

S.S. n.21 "della Maddalena"
Variante agli abitati di Demonte, Aisone e Vinadio
Lotto 1. Variante di Demonte

PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

I PROGETTISTI:

ing. Vincenzo Marzi
Ordine Ing. di Bari n.3594
ing. Achille Devitofranceschi
Ordine Ing. di Roma n.19116
geol. Flavio Capozucca
Ordine Geol. del Lazio n.1599

RESPONSABILE DEL SIA

arch. Giovanni Magarò
Ordine Arch. di Roma n.16183

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

geom. Fabio Quondam

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :

ing. Nicolò Canepa

PROTOCOLLO

DATA

Opere d'arte maggiori
Galleria naturale
Relazione geomeccanica

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	DPT005_D_1601_T00_GN01_OST_RE01_A.DWG		
DPT005	D	1601	CODICE ELAB. T00GN01OSTRE01	A	-
C					
B					
A	EMISSIONE		Novembre 2017	-	-
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO APPROVATO

INDICE

1	INTRODUZIONE E NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
1.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
2	INQUADRAMENTO DELLE OPERE IN PROGETTO	4
3	INQUADRAMENTO DEL RILIEVO PODIO	6
4	INDAGINI GEOGNOSTICHE REALIZZATE	7
4.1	SONDAGGI GEOGNOSTICI	7
4.2	INDAGINI GEOFISICHE	12
5	UNITÀ GEOTECNICHE E GEOMECCANICHE INDIVIDUATE	21
6	PROVE GEOTECNICHE ESEGUITE	29
6.1	PROVE DI LABORATORIO	29
6.1.1	DETERMINAZIONE DEL PESO DI VOLUME	44
6.1.2	ANALISI GRANULOMETRICHE	45
6.1.3	LIMITI DI ATTERBERG	49
6.1.4	PROVA DI TAGLIO DIRETTO	51
6.1.5	PROVE DI COMPRESIONE MONOASSIALE E PROVE POINT LOAD	52
6.2	PROVE IN FORO	55
6.2.1	PROVE SPT	55
6.2.2	PROVE PRESSIOMETRICHE E DILATOMETRICHE	59
6.2.3	PROVE DI PERMEABILITÀ LUGEON	62
7	CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO	64
8	CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE E GEOMECCANICHE	66
8.1	UNITÀ GEOTECNICA DR	70
8.2	UNITÀ GEOMECCANICA UGM1	70
8.3	UNITÀ GEOMECCANICA UGM2	71
8.4	UNITÀ GEOMECCANICA UGM3	71
8.5	UNITÀ GEOMECCANICA UGM4	72
8.6	UNITÀ GEOMECCANICA UGM_I	72
9	MODELLO GEOMECCANICO DI RIFERIMENTO	73
10	INQUADRAMENTO SISMICO DELL'AREA IN ESAME	78
10.1	TEMPO DI RITORNO	79
10.2	ACCELERAZIONE MASSIMA	80
10.3	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO	81

10.4	CONDIZIONI TOPOGRAFICHE	83
10.5	ACCELERAZIONE MASSIMA AL SUOLO	84

1 INTRODUZIONE E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La presente relazione fa parte del Progetto Definitivo (cod. Prog. N.TOUP67) della Variante di Demonte e Vinadio (Aisone) – Lotto 1° - variante di Demonte, relativo al DGACQ 15-14, Accordo Quadro con unico operatore per lotto, ai sensi dell'59, comma 4 del D.Lsd 163/2006. CIG: 6023245B01 – Prot. n. CDG 0138938 – P del 23/12/2016.

Questo documento riporta la caratterizzazione geomeccanica dei litotipi da scavare per la realizzazione della galleria naturale di lunghezza pari a 647,61m ubicata entro il rilievo Podio, posto immediatamente ad Est dell'abitato di Demonte.

1.1 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento è la seguente:

- Decreto Ministero Infrastrutture 14 gennaio 2008 – Nuove norme tecniche per le costruzioni.
- Circolare n.617 del 2 febbraio 2009 del Ministero Infrastrutture e Trasporti – Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni”.

2 INQUADRAMENTO DELLE OPERE IN PROGETTO

Come anticipato il presente elaborato descrive l'assetto geomeccanico dei terreni interessati dallo scavo della galleria da realizzare nel rilievo Podio collocato in prossimità dell'abitato di Demonte.

In particolare l'opera in progetto è costituita da una galleria stradale a singolo fornice di lunghezza complessiva pari a 647,61m, costituita da 48,3m di gallerie artificiali (18,3m presso l'imbocco lato Ovest e 30m presso l'imbocco lato Est) e 599,31 m di scavo della galleria naturale. In aggiunta a tale opera verrà realizzato un cunicolo di esodo caratterizzato da lunghezza pari a 174,98m, dei quali 163,48m costituiranno lo scavo in naturale ed i restanti 11,5m verranno realizzati mediante una galleria artificiale.

La galleria è caratterizzata da copertura massima pari a circa 75m; in corrispondenza della parte centrale dell'opera è previsto l'innesto del cunicolo di esodo che sarà caratterizzato da una copertura massima pari a circa 66m.

Le progressive di imbocco delle opere sono riportate nelle tabelle seguenti.

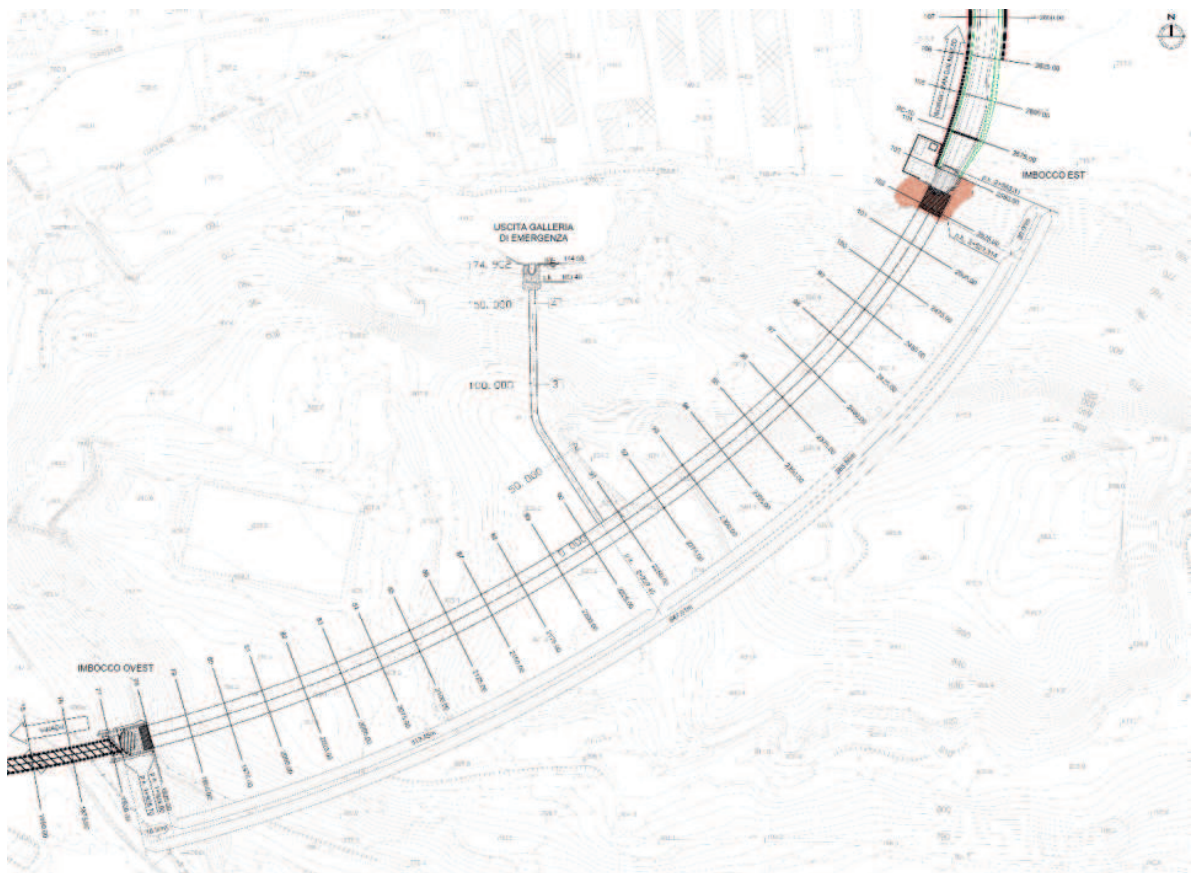


Figura 1: Planimetria di inquadramento della galleria da realizzare nel rilievo Podio. Immagine non in scala.

Tabella 1: Progressive di progetto della galleria stradale.

Galleria stradale			
Pk imbocco lato Vinadio (SW) (m)		Pk imbocco lato Borgo San Dalmazzo (NE) (m)	
G.A.	G.N.	G.N.	G.A.
1+905,70	1+924,00	2+523,314	2+553,31

Tabella 2: Progressive di progetto del cunicolo di esodo della galleria stradale.

Cunicolo di esodo		
Pk imbocco G.A. (m)	Pk imbocco G.N. (m)	Pk innesto nella galleria stradale (m)
0+174,98	0+163,48	2+237,45

3 INQUADRAMENTO DEL RILIEVO PODIO

La galleria verrà realizzata in attraversamento del rilievo denominato "il Podio", formazione prevalentemente rocciosa che si inserisce nel contesto alpino della valle dello Stura, la quale si colloca tra imponenti montagne nelle Alpi Marittime per più di 50 Km, prima di unirsi alla Pianura Padana nei pressi di Cuneo. La zona è caratterizzata dalla presenza del fiume Stura ubicato a sud dell'abitato di Demonte, il cui principale affluente proviene da nord ed è il torrente Cant, che dispone di un grande bacino imbrifero (Vallone dell'Arma).

I terreni affioranti nella zona possono essere suddivisi in depositi quaternari e substrato (di età compresa tra il Paleozoico e l'Oligocene); lo scavo interesserà le formazioni appartenenti al Substrato sedimentario-metamorfico costituite prevalentemente da metacalcari e carniole.

4 INDAGINI GEOGNOSTICHE REALIZZATE

Nell'ambito della presente fase progettuale è stata realizzata una campagna di indagini geognostiche caratterizzata dalle seguenti finalità:

- verifica dei litotipi coinvolti dalla realizzazione delle opere in progetto;
- acquisizione di campioni per l'esecuzione di prove di laboratorio;
- esecuzione di prove geotecniche in sito;
- rilevazione e monitoraggio dell'altezza della superficie piezometrica di una falda libera eventualmente presente nel rilievo in studio.

In dettaglio il presente elaborato tratterà esclusivamente le indagini eseguite presso il rilievo Podio al fine di caratterizzare l'ammasso roccioso entro cui verranno realizzate le opere in sotterraneo previste; pertanto non saranno descritte le indagini geognostiche eseguite esternamente all'area considerata.

Nel periodo compreso tra il 4 Maggio e l'8 Luglio 2017 sono state realizzate le seguenti indagini geognostiche:

- N°5 sondaggi a carotaggio continuo;
- N°1 sondaggio misto a carotaggio continuo e distruzione di nucleo;
- N°5 stendimenti sismici a rifrazione ed elaborazione tomografica;
- N° 3 stendimenti elettrici ad elaborazione tomografica;
- N° 1 prova sismica in foro tipo Down Hole.

Nei paragrafi seguenti verrà fornita una descrizione sintetica delle indagini eseguite.

Per la visualizzazione dei rapporti di prova e per maggiori informazioni circa le indagini eseguite si rimanda agli specifici elaborati.

4.1 SONDAGGI GEOGNOSTICI

I sondaggi geognostici sono stati realizzati nel periodo compreso tra il 13 Maggio e l'8 Luglio 2017 ed hanno permesso di:

- Acquisire n°6 colonne stratigrafiche di lunghezza compresa tra 7 e 70,2m;
- Acquisire n°55 campioni indisturbati e n°8 campioni rimaneggiati;
- Installare n°2 piezometri a tubo aperto;
- Eseguire n°3 indagini SPT;
- Eseguire n°1 prova pressiométrica;
- Eseguire n°17 prove dilatometriche;

- Eseguire n°5 prove di permeabilità tipo Lugeon.

In aggiunta alla descrizione delle stratigrafie (le cui descrizioni sono state sinteticamente riportate in seguito) i sondaggi realizzati hanno inoltre permesso di determinare il valore dell'indice RQD delle tratte perforate entro materiali litoidi.

Nelle tabelle riportate in seguito sono state riassunte le principali caratteristiche dei singoli sondaggi realizzati e l'ubicazione delle verticali di indagine rispetto alle opere in progettazione.

Tabella 3: Indagini geognostiche eseguite presso l'area in esame. CC=perforazione a carotaggio continuo; DN=perforazione a distruzione di nucleo; SPT=prova penetrometrica standard; PR=prova pressiometrica; DL=prova dilatometrica; TA=piezometro a tubo aperto; IND=campioni indisturbati; RIM=campioni rimaneggiati; LU=prova Lugeon.

