e G_{din}).

Depth	D	T_p	T_s	V_p	V_s	V_p/V_s	γ	ν	E_{din}	G_{din}
1.0	1.41	0.0010	0.0181	697	214	3.26	20.0	0.45	269	93
2.0	2.24	0.0022	0.0219	707	216	3.28	20.0	0.45	275	95
3.0	3.16	0.0034	0.0269	766	185	4.14	20.0	0.47	206	70
4.0	4.12	0.0045	0.0310	829	235	3.52	20.0	0.46	329	113
5.0	5.10	0.0056	0.0339	899	334	2.69	20.0	0.42	647	228
6.0	6.08	0.0066	0.0361	979	451	2.17	20.0	0.37	1134	415
7.0	7.07	0.0076	0.0385	1051	410	2.57	20.0	0.41	965	342
8.0	8.06	0.0084	0.0407	1139	451	2.53	20.0	0.41	1167	415
9.0	9.06	0.0092	0.0424	1208	602	2.01	20.0	0.33	1972	738
10.0	10.05	0.0100	0.0439	1312	637	2.06	20.0	0.35	2224	826
11.0	11.05	0.0105	0.0449	2011	1008	1.99	20.0	0.33	5518	2071
12.0	12.04	0.0110	0.0459	1973	996	1.98	20.0	0.33	5378	2023
13.0	13.04	0.0115	0.0468	2100	1108	1.90	20.0	0.31	6539	2501
14.0	14.04	0.0119	0.0477	2239	1121	2.00	20.0	0.33	6823	2560
15.0	15.03	0.0123	0.0484	2696	1386	1.95	20.0	0.32	10337	3914
16.0	16.03	0.0127	0.0491	2525	1444	1.75	20.0	0.26	10690	4252
17.0	17.03	0.0130	0.0497	3055	1666	1.83	20.0	0.29	14586	5661
18.0	18.03	0.0133	0.0502	3391	1997	1.70	20.0	0.23	20072	8128

Sia dall'analisi dell'esito della rifrazione che dalla D-H, si può osservare che l'unità C è posta oltre i 10-15 m di profondità ed è caratterizzata da subito da valori di velocità V_s superiori ai 1300 m/s, cui corrispondono valori di modulo elastico dinamico superiori ai 10 GPa e che raggiungono i 20 GPa già dopo 3 m.

6.4.6 Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso

Per definire i parametri di resistenza e deformabilità caratteristici dell'ammasso roccioso secondo il criterio di rottura assunto, sono state utilizzate le seguenti relazioni:

- o Parametri di resistenza (Hoek-Brown 2002):

$$mb = mi \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

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

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

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

Essendo σ'_{cm} la resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso roccioso.

- o Parametri di deformabilità dell'ammasso roccioso:

- Hoek et al. 2002:

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

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

- Hoek et Diederichs 2006:

$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right) \quad \text{con } E_i \text{ modulo di rigidità della roccia intatta}$$

Nelle espressioni sopra riportate compare il parametro D che rappresenta un indice legato al disturbo apportato dal sistema di scavo all'ammasso roccioso. D varia da 0 (assenza di disturbo) a 1 (massimo disturbo).

Dovendo svolgere alcune calcolazioni geotecniche con riferimento al criterio di rottura di Mohr-Coulomb, risulta essenziale poter definire i valori dell'angolo d'attrito ϕ' e della coesione c' equivalenti.

I parametri c' e ϕ' equivalenti all'ammasso roccioso, vengono determinati in rapporto alle caratteristiche della roccia intatta e dell'ammasso roccioso, secondo quanto proposto da Hoek (2002), in funzione del livello tensionale caratteristico del problema geotecnico in esame, utilizzando le seguenti espressioni:

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

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

Dove:

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

Essendo $\sigma'_{3\max}$ il limite superiore della tensione di confinamento rispetto alla quale è valutata la relazione tra i criteri di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb, fornito nel caso di **gallerie** dalla seguente espressione:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.47 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.94}$$

Nel caso di **pendii**, l'espressione sopra assume invece la seguente forma:

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}$$

7. PARAMETRI GEOTECNICI

Sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti, per le unità geotecniche **A**, **B** e **C** si possono assumere gli intervalli di parametri riepilogati nella tabella seguente.

SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI												
Unità	Peso dell'unità di volume (kN/m ³)	Resistenza a compressione monoassiale roccia intatta σ_{ci} (MPa)			GSI	m_i	Modulo elastico roccia intatta E_i (GPa)		Coesione drenata c' (kPa)	Angolo d'attrito ϕ'	Modulo elastico ammasso E_m (MPa)	
A	20								0	32	35	
B	24	8			46	20	3.9					
C	26	35	÷	50	27 ÷ 45	8	27	÷	50	102 ÷ 548	30 ÷ 51	500-3100

Come già sottolineato all'inizio del paragrafo 6.4, per l'unità **C**, i valori di minimo delle forchette sono posti in prossimità dei minimi riscontrati tramite le prove delle campagne geognostiche, mentre i valori massimi non coincidono con i valori massimi riscontrati tramite le prove, ma con i valori medi.

L'elevata variabilità dei valori di angolo d'attrito e coesione efficace relativi all'unità **C** scaturisce dall'altrettanto ampia variabilità delle coperture che caratterizzano la morfologia dell'ammasso interessato dalle opere, in particolare dalla galleria naturale. Per il dettaglio dei parametri assunti in funzione delle classi di copertura si rimanda alla relazione geomeccanica e di calcolo della galleria.

8. REGIME DELLE PRESSIONI INTERSTIZIALI

Dalle campagne d'indagini condotte, è stata riscontrata presenza di falda solamente nel sondaggio S5_2017, all'interno della formazione del Medolo.

Tale falda è posta a una quota assoluta di circa 160 m s.l.m., ben al di sotto della quota di scavo, si ritiene pertanto che non possa interferire con le opere in progetto.