COMMITTENTE:

RFI RETE FERROVIARIA ITALIANA
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

PROGETTAZIONE:

ITALFERR
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE

CUP: J94H17000420001

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

UPGRADING PRESTAZIONALE CORRIDOIO RENO ALPI - TORINO

Adeguamento a modulo 750 metri della linea Savona - Genova

Stazione di Cogoleto

Relazione geotecnica

SCALA: -

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
NT1N	00	D	26	GE	GE0006	001	A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	C.Soave	Dicembre 2020	P.Scarano	Dicembre 2020	F.Perrone	Dicembre 2020	A.Perego Dicembre 2020

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI MILANO
DOTT. ING. PEREGO ANDREA
Sez. A Settori: a) civile e ambientale, b) industriale, c) dell'informazione
n. A 02428

File: NT1N00D26GEGE0006001A		n. Elab.:

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 4
1.1 PREMESSA 4
1.2 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO 6
1.3 BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO 6
1.4 SOFTWARE 6
2 DESCRIZIONE DELLE OPERE 7
3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGRAFICO E IDROGEOLOGICO 8
4 INQUADRAMENTO SISMICO 15
4.1 ACCELERAZIONE DI RIFERIMENTO 15
4.2 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E TOPOGRAFICA 16
5 INDAGINI GEOGNOSTICHE A DISPOSIZIONE 20
5.1 UBICAZIONE INDAGINI 20
5.2 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE 22
6 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA 23
6.1 CARATTERISTICHE FISICHE 23
6.1.1 DENSITÀ RELATIVA DA SPT 23
6.2 PARAMETRI DI RESISTENZA DEL TERRENO 24
6.2.1 ANGOLO DI ATTRITO DA SPT 24
6.2.2 COESIONE NON DRENATA DA SPT 25
6.2.3 VELOCITÀ DELLE ONDE DI TAGLIO DA SPT 25
6.3 PARAMETRI DI DEFORMABILITÀ 26
6.3.1 MODULI ELASTICI INIZIALI 26
6.3.2 MODULO DI YOUNG DA SPT 26
6.4 CARATTERIZZAZIONE DELLE ROCCE 28
6.4.1 GENERALITÀ 28
6.4.2 VALUTAZIONE DEL PARAMETRO RMR 28
6.4.3 CRITERI DI ROTTURA 33
6.4.4 CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ 35
7 ELABORAZIONE DELLE INDAGINI IN SITO 37
7.1 PROVE SPT 37
7.1.1 VALORI DI SPT 37
7.1.2 DENSITÀ RELATIVA 38
7.1.3 ANGOLO DI ATTRITO 39
7.1.4 MODULO DI YOUNG 40

7.2 PROVE SULLE ROCCE 41
7.2.1 VALORI DI RQD 41
7.2.2 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI RESISTENZA E DI DEFORMABILITÀ 41
7.3 PROVE MASW 44
7.3.1 MODULO DI YOUNG 44
8 PARAMETRI GEOTECNICI 46
9 VERIFICA A LIQUEFAZIONE DEI TERRENI 48

1 INTRODUZIONE

1.1 Premessa

La progettazione in oggetto è inserita nell'ambito del progetto di Upgrading prestazionale corridoio Reno Alpi e riguarda la tratta Genova Voltri - Savona per la quale i Posti di Movimento sono stati previsti per entrambe le direzioni nella località di Cogoleto sui binari I e IV.
A Cogoleto, oggetto di questo progetto, è previsto l'allungamento della precedenza già presente sul binario I modificandone la radice lato Ventimiglia al fine di ottenere il modulo da 750 m., e, per lo stesso motivo, una minima modifica in estensione del binario IV (lato Ventimiglia).
A seguito degli interventi verrà prevista la modifica dell'attuale ACEI e sarà necessario il prolungamento della tombinatura del rio Beuca; con l'occasione si dovrà prevedere il riposizionamento delle precedenze ad interassi standard.

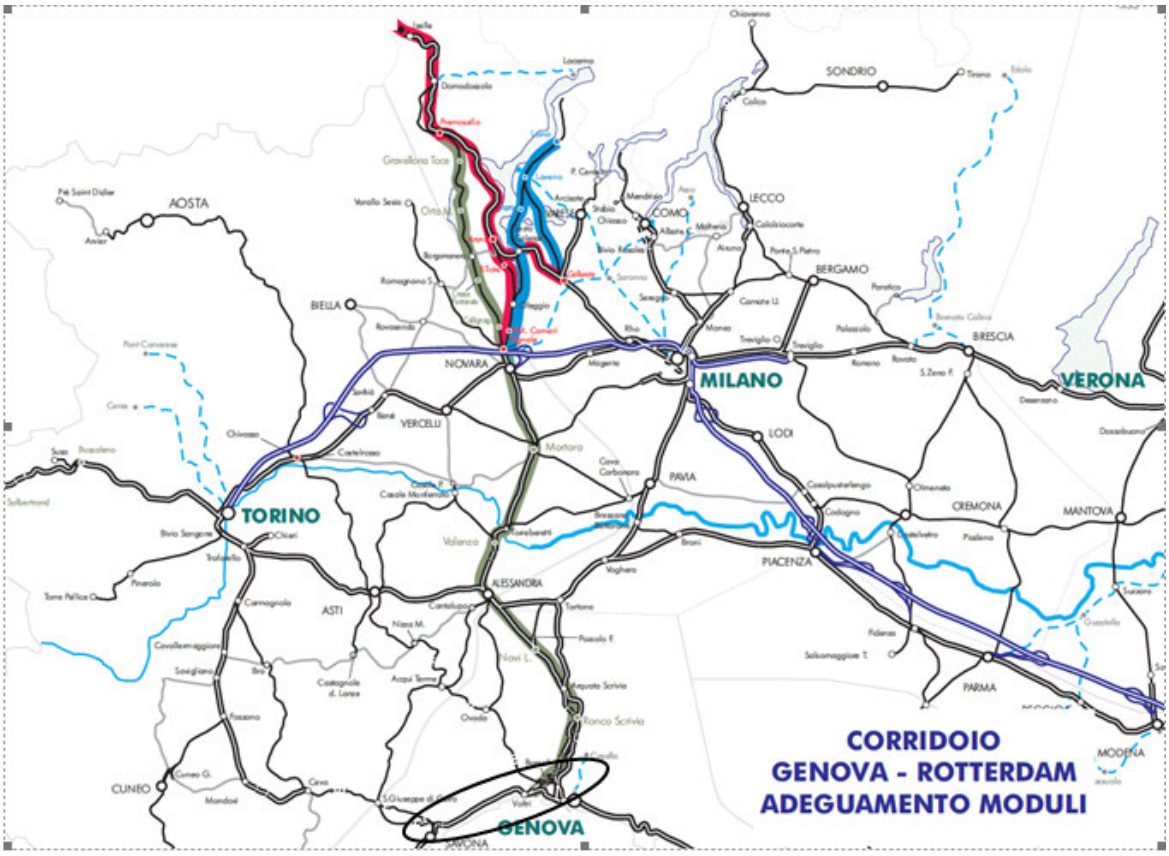


Figura 1 – Linea Savona – Genova interessata da interventi di adeguamento moduli 750

Il documento è articolato nelle seguenti sezioni:

- Inquadramento geologico, geomorfologico ed idrogeologico;
- Inquadramento sismico;
- Descrizione delle indagini geognostiche disponibili;
- Definizione delle unità geotecniche;
- Caratterizzazione geotecnica dei terreni;
- Verifica a liquefazione.

Per la definizione del modello geotecnico si è fatto riferimento agli esiti del sondaggio S02 spinto a 30 m di profondità ed eseguito nel settembre 2020 nella zona a nord dei binari, oltre alla campagna di indagini geofisiche che ha previsto n.2 MASW e n.2 HVSR.

1.2 Quadro normativo di riferimento

[1] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni”, Supplemento Ordinario alla G.U. n.42 del 20.2.2018;

[2] Circolare 21 gennaio 2019 n.7 ” Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018″;

[3] “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche” A.G.I. 1977;

[4] Capitolato RFI 2020;

[5] Manuale di progettazione RFI 2020.

1.3 Bibliografia di riferimento

[6] Cestari, F.; “Indagini geognostiche in sito”. Flaccovio Dario, 2013;

[7] Palmstrom A, Singh R. The deformation modulus of rock masses: comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling Underground Space Technol 2001;16:115–31;

[8] Deere DU. Chapter 1: geological considerations. In: Stagg KG, Zienkiewicz OC, editors. Rock mechanics in engineering practice. London: Wiley; 1968. p. 1–20;

[9] Hoek E., Diederichs M.S. Empirical estimation of rock mass modulus. 2005;

1.4 Software

[10] Roclab ver. 1.033 (Rocscience).

2 DESCRIZIONE DELLE OPERE

In corrispondenza della stazione di Cogoleto sono previste le seguenti opere:

Lato nord:

- demolizione del muro esistente e realizzazione di un nuovo muro di recinzione, che dovrà prevedere un varco nella soletta di fondazione per consentire l'attraversamento del Rio Beuca;

Lato sud:

- demolizione del muro esistente e costruzione di un nuovo muro su micropali per consentire la realizzazione del nuovo binario, previa esecuzione di una paratia provvisionale per il sostegno del binario esistente;
- costruzione di un nuovo ponticello sul Rio Beuca per realizzare la copertura necessaria per il passaggio del nuovo binario, previa esecuzione di una paratia provvisionale per il sostegno del binario esistente.

Si riporta nella planimetria seguente l'ubicazione delle opere in progetto.

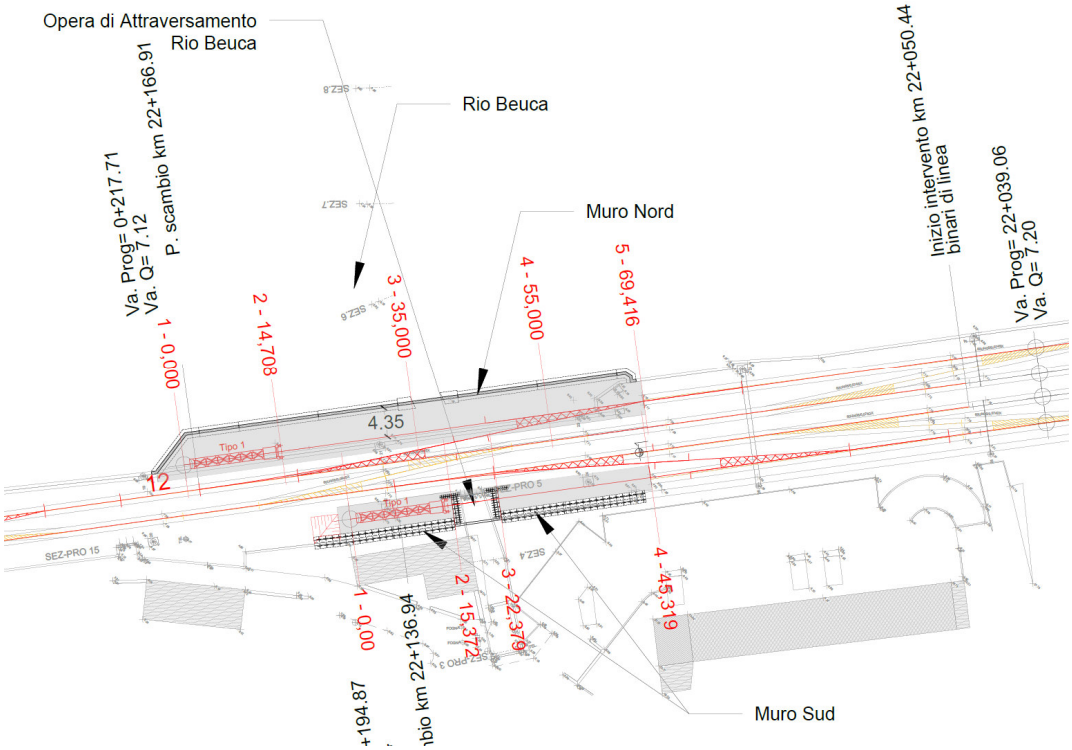


Figura 2 – Stazione Cogoleto: ubicazione opere in progetto

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGRAFICO E IDROGEOLOGICO

Per l'inquadramento geologico dell'area si è fatto riferimento alla Relazione Geologica del presente progetto (NT1N00D69RGGE0001001 ultima revisione).