Sigla sondaggio	Prof. (m)	Perforazione	Prove in foro	Completamento foro	Campioni raccolti
S6_orizz	70,2	CC	5 DL	-	16 IND + 2 RIM
S7-P	60	CC	1 SPT + 5 DL + 2 LU	Piezometro TA	16 IND + 1 RIM
S8_orizz	40	CC	3 DL	-	8 IND + 1 RIM
S10-P	25	CC	1 SPT + 1 PR + 2 DL + 1 LU	Piezometro TA	6 IND + 3 RIM
S10-Pbis	16	DN(0-9) + CC(9-16)	2 LU	-	-
S11_DH	30	CC	1 SPT + 2 DL	Down Hole	9 IND + 1 RIM

Tabella 4: Indagini geognostiche eseguite presso l'area in esame.

Sigla sondaggio	Prof. (m)	Quota (m s.l.m.)	Fuori asse (m)	Fuori asse (direzione rispetto al tracciato)	Ubicazione rispetto all'opera in progetto
S6_orizz	70,2	748	9,4	NNW	Imbocco lato Vinadio (SW)
S7-P	60	807	2,9	SSE	Settore prossimo all'Imbocco lato Vinadio (SW)
S8_orizz	40	746	9,1	NW	Imbocco lato Borgo San

Sigla sondaggio	Prof. (m)	Quota (m s.l.m.)	Fuori asse (m)	Fuori asse (direzione rispetto al tracciato)	Ubicazione rispetto all'opera in progetto
					Dalmazzo (NE)
S10-P	25	771	15,3	NNW	Imbocco lato Vinadio (SW)
S10-Pbis	16	771	13,6	SSE	Imbocco lato Vinadio (SW)
S11_DH	30	748	6,8	NNW	Imbocco lato Vinadio (SW)

Il sondaggio **S6-orizz** (di lunghezza pari a 70,2m) è stato realizzato orizzontalmente presso l'imbocco lato Vinadio (imbocco SW) della galleria naturale ed ha determinato la presenza dei seguenti litotipi:

- 0-3m. Ciottoli eterometrici in matrice sabbiosa;
- 3-8,5m. Limi sabbiosi con ciottoli arenacei;
- 8,5-19,5m. Sabbie medio fini giallastre con inclusi arenacei;
- 19,5-22m. Carniola calcarea alterata ed immersa in matrice limosa;
- 22-31,6m. Carniola calcarea litoide con vacuoli;
- 31,6-70,2m. Alternanze di argilliti siltose a grana fine con breccie cementate con clasti a spigoli vivi.

In generale il sondaggio ha identificato la presenza di materiali sciolti non litoidi fino alla progressiva di perforazione circa 23m (RQD 0%), mentre in seguito sono state incontrate carnioli ed argilliti con breccie litoidi caratterizzate da RQD mediamente compreso tra 60-80%. Non è stata rilevata la presenza di acqua nel sondaggio.

Il sondaggio **S7-P** (di lunghezza pari a 60m) è stato realizzato nelle vicinanze del campo sportivo ubicato presso il rilievo del Podio ed ha evidenziato la presenza di:

- 0-4,5m. Ciottoli calcarei in matrice sabbiosa;
- 4,5-9,5m. Sabbie e sabbie debolmente limose con ciottoli;
- 9,5-12,8m. Calcarea molto fratturato;
- 12,8-15,8m. Limi sabbiosi e limi sabbiosi debolmente argillosi;
- 15,8-22,3m. Arenarie calcaree brecciate con riempimenti limosi e sabbiosi;
- 22,3-41,4m. Calcari a cellette talvolta con aspetto brecciato;
- 41,4-47,4m. Argilliti calcaree di colore verdastro;
- 47,4-60m. Calcari ad aspetto brecciato.

In generale i materiali attraversati dal sondaggio S7-P si presentano sciolti non litoidi fino alla profondità di 17m (RQD 0%), mentre in seguito la presenza di arenarie, calcari ed argilliti ha evidenziato la presenza di litotipi litoidi caratterizzati da RQD compreso mediamente tra 60-80%.

Nel sondaggio S7-P la presenza di un piezometro a tubo aperto ha permesso di rilevare la presenza di una superficie di falda libera caratterizzata da soggiacenza pari a 22m dal piano campagna.

Il sondaggio **S8-orizz** (di lunghezza pari a 40m) è stato realizzato orizzontalmente presso l'imbocco lato Borgo San Dalmazzo (imbocco NE) della galleria naturale ed ha determinato la presenza dei seguenti litotipi:

- 0-3m. Materiali di riporto;
- 3-12m. Detrito di versante costituito da frammenti e scaglie di meta calcari;
- 12-16,8m. Detrito di versante costituito da frammenti e scaglie di meta calcari immerso in matrice sabbiosa-debolmente limosa;
- 16,8-27,5m. Meta calcari fratturati;
- 27,5-40m. Meta calcari.

In generale il sondaggio ha identificato la presenza di materiali sciolti non litoidi fino alla progressiva di perforazione 16,8m (RQD 0%), mentre in seguito la perforazione dei meta calcari ha evidenziato il passaggio entro il substrato roccioso litoide caratterizzato da RQD compreso mediamente tra 60-80%. Non è stata rilevata la presenza di acqua nel sondaggio.

Il sondaggio **S10-P** (di lunghezza pari a 25m) è stato realizzato nelle vicinanze dell'imbocco lato Vinadio (imbocco SW) della galleria naturale ed ha evidenziato i seguenti litotipi:

- 0-1,5m. Ciottoli con sabbie;
- 1,5-4,7m. Limi sabbiosi con ciottoli;
- 4,7-9,4m. Meta arenarie calcaree;
- 9,4-25m. Carniole.

Il sondaggio ha quindi intercettato per i primi 5m dei materiali sciolti a comportamento non litoide (RQD 0%), per poi entrare in un ammasso litoide debole costituito da depositi giurassici e triassici e carniole caratterizzate da RQD discontinuo pari mediamente a circa 20% fino a 19m di profondità e successivamente variabile tra circa 40-90% fino a fondo foro.

Anche nel sondaggio S10-P non è stata rilevata la presenza di acqua.

Il sondaggio **S10-Pbis** (di lunghezza pari a 16m) è stato realizzato nelle vicinanze dell'imbocco lato Vinadio (imbocco SW) della galleria naturale ed ha evidenziato i seguenti litotipi:

- 0-9m. Nessuna informazione disponibile in quanto tratta eseguite a distruzione di nucleo;
- 9-16m. Carniole.

Nella tratta realizzata a carotaggio continuo entro le carniole litoidi è stato determinato un valore dell'indice RQD mediamente variabile tra 40-80%. Nel sondaggio è stato inoltre installato un piezometro a tubo aperto che ha permesso di rilevare la presenza di una superficie di falda libera caratterizzata da soggiacenza pari a 9,5m dal piano campagna.

Il sondaggio **S11-DH** (di lunghezza pari a 30m) è stato realizzato nelle vicinanze dell'imbocco lato Vinadio (imbocco SW) della galleria naturale ed ha evidenziato i seguenti litotipi:

- 0-4,6m. Ciottoli in matrice limoso-ghiaiosa;
- 4,6-30m. Carniole.

Il sondaggio ha intercettato 5m iniziali caratterizzati dalla presenza di depositi sciolti (RQD 0%), successivamente passanti a carniole litoidi caratterizzate da RQD mediamente variabile tra 40-60% fino alla profondità di 27m, mentre gli ultimi 3m hanno evidenziato un RQD pari a 0%.

4.2 INDAGINI GEOFISICHE

Le indagini geofisiche ad elaborazione tomografica (indagini sismiche a rifrazione e geoelettriche) sono state realizzate nel periodo compreso tra il 4 ed il 16 Maggio 2017 ed hanno permesso di valutare la velocità delle onde sismiche di compressione (V_p) e di taglio (V_s), nonché determinare la distribuzione della resistività elettrica lungo gli stendimenti realizzati presso il rilievo del Podio.

In dettaglio le caratteristiche delle sezioni realizzate sono state riassunte nella tabella seguente, mentre successivamente è stata proposta una sintetica descrizione delle indagini geofisiche realizzate.

Tabella 5: Indagini geofisiche ad elaborazione tomografica realizzate.

Sigla sondaggio	Tipologia	Lunghezza (m)	Data di realizzazione	Direzione	Ubicazione rispetto all'opera in progetto
SIS5	Sismica a rifrazione	120	4/5/17	NW-SE	Imbocco lato Vinadio (SW)
SIS6	Sismica a rifrazione	600	9/5/17	WSW-ENE	Disposta lungo il tracciato della galleria a partire dall'imbocco lato Vinadio (SW)
SIS7	Sismica a rifrazione	240	5/5/17	NW-SE	Trasversale rispetto alla galleria ed ubicata presso la porzione centrale della galleria
SIS8	Sismica a rifrazione	120	15/5/17	WSW-ENE	Piazzale antistante l'imbocco del cunicolo di esodo
SIS9	Sismica a rifrazione	48	15/5/17	NNW-SSE	Piazzale antistante l'imbocco del cunicolo di esodo
ERT1	Geoelettrica	600	11/5/17	WSW-ENE	Disposta lungo il tracciato della galleria a partire dall'imbocco lato Vinadio (SW)
ERT2	Geoelettrica	240	5/5/17	NW-SE	Trasversale rispetto alla galleria ed ubicata presso la porzione centrale della galleria
ERT3	Geoelettrica	90	16/5/17	WNW-ESE	Settore antistante l'imbocco lato San Dalmazzo (NE)

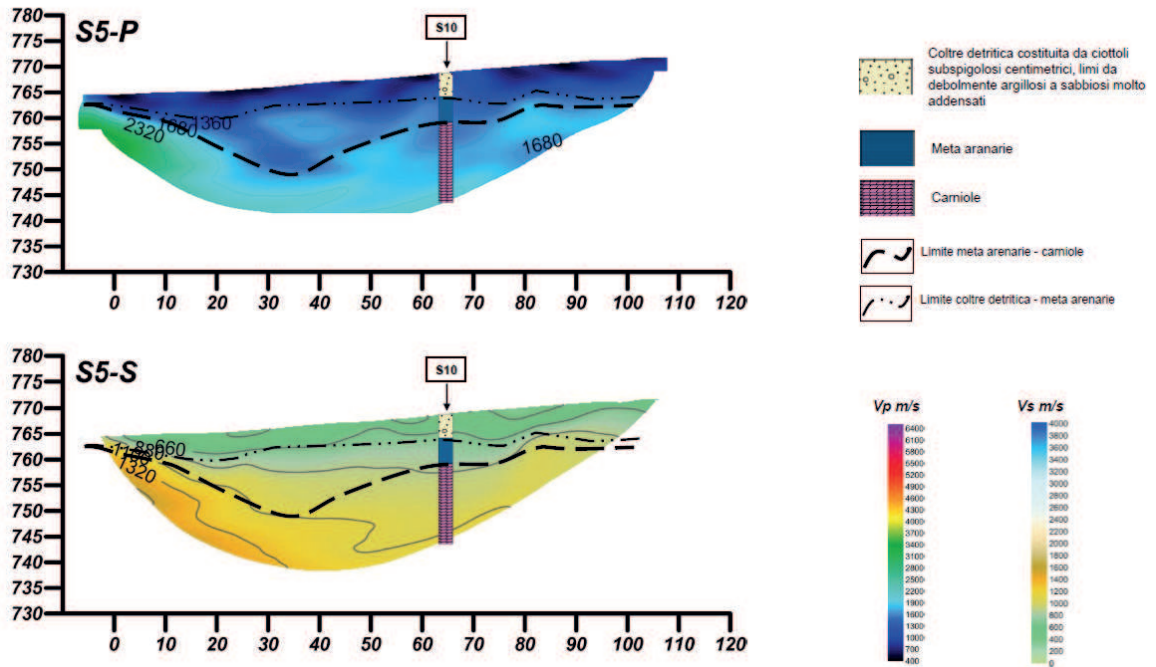


Figura 2: Sezione sismica tomografica a rifrazione SIS5. Immagine non in scala.

La sezione SIS 5 ha evidenziato la presenza di un settore superficiale caratterizzato da potenza non superiore a 5m e velocità V_p inferiore a 1300 m/s, seguito da un settore caratterizzato da velocità V_p inferiore a 2300 m/s e potenza pari a circa 15-20m, passante lateralmente nella parte nord occidentale a velocità V_p superiori a 2300 m/s. La distribuzione delle velocità delle onde di taglio V_s rileva la medesima sismostratigrafia caratterizzata tuttavia da passaggi associati a velocità inferiori pari rispettivamente a 660 e 1300 m/s.

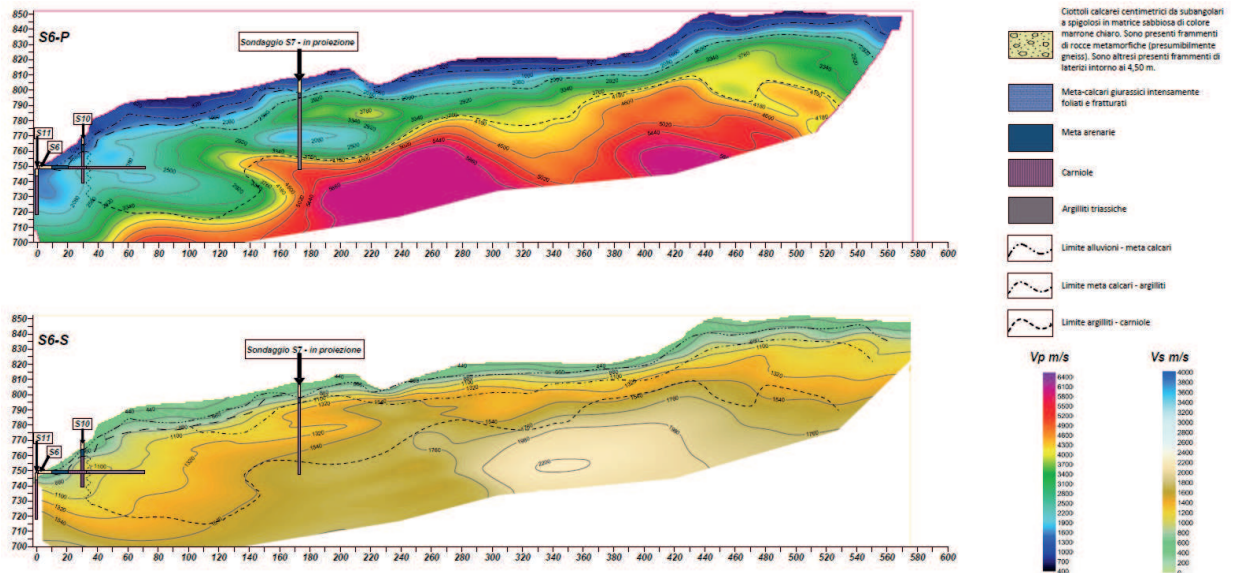


Figura 3: Sezione sismica tomografica a rifrazione SIS6. Distribuzione delle velocità delle onde di compressione V_p (in alto) e di taglio V_s (in basso). Immagine non in scala.

La sezione **SIS 6** evidenzia la presenza di un primo sismostrato superficiale distribuito con regolarità lungo la superficie topografica, caratterizzato da V_p inferiore a 1200 m/s e potenza mediamente pari a circa 10-15m. Tale strato è seguito da un secondo sismostrato molto potente (circa 30-40m), irregolare e caratterizzato da velocità V_p inferiori a 3700 m/s. In seguito la sezione rileva un substrato compatto e sismicamente molto veloce (sismostrato n°3), caratterizzato da V_p variabili da 3700 a 5800 m/s con l'aumentare della profondità.

In generale la sezione evidenzia inoltre la presenza di un'irregolare distribuzione delle velocità e del contatto tra i sismostrati n°2 e n°3, caratterizzata da:

- diverse indentazioni tra tali livelli;
- dalla presenza di una netta prevalenza del sismostrato n°2 nel settore prossimo all'imbocco lato Vinadio rispetto alla parte più profonda del rilievo del Podio, rappresentata dalla parte di stesa protesa verso NE e caratterizzata da una prevalenza del sismostrato n°3.

Il profilo di velocità delle onde V_s evidenzia una distribuzione simile a quella descritta dall'analisi delle onde V_p ; anche in questo caso infatti l'imbocco lato Vinadio evidenzia valori di velocità V_s inferiori (V_s massima pari a circa 1500 m/s) rispetto alla parte verso la terminazione nordorientale della sezione ove vengono raggiunte velocità pari a circa 2200 m/s nel settore più profondo della sezione analizzata.

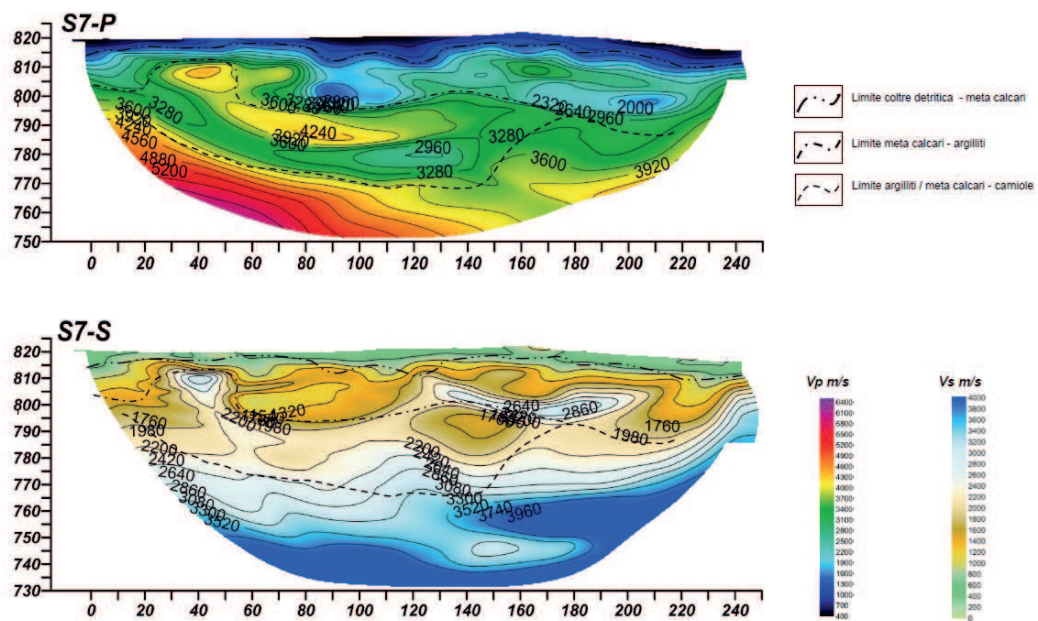


Figura 4: Sezione sismica tomografica a rifrazione SIS7. Distribuzione delle velocità delle onde di compressione V_p (in alto) e di taglio V_s (in basso). Immagine non in scala.

La sezione **SIS 7** evidenzia una irregolare distribuzione delle velocità delle onde V_p in quanto in seguito al sismostrato più superficiale, caratterizzato da velocità inferiori a 1300 m/s e regolare potenza pari a circa 5-10m, è presente un livello molto complesso ed eterogeneo caratterizzato da velocità V_p inferiori a 3700 m/s e potenza compresa tra 40-45m.

In seguito nel settore sudorientale della stesa sismica è visibile un passaggio ad una velocità V_p estesa fino a valori di circa 6400 m/s.

La distribuzione delle onde di taglio V_s evidenzia una sismostratigrafia analoga, caratterizzata da un primo passaggio visibile a velocità pari a circa 600 m/s, seguito da un secondo passaggio a velocità pari a circa 3700 m/s. In questo caso tuttavia il passaggio tra i tre strati si presenta più regolare rispetto a quanto osservato per le onde V_p .

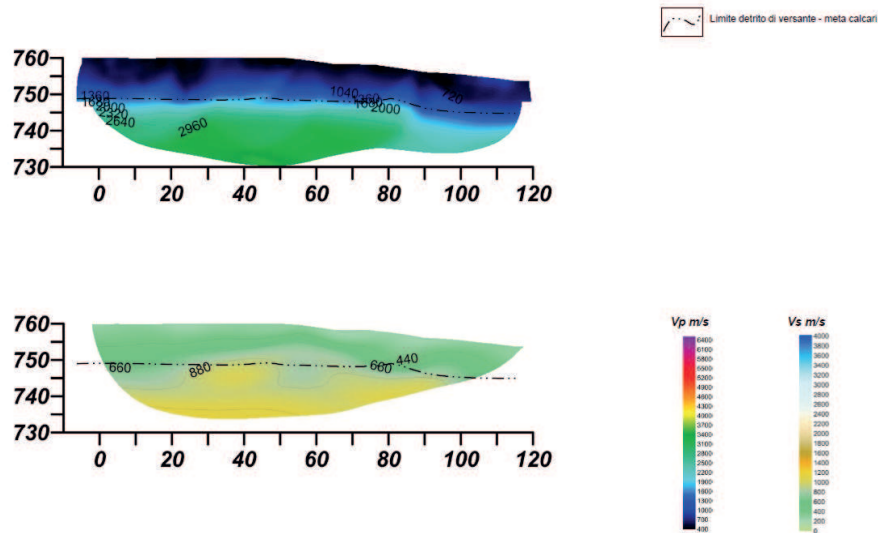


Figura 5: Sezione sismica tomografica a rifrazione SIS8. Distribuzione delle velocità delle onde di compressione V_p (in alto) e di taglio V_s (in basso). Immagine non in scala.

La sezione **SIS 8** evidenzia una distribuzione regolare dei due sismostrati visibili; il primo e più superficiale presenta una potenza pari a circa 10m ed è individuato da una velocità delle onde V_p compresa entro 1300 m/s, il secondo strato rileva invece una velocità superiore delle onde V_p , estesa fino a circa 3000 m/s.

La distribuzione delle velocità delle onde V_s rileva una distribuzione identica a quella descritta precedentemente ed è caratterizzata da un passaggio a circa 660 m/s ed una velocità massima del secondo sismostrato pari a circa 1200m/s.

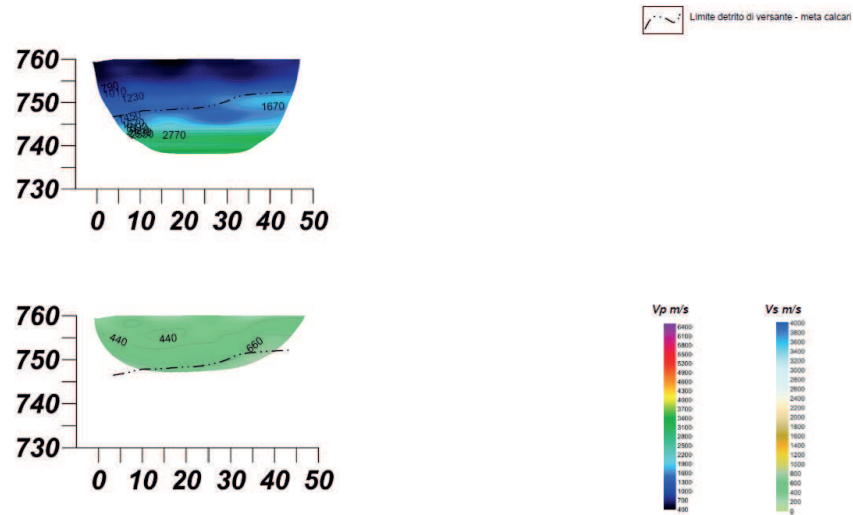


Figura 6: Sezione sismica tomografica a rifrazione SIS9. Distribuzione delle velocità delle onde di compressione V_p (in alto) e di taglio V_s (in basso). Immagine non in scala.

La sezione SIS 9 evidenzia tre sismostrati caratterizzati da contatti suborizzontali e passaggi di velocità V_p posti a circa 1300 e 2800 m/s. Il primo strato superficiale presenta potenza pari a circa 5-8m, il secondo strato presenta una potenza pari a circa 8-10m. L'analisi delle onde V_s non evidenzia in questo caso la presenza di alcuna variazione significativa.

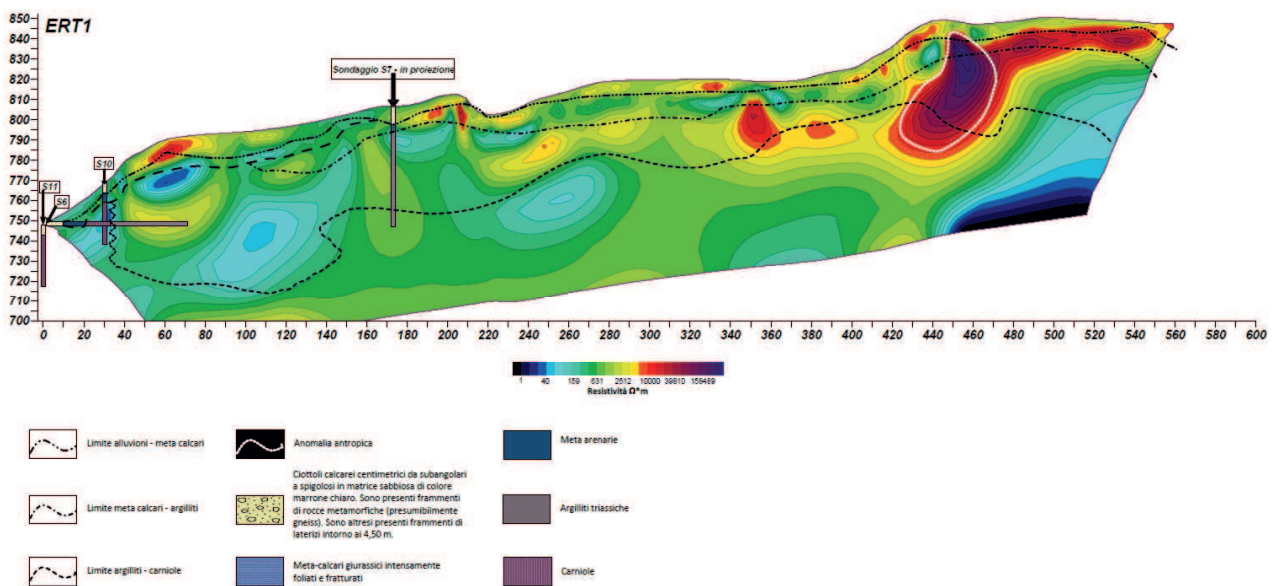


Figura 7: Sezione geoelettrica tomografica ERT 1. Immagine non in scala.