Inquadramento geologico

Nell'area di studio sono individuabili diverse unità tettoniche ofiolitiche appartenenti al dominio Ligure-Piemontese coperte in parte da una successione sedimentaria Cenozoica legata alla trasgressione marina e da depositi quaternari deposti sopra alle unità tettonizzate. Al fine di distinguere i rapporti tra i terreni Cenozoici e le sottostanti unità tettoniche del substrato è stata utilizzata la seguente classificazione geolitologica, adottata per il PUC del Comune di Cogoleto (Buzzi et al., 2010-2018):

Depositi Quaternari

Depositi alluvionali e spiagge (As): appartengono a questa unità i depositi ghiaiosi e sabbiosi che costituiscono i terrazzi e gli alvei attuali dei fiumi e i depositi sabbiosi e ciottolosi dei litorali attuali. Olocene

Grossi riporti (Gr): riporti antropici per la stabilizzazione dei versanti. Olocene

Paleofrane (Pf): detriti di falda e depositi ciottolosi a matrice detritica. Si trovano prevalentemente ai piedi dei versanti ofiolitici. Pleistocene – Olocene

Depositi Oligocenici

Formazione di Molare (M-Mol): marne e marne siltose con intercalazione di sottili livelli arenacei e di livelli conglomeratici alla base della serie. La formazione è in contatto tettonico con le Argille di Ortovero e i quarzoscisti dell'unità Voltri-Rossiglione. Oligocene sup.

Sequenza sedimentaria di piattaforma di Cogoleto:

Sequenza di zona esterna costituita dal basso verso l'alto da quarziti, dolomie calcaree e scisti filladici e micacei più o meno calcariferi. I livelli di calcare, dolomia e di dolomia calcarea sono ricristallizzati con grana saccaroide e frequenti idioblasti albitici. Le dolomie e le dolomie calcaree presenti nel comune di Cogoleto son ben stratificate con locali intercalazioni cloritico sericitiche.

Il livello degli scisti filladico - micacei è caratterizzato da filladi e scisti finemente micacei a livelli calcarei finemente ricristallizzati con abbondanti lenti di quarzo ricristallizzato. Triassico

Unità di Voltri-Rossiglione:

Metabasiti a scisti verdi costituiti da prasiniti, ad albite+clorite+epidoti+attinolite+fengite+titanite+quarzo con albite ocellare, associate a calcescisti. Tali litotipi rappresentano il risultato di un metamorfismo polifasico su terreni torbiditici con riequilibratura finale in facies scisti verdi.

Unità di Varazze:

Serpentiniti associate a metagabbri con due fasi di serpentinizzazione: la prima con associazione mineralogica lizardite+magnetite+diopside+clorite+humite; la seconda con lo sviluppo di antigorite, la ricristallizzazione della magnetite e la scomparsa di diopside e cloriti. Sono presenti all'interno delle serpentiniti masse di metagabbri con associazione mineralogica albite+clinozoisite+clincloro+tremolite+fengite+titanite.

Nell'area di progetto affiorano i depositi quaternari litoranei (a sud) e le serpentiniti dell'unità di Varazze (a nord), come si può osservare nella figura seguente.

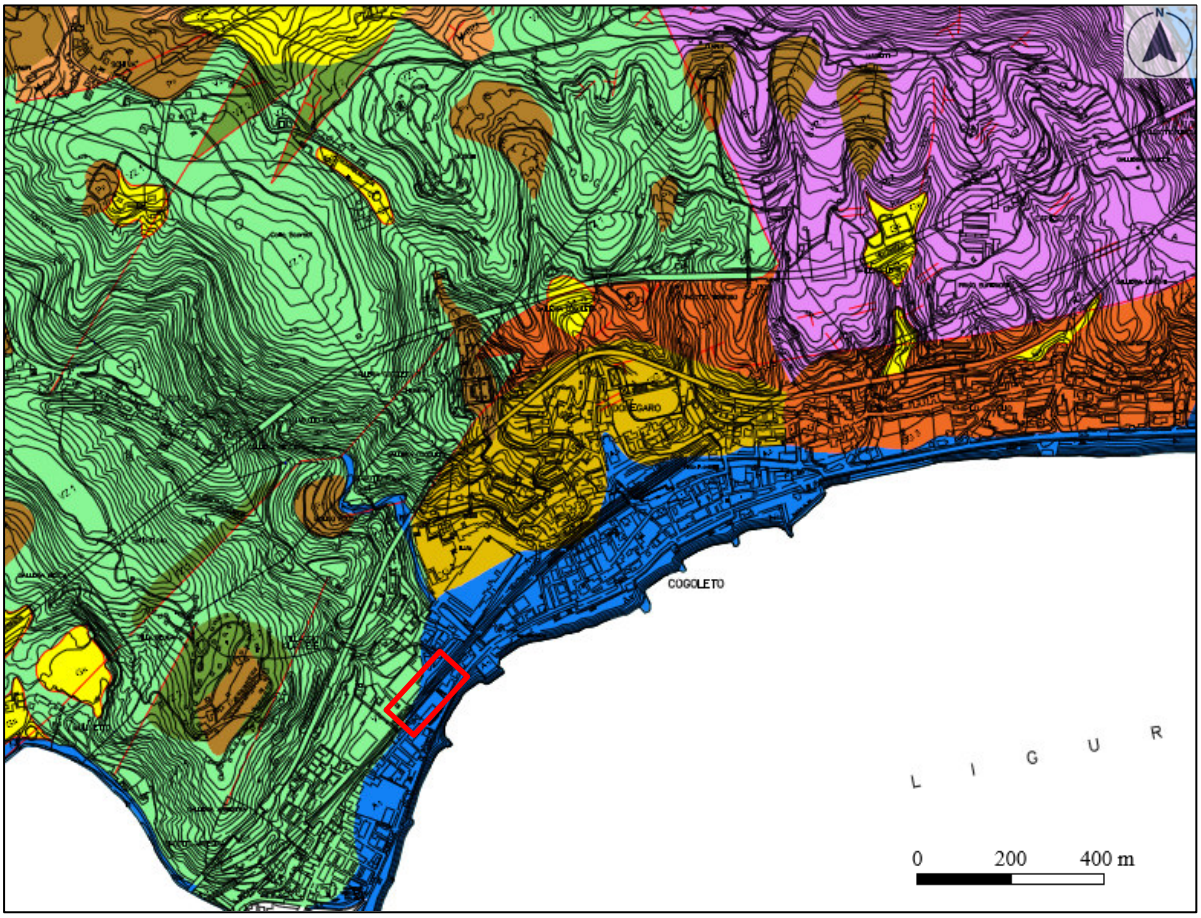


Figura 3 – Stralcio, non in scala, della Carta Geolitologica del PUC del comune di Cogoleto (scala 1:5.000). L'area di progetto è evidenziata in rosso.

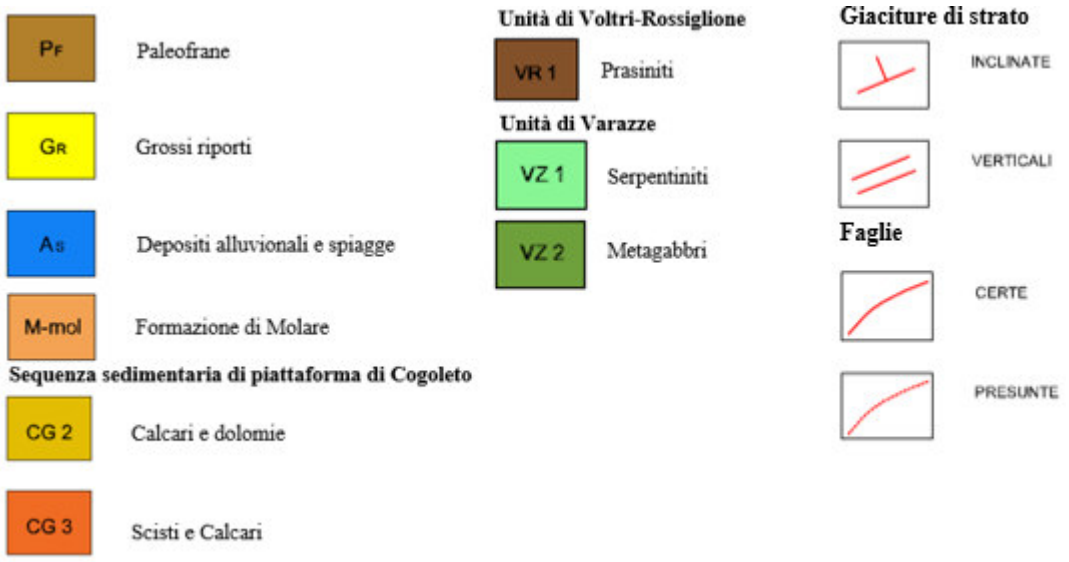


Figura 4 - Legenda della Carta Geolitologica del PUC del comune di Cogoleto (scala 1:5.000).

Inquadramento idrografico

La tettonica plio-quaternaria ha condizionato profondamente l'idrografia di superficie del versante ligure tirrenico. I bacini risultano, in quest'area, modellati prevalentemente dall'azione delle acque di ruscellamento ed incanalate e presentano un reticolo poco gerarchizzato. I bacini idrografici dell'area di studio sono tutti di dimensioni ridotte, fatta eccezione per quelli dei due maggiori fiumi dell'area, ovvero i torrenti Arrestra e Lerone (circa 21 km2), e presentano caratteristiche geomorfologiche piuttosto simili tra loro; il regime dei corsi d'acqua è torrentizio con forti acclività, le distanze tra gli spartiacque e la linea di riva brevi, le piane costiere sono in genere strette. Ma il vero elemento dominante di tutta la fascia costiera è l'intensa antropizzazione dei tratti mediani e terminali dei bacini. Detta antropizzazione relativa per lo più all'urbanizzazione, ha completamente obliterato sia i caratteri morfologici dei versanti (aggrediti dall'edilizia residenziale ed industriale) sia quelli dei fondivalle (quasi tutti i corsi d'acqua risultano tombinati nei tratti più prossimi alla costa). La complessità dell'assetto geologico che caratterizza tutto questo settore ha contribuito in maniera determinante a definirne il suo l'aspetto geomorfologico.

Per quanto concerne l'area di progetto, il Torrente Lerone si trova a 1,5 km di distanza a nord est dell'area di studio e quindi non si ritiene interferisca con le opere in progetto. Il torrente Arrestra invece scorre a 500 m a sud ovest dell'area di studio.

La cartografia regionale del reticolo idrografico riporta la presenza di due torrenti appartenenti al reticolo idrico minore. Il maggiore dei due corsi d'acqua, il torrente Rumaro, scorre a circa 100 m a nord est rispetto all'area di progetto. Il più piccolo, il Rio Beuca, si trova all'interno dell'area di progetto, diventa tombinato in prossimità della linea ferroviaria per poi sboccare in mare 90 m a valle della ferrovia.

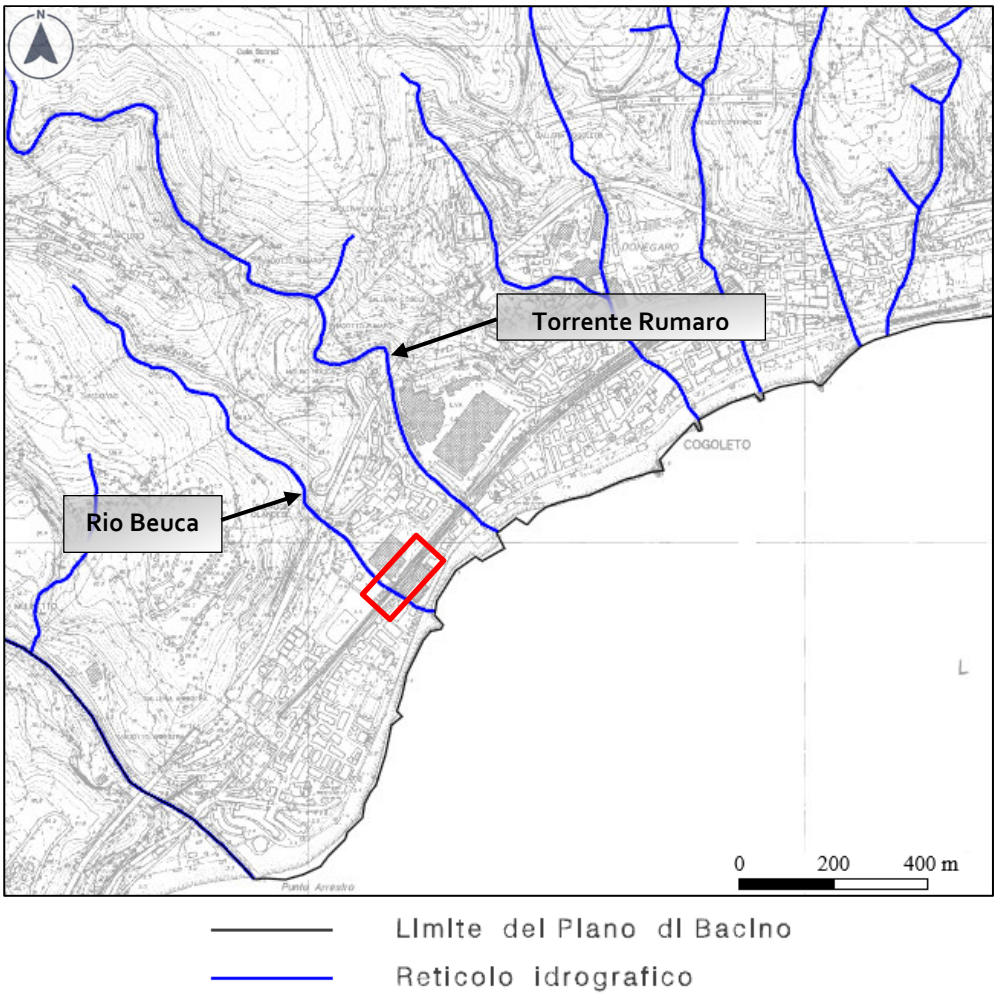


Figura 5 - Stralcio, non in scala, della Carta del Reticolo Idrografico del Piano di Bacino della Provincia di Genova, ambiti 12 e 13 (scala 1:10.000). L'area di progetto è evidenziata in rosso.