Per quanto concerne invece gli stendimenti geoelettrici tomografici realizzati, osservando la sezione longitudinale **ERT 1** (realizzata in sovrapposizione alla sezione sismica SIS 6) si può chiaramente notare la presenza di diverse anomalie ad alta e bassa resistività lungo il tracciato.

In particolare presso l'imbocco lato Vinadio (imbocco lato SW) è visibile una concentrazione di anomalie scarsamente resistive (valori di resistività inferiori a $159 \Omega \cdot m$), seguita verso la parte nordorientale dalla presenza di una anomalia fortemente resistiva e superficiale (valori superiori a $1000 \Omega \cdot m$).

La presenza di una forte anomalia a resistività ridotta/nulla presso il margine nordorientale della sezione ERT 1 (valori di resistività inferiore a $40 \Omega \cdot m$) sembrerebbe legata ad effetti di bordo piuttosto che alla presenza di un materiale molto conduttivo.

In generale la sezione ERT1 evidenzia un andamento dei valori di resistività confrontabile con quello delle velocità delle onde sismiche V_p e V_s determinati sul medesimo allineamento; in particolare la presenza delle anomalie scarsamente resistive poste presso l'imbocco lato Vinadio si sovrappone generalmente al secondo sismostrato rilevato dalla sezione SIS 6 e caratterizzato da V_p inferiore a 3300 m/s e V_s inferiore a 1500 m/s. Tale settore potrebbe essere indicativo di una porzione di ammasso roccioso caratterizzata da elevata fratturazione ed associato alla presenza di materiali conduttivi probabilmente imbibiti di acqua.

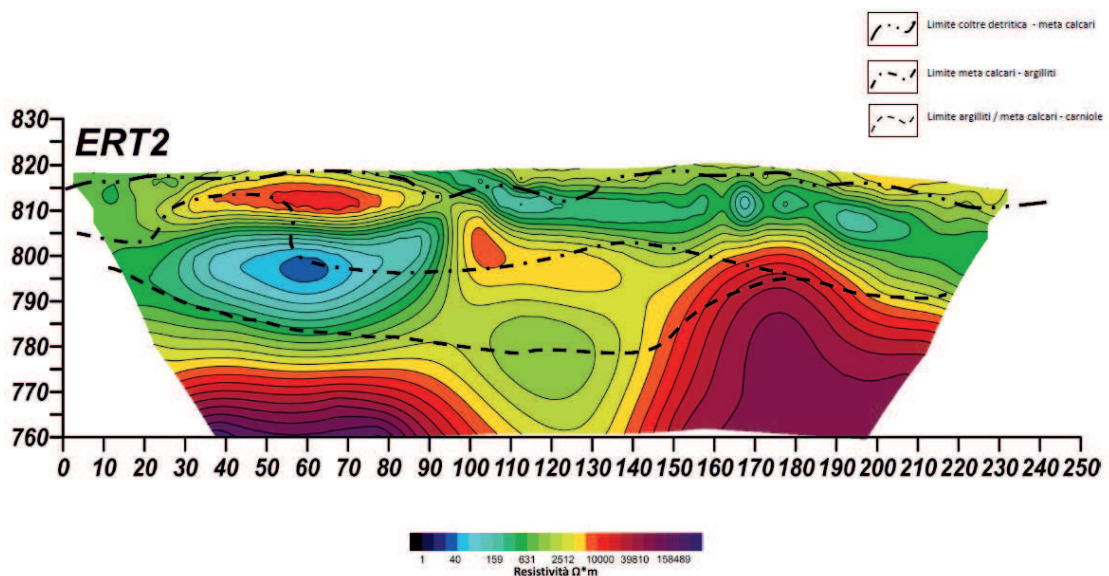


Figura 8: Sezione geoelettrica tomografica ERT 2. Immagine non in scala.

Analizzando la sezione **ERT 2** (realizzata in sovrapposizione alla sezione sismica SIS 7) si osserva la presenza di due elementi principali: una anomalia scarsamente resistiva localizzata nella porzione sudorientale della sezione (valori compresi tra circa 159-40 Ω^*m), seguiti da una anomalia posta al centro della sezione e caratterizzata da valori di resistività pari a circa 2500 Ω^*m tra due porzioni di substrato caratterizzate da valori superiori a 10000 Ω^*m .

In questo caso la sovrapposizione con la sezione sismica tomografica in onde P ed onde S rileva la presenza di una anomalia centrale che, non essendo stata individuata dall'indagine sismica, risulta di difficile interpretazione.

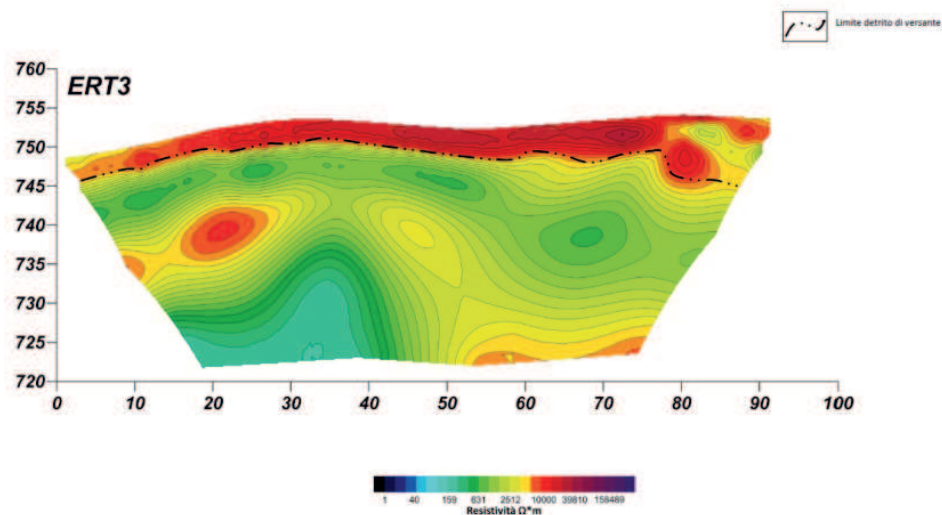


Figura 9: Sezione geoelettrica tomografica ERT 3. Immagine non in scala.

In ultimo la sezione **ERT 3**, realizzata in corrispondenza dell'imbocco lato San Dalmazzo (imbocco verso NE), ha evidenziato chiaramente la presenza di un primo elettrostrato resistivo (valori superiori a 10000 Ω^*m) caratterizzato da potenza pari a circa 3-5m e distribuzione molto regolare lungo tutta la superficie topografica seguito in profondità da un secondo elettrostrato caratterizzato dalla presenza di alcune anomalie resistive ma mediamente associato a valori compresi tra 500 e 2500 Ω^*m .

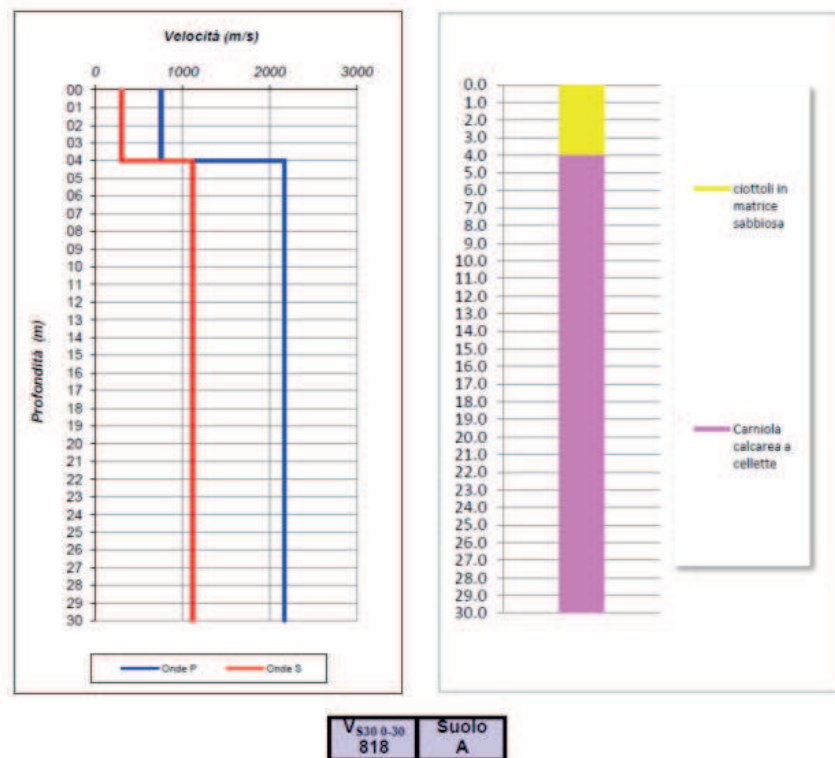


Figura 10: Profilo di velocità delle onde di compressione V_p e di taglio V_s rilevato entro il foro di sondaggio S11-DH. Immagine non in scala.

In ultimo si segnala che in corrispondenza del sondaggio S11-DH è stata realizzata una prova sismica tipo Down-Hole che ha permesso di ricavare un profilo di velocità delle onde V_p e V_s lungo i 30m di sondaggio realizzati.

Analizzando l'andamento del profilo di velocità delle onde V_p ed V_s in comparazione con la stratigrafia del foro eseguito si osserva la presenza di:

- un primo strato superficiale di potenza pari a 4m, costituito da ciottoli in matrice limoso-ghiaiosa e caratterizzato da velocità V_p pari a 750 e V_s 300 m/s;
- un secondo strato di potenza pari a 26m, costituito da carniole e caratterizzato da velocità V_p pari a 2200 m/s e V_s 1100 m/s.

Lungo tale verticale è stato quindi determinato un valore di V_{S30} pari a 818 m/s.

5 UNITÀ GEOTECNICHE E GEOMECCANICHE INDIVIDUATE

In seguito al completamento della campagna di indagini geognostiche è stato possibile confrontare i dati stratigrafici di sottosuolo con le risultanze dello studio geologico-strutturale condotto presso l'area in esame (vedi Capitolo 3 per una sintesi delle risultanze) al fine di procedere ad una classificazione preliminare dei litotipi presenti sulla base del comportamento meccanico atteso.

Tale operazione ha permesso di identificare delle unità geotecniche per i litotipi a comportamento non litoide e delle unità geomeccaniche per i litotipi a comportamento litoide o generalmente tale.

Si precisa che nel presente elaborato sono stati analizzati esclusivamente i litotipi presenti nel rilievo Podio ed interessati dalla realizzazione della galleria stradale, del cunicolo di esodo e dalle relative opere di imbocco.

In generale la definizione delle unità geotecniche/geomeccaniche ha considerato i seguenti aspetti:

- Caratteristiche litologiche;
- Grado di fratturazione;
- Grado di alterazione;
- Comportamento meccanico atteso.

Secondo quanto determinato dallo studio geologico-strutturale i litotipi individuati presso il rilievo Podio, elencati dall'alto verso il basso della successione stratigrafica, sono quindi costituiti da:

- Detrito di versante;
- Meta Calcari;
- Depositi arenacei giurassici;
- Carniole;
- Depositi triassici.

Sulla base di tale distinzione di carattere litologico e considerate le condizioni di fratturazione rilevate dall'analisi delle stratigrafie (RQD), nonché valutato lo stato di alterazione osservato sulle medesime carote, è stato possibile individuare le unità geotecniche e geomeccaniche riportate nella tabella seguente.

Tabella 6: Sintesi delle unità geotecnico/geomeccaniche individuate nell'area in esame

Numerazione	Unità litologica	Principali caratteristiche litologiche	Caratteristiche di alterazione e fratturazione prevalenti	Comportamento meccanico generale	Unità geotecnica/geomeccanica individuata
1	Detrito di versante	Detrito costituito da clasti di meta calcari con scarsa matrice fine sabbiosa	-	Incoerente	DR
2	Meta calcari	Calcari compatti	Da mediamente a diffusamente fratturati	Litoide	UGm1
3a	Carniole	Calcari a cellette e dolomie cariate con subordinate masse di gessi ed anidriti	Mediamente fratturati ma scarsamente alterati	Litoide	UGm2
3b			Mediamente fratturati ed alterati	Litoide/litoide debole	UGm3
4	Depositi arenacei giurassici	Costituiti da sabbie medio fini giallastre con inclusi arenacei	Fratturati ed alterati diffusamente con possibile e localizzata perdita della coesione	Coesivo/litoide debole/incoerente	UGm4
5	Depositi triasici	Argilliti ed argilliti calcaree con intercalazioni di calcari a cellette e presenza di brecce varicolori da dissoluzione.			
6	Litotipi 2,3a, 3b,4 e 5	Ghiaie e sabbie limose con ciottoli, ciottoli in matrice sabbioso-limosa, ciottoli con sabbie	Litotipi estremamente fratturati ed alterati	Incoerente/debolmente coesivo	UGm_i

In dettaglio l'unità geotecnica DR è caratterizzata dalla presenza di detrito di falda a struttura "clast sup-

ported" caratterizzato da clasti eterometrici (dimensioni comprese tra alcuni mm e circa 10cm) costituiti da meta calcari angolosi e non arrotondati. La matrice fine presente è generalmente costituita da sabbie e ghiaie con la scarsa presenza di limi. Spesso tale unità presenta una struttura aperta definita "open work" in quanto priva di matrice fine.