Inquadramento idrogeologico

Nell'area di studio le unità geologiche presenti originano corpi acquiferi superficiali a elevata permeabilità per porosità nei depositi quaternari posti sopra a rocce metamorfiche a permeabilità inferiore, che fungono da base dell'acquifero.

Le unità geolitologiche sono state classificate valutando le loro caratteristiche idrogeologiche; valutando quindi il grado di permeabilità e la tipologia di permeabilità (per porosità o per fessurazione) dei litotipi sono state distinte quattro classi, riportate sulla Carta Idrogeologica del PUC del comune di Cogoleto e sulla Carta Idrogeologica del PAI della Provincia di Genova:

- Formazioni permeabili per porosità: fanno parte di questa classe tutti gli accumuli di materiali sciolti, quali le coperture detritiche con potenza maggiore di 3 m, i depositi alluvionali e di

spiaggia e i riporti antropici “Grossi riporti” sulla Carta Geomorfologica. In questa classe rientrano depositi con permeabilità differenti, infatti i depositi alluvionali e di spiaggia, posti in prevalenza lungo la costa, hanno permeabilità maggiori rispetto alle coltri eluvio colluviali lungo i versanti.

- Formazioni permeabili per fessurazione e/o fratturazione: in questa classe si trovano i litotipi massivi, stratificati o foliati che presentano una permeabilità per fessurazione primaria o secondaria a causa delle deformazioni tettoniche subite. Di questa classe fanno parte le dolomie, i calcari dolomitici, i calcari e le serpentiniti. Le serpentiniti sono la litologia di questa classe maggiormente presente sul territorio in esame e sono quasi sempre molto fratturate e alterate (PAI, 2019).
- Formazioni semipermeabili: In questa classe ricadono i litotipi a permeabilità medio bassa, quali quarziti, calcescisti e micascisti. Le rocce con queste litologie hanno una fratturazione poco pervasiva e nei calcescisti le fratture possono essere riempite da materiale argilloso che ne riduce la permeabilità.
- Formazioni impermeabili: in questa classe rientrano i metagabbri, le metabasiti e le marne, che non permettono l’infiltrazione delle acque essendo prevalentemente impermeabili.

La classificazione appena descritta non considera l’urbanizzazione e la conseguente impermeabilizzazione dei primi metri dal p.c.. Sullo stralcio della Carta Idrogeologica del PAI della Provincia di Genova si osserva come tutta la costa nei pressi dell’abitato di Cogoleto, compresa l’area di progetto, ricadano in un’area classificata come “Urbanizzato continuo impermeabile con substrato relativo”. Quindi sebbene l’area di studio si trovi in parte su depositi di spiaggia permeabili per porosità e in parte su serpentiniti permeabili per fessurazione, la presenza di un sottile livello cementizio superficiale legato all’urbanizzazione dell’area comporta una maggiore impermeabilizzazione della stessa, con una conseguente scarsa o nulla infiltrazione.

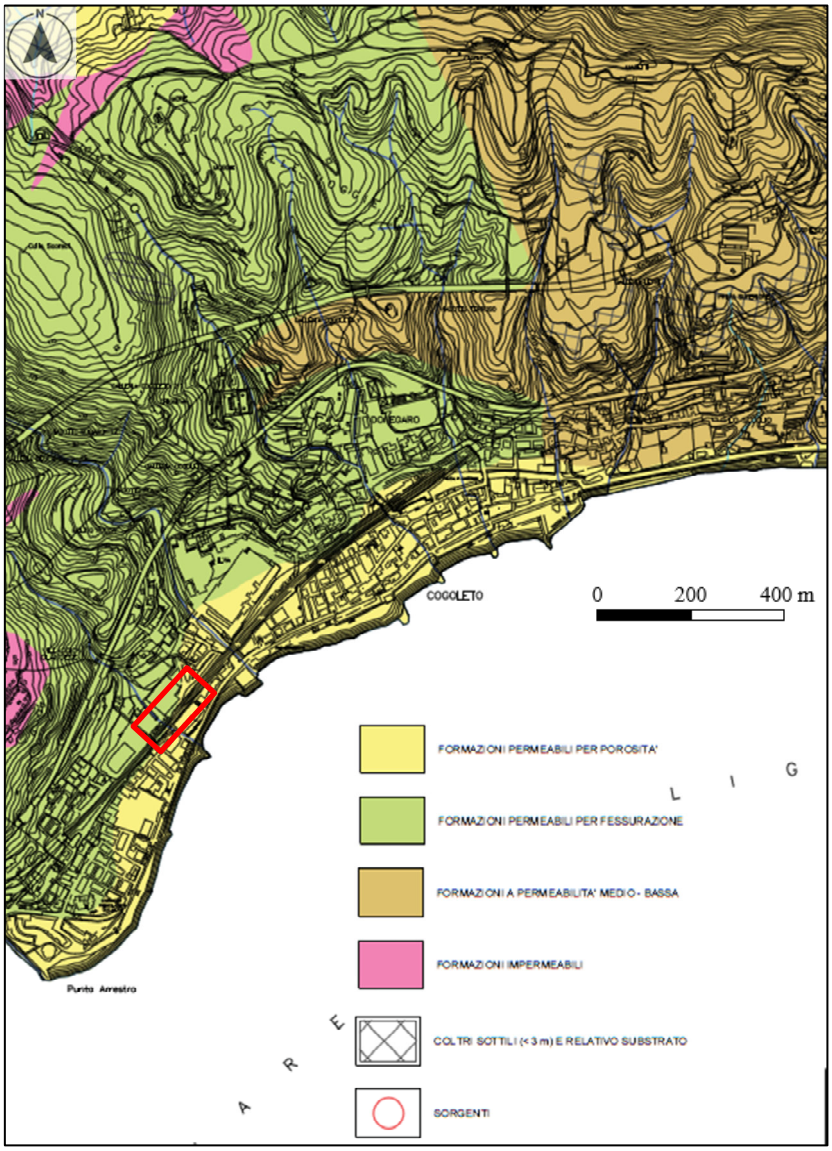


Figura 6 – Stralcio, non in scala, della Carta Idrogeologica del PUC del comune di Cogoleto (scala 1:5.000). L'area di progetto è evidenziata in rosso.

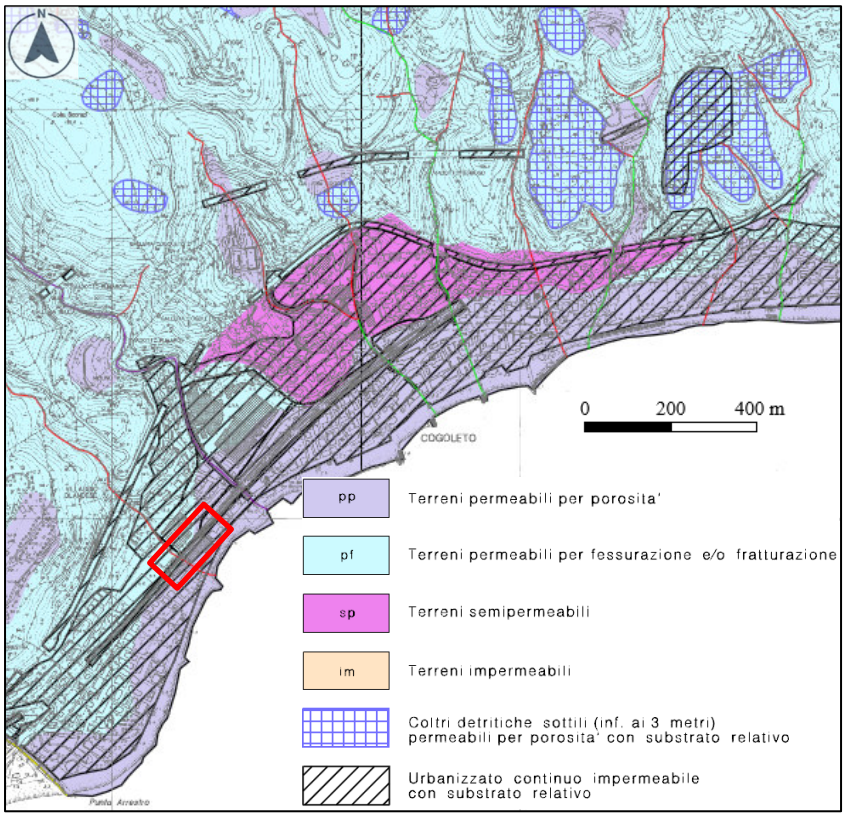


Figura 7 – Stralcio, non in scala, della Carta Idrogeologica del Piano di Bacino della Provincia di Genova, ambiti 12 e 13 (scala 1:10.000). L'area di progetto è evidenziata in rosso.

Il livello di falda derivante dal sondaggio S02 eseguito nell'area di interesse è il seguente:

ID	Data	Livello di falda (m da p.c.)
S02	27/09/2020	-6.11

4 INQUADRAMENTO SISMICO

4.1 Accelerazione di riferimento

Per quanto concerne la caratterizzazione della sismicità locale si è fatto riferimento alla recente normativa sismica nazionale che disciplina, attraverso norme specifiche, la progettazione e la costruzione in aree soggette ad azioni sismiche, oltre a fornire criteri per la valutazione della sicurezza e gli interventi di adeguamento delle strutture su cui tali azioni si esplicano.

In base alla classificazione sismica del territorio indicata nell'O.P.C.M. n. 3274/2003, successivamente aggiornata dalla O.P.C.M. n.3519/2006, la zona di Cogoleto appartiene alla zona sismica 3.

La Mappa Nazionale dei valori di Pericolosità Sismica indica infatti un valore di accelerazione massima riferita a suolo rigido e pianeggiante, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, compresa tra 0.05 g e 0.075 g.

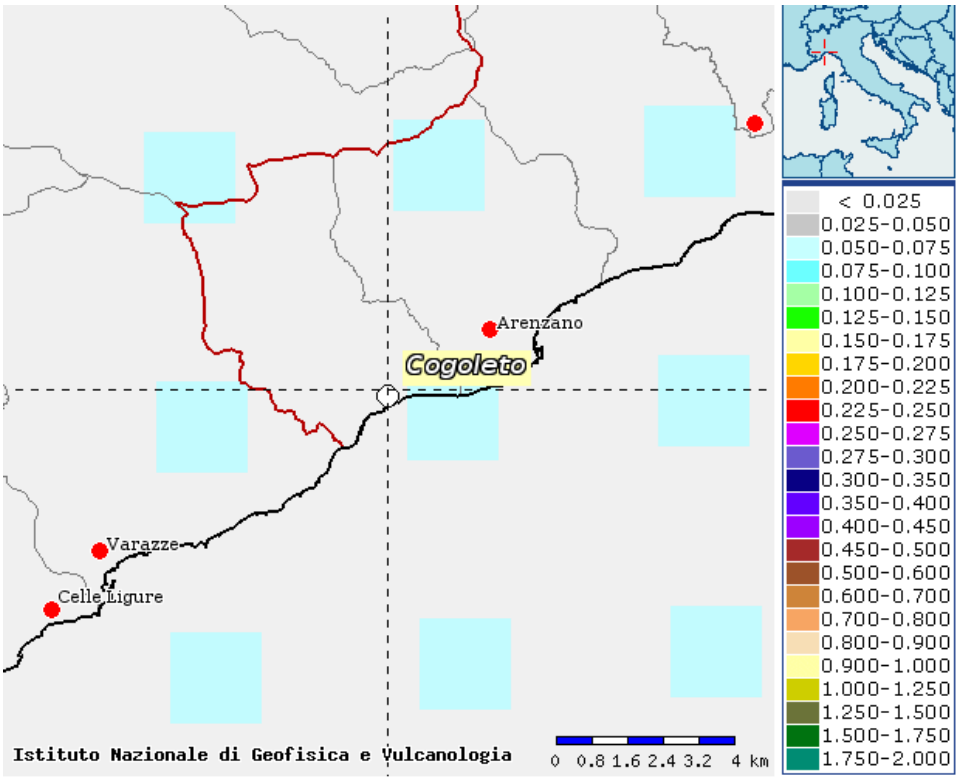


Figura 8- Mappa Nazionale dei valori di Pericolosità Sismica (Fonte: INGV)

Le azioni sismiche vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava moltiplicando la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U, corrispondente alla categoria d'uso scelta.