L'unità in esame presenta un comportamento completamente incoerente.

Figura 11: Tratta di sondaggio S8_orizz compresa tra 5-10m perforata entro il detrito di falda con sabbie e ghiaie incluso nell'unità geotecnica DR.



Figura 12: Affioramenti di detrito di falda inserito nell'unità geotecnica DR. L'immagine riporta il detrito di falda completamente privo di matrice fine.

L'unità geomeccanica **UGm1** è costituita esclusivamente dai meta calcari caratterizzati da grado di fratturazione medio-elevato e comportamento litoide. Tale litotipo è stato osservato sia in affioramento che nel sondaggio S8_orizz. Nel sondaggio S7-P è stata osservata una tratta costituita da meta calcari caratterizzati da un elevatissimo grado di fratturazione tale da renderne il comportamento incoerente; per tale ragione essi sono stati quindi inseriti entro una specifica unità denominata **UGm_j** descritta in seguito.

In generale in affioramento i calcari hanno evidenziato una notevole competenza e resistenza allo scavo, associata ad una spiccata lavorabilità tale da permettere la creazione di scarpate di origine antropica caratterizzate da inclinazione verticale o subverticale.



Figura 13: Tratta di sondaggio S8_orizz compresa tra le progressive 25-30m e caratterizzata dalla presenza di meta calcari inseriti entro l'unità UGm1.



Figura 14: Parete antropica costituita da meta calcari inseriti entro l'unità UGm1.

L'unità geomeccanica **UGm2** e l'unità geomeccanica **UGm3** sono caratterizzate dalla presenza di carnioli litoidi costituite in genere da calcari a cellette e dolomie cariate. Le carnioli si presentano in genere molto cariate e sono spesso caratterizzate dalla presenza di vacuoli prodotti dalla dissoluzione di gessi ed anidriti, nonché talvolta dalla presenza di breccie calcaree cementate. La principale discriminante tra le due unità è rappresentata dal grado di alterazione delle carnioli; in presenza di un basso grado di alterazione e di un comportamento litoide del litotipo è stata definita l'unità UGm2, mentre in presenza di un grado di alterazione maggiore e di un comportamento litoide/litoide debole è stata definita l'unità UGm3.

La distinzione tra le due unità può risultare talvolta difficoltosa in quanto eterogena.



Figura 15: Carnioli associate all'unità geotecnica UGm3 in quanto caratterizzate da un elevato grado di alterazione.

L'unità geomeccanica **UGm4** comprende i depositi arenacei giurassici ed i depositi triassici entrambi molto alterati ed è caratterizzata dalla presenza generalmente di sabbie medio-fini giallastre con inclusi arenacei, argille ed argilliti calcaree con subordinate intercalazioni di calcari a cellette e breccie varicolori da dissoluzione.

L'ammasso in esame presenta quindi un alto grado di alterazione e fratturazione, tale da determinarne un comportamento meccanico al limite tra debolmente litoide, coesivo ed incoerente.



Figura 16: Depositi triassici associati all'unità geotecnica UGm4 perforati tra 10-15m nel sondaggio S10-P.



Figura 17: Depositi triassici associati all'unità geotecnica UGm4 perforati tra 69-72,2m nel sondaggio S7-P. Particolare delle breccie varicolori osservate.

L'ultima unità geomeccanica individuata è stata denominata **UGm_j**; tale unità è legata alla presenza di un elevato grado di fratturazione ed alterazione associato agli altri litotipi precedentemente elencati tale da renderne il comportamento incoerente o debolmente coesivo. Date tali caratteristiche l'unità racchiude quindi sabbie con ciottoli, limi sabbiosi con ciottoli, ciottoli con matrice sabbiosa, nonché calcari e

carriole intensamente brecciate e ridotti a depositi debolmente coesivi o talvolta incoerenti.



Figura 18: Meta calcari intensamente tettonizzati campionati dal sondaggio S6_orizz tra le progressive 3-8m ed attribuiti all'unità geomeccanica UGm_i.



Figura 19: Meta calcari intensamente tettonizzati campionati dal sondaggio S7-P tra le progressive 10-15m ed attribuiti all'unità geomeccanica UGm_i.

6 PROVE GEOTECNICHE ESEGUITE

Come anticipato nel Capitolo 4 la presente fase progettuale ha previsto l'esecuzione di n°6 sondaggi geognostici di cui n° 5 a carotaggio continuo e n°1 a distruzione di nucleo/carotaggio continuo. Oltre alla determinazione delle successioni stratigrafiche ed all'installazione di piezometri a tubo aperto per il monitoraggio della falda, le perforazioni realizzate hanno quindi permesso di eseguire diverse indagini geotecniche suddivise tra (vedi tabella seguente):

- prove in foro rappresentate da prove SPT, prove pressiometriche, prove dilatometriche e prove Lugeon;
- prove di laboratorio geotecnico da eseguire sui campioni indisturbati e rimaneggiati acquisiti nei sondaggi a carotaggio continuo.

Tabella 7: Indagini geognostiche eseguite presso l'area in esame. CC=perforazione a carotaggio continuo; DN=perforazione a distruzione di nucleo; SPT=prova penetrometrica standard; PR=prova pressiometrica; DL=prova dilatometrica; TA=piezometro a tubo aperto; IND=campioni indisturbati; RIM=campioni rimaneggiati; LU=prova Lugeon.

Sigla sondaggio	Prof. (m)	Perforazione	Prove in foro	Campioni raccolti
S6_orizz	70,2	CC	5 DL	16 IND + 2 RIM
S7-P	60	CC	1 SPT + 5 DL + 2 LU	16 IND + 1 RIM
S8_orizz	40	CC	3 DL	8 IND + 1 RIM
S10-P	25	CC	1 SPT + 1 PR + 2 DL + 1 LU	6 IND + 3 RIM
S10-Pbis	16	DN(0-9) + CC(9-16)	2 LU	-
S11_DH	30	CC	1 SPT + 2 DL	9 IND + 1 RIM

6.1 PROVE DI LABORATORIO

Durante la realizzazione della campagna di indagini geognostiche presso il rilievo Podio sono stati raccolti i seguenti campioni:

- n°55 campioni indisturbati;
- n°8 campioni rimaneggiati.

In seguito su tali campioni sono state eseguite complessivamente le seguenti prove geotecniche di laboratorio:

- n°63 determinazioni delle caratteristiche fisiche del campione;

- n°7 analisi granulometriche condotte con setacciatura e sedimentazione;
- n°7 determinazioni dei limiti di Atterberg e delle proprietà (LL, LP, IP, IC ed IA);
- n°1 prove di taglio diretto;
- n°7 prove di taglio diretto su giunto;
- n°15 prove di compressione monoassiale;
- n°30 prove Point Load Strength Index.

Nella tabella seguente è stata riportata una sintesi delle prove geotecniche di laboratorio eseguite in relazione alle diverse perforazioni completate.

Tabella 8: Sintesi del numero di prove di laboratorio eseguite sui campioni raccolti nel corso delle indagini geognostiche realizzate.

Sond.	Caratt. fisiche	Analisi granulometrica		Determinazione dei Limiti di Atterberg	Prova di taglio diretto		Point Load	Compressione monoassiale
		Setacciatura	Sedimentazione		Normale	Su giunto		
S6_ori zz	18	2	2	2	-	2	10	5
S7-P	17	1	1	1	-	2	8	3
S8_ori zz	9	1	1	1	-	2	4	4
S10-P	9	2	2	2	1	1	3	1
S10-Pbis	-	-	-	-	-	-	-	-
S11_D H	10	1	1	1	-	-	5	2

Nelle tabelle seguenti è stata riportata una sintesi dei risultati ottenuti dalle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati nell'area del rilievo Podio; per ulteriori dettagli si rimanda agli specifici certificati di prova.

In merito alle caratteristiche fisiche dei materiali analizzati riportate in seguito si segnala che è stata omessa l'indicazione del peso specifico dei grani (γ_s) in presenza di campioni litoidi, in quanto la deter-

minazione di tale parametro non è ritenuta significativa in presenza di tale tipologia di campioni.

Si ricorda che la trattazione dei risultati delle prove geotecniche di laboratorio riportata in seguito è stata organizzata secondo le unità geotecnico/geomeccaniche individuate e descritte nel Capitolo 5.

Considerata la necessità di procedere con la caratterizzazione di tali unità in seguito sono state analizzate le risultanze delle prove di laboratorio maggiormente significative per tale finalità; esse sono quindi rappresentate da:

- determinazione del peso di volume;
- analisi granulometrica dei materiali non litoidi;
- determinazione dei limiti di Atterberg;
- esecuzione di prove di taglio diretto (eseguita su giunto e sul materiale non litoide);
- esecuzione di prove di compressione monoassiale;
- esecuzione di prove Point Load.

Tabella 9: Anagrafica dei campioni analizzati e sintesi delle quote di raccolta.

Unità	Sondaggio	Campione	Tipo	Descrizione sintetica litologia campione	Tipologia	Profondità/progressiva		Profondità/progressiva media	Profondità calcolata sulla verticale
					Pf=profondità; Pr=progressiva	da	a		
						m			
UGm_i	S6or	CR1	RIM	Limo con sabbia	Pr	12	12.2	12.1	
UGm_i	S6or	CR2	RIM	Limo con sabbia	Pr	15.2	15.7	15.45	
UGm2e3	S6or	CR3	IND	Carniola calcarea	Pr	23.5	24	23.75	17.2
UGm2e3	S6or	CR4	IND	Carniola calcarea	Pr	26.4	26.6	26.5	20.4
UGm2e3	S6or	CR5	IND	Calcarenite	Pr	38	39	38.5	29.42
UGm2e3	S6or	CR6	IND	Breccia	Pr	47.5	47.9	47.7	34.95
UGm2e3	S6or	CR9	IND	Carniola calcarea	Pr	23	23.8	23.4	16.8
UGm2e3	S6or	CR10	IND	Carniola calcarea	Pr	28	33	30.5	22.13
UGm2e3	S6or	CR11	IND	Breccia calcarea	Pr	33	38	35.5	26.83
UGm2e3	S6or	CR12	IND	Calcare conglomeratico	Pr	38	43	40.5	31.68
UGm2e3	S6or	CR13	IND	Breccia calcarea	Pr	43	48	45.5	34.17
UGm4	S6or	CR14	IND	Argillite calcarea	Pr	48	53	50.5	35.85
UGm4	S6or	CR15	IND	Breccia	Pr	53	58	55.5	38
UGm2e3	S6or	CR16	IND	Argillite	Pr	58	63	60.5	40.4
UGm2e3	S6or	CR17	IND	Brecce	Pr	63	68	65.5	43
UGm4	S6or	CR18	IND	Breccia calcarea	Pr	68	70.2	69.1	44

Unità	Sondaggio	Campione	Tipo	Descrizione sintetica litologia campione	Tipologia	Profondità/progressiva		Profondità/progressiva media	Profondità calcolata sulla verticale
					Pf=profondità; Pr=progressiva	da	a		
						m			
UGm_i	S7P	CR1	RIM	Sabbia con ghiaia	Pf	6	7	6.5	
UGm4	S7P	CR2	IND	Breccia calcarea	Pf	22.4	22.6	22.5	
UGm2e3	S7P	CR3	IND	Calcarea	Pf	28.5	28.8	28.65	
UGm2e3	S7P	CR4	IND	Calcarea	Pf	31	31.3	31.15	
UGm2e3	S7P	CR5	IND	Breccia	Pf	36.2	36.5	36.35	
UGm4	S7P	CR6	IND	Calcarea	Pf	41.7	44.4	43.05	
UGm4	S7P	CR7	IND	Argilliti	Pf	46.1	46.5	46.3	
UGm2e3	S7P	CR8	IND	Calcarea	Pf	53	54	53.5	
UGm2e3	S7P	CR9	IND	Breccia	Pf	55	55.7	55.35	
UGm4	S7P	CR10	IND	Breccia calcarea	Pf	20	25	22.5	
UGm2e3	S7P	CR11	IND	Calcarea	Pf	25	30	27.5	
UGm2e3	S7P	CR12	IND	Calcarea	Pf	30	35	32.5	
UGm2e3	S7P	CR13	IND	Calcarea	Pf	35	40	37.5	
UGm4	S7P	CR14	IND	Calcarenite	Pf	40	45	42.5	
UGm4	S7P	CR15	IND	Breccia calcarea	Pf	45	50	47.5	
UGm2e3	S7P	CR16	IND	Breccia calcarea	Pf	50	55	52.5	
UGm2e3	S7P	CR17	IND	Breccia calcarea	Pf	55	60	57.5	