Nel caso in esame si utilizza V_N = 50 anni e classe d'uso III a cui corrisponde C_u = 1.5. Si ha quindi $V_R = V_N \times C_U$ = 75 anni.

Con riferimento al comune di Cogoleto l'accelerazione in sito riferita al periodo di riferimento V_R = 75 anni è pari a a_g = 0.06 g.

4.2 Categoria di sottosuolo e topografica

Ai sensi del D.M. 17.01.2018 ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio Vs,eq.

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove H è la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da VS non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio Vs,eq è definita dal parametro Vs,30.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti,* caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti,* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D,* con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tabella 1 – Tabella 3.2.II delle NTC 2018

Nel caso in esame si hanno a disposizione i risultati della prova MASW 2C eseguita a sud rispetto alla ferrovia e la MASW 1C e il sondaggio S02 eseguiti a nord rispetto ai binari, dove sono state eseguite prove SPT in foro da cui sono stati calcolati valori di Vs.

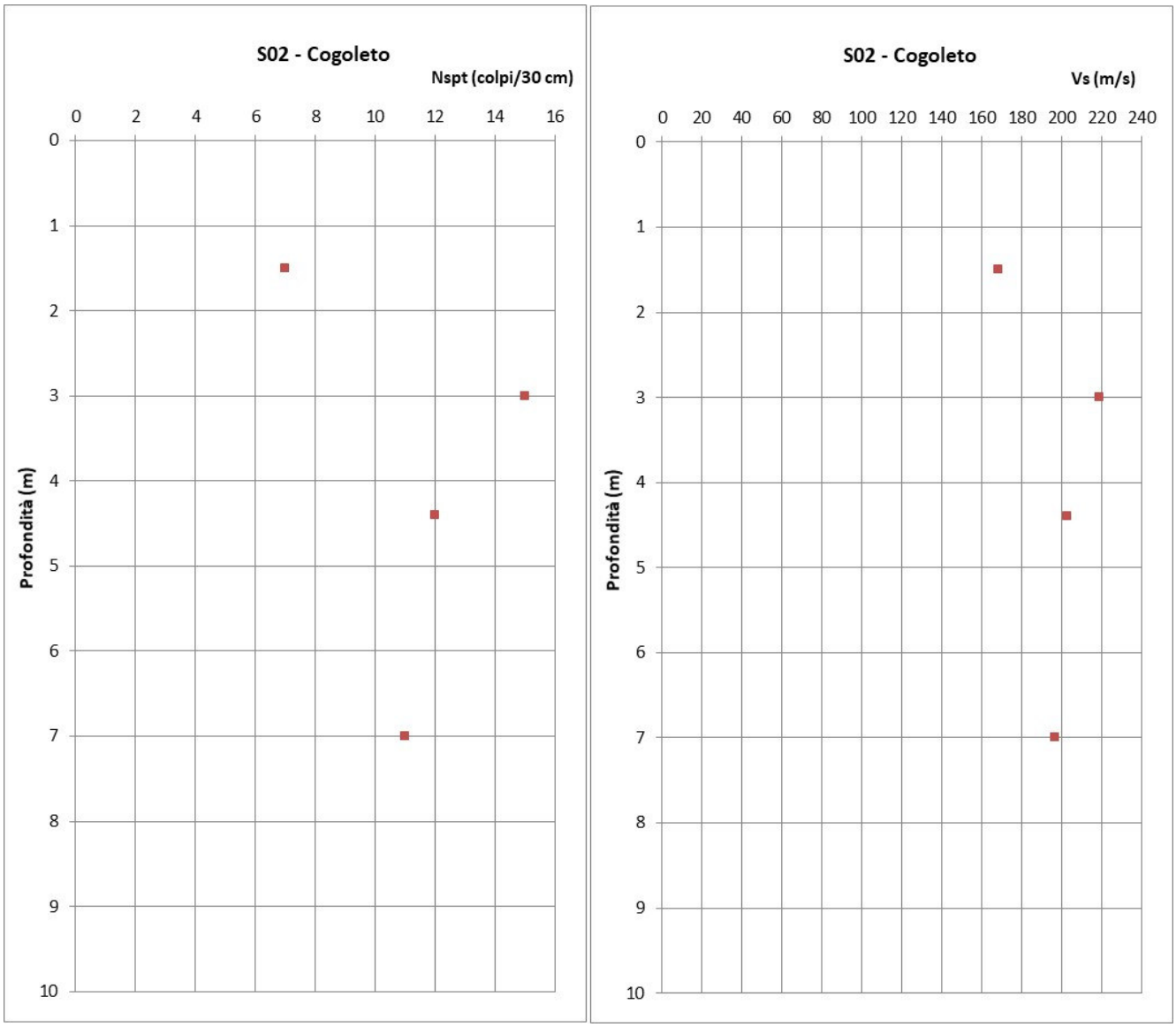


Figura 9 – Lato nord - Sondaggio S02: valori di Nspt e Vs

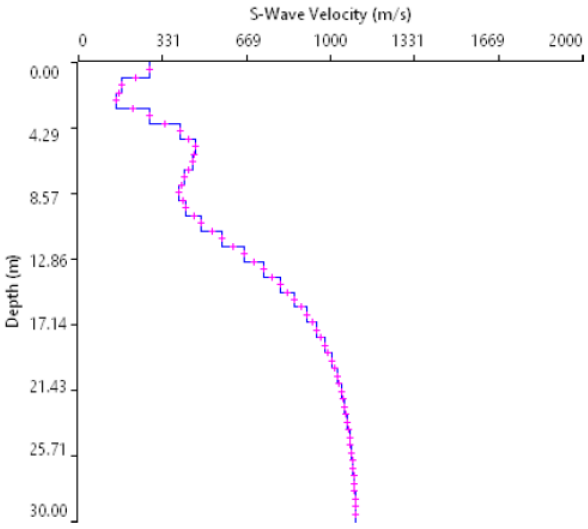


Tabella 3.1.4.1: Modello sismo-stratigrafico dei terreni – M.A.S.W_1C.

Sismostrato	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	Vs (m/s)
1	1	0	280
2	1	1	169
3	1	2	148
4	1	3	281
5	1	4	406
6	1	5	463
7	1	6	455
8	1	7	419
9	1	8	400
10	1	9	424
11	1	10	488
12	1	11	570
13	1	12	655
14	1	13	733
15	1	14	801
16	1	15	858
17	1	16	906
18	1	17	945
19	1	18	977
20	1	19	1003
21	1	20	1025
22	1	21	1042
23	1	22	1056
24	1	23	1067
25	1	24	1076
26	1	25	1083
27	1	26	1089
28	1	27	1094
29	1	28	1099
30	INF	29	1102

Figura 10 – Lato nord – MASW 1C

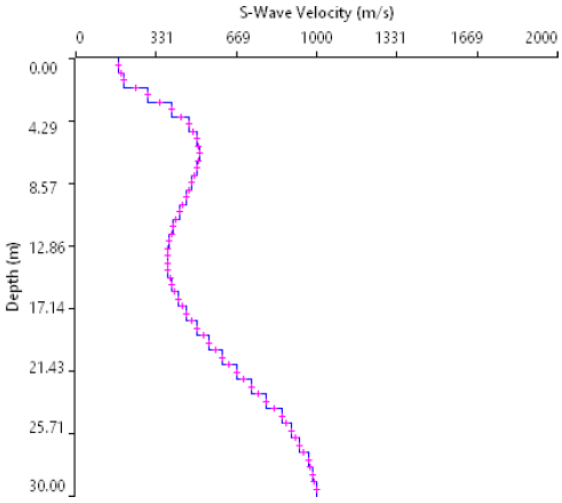


Tabella 3.1.5.1: Modello sismo-stratigrafico dei terreni – M.A.S.W_2C.

Sismostrato	Spessore (m)	Profondità (m dal p.c.)	Vs (m/s)
1	1	0	179
2	1	1	197
3	1	2	296
4	1	3	399
5	1	4	470
6	1	5	505
7	1	6	513
8	1	7	503
9	1	8	482
10	1	9	456
11	1	10	429
12	1	11	405
13	1	12	387
14	1	13	379
15	1	14	383
16	1	15	398
17	1	16	424
18	1	17	460
19	1	18	504
20	1	19	554
21	1	20	609
22	1	21	667
23	1	22	728
24	1	23	791
25	1	24	855
26	1	25	895
27	1	26	928
28	1	27	967
29	1	28	983
30	INF	29	1000

Figura 11 – Lato sud – MASW 2C

Le prove SPT eseguite nel sondaggio S02 all'interno dei terreni superficiali (limo argilloso e sabbia limosa) presenti fino a 9 m di profondità forniscono un valore di velocità equivalente Vs,eq (9 m) = 191 m/s, corrispondente ad un terreno di tipo C. Visto il profilo di velocità delle onde di taglio, ne deriva una categoria di sottosuolo di sottosuolo tipo E.

Con riferimento alla MASW 1C, il valore di Vs,eq calcolato per H = 14 m (H spessore delle terre poste al di sopra del substrato di riferimento rigido 800 m/s) è pari a Vs,(14) = 345 m/s, corrispondente a un suolo C; visto il profilo di velocità delle onde di taglio, ne deriva una categoria di sottosuolo di sottosuolo tipo E.

Con riferimento alla MASW 2C, il valore di Vs,eq calcolato per H = 24 m (H spessore delle terre poste al di sopra del substrato di riferimento rigido 800 m/s) è pari a Vs,(24) = 413 m/s, corrispondente a un suolo B; visto il profilo di velocità delle onde di taglio, ne deriva una categoria di sottosuolo di sottosuolo tipo B.

Per il sito in esame si adotta cautelativamente una **categoria di sottosuolo E**: "*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m*", sia lato nord che lato sud rispetto ai binari.

Per quanto concerne le caratteristiche della superficie topografica, l'area in oggetto può essere classificata di **categoria T1** "Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media i ≤ 15°".

Considerando quindi una categoria di terreno E e una categoria topografica T1, i coefficienti di amplificazione stratigrafica e topografica sono rispettivamente pari a $S_S = 1.6$ e $S_T = 1$.

L'accelerazione massima in sito $a_{max} = a_g \cdot S_S \cdot S_T$ è quindi pari a 0.06 g · 1.6 = 0.096 g.

5 INDAGINI GEOGNOSTICHE A DISPOSIZIONE

5.1 Ubicazione indagini

La campagna di indagine eseguita nel settembre-ottobre 2020 ha previsto il sondaggio S02 ubicato in corrispondenza del Rio Beuca sul lato nord della ferrovia e le indagini geofisiche MASW 1C, HVSR 1C eseguite lato nord e MASW 2C, HVSR 2C eseguite lato sud.



Figura 12 – Ubicazione indagini 2020

Commessa n°: - ***Verbale di Accettazione n°*** -

Località: Cogoleto (GE) ***Data esecuzione sondaggio:*** *Dal 24/09/2020 al 27/09/2020*

Coordinate WGS84 : N 44°23'6.75" - E 8°38'13.34" ***Quota (m.s.l.m):*** 5,19

Coordinate Cartesiane: ***Perforatrice idraulica:*** *TEREDO MN 209*

Campione Rimaneggiato:	Cr1,2..	Prova Pressiometrica:		Pozzetto carrabile e terminale di protezione		S.P.T. (Punta chiusa)	PC
Campione Indisturbato:	C1,2,..	Prova Dilatometrica:		Piezometro a tubo aperto:		S.P.T. (Punta aperta)	PA
Shelby:	S	Prova Lugeon:		Tubo in PVC per Down-hole:		Quota falda iniz.	
DenIson -Mazier:	DM	Prova Lefranc		Cella casagrande:		Quota falda finale	

Profondità p.c. (m)	Potenza strati (m)	Simbologia	Consistenza Pocket σ (kg/cm²)	Consistenza Vane Test Cu (kg/cm²)	DESCRIZIONE STRATIGRAFICA	Indice di carotaggio % carot.	Indice di carotaggio RQD	Prelievo campioni Modalità	Prelievo campioni Profondità (m)	Prove in foro S.P.T. prof. (m p.c.)	Prove in foro S.P.T. N° Colpi	Installazione in foro Schema / Note:	Falda quota (m dal p.c.)	Dati foro Utensile perforazione	Dati foro Rivestimento Foro
1,10	1,10				Materiale eterogeno di riporto antropico.							TAPPO DI CEMENTO E BENTONITE		CAROTIERE SEMPLICE 101 mm	RIVESTIMENTO METALLICO 127 mm
3,00	1,90				Terreno rimaneggiato costituito da limo argilloso debomente ghiaioso di colore marroncino chiaro tendente al marrone scuro con l'aumentare della profondità, con presenza di screziature ocracee; presenza di inclusi eterogenei eterometrici sub-angolari e arrotondati, talora presenza di sottili lenti più argillose . il materiale si presenta umido da mediamente a molto consistente /addensato.					PC 1,50-1,95/3+3+4		TUBO PIEZOMETRICO CIECO			
5,00	2,00				Sabbia debolmente limosa con ghiaia pilicrome con presenza di inclusi di origine serpentinitica di colore verde scuro a spigoli vivi; talora presenza di noduli di concrezione di colore bianco. Il materiale si presenta umido e mediamente consistente / addensato.			CR1	1,95 -2,40	PC 3,00-3,45/5+7+8		TAPPO DI CEMENTO E BENTONITE			
6,35	1,35				Trovante di serpentiniti a lizardite e antigorite; il materiale si presenta inizialmente disgregato, con l'aumentare della profondità diventa più integro con fratture talora riempite da sabbia fine limosa; con presenza di patine di ossidazione ocracee.			CR2	3,45 -3,90						
7,60	1,25				Sabbia medio fine debolmente limosa di colore marroncino chiaro tendente al marrone scuro con l'aumentare della profondità e con presenza di screziature ocracee. il materiale si presenta umido mediamente consistente /addensato.			CR3	4,50 -5,00	PC 4,40-4,85/5+5+7			-6,11		
8,60	1,00				Sabbia limoso- argillosa di colore grigio con presenza di inclusi eterometrici di origine serpentinitica.			CR4	7,45 -8,00	PC 7,00-7,45/3+4+7					
							20%								
							83%								
							81%								
							90%								
							94%								
							80%								
							62%								
							73%								
							83%								
							64%								
							20%								
							20%								
							36%								
							34%								
							28%								
							39%								
							83%								
							20%								
							20%								
							41%								
							56%								
							62%								
30,00	21,40				Calcemicascisti di colore grigiastro scuro con lineamenti nerastri appartenenti all'unità tettonometamorfica Palmaro - Caffarella (Calcascisti della Val Branega): Scisti quarzo - micacei più o meno calciferi con livelli nerastri ricchi in cloritoide di spessore millimetrico, boudinati. il materiale si presenta fratturato e con l'aumentare della profondità molto disgregato.							GHIAIETTO SILICEO CALIBRATO 1-4 mm	30,00		

Note:

data	*fondo foro*	*rivestimento*	*falda*
26/09/20	21,00 m	10,00 m	-5,37 m
27/09/20	30,00 m	10,00 m	-6,11 m

Figura 13 – Stratigrafia S02

5.2 Definizione delle unità geotecniche

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni si è fatto riferimento agli esiti del sondaggio S02 spinto fino a 30 m di profondità ed eseguito nel settembre 2020, nel corso del quale sono state effettuate prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test) nei terreni fino a 9 m di profondità e prove RQD (Rock Quality Designation) nella formazione rocciosa sottostante.

Sono state inoltre considerate le due prove MASW eseguite rispettivamente a nord e a sud rispetto ai binari, che hanno individuato posizioni diverse per il substrato roccioso.

Lato nord sono state individuate le seguenti unità geotecniche:

Unità 1 – Terreno rimaneggiato: limo argilloso debolmente ghiaioso (0-3 m pc), con Nspt = 7 e Vs = 150-280 m/s;
Unità 2 – Sabbia limosa mediamente addensata (3-9 m pc), con Nspt = 11-15 e Vs = 200-450 m/s;
Unità 3 – Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi fratturati (9-18 m) - Roccia di qualità da buona a discreta con RQD = 62-94% e Vs = 420-1000 m/s;
Unità 4 – Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi molto disgregati - Roccia di qualità da scadente a molto scadente (18-30 m pc), con RQD = 20-39%.

Lato sud sono state individuate le seguenti unità geotecniche:

Unità 1 – Terreno rimaneggiato: limo argilloso debolmente ghiaioso (0-3 m pc), con Vs = 180-300 m/s;
Unità 2 – Sabbia limosa mediamente addensata (3-14 m pc), con Vs = 400-500 m/s;
Unità 3 – Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi molto disgregati - Roccia di qualità da scadente a molto scadente (14-15 m pc), con Vs = 380-400 m/s;
Unità 4 – Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi fratturati (15-30 m) - Roccia di qualità da buona a discreta con Vs = 420-1000 m/s.

Per quanto riguarda le unità geotecniche individuate lato sud, sono state fatte delle ipotesi cautelative sulla base delle litologie individuate nel sondaggio S02 eseguito lato nord; tali ipotesi andranno confermate in sede di progetto esecutivo mediante l'esecuzione di un sondaggio integrativo.

6 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

6.1 Caratteristiche fisiche

6.1.1 Densità relativa da SPT

La densità relativa Dr [%] è stata valutata dai valori di Nspt normalizzati con la correlazione di Skempton (1986):

$$D_r = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{A}} \cdot 100$$

dove A è un parametro adimensionale che vale 65 per le sabbie grosse, 60 per le sabbie medie e 55 per le sabbie fini.

É possibile valutare i valori di Nspt normalizzati per tenere conto della pressione efficace del terreno sovrastante σv0', con la seguente espressione:

$$N_1 = N_{spt} \cdot \left(\frac{p_{atm}}{\sigma'_{v0}}\right)^n$$

dove n è un coefficiente posto pari a 0.5 (Liao e Withman, 1985).

É inoltre possibile tenere conto del rendimento del sistema di infissione ER:

$$(N_1)_{60} = N_1 \cdot \frac{ER}{60}$$

Poiché il rendimento medio dei sistemi di battitura in Italia è del 60%, generalmente questa correzione viene trascurata.

Per la densità relativa è stata anche considerata la seguente correlazione di Gibbs e Holtz (1957):

$$D_R{}^2 = \frac{N_{spt}}{17 + 24\frac{\sigma'_{v0}}{p_a}}$$

6.2 Parametri di resistenza del terreno

6.2.1 Angolo di attrito da SPT

L'angolo di attrito è stato stimato a partire dai valori di Nspt e della densità relativa con le seguenti correlazioni.

Per le sabbie in genere sono valide le seguenti correlazioni.

Meyerhof (1965)

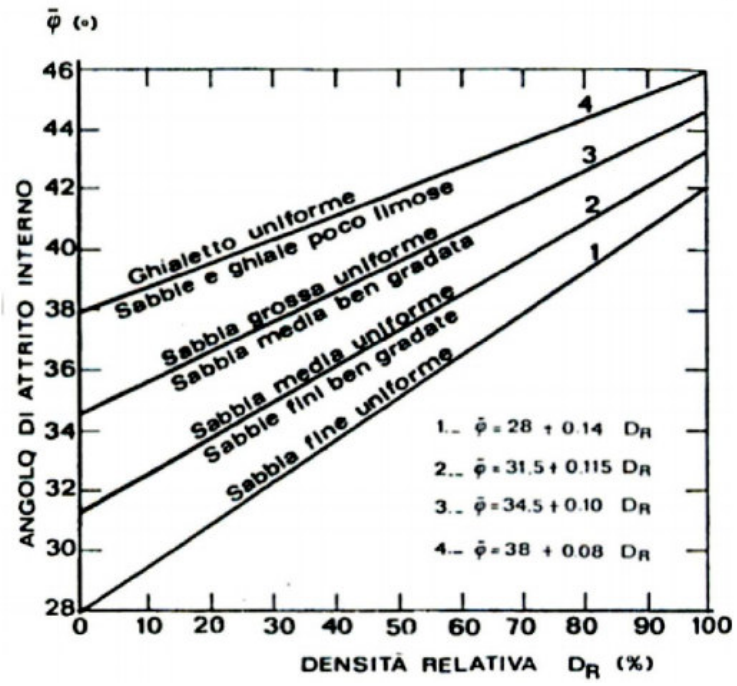
$\phi' = 23.7 + 0.57Nspt - 0.006\ Nspt^2$ (> 5%limo)

Sowers (1961)

$\phi' = 0.28\ Nspt + 28$

Schmertmann (1977)

$$\varphi' = \alpha + \beta \cdot D_r$$



La correlazione di Shioi e Fukuni riportata in seguito è valida per tutti i tipi di suolo:

Shioi e Fukuni - Road Bridge Specification (1982)

$$\varphi' = \sqrt{15 \cdot N_{spt}} + 15°$$

Per la stima dell'angolo di resistenza al taglio nei terreni a grana fine può essere utilizzata la correlazione proposta da Peck (1953) in funzione del valore di Nspt:

$$\phi' (°) = 0.30 \cdot Nspt + 20$$

6.2.2 Coesione non drenata da SPT

I valori della coesione non drenata Cu per i terreni coesivi possono essere stimati dalle SPT attraverso la seguente relazione:

Stroud (1974)

$$C_u(kPa) = (4.5 \div 5.5)Nspt$$

6.2.3 Velocità delle onde di taglio da SPT

A partire dai valori di Nspt sono state stimate le velocità delle onde di taglio Vs con la seguente correlazione valida per tutti i tipi di suolo:

Ohta & Goto (1978) $\quad Vs = 85.35 \cdot N_{spt}^{0.348}$

6.3 Parametri di deformabilità

6.3.1 Moduli elastici iniziali

I moduli iniziali di taglio (G0) e di Young (E0) possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio Vs utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9{,}81} \cdot (V_s)^2 \text{ (kPa)}$$

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu') \text{ (kPa)}$$

essendo:

γt = peso di volume naturale del terreno in kN/m^3

ν' = rapporto di Poisson del terreno, ipotizzato pari a 0.3

Vs = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s

Il modulo elastico statico (operativo) è stato calcolato con la seguente espressione a partire dal modulo dinamico E_0:

$E_{op} = E_0 / 10$

6.3.2 Modulo di Young da SPT

Per i terreni incoerenti è possibile stimare il modulo elastico E con le correlazioni di D'Appolonia (1970) e Schmertmann a partire dai valori di Nspt.

D'Appolonia (1970) – terreni sabbioso ghiaiosi normalconsolidati

$$\mathrm{E\ (MPa)} = 0.756 \cdot \mathrm{N_{spt}} + 18.75$$

Schmertmann – terreni sabbiosi

$$\mathrm{E\ (MPa)} = \mathrm{B} \cdot \mathrm{N_{spt}}$$

dove:

B = 0.8 sabbie fini

B= 1.2 sabbie medie

B= 2 sabbie grossolane

Pasqualini (Politecnico di Torino, 1983)

$$\mathrm{E\ (MPa)} = \mathrm{B} \cdot \sqrt{\mathrm{N_{spt}}}$$

dove:

B = 7 MPa

Per i terreni di natura coesiva è possibile determinare il modulo elastico confinato M dall'interpretazione delle prove SPT attraverso la seguente relazione (*Stroud e Butler, 1975*):

$$M\ (kg/cm^2) = 5\ Nspt$$

Il modulo di Young si ottiene dal modulo edometrico con la seguente relazione:

$$E = \frac{M(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}{(1-\upsilon)}$$

dove ν = 0.3 è il coefficiente di Poisson.

6.4 Caratterizzazione delle rocce

6.4.1 Generalità

La caratterizzazione geotecnica delle formazioni rocciose è stata condotta con riferimento alla classificazione dell'ammasso roccioso proposta da Bieniawski (1989), allo schema concettuale di mezzo continuo (omogeneo o stratificato) e ai criteri di rottura proposti e aggiornati da Hoek & Brown a partire dal 1980.

6.4.2 Valutazione del parametro RMR

E' possibile stimare il parametro RMR "*Rock Mass Rating*" sulla base di quanto descritto in seguito; il parametro GSI (*Geological Strength Index*) viene valutato con la seguente espressione (vedi Sjoberg, 1997):

$$GSI = RMR - 5$$

Per ogni litotipo il parametro RMR viene stimato in accordo a quanto proposto in Bieniawski (1974, 1989, 1993), ovvero come somma dei seguenti 6 indici:

a) resistenza alla compressione uniassiale della roccia intatta (A1);

b) indice RQD (A2);

c) spaziatura delle discontinuità (A3);

d) tipo e condizioni delle discontinuità (scabrezza, alterazione delle pareti, apertura, materiali di riempimento) (A4);

e) condizioni idrauliche (A5);

f) a seconda della applicazione, una correzione per la giacitura delle discontinuità (A6).

Ciascun parametro è valutato in modo quantitativo e a ciascuno è assegnato un indice parziale, come indicato nella tabella seguente.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
A1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
A2	Drill core Quality *RQD*		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
A3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
A4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
A5	Groundwater	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			

Tabella 2 – Valori degli indici A1-A5 per la stima di RMR

C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS					
Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21
Class number	I	II	III	IV	V
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock
D. MEANING OF ROCK CLASSES					
Class number	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100
Friction angle of rock mass (deg)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions					
Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed
Ratings	6	5	3	1	0
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**					
(A) Strike perpendicular to tunnel axis			(B) Strike parallel to tunnel axis		
Drive with dip - Dip 45 - 90°	Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°	Dip 20 - 45°	
Very favourable	Favourable		Very unfavourable	Fair	
Drive against dip - Dip 45-90°	Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°		
Fair	Unfavourable		Fair		

* Some conditions are mutually exclusive . For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.
** Modified after Wickham et al (1972).

Tabella 3 – Classi e correzioni per la giacitura delle discontinuità

Nel caso in esame si hanno a disposizione solo i risultati degli indici RQD, da cui è stato stimato l'indice GSI. Si riporta nella tabella seguente la classificazione della qualità dell'ammasso roccioso in funzione dell'indice RQD.

RQD (%)	Qualità dell'ammasso
< 25	molto scadente
25 - 50	scadente
50 -75	mediocre
75 - 90	buona
90 - 100	molto buona

Tabella 4 – Qualità dell'ammasso in funzione dell'indice RQD

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, peridotite , rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, sandstone, schist
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Concete, phyllite, schist, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, claystone, potash, marl, siltstone, shale, rocksalt,
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock, shale
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

* Grade according to Brown (1981).
** Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield highly ambiguous results.

Figura 14 – Stima della resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta

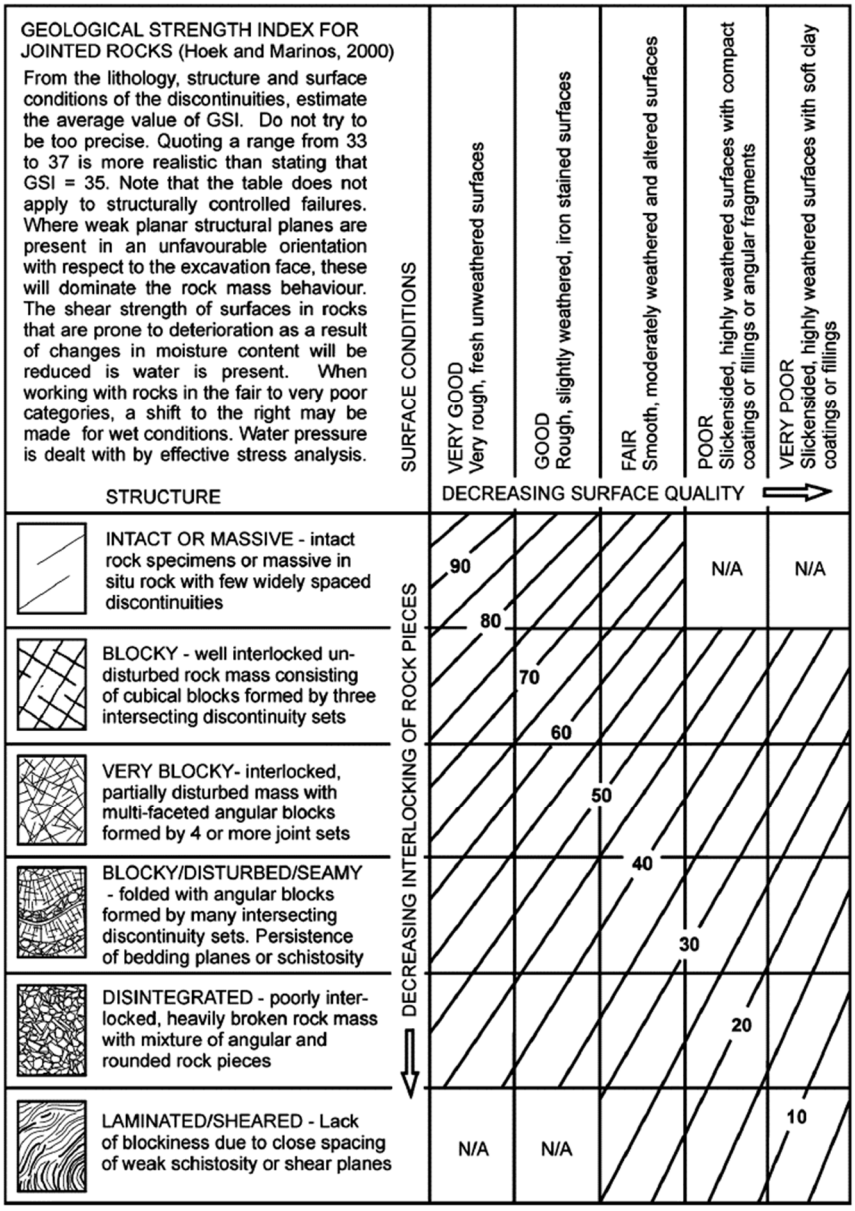


Figura 15 – Grafico per la determinazione dell'indice GSI

6.4.3 Criteri di rottura

In accordo a quanto riportato in Brown & Hoek (1988), Hoek & Brown (1988) e Hoek, Kaiser & Bawden (1995) (vedi anche Sjoberg, 1997), Hoek et al. (2002) l'ammasso roccioso verrà descritto per ogni litotipo dal seguente criterio di rottura:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a$$

essendo:

- GSI, Geological Strength Index
- $m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}}$ il valore ridotto della costante del materiale m_i, relativa alla roccia intatta
- $s = e^{\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}}$
- D, il grado di disturbo dell'ammasso, pari a 0 per "undisturbed rock masses" e pari a 1 per "disturbed rock masses"; nel caso in esame si assume D = 0.2
- $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$
- σ_1' = tensione principale efficace maggiore
- σ_3' = tensione principale efficace minore
- σ_c = resistenza alla compressione semplice della roccia intatta, nel caso in esame assunta pari a 15 MPa per la roccia di qualità buona-discreta e 5 MPa per la roccia di qualità scadente.

Nella tabella seguente vengono riportati i valori tipici di m_i per le diverse formazioni rocciose. Per gli scisti si assume un valore medio pari a 12.

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

* These values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if failure occurs along a weakness plane.

Figura 16 – Stima della costante mi per la roccia intatta (Marinos & Hoek, 2000)

Poiché molti software geotecnici utilizzano il criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, è necessario determinare dei valori equivalenti di angolo di attrito ϕ' e coesione efficace c' per l'ammasso roccioso, utilizzando i parametri definiti in precedenza:

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

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

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

Dove $\sigma_3'_{max}$ è il limite superiore della tensione di confinamento σ_3'.

6.4.4 Caratteristiche di deformabilità

Il modulo di deformazione dell'ammasso roccioso viene stimato attraverso la correlazione proposta da Hoek & Diederichs (2006), che considera l'indice GSI, il grado di disturbo D e il modulo elastico della roccia intatta Ei:

$$E_{rm} = E_i\left(0.02+\frac{1-D/2}{1+e^{((60+15D-GSI)/11)}}\right)$$

$$E_i = MR\cdot\sigma_{ci}$$

Dove il modulo elastico della roccia intatta Ei viene stimato a partire dalla resistenza a compressione della roccia intatta σ_{ci} e dal rapporto MR, assunto pari a 400-500 nel caso in esame.

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerates 300–400 Breccias 230–350	Sandstones 200–350	Siltstones 350–400 Greywackes 350	Claystones 200–300 Shales 150–250[a] Marls 150–200
	Non-clastic	Carbonates	Crystalline limestones 400–600	Sparitic limestones 600–800	Micritic Limestones 800–1000	Dolomites 350–500
		Evaporites		Gypsum (350)[b]	Anhydrite (350)[b]	
		Organic				Chalk 1000+
Metamorphic	Non-foliated		Marble 700–1000	Hornfels 400–700 Metasandstone 200–300	Quartzites 300–450	
	Slightly foliated		Migmatite 350–400	Amphibolites 400–500	Gneiss 300–750[a]	
	Foliated[a]			Schists 250–1100[a]	Phyllites/Mica Schist 300–800[a]	Slates 400–600[a]
Igneous	Plutonic	Light	Granite[c] 300–550 Granodiorite[c] 400–450	Diorite[c] 300–350		
		Dark	Gabbro 400–500 Norite 350–400	Dolerite 300–400		
	Hypabyssal			Porphyries (400)[b]	Diabase 300–350	Peridotite 250–300
	Volcanic	Lava		Rhyolite 300–500 Andesite 300–500	Dacite 350–450 Basalt 250–450	
		Pyroclastic	Agglomerate 400–600	Volcanic breccia (500)[b]	Tuff 200–400	

[a]Highly anisotropic rocks: the value of MR will be significantly different if normal strain and/or loading occurs parallel (high MR) or perpendicular (low MR) to a weakness plane. Uniaxial test loading direction should be equivalent to field application.
[b]No data available, estimated on the basis of geological logic.
[c]Felsic Granitoids: coarse grained or altered (high MR), fined grained (low MR).

Figura 17 – Tabella per la stima di MR (Deere; Palmstrom & Singh)

7 ELABORAZIONE DELLE INDAGINI IN SITO

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni si è fatto riferimento agli esiti del sondaggio S02 spinto fino a 30 m di profondità ed eseguito nel settembre 2020, nel corso del quale sono state effettuate prove penetrometriche dinamiche SPT (Standard Penetration Test) nei terreni fino a 9 m di profondità e prove RQD (Rock Quality Designation) nella formazione rocciosa sottostante.

Per i terreni fino -9 m la caratterizzazione geotecnica si è basata prevalentemente sulle prove SPT. Per un confronto sui moduli elastici operativi, tale parametro è stato anche calcolato a partire dai valori di Vs. Per la formazione rocciosa sottostante è stata svolta una caratterizzazione mediante l'utilizzo del software Roclab, a partire dai valori di RQD.

Si è fatto inoltre riferimento ai risultati delle due prove MASW, in particolare per la definizione della stratigrafia a sud dei binari.

7.1 Prove SPT

7.1.1 Valori di SPT

Si riportano in seguito i valori di Nspt ricavati dalle prove eseguite nel foro di sondaggio S02.

Profondità	Nspt
m	N_{60}
1.5	7
3	15
4.4	12
7	11

Nel primo strato costituito da limo argilloso debolmente ghiaioso (0-3 m) si ha quindi Nspt = 7; a seguire, nello strato di sabbia limosa presente fino a 9 m si ha Nspt = 11-15.

7.1.2 Densità relativa

Si riportano nel grafico seguente i valori della densità relativa, stimati a partire dai valori di Nspt in funzione delle correlazioni precedentemente esposte.