Unità	Sondaggio	Campione	Tipo	Descrizione sintetica litologia campione	Tipologia	Profondità/progressiva		Profondità/progressiva media	Profondità calcolata sulla verticale
					Pf=profondità; Pr=progressiva	da	a		
						m			
DR	S8 or	CR1	RIM	Ghiaia sabbioso-limosa	Pr	13.5	13.8	13.65	
UGm1	S8 or	CR2	IND	Calccare	Pr	22	22.9	22.45	13.82
UGm1	S8 or	CR3	IND	Calccare	Pr	28.6	29	28.8	24.73
UGm1	S8 or	CR4	IND	Calccare	Pr	30	31.8	30.9	25.8
UGm1	S8 or	CR5	IND	Calccare	Pr	36.2	37.9	37.05	29.3
UGm1	S8 or	CR6	IND	Calccare	Pr	20	25	22.5	7.67
UGm1	S8 or	CR7	IND	Calccare	Pr	25	30	27.5	22.9
UGm1	S8 or	CR8	IND	Calccare	Pr	30	35	32.5	26.66
UGm1	S8 or	CR9	IND	Calccare	Pr	35	40	37.5	29.06
UGm_i	S10 P	CR1	RIM	Limo con sabbia e ghiaia	Pf	3	3.4	3.2	
UGm_i	S10 P	CR2	RIM	Meta arenarie calcaree	Pf	7	7.4	7.2	
UGm_i	S10 P	CR3	RIM	Ghiaia sabbioso-limosa	Pf	7.4	7.6	7.5	
UGm4	S10 P	CR4	IND	Arenaria	Pf	10	11	10.5	
UGm4	S10 P	CR5	IND	Calcarenite	Pf	10	15	12.5	
UGm2e3	S10 P	CR6	IND	Carniola	Pf	19.1	19.9	19.5	
UGm2e3	S10 P	CR7	IND	Arenaria calcarea	Pf	15	20	17.5	

Unità	Sondaggio	Campione	Tipo	Descrizione sintetica litologia campione	Tipologia	Profondità/progressiva		Profondità/progressiva media	Profondità calcolata sulla verticale
					Pf=profondità; Pr=progressiva	da	a		
						m			
UGm2e3	S10 P	CR8	IND	Calcarenite	Pf	23.6	24	23.8	
UGm2e3	S10 P	CR9	IND	Breccia calcarea	Pf	20	25	22.5	
RIPORTO	S11 DH	CR1	RIM	Ghiaia sabbioso-limosa	Pf	1.75	2	1.875	
UGm2e3	S11 DH	CR2	IND	carniole	Pf	5.3	5.6	5.45	
UGm2e3	S11 DH	CR3	IND	carniole	Pf	10.3	10.7	10.5	
UGm2e3	S11 DH	CR4	IND	carniole	Pf	13.4	13.8	13.6	
UGm2e3	S11 DH	CR5	IND	carniole	Pf	18.7	19	18.85	
UGm2e3	S11 DH	CR6	IND	carniole	Pf	5	10	7.5	
UGm2e3	S11 DH	CR7	IND	carniole	Pf	10	15	12.5	
UGm2e3	S11 DH	CR8	IND	carniole	Pf	15	20	17.5	
UGm2e3	S11 DH	CR9	IND	carniole	Pf	20	25	22.5	
UGm2e3	S11 DH	CR10	IND	carniole	Pf	25	30	27.5	

Tabella 10: Sintesi delle caratteristiche fisiche dei campioni analizzati

Unità	Sondaggio	Campioni	Peso di volume	Peso specifico dei grani	Peso volume secco	Peso volume immerso	Peso di volume saturo	Contenuto in acqua	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Granulometria				Limiti di Atterberg				
			γ	γ_s	γ_d	γ'	γ_{sat}	w_n	e	n	Sr	G	S	L	A	L _L	L _P	I _P	I.C.	I.A.
			kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	%	-	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
UGm_i	S6or	CR1	14.41	26.03	12.2	7.58	17.38	18.5	1.14	53.3	43	9	41	46	4	30	22	8	1.4	2.1
UGm_i	S6or	CR2	14.5	25.98	12.5	7.81	17.62	15.6	1.07	51.7	39	6	39	45	10	24	15	9	0.9	0.9
UGm2e3	S6or	CR3	22.93																	
UGm2e3	S6or	CR4	23.68																	
UGm2e3	S6or	CR5	23.7																	
UGm2e3	S6or	CR6	25.68																	
UGm2e3	S6or	CR9	24.34																	
UGm2e3	S6or	CR10	25.59																	
UGm2e3	S6or	CR11	26																	
UGm2e3	S6or	CR12	24.22																	
UGm2e3	S6or	CR13	26.13																	
UGm4	S6or	CR14	26.22																	

Unità	Sondaggio	Campione	Peso di volume	Peso specifico dei grani	Peso volume secco	Peso volume immerso	Peso di volume saturo	Contenuto in acqua	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Granulometria				Limiti di Atterberg				
			γ	γ_s	γ_d	γ'	γ_{sat}	w_n	e	n	Sr	G	S	L	A	L _L	L _P	I _P	I.C.	I.A.
			kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	%	-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
UGm4	S6or	CR15	26.35																	
UGm2e3	S6or	CR16	26.67																	
UGm2e3	S6or	CR17	26.58																	
UGm4	S6or	CR18	25.88																	
UGm_i	S7P	CR1	16.45	26	16.2	10.1	19.9	1.5	0.6	37.6	7	39	40	15	6	20	16	5	4.1	0.8
UGm4	S7P	CR2	25.71																	
UGm2e3	S7P	CR3	25.83																	
UGm2e3	S7P	CR4	25.62																	
UGm2e3	S7P	CR5	25.05																	
UGm4	S7P	CR6	24.96																	
UGm4	S7P	CR7	22.98																	
UGm2e3	S7P	CR8	25																	
UGm2e3	S7P	CR9	25.75																	
UGm4	S7P	CR10	26.28																	

Unità	Sondaggio	Campione	Peso di volume	Peso specifico dei grani	Peso volume secco	Peso volume immerso	Peso di volume saturo	Contenuto in acqua	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Granulometria				Limiti di Atterberg				
			γ	γ_s	γ_d	γ'	γ_{sat}	w_n	e	n	S_r	G	S	L	A	L _L	L _P	I _P	I.C.	I.A.
			kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	%	-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
UGm2e ₃	S7P	CR11	26.11																	
UGm2e ₃	S7P	CR12	25.96																	
UGm2e ₃	S7P	CR13	26.1																	
UGm4	S7P	CR14	25.28																	
UGm4	S7P	CR15	26.18																	
UGm2e ₃	S7P	CR16	26.34																	
UGm2e ₃	S7P	CR17	25.8																	
DR	S8 or	CR1	15.91	25.89	14.1	8.77	18.58	12.7	0.83	45.5	40	66	16	14	4	25	20	5	2.3	1.4
UGm1	S8 or	CR2	25.55																	
UGm1	S8 or	CR3	25.12																	
UGm1	S8 or	CR4	25.05																	
UGm1	S8 or	CR5	25.88																	
UGm1	S8 or	CR6	25.85																	
UGm1	S8 or	CR7	26.05																	
UGm1	S8 or	CR8	25.81																	

Unità	Sondaggio	Campione	Peso di volume	Peso specifico dei grani	Peso volume secco	Peso volume immerso	Peso di volume saturo	Contenuto in acqua	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Granulometria				Limiti di Atterberg				
			γ	γ_s	γ_d	γ'	γ_{sat}	w_n	e	n	S_r	G	S	L	A	L _L	L _P	I _P	I.C.	I.A.
			kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	%	-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
UGm1	S8 or	CR9	26.03																	
UGm_i	S10 P	CR1	15.07	26.13	13.3	8.32	18.13	13.1	0.96	49	36	20	36	38	6	28	20	8	1.9	1.3
UGm_i	S10 P	CR2	18.02	-	15.7	-	-	14.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UGm_i	S10 P	CR3	15.31	26.03	13.5	8.43	18.24	13.2	0.92	48	38	54	23	20	3	23	15	8	1.3	2.6
UGm4	S10 P	CR4	25.66																	
UGm4	S10 P	CR5	25.99																	
UGm2e ₃	S10 P	CR6	23.43																	
UGm2e ₃	S10 P	CR7	25.76																	
UGm2e ₃	S10 P	CR8	23.25																	
UGm2e ₃	S10 P	CR9	25.5																	
RIPORTO	S11 DH	CR1	15.04	25.93	13.9	8.64	18.44	8.3	0.87	46.4	25	55	24	17	4	22	15	7	2	1.7
UGm2e ₃	S11 DH	CR2	22.32																	
UGm2e	S11 DH	CR3	22.75																	

Unità	Sondaggio	Campione	Peso di volume	Peso specifico dei grani	Peso volume secco	Peso volume immerso	Peso di volume saturo	Contenuto in acqua	Indice dei vuoti	Porosità	Grado di saturazione	Granulometria				Limiti di Atterberg				
			γ	γ_s	γ_d	γ'	γ_{sat}	w_n	e	n	S_r	G	S	L	A	L _L	L _P	I _P	I.C.	I.A.
			kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	kN/m ³	%	-	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
3																				
UGm2e 3	S11 DH	CR4	22.84																	
UGm2e 3	S11 DH	CR5	25.4																	
UGm2e 3	S11 DH	CR6	24.75																	
UGm2e 3	S11 DH	CR7	22.67																	
UGm2e 3	S11 DH	CR8	24.47																	
UGm2e 3	S11 DH	CR9	25.42																	
UGm2e 3	S11 DH	CR10	24.45																	

Tabella 11: Sintesi delle caratteristiche di deformabilità e resistenza dei campioni.

Unità	Sondaggio		Campione	Prova di taglio diretto		Point Load	Prova compressione monoassiale				Prova di taglio diretto sul giunto	
				c' (kPa)	ϕ' (°)	σ_c	ν	E_{t50}	E_{s50}	σ_r	c	ϕ
						Mpa		Mpa	Mpa	Mpa	KN/m ²	°
UGm1	S8 or	13.82	CR2				0.27	9524	9353	17.79	0.55	45.63
UGm1	S8 or	24.73	CR3				0.26	11407	10821	14.91		
UGm1	S8 or	25.8	CR4				0.25	10753	9825	13.21	0.77	46.17
UGm1	S8 or	29.3	CR5				0.25	11856	11333	22.1		
UGm1	S8 or	7.67	CR6			29.5						
UGm1	S8 or	22.9	CR7			30.95						
UGm1	S8 or	26.66	CR8			37.54						
UGm1	S8 or	29.06	CR9			28.47						
UGm2e3	S6or	17.2	CR3				0.25	1902	1871	10.12		
UGm2e3	S6or	20.4	CR4				0.26	1624	1579	13.23		
UGm2e3	S6or	29.42	CR5				0.29	9756	9354	10.27	2.44	38.04
UGm2e3	S6or	34.95	CR6									
UGm2e3	S6or	16.8	CR9			16.64						
UGm2e3	S6or	22.13	CR10			15.17						
UGm2e3	S6or	26.83	CR11			8.45						
UGm2e3	S6or	31.68	CR12			29.41						
UGm2e3	S6or	34.17	CR13			10.64						
UGm2e3	S6or	42.85	CR8				0.26	9335	9079	16.52		
UGm2e3	S6or	40.4	CR16			7.54						
UGm2e3	S6or	43	CR17			6.28						

Unità	Sondaggio		Campione	Prova di taglio diretto		Point Load	Prova compressione monoassiale				Prova di taglio diretto sul giunto	
				c' (kPa)	ϕ' (°)	σ_c	v	E_{t50}	E_{s50}	σ_r	c	ϕ
						Mpa		Mpa	Mpa	Mpa	KN/m ²	°
UGm2e3	S10 P	19.5	CR6									
UGm2e3	S10 P	17.5	CR7			5.3						
UGm2e3	S10 P	23.8	CR8				0.26	3761	3597	4.6		
UGm2e3	S10 P	22.5	CR9			18.9						
UGm2e3	S11 DH	5.45	CR2				0.26	1692	1634	4.39		
UGm2e3	S11 DH	10.5	CR3									
UGm2e3	S11 DH	13.6	CR4				0.26	1707	1659	5.17		
UGm2e3	S11 DH	18.85	CR5									
UGm2e3	S11 DH	7.5	CR6			4.24						
UGm2e3	S11 DH	12.5	CR7			7.11						
UGm2e3	S11 DH	17.5	CR8			3.43						
UGm2e3	S11 DH	22.5	CR9			13.86						
UGm2e3	S11 DH	27.5	CR10			26.33						
UGm2e3	S7P	53.5	CR8									
UGm2e3	S7P	55.35	CR9				0.27	8321	8110	28.32		
UGm2e3	S7P	52.5	CR16			5.71						
UGm2e3	S7P	57.5	CR17			8.22						
UGm2e3	S7P	28.65	CR3									
UGm2e3	S7P	31.15	CR4				0.27	10055	9949	43.72		
UGm2e3	S7P	36.35	CR5				0.27	7706	7400	33.6		
UGm2e3	S7P	27.5	CR11			20.72						
UGm2e3	S7P	32.5	CR12			28.8						

Unità	Sondaggio		Campione	Prova di taglio diretto		Point Load	Prova compressione monoassiale				Prova di taglio diretto sul giunto	
				c' (kPa)	φ' (°)	σ _c	ν	E _{t50}	E _{s50}	σ _r	c	φ
						Mpa		Mpa	Mpa	Mpa	KN/m ²	°
UGm2e3	S7P	37.5	CR13			11.21						
UGm4	S6or	38	CR7				0.27	3509	3399	10.34	1.41	42.65
UGm4	S6or	35.85	CR14			6.19						
UGm4	S6or	38	CR15			9.76						
UGm4	S6or	44	CR18			9.22						
UGm4	S7P	22.5	CR2									
UGm4	S7P	43.05	CR6								1.15	44.69
UGm4	S7P	46.3	CR7								0.96	45.08
UGm4	S7P	22.5	CR10			11.42						
UGm4	S7P	42.5	CR14			8.38						
UGm4	S7P	47.5	CR15			6.52						
UGm4	S10 P	12.5	CR5			4.96					1.9	38.65

La trattazione seguente riporta le risultanze delle analisi condotte raggruppate per singoli parametri e riportate per ogni diversa unità geotecnico/geomeccanica individuata.