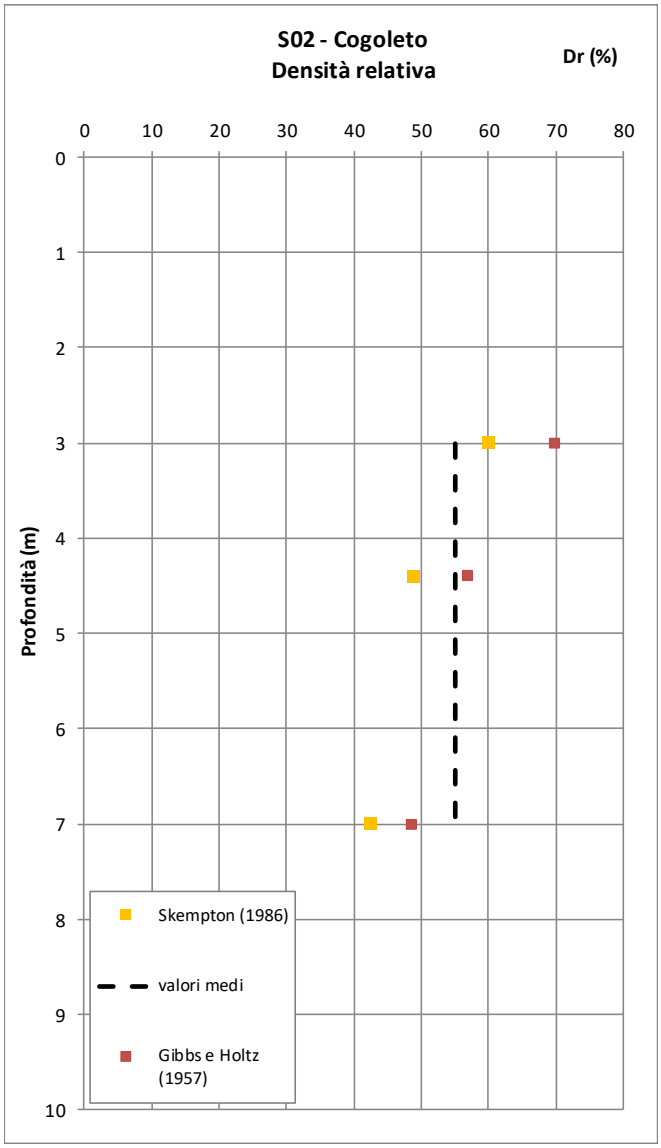


Figura 18 – Densità relativa ottenuta da Nspt

7.1.3 Angolo di attrito

Si riportano nel grafico seguente i valori dell'angolo di attrito, stimati a partire dai valori di Nspt in funzione delle correlazioni precedentemente esposte.

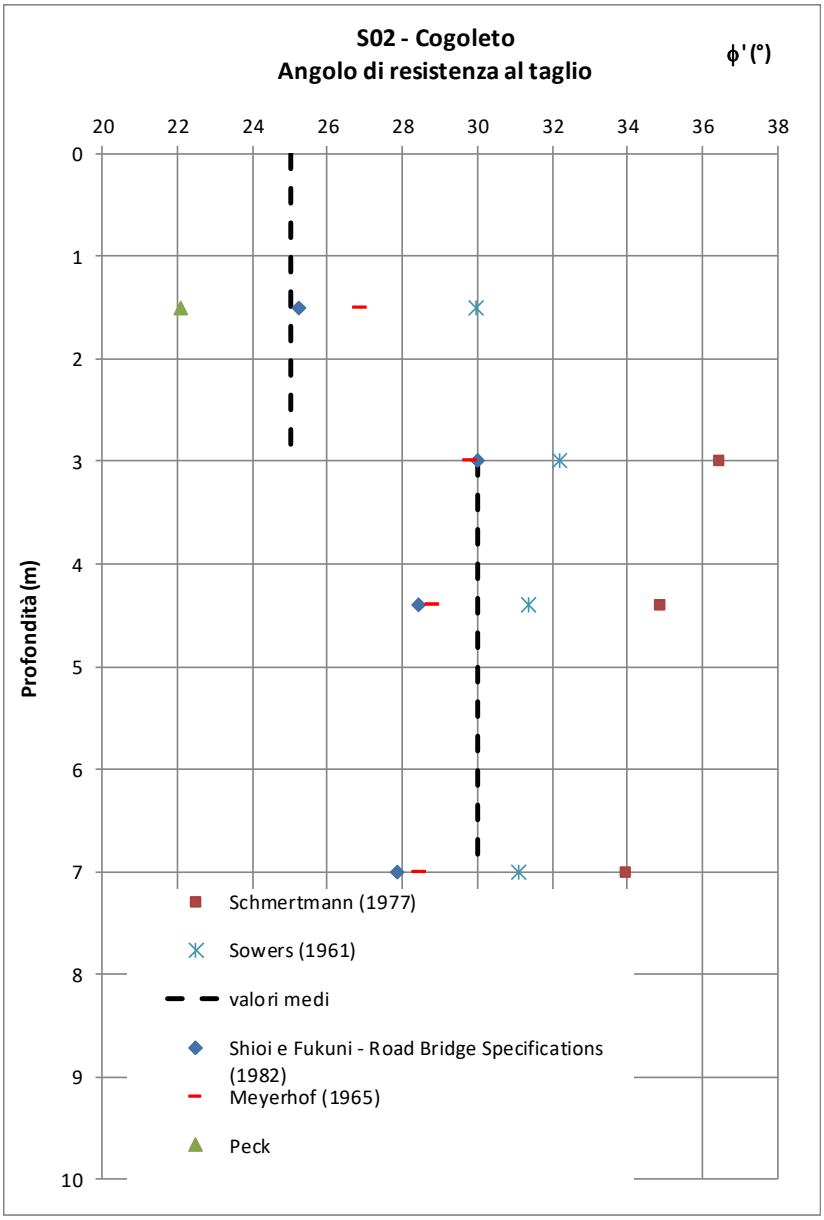


Figura 19 – Angolo di attrito ottenuto da Nspt

7.1.4 Modulo di Young

Si riportano nel grafico seguente i valori del modulo di Young, stimati a partire dai valori di Nspt in funzione delle correlazioni precedentemente esposte e, per confronto, anche dalle Vs:

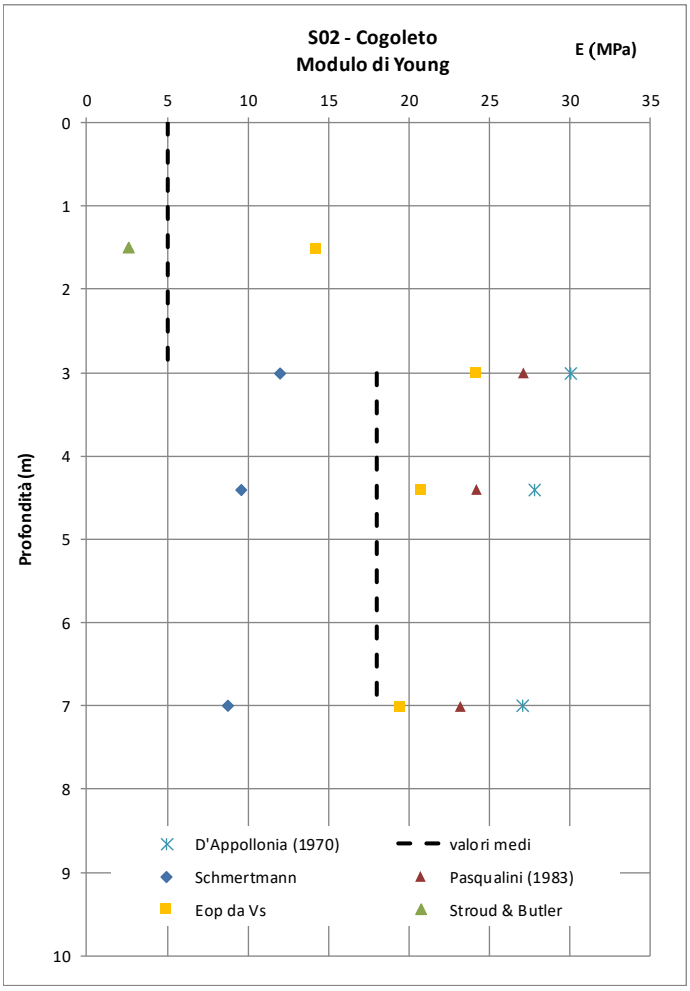


Figura 20 – Modulo di Young ottenuto da Nspt e Vs

7.2 Prove sulle rocce

7.2.1 Valori di RQD

Da 9 m a 30 m di profondità viene individuato il substrato roccioso, descritto come segue: "*Calcemicascisti di colore grigiastro scuro con lineamenti nerastri appartenenti all'unità tettonometamorfica Palmaro - Caffarella (Calcascisti della Val Branega): Scisti quarzo - micacei più o meno calciferi con livelli nerastri ricchi in cloritoide di spessore millimetrico, boudinati. il materiale si presenta fratturato e con l'aumentare della profondità molto disgregato*".

Si riportano in seguito i valori di RQD:

9-14 m	80-94%	qualità buona/molto buona
14-18 m	62-73%	qualità discreta
18-20 m	20%	qualità molto scadente
20-25 m	28-39%	qualità scadente
25-27 m	20%	qualità molto scadente
27-30 m	41-62%	qualità scadente/discreta

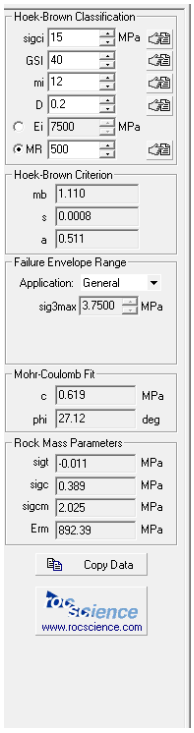
7.2.2 Determinazione dei parametri di resistenza e di deformabilità

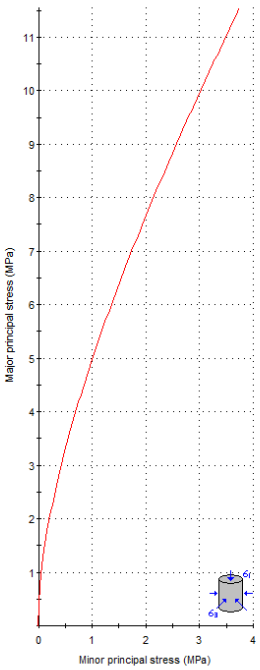
Con l'ausilio del software Roclab è stato possibile stimare i parametri di resistenza secondo il criterio di rottura Mohr-Coulomb e di deformabilità dell'ammasso. Sono state svolte due analisi, la prima per l'ammasso di qualità buona/discreta da 9 m a 18 m e la seconda per l'ammasso di qualità scadente/molto scadente che si incontra a seguire.

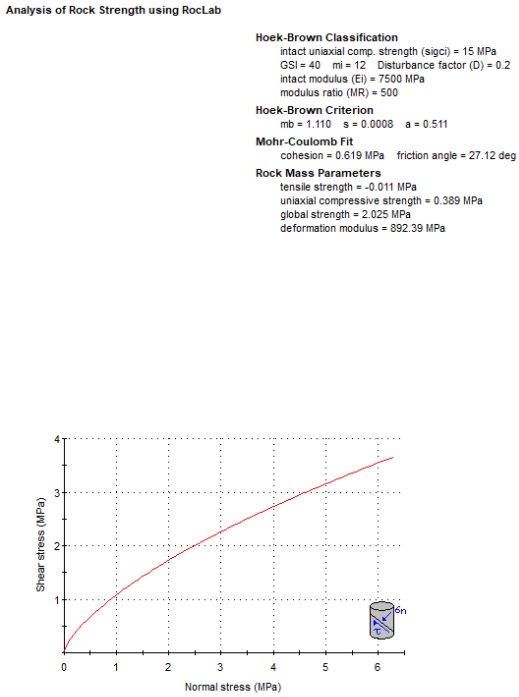
9-18 m (roccia buona/discreta)

UCS roccia intatta = 15 MPa

GSI = 40



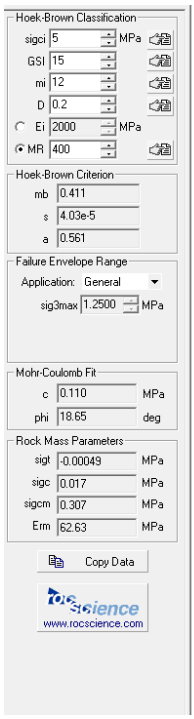


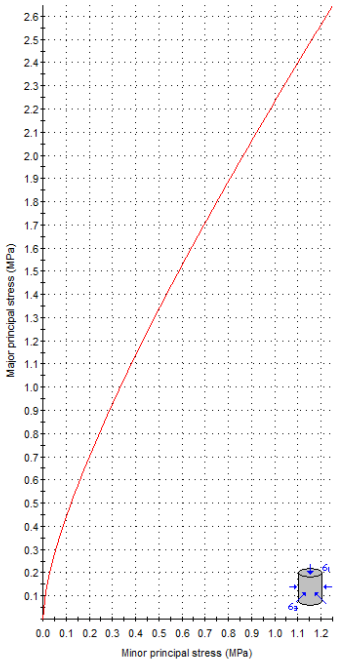


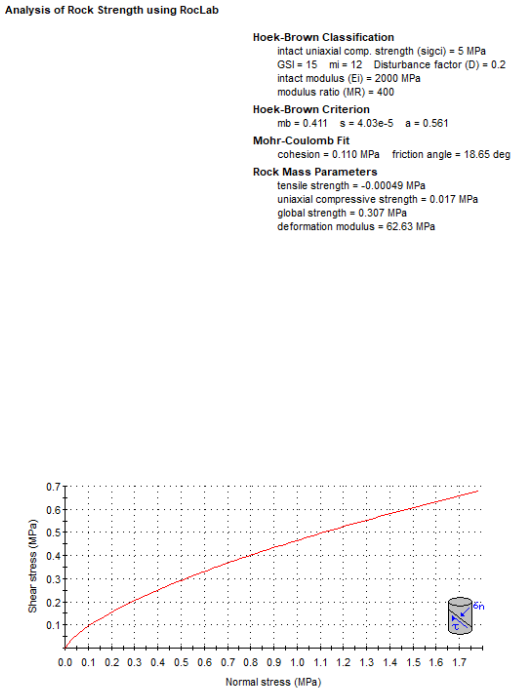
18-30 m (roccia scadente/molto scadente)

UCS roccia intatta = 5 MPa

GSI = 15







7.3 Prove MASW

7.3.1 Modulo di Young

Si riportano nel grafico seguente i valori del modulo di Young, stimati a partire dai valori di Vs:

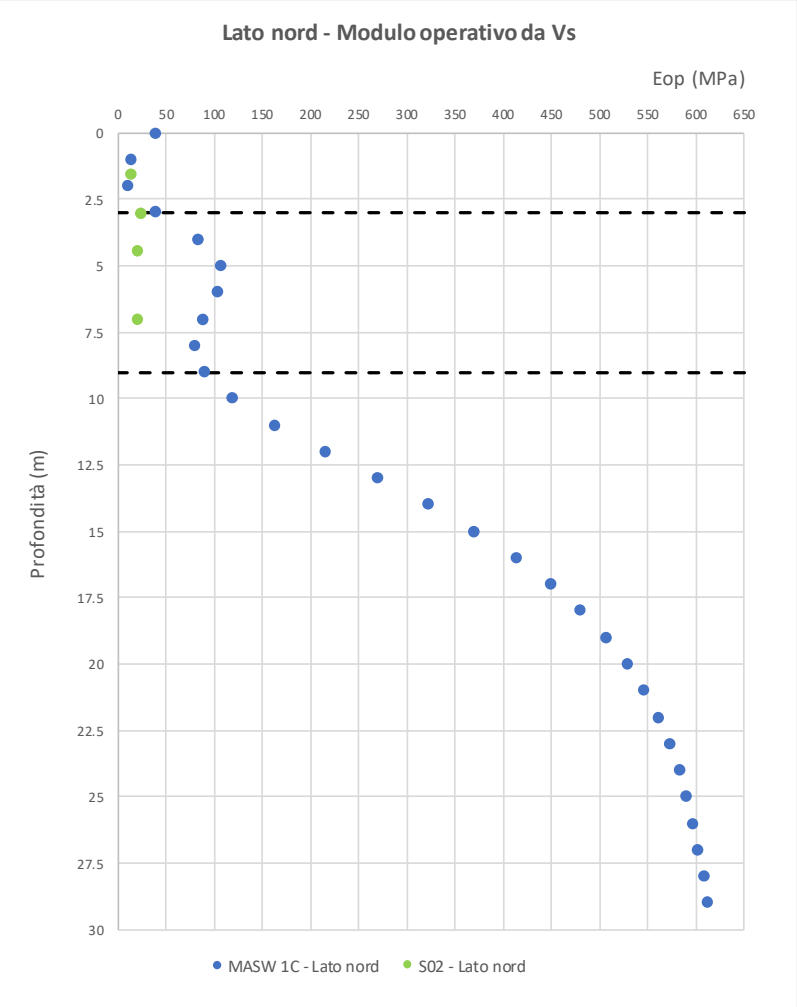


Figura 21 – Lato nord - Modulo di Young ottenuto da Vs

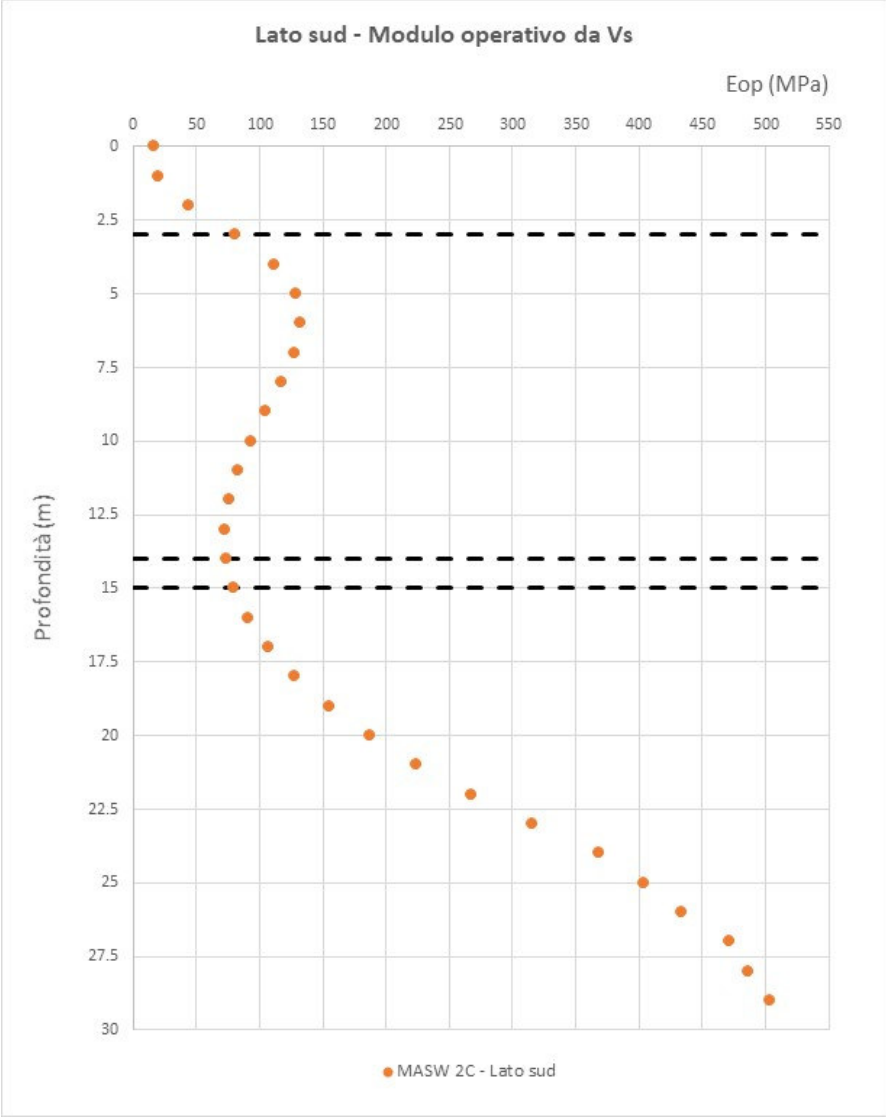


Figura 22 – Lato sud - Modulo di Young ottenuto da Vs

8 PARAMETRI GEOTECNICI

Per le unità geotecniche individuate si assumeranno i seguenti parametri geotecnici.

Lato nord
S02, MASW 1C - Cogoleto
Quota piano campagna = quota sondaggio = +6.4 m l.m.m.

Categoria sismica sottosuolo: E

Unità	Descrizione	da (m da p.c.)	a (m da p.c.)	spessore (m)	Peso dell'unità di volume γ (kN/m^3)	Densità relativa Dr (%)	Angolo di resistenza al taglio ϕ' (°)	Coesione efficace c' (kPa)	Coesione non drenata cu (kPa)	Modulo di Young E (MPa)	GSI (Geological Strength Index)	RQD (Rock Quality Designation) - (%)
1	Terreno rimaneggiato: limo argilloso debolmente ghiaioso	0	3	3	19*	-	25	0*	35	5	-	-
2	Sabbia limosa mediamente addensata	3	9	6	19*	50-60	30	0	-	18	-	-
3	Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi fratturati - Roccia di qualità da buona a discreta	9	18	9	24*	-	27	600	-	100-500	40	62-94
4	Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi molto disgregati - Roccia di qualità da scadente a molto scadente	18	30	12	24*	-	18.5	100	-	60	15	20-39

* valori ipotizzati, poiché non si hanno a disposizione prove di laboratorio

Lato sud
MASW 2C - Cogoleto

Quota piano campagna = +3 m l.m.m.
Categoria sismica sottosuolo: E

Unità	Descrizione	da (m da p.c.)	a (m da p.c.)	spessore (m)	Peso dell'unità di volume γ (kN/m^3)	Densità relativa Dr (%)	Angolo di resistenza al taglio ϕ' (°)	Coesione efficace c' (kPa)	Coesione non drenata cu (kPa)	Modulo di Young E (MPa)	GSI (Geological Strength Index)	RQD (Rock Quality Designation) - (%)
1	Terreno rimaneggiato: limo argilloso debolmente ghiaioso	0	3	3	19*	-	25	0*	35	5	-	-
2	Sabbia limosa mediamente addensata	3	14	11	19*	50-60	30	0	-	18	-	-
3	Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi molto disgregati - Roccia di qualità da scadente a molto scadente	14	15	1	24*	-	18.5	100	-	60	15	20-39
4	Scisti quarzo-micacei più o meno calciferi fratturati - Roccia di qualità da buona a discreta	15	30	15	24*	-	27	600	-	100-500	40	62-94

* valori ipotizzati, poiché non si hanno a disposizione prove di laboratorio

Con riferimento al modello geotecnico lato sud la quota del piano campagna è stata assunta alla +3 m l.m.m., corrispondente alla quota a cui è stata eseguita la MASW 2C. Il terreno a quote superiori è costituito dal rilevato ferroviario esistente, cautelativamente caratterizzato da un angolo di attrito ϕ' = 35°, da coesione nulla e modulo elastico E = 20 MPa.

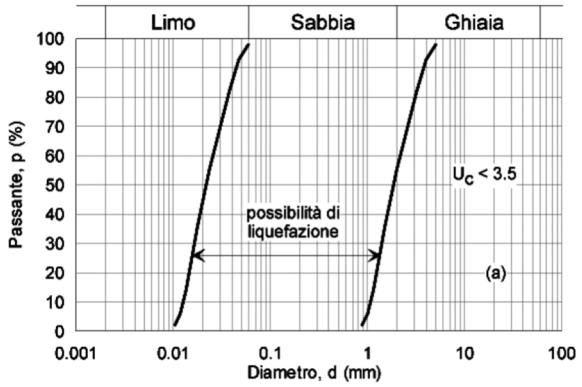
Con riferimento al modello geotecnico lato sud, in fase di progetto esecutivo dovrà essere realizzato un sondaggio integrativo per confermare la profondità del substrato roccioso, considerato che la prova MASW 2C individua la presenza della roccia a 14 m, a differenza di quanto riscontrato lato nord, dove la MASW 1C e il sondaggio S2 individuano la roccia a 9 m di profondità.

La falda di progetto viene assunta a -6 m dal piano campagna riscontrato nel sondaggio S02 eseguito lato nord (+6.4 m l.m.m.), quindi alla quota assoluta +0.4 m l.m.m..

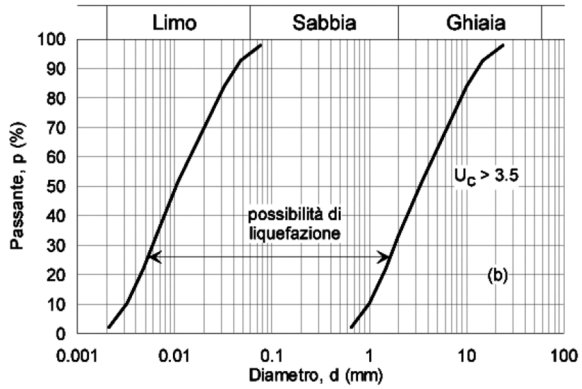
9 VERIFICA A LIQUEFAZIONE DEI TERRENI

Secondo quanto riportato al paragrafo 7.11.3.4.2 delle NTC 2018 la verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti condizioni:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata (N1)60 > 30 oppure qc1N > 180 dove (N1)60 è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc1N è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nelle figure seguenti nel caso di terreni con coefficiente di uniformità Uc < 3,5 e nel caso di terreni con coefficiente di uniformità Uc > 3,5.



a)



b)

Nel caso in esame è possibile omettere la verifica a liquefazione sulla base della condizione 1): si ha infatti a_{max} = 0.096 g < 0.1 g.