6.1.1 DETERMINAZIONE DEL PESO DI VOLUME

La determinazione del peso di volume (γ) è stata eseguita per ogni campione rimaneggiato ed indisturbato analizzato.

Nella tabella seguente sono stati riportati i valori minimo, medio, mediano e massimo delle misure effettuate per ogni unità geotecnico/geomeccanica considerata.

Tabella 12: Sintesi delle determinazioni del peso di volume suddivise per le unità geotecniche individuate. Valori espressi in kN/m^3 .

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misure	Valore minimo	Valore massimo	Media	Mediana
DR	1	15,91			
UGm1	8	25,05	26,05	25,67	25,83
UGm2	22	22,32	26,13	24,33	24,39
UGm3					
UGm4	25	22,98	26,67	25,70	25,83
UGm _i	6	14,41	18,02	15,63	15,19

Sulla base dei risultati ottenuti e riportati in tabella si può quindi osservare che i valori del peso di volume delle unità UGm1÷UGm4 sono compresi tra 24 e 26 kN/m^3 , mentre l'unità UGm_i evidenzia un valore compreso tra 14,41÷18,02 kN/m^3 ed una media pari a 15,63 kN/m^3 . Il detrito di versante DR presenta una sola caratterizzazione che ha restituito un valore pari a 15,91 kN/m^3 , molto simile al valore medio calcolato per l'unità UGm_i.

Si precisa che i valori ottenuti per le unità UGm_i e DR si riferiscono alla sola componente granulometrica compresa tra le ghiaie e le argille, escludendo la presenza di ciottoli/clasti di dimensioni superiori alle ghiaie. Per tale ragione il valore del peso di volume di tali depositi deve essere necessariamente corretto per considerare la presenza di ciottoli/clasti entro tale unità.

6.1.2 ANALISI GRANULOMETRICHE

In presenza di campioni rimaneggiati, costituiti prevalentemente da materiali detritici coesivi o incoerenti appartenenti alle unità DR ed UGm_i è stata eseguita la determinazione delle curve granulometriche mediante setacciatura per via umida e successivamente per sedimentazione.

I risultati ottenuti sono stati sintetizzati nella tabella seguente in funzione delle diverse unità geotecniche/geomeccaniche, mentre in seguito sono state riportate le relative curve granulometriche ottenute.

Tabella 13: Sintesi delle analisi granulometriche eseguite.

Unità geotecnica/geomeccanica	Sondaggio	Campione	Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla
DR	S8_orizz	CR1	66	16	14	4
UGm_i	S6_orizz	CR1	9	41	46	4
UGm_i	S6_orizz	CR2	6	39	45	10
UGm_i	S7-P	CR1	39	40	15	6
UGm_i	S10-P	CR1	20	36	38	6
UGm_i	S10-P	CR3	54	23	20	3

In aggiunta a tali determinazioni è stato analizzato anche un campione costituito da riporti antropici intercettati dal sondaggio S11-DH e situati sotto la sede stradale posta in adiacenza al rio Cant.

Tale deposito, non interessato direttamente dalla realizzazione delle opere trattate dal presente elaborato, presenta una granulometria grossolana costituita da: 55% di ghiaie, 24% di sabbie, 17% di limi e 4% di argille.

Figura 20: Curva granulometrica del campione CR1 raccolto nel sondaggio S8_orizz e rappresentativo dell'unità geotecnica DR.

Figura 21: Curva granulometrica del campione CR1 raccolto nel sondaggio S6_orizz e rappresentativo dell'unità geomeccanica UGm_i

Figura 22: Curva granulometrica del campione CR2 raccolto nel sondaggio S6_orizz e rappresentativo dell'unità geomeccanica UGm_i

Figura 23: Curva granulometrica del campione CR1 raccolto nel sondaggio S7-P e rappresentativo dell'unità geomeccanica UGm_i

Figura 24: Curva granulometrica del campione CR1 raccolto nel sondaggio S10-P e rappresentativo dell'unità geomeccanica UGm_i

Figura 25: Curva granulometrica del campione CR3 raccolto nel sondaggio S10-P e rappresentativo dell'unità geomeccanica UGm_i

Figura 26: Curva granulometrica del campione CR1 raccolto nel sondaggio S11-DH e rappresentativo di un riporto antropico individuato sotto la sede stradale della strada in adiacenza al torrente Cant.

Come si può quindi osservare dall'analisi delle curve granulometriche riportate (i cui dati sono stati sintetizzati nella tabella precedentemente riportata):

- l'unità DR si presenta come un deposito grossolano caratterizzato da un elevato contenuto in ghiaie pari a 2/3 del materiale analizzato associato ad un ridotto quantitativo di matrice fine limoso-argillosa (18% sul totale);
- l'unità UGm_i si presenta granulometricamente eterogenea in quanto variabile da ghiaie sabbioso-limose (ghiaia pari al 54%) a limi con sabbie caratterizzati da un quantitativo di sabbie pari a circa 6-9% e sabbie+limi pari a circa 84-87%.

6.1.3 LIMITI DI ATTERBERG

La determinazione dei limiti di Atterberg è stata eseguita sui medesimi campioni rimaneggiati sottoposti alla determinazione delle curve granulometriche.

Tabella 14: Sintesi delle determinazioni dei limiti di Atterberg eseguite. LL=Limite liquido; LP=Limite plastico; IP=Indice di plasticità; IC=Indice di consistenza; IA=Indice di attività.

Unità geotecnica/geomeccanica	Sondaggio	Campione	LL	LP	IP	IC	IA
DR	S8_orizz	CR1	25	20	5	2	1
UGm_i	S6_orizz	CR1	30	22	8	1	2
UGm_i	S6_orizz	CR2	24	15	9	1	1
UGm_i	S7-P	CR1	20	16	5	4	1
UGm_i	S10-P	CR1	28	20	8	2	1
UGm_i	S10-P	CR3	23	15	8	1	3

Anche in questo caso in aggiunta a tali determinazioni è stato analizzato anche un campione costituito da riporti antropici intercettati dal sondaggio S11-DH e situati sotto la sede stradale posta in adiacenza al rio Cant.

Tale deposito, non interessato direttamente dalla realizzazione delle opere trattate dal presente elaborato, presenta LL=22%, LP=15%, IP=7%, IC=2% ed IA=2%.

Sulla base delle determinazioni del limite liquido LP e dell'indice di plasticità IP ricavati dalle determinazioni dei limiti di Atterberg è stato possibile classificare la matrice fine dell'unità geotecnica DR, dell'unità geomeccanica UGm_i e dei riporti individuati dal sondaggio S11-DH.

Analizzando i grafici riportati in seguito è possibile osservare che:

- il campione riferito al detrito di versante (DR) è caratterizzato da matrice fine ricadente nella classe CL-ML, costituita generalmente da limi inorganici, limi argillosi e sabbie molto fini limose (ML) oppure da argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille limose sabbiose o ghiaiose (CL);
- i campioni appartenenti all'unità geomeccanica UGm_i presentano matrice fine costituita sia da argille inorganiche di media-bassa plasticità, argille limose sabbiose o ghiaiose (CL) sia da limi inorganici, limi argillosi e sabbie molto fini limose (ML);
- i riporti (non interessati direttamente dalla realizzazione delle opere in sotterraneo) ricadono nella classe CL-ML.

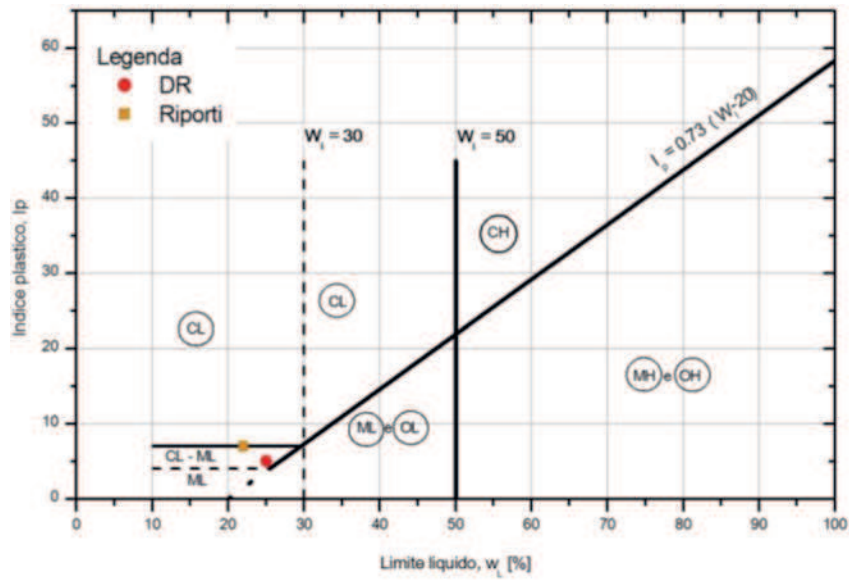


Figura 27: Carta della plasticità di Casagrande della matrice fine dell'unità DR e dei materiali di riporto individuati dal sondaggio S11-DH.

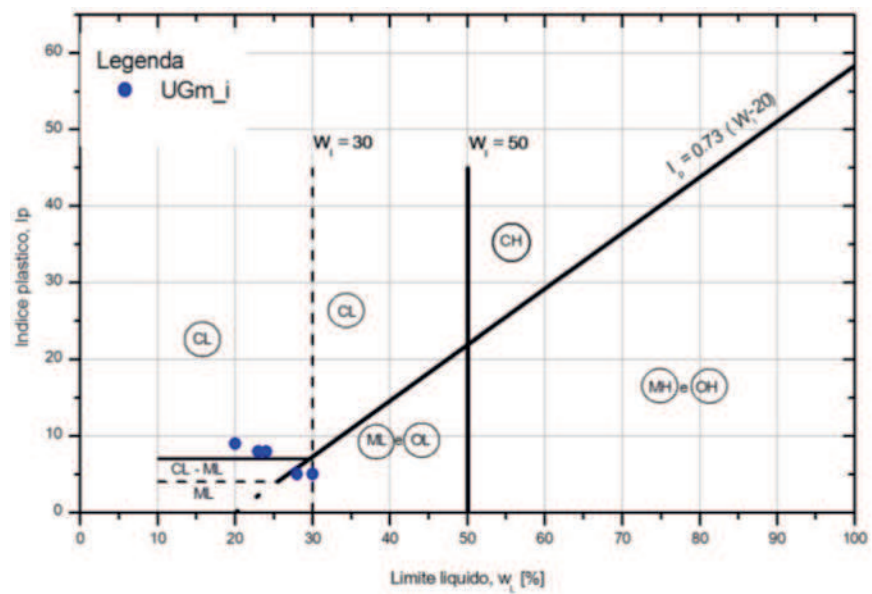


Figura 28: Carta della plasticità di Casagrande della matrice fine dell'unità UGm_i.

Figura 29: Sistema di classificazione delle terre proposto dall'USCS. Sigle riportate nella carta della plasticità di Casagrande.

6.1.4 PROVA DI TAGLIO DIRETTO

Le prove di taglio diretto sono state eseguite su giunti di discontinuità presenti negli spezzoni litoidi analizzati oppure su campioni di depositi non litoidi.

I parametri ricavati da tali prove permettono di descrivere il criterio di resistenza al taglio di Mohr-Coulomb, in quanto per ogni campione analizzato (sia esso un giunto in roccia sia un campione di deposito) esse forniscono una specifica coppia di valori di coesione (c) ed angolo di resistenza al taglio di picco (Φ_p).

Nel primo caso sono state analizzate le caratteristiche di resistenza di giunti in roccia presenti nell'ammasso roccioso, mentre nel secondo caso è stata valutata la resistenza al taglio offerta dal deposito stesso.

Per quanto concerne la prova di taglio diretto eseguita su deposito, essa ha interessato esclusivamente il campione CR2 del sondaggio S10-P, attribuito all'unità geomeccanica UGm_i. Tale prova ha fornito un valore di coesione pari a 8,19 kPa ed un valore di angolo di resistenza al taglio pari a 27,69°.

Per quanto concerne le prove di taglio diretto su giunto realizzate, esse hanno permesso di determinare i parametri di resistenza di picco delle superfici di discontinuità presenti negli spezzoni litoidi analizzati, i cui valori sono stati riportati nella tabella seguente.

Analizzando i risultati ottenuti si può osservare una generale uniformità dei parametri di resistenza dei giunti di discontinuità indipendentemente dall'unità geomeccanica considerata.

Tale considerazione è legata alla presenza di spezzoni litoidi costituiti mediamente da litotipi carbonatici (calcari o dolomi), caratterizzati generalmente da un valore di coesione compreso tra 0,55 a 2,44 kPa ed

un valore dell'angolo di resistenza al taglio compreso tra 38,04 e 46,17°. I valori medi calcolati per le singole unità evidenziano inoltre delle differenze ancora meno accentuate in quanto la coesione varia da 0,66 a 1,36 kPa mentre Φ_p varia tra 42,8 e 45,96°.

Tabella 15: Determinazione dei parametri di picco della resistenza al taglio dei giunti presenti sui campioni litoidi analizzati.

Unità geomeccanica	Sondaggio	Campione	c (kPa)	Φ_p (°)	Valori medi	
					c (kPa)	Φ_p (°)
UGm1	S8_orizz	CR2	0,55	45,63	0,66	45,9
UGm1	S8_orizz	CR4	0,77	46,17		
UGm2/UGm3	S6_orizz	CR5	2,44	38,04	-	-
UGm4	S6_orizz	CR7	1,41	42,65	1,36	42,8
UGm4	S7-P	CR6	1,15	44,69		
UGm4	S7-P	CR7	0,96	45,08		
UGm4	S10-P	CR5	1,9	38,65		

6.1.5 PROVE DI COMPRESSIONE MONOASSIALE E PROVE POINT LOAD

Su alcuni campioni litoidi raccolti sono state eseguite delle prove di compressione monoassiale con misura delle deformazioni e alcune prove Point Load.

L'analisi e l'interpretazione delle prove di compressione monoassiale eseguite ha permesso di determinare i seguenti parametri riferiti alla roccia intatta:

- Resistenza a compressione uniassiale (σ_c) espressa in MPa;
- Modulo di elasticità tangente (E_{t-i}) espresso in MPa;
- Modulo di elasticità secante (E_{s-i}) espresso in MPa;
- Valore del coefficiente di Poisson (ν) (adimensionale).

Per quanto concerne le prove Point Load esse hanno permesso di ricavare indirettamente i valori di resistenza alla compressione monoassiale dei campioni testati, mediante l'applicazione di una correlazione proposta in letteratura, per cui l'indice di resistenza al punzonamento viene corretto tramite un coefficiente di correlazione compreso tra 20-25 per la determinazione della σ_c .

Nel presente studio è stato considerato un valore del coefficiente di correlazione pari a 24.

Tabella 16: Sintesi dei valori di resistenza alla compressione uniassiale (σ_c) ottenuti dalle medesime prove eseguite. I valori sono espressi in MPa.

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misur	Valore minimo	Valore massimo	Media
UGm1	4	13,21	22,11	17
UGm2	6	4,39	43,7	16
UGm3				
UGm4	5	10,34	10,34	10,34

Tabella 17: Sintesi delle prove Point Load eseguite. I valori riportati rappresentano i valori di compressione uniassiale (σ_c) ricavati dagli indici di resistenza al punzonamento. I valori sono espressi in MPa.

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misur	Valore minimo	Valore massimo	Media
UGm1	4	28,47	37,54	31,62
UGm2	12	3,43	29,41	13
UGm3				
UGm4	14	4,96	11,42	8

Tabella 18: Sintesi dei valori del modulo di elasticità tangente (E_{t-i}) ottenuti dalle prove di compressione uniassiale eseguite. I valori sono espressi in MPa.

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misur	Valore minimo	Valore massimo	Media
UGm1	4	9524	11856	10885
UGm2	6	1624	10055	5585
UGm3				
UGm4	5	3509	3509	3509

Tabella 19: Sintesi dei valori del modulo di elasticità secante ($E_{s,i}$) ottenuti dalle prove di compressione uniassiale eseguite. I valori sono espressi in MPa.

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misure	Valore minimo	Valore massimo	Media
UGm1	4	9353	11333	10333
UGm2	6	1579	5423	3282,33
UGm3				
UGm4	5	3399	3399	3399

Tabella 20: Sintesi dei valori del coefficiente di Poisson (ν) ottenuti dalle prove di compressione uniassiale eseguite. I valori sono adimensionali.

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misure	Valore minimo	Valore massimo	Media
UGm1	4	0.25	0.25	0.26
UGm2	6	0,25	0,29	0,26
UGm3				
UGm4	5	0.26	0,27	

6.2 PROVE IN FORO

Per quanto concerne le prove geotecniche in foro eseguite nei sondaggi realizzati si dispone di:

- n° 3 indagini SPT;
- n° 1 prove pressiometriche;
- n°17 prove dilatometriche;
- n°3 prove di permeabilità Lugeon.

Nei paragrafi seguenti è stata riportata una sintesi dei risultati ottenuti dalle prove in sito eseguite nell'area del rilievo Podio; per ulteriori dettagli si rimanda agli specifici certificati di prova.

Si ricorda che la trattazione dei risultati delle prove in sito riportata in seguito è stata organizzata secondo le unità geotecnico/geomeccaniche individuate e descritte nel Capitolo 5.

6.2.1 PROVE SPT

L'elaborazione delle prove SPT è stata condotta impiegando le correlazioni disponibili in letteratura per terreni granulari caratterizzati dalla presenza di sabbie con limi, ghiaie e ciottoli. Nella tabella seguente è stata riportata una sintesi dei valori ricavati dalle prove SPT eseguite ed è stata indicata la granulometria prevalente del deposito interessato dall'esecuzione di tale prova.

Tabella 21: Sintesi delle caratteristiche delle prove in foro SPT realizzate. PC=punta chiusa; PA=punta aperta; R=rifiuto alla penetrazione.

Sondaggio	Profondità (m)	Tipologia punta	Unità	Granulometria	Soggiacenza della falda (m dal p.c.)	Numero di colpi		
						N1	N2	N3
S7-P	6	PC	UGm_i	Sabbie con ciottoli	22	6	7	12
S10-P	3	PA	UGm_i	Limi sabbiosi con ciottoli	Non misurata	2	4	R
S11_DH	3,9	PC	Riporti	Ciottoli centimetrici in matrice limoso-ghiaiosa	Non misurata	20	9	12

Nelle tabelle seguenti sono state riportate le elaborazioni eseguite sulla base dei valori N_{SPT} misurati, al fine di applicare le correlazioni disponibili in letteratura per i materiali oggetto della prova e finalizzate alla determinazione dei seguenti parametri:

- Densità relativa (D_r espressa in %);
- Angolo di resistenza al taglio drenato di picco (Φ_p espressa in °);
- Modulo di deformabilità (E_s espressa in MPa).

Tale operazione si basa sull'applicazione di correlazioni di carattere empirico proposte dai seguenti Autori:

- D_r - Yoshida et al., 1988;
- D_r - Skempton, 1986;
- Φ_p - Meyerhof, 1959 in funzione di D_r ricavata tramite Yoshida;
- Φ_p - Japanese Railway, 1959;
- E_s - Bowles, 1997;
- E_s - Denver, 1982.

Le correlazioni citate richiedono la determinazione del peso di volume del materiale indagato e della soggiacenza della falda idrica libera. Il valore del peso di volume dei depositi analizzati è stato assunto pari a 21 kN/m^3 e rappresenta un valore medio determinato mediante prove di laboratorio geotecnico eseguite in contesti geologici simili.

Per quanto concerne invece l'indicazione sulla soggiacenza della superficie di falda libera si dispone di una sola determinazione diretta acquisita presso il sondaggio S7-P (attrezzato con piezometro a tubo aperto) e pari a 22m. Per il sondaggio S11-DH non è stata riportata alcuna indicazione in merito alla soggiacenza della falda eventualmente presente, mentre per il sondaggio S10-P è stata utilizzata la soggiacenza misurata presso il sondaggio S10-Pbis (9,5m) in quanto eseguito alla medesima quota ed attrezzato con piezometro a tubo aperto.

Nelle tabelle seguenti sono stati riportati i risultati ottenuti dalle elaborazioni delle prove SPT eseguite nei sondaggi S7-P ed S11-DH, i cui risultati medi sono stati riassunti nella tabella sottostante.

I risultati ricavati dalla prova eseguita nel sondaggio S10-P non sono stati elaborati in quanto durante l'infissione della tratta N3 è stato rilevato immediatamente il rifiuto alla penetrazione. Tale risposta è probabilmente collegata all'utilizzo della punta aperta, che risulta maggiormente suscettibile all'occlusione in presenza di materiale granulare grossolano con ciottoli, oppure alla presenza di un ciottolo che ne ha impedito completamente l'infissione. Considerato l'esiguo numero di prove disponibili ($n^{\circ}2$) è stato riportato unicamente il valore medio calcolato per ogni parametro geotecnico determinato.

Tabella 22: Sintesi dei risultati ottenuti dall'elaborazione delle prove SPT

Sondaggio	Profondità (m)	Unità	Dr media (%)	Φ'_p media (°)	Es media (MPa)
S7-P	6	UGm_i	56	35	32
S10-P	3	UGm_i	Elaborazioni non eseguite		
S11_DH	3,9	Riporti	66	37	39

I valori medi ricavati dalle correlazioni applicate sono molto simili in quanto originariamente le prove analizzate presentano uno scarto minimo dei colpi N2+N3. Tali valori devono essere considerati come indicativi in quanto le prove SPT si basano essenzialmente su correlazioni empiriche proposte dagli Autori in seguito all'analisi di dati eterogenei accumulati generalmente da simili caratteristiche granulometriche e di addensamento dei depositi analizzati

Tabella 23: Elaborazioni dei dati SPT raccolti nel sondaggio S7-P.

Sond.	Prof. (m)	N1 15cm	N2 15cm	N3 15cm	N2+N3	Correzione per la presenza di materiale sovrastante C_N	Po' (KPa)	N'_{70}	N_{60}	Dr [%] (Yoshida, et al., 1988)	Dr [%] (Skempton, 1986)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Yoshida)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Skempton)	ϕ [deg] (Jap.Railw.Stand. Buildings, 1959)	Es [MPa] (gravelly sand, Bowles, 1997)	Es [MPa] (sabbia e ghiaia, Denver, 1982)
S7-P	6.0	6	7	12	19	0.87	126	17	19	55	57	36	37	33	32	31
Soggiacenza																
22.00																

Tabella 24: Elaborazioni dei dati SPT raccolti nel sondaggio S11-DH.

Sond.	Prof. (m)	N1 15cm	N2 15cm	N3 15cm	N2+N3	Correzione per la presenza di materiale sovrastante C_N	Po' (KPa)	N'_{70}	N_{60}	Dr [%] (Yoshida, et al., 1988)	Dr [%] (Skempton, 1986)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Yoshida)	ϕ [deg] (Meyerhof, 1959) f(Dr Skempton)	ϕ [deg] (Jap.Railw.Stand. Buildings, 1959)	Es [MPa] (gravelly sand, Bowles, 1997)	Es [MPa] (sabbia e ghiaia, Denver, 1982)
S11-DH	3.9	20	9	12	21	1.08	81.9	23	26	67	66	38	38	35	42	36
Soggiacenza																
25																

6.2.2 PROVE PRESSIOMETRICHE E DILATOMETRICHE

In corrispondenza di alcuni sondaggi ubicati presso il rilievo Podio sono state eseguite delle prove di deformabilità in foro suddivise come segue:

- N°1 prova pressiométrica;
- N°17 prove dilatometriche.

Le prove eseguite hanno permesso di determinare il valore del modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso (E), caratterizzato da valori minori rispetto al modulo di elasticità della roccia intatta ricavato tramite l'esecuzione delle prove di compressione monoassiale precedentemente analizzate.

Nella tabella seguente sono state riportati i valori ricavati dalle prove di deformabilità eseguite; si precisa inoltre che:

- Per quanto concerne il calcolo del modulo di deformabilità (E) a partire dal modulo pressiométrico (EPR) è stato adottato un coefficiente reologico pari a 2/3 proposto da Baguelin et al., 1978 per rocce debolmente fratturate o estremamente alterate;
- Per quanto concerne il modulo di deformabilità (E) ricavato dalle prove dilatometriche, è stato assunto il valore ottenuto dalla curva di ricarica relativa al terzo ciclo di carico-scarico eseguito in ogni prova.

Tabella 25: Sintesi delle prove pressiométriche e dilatometriche eseguite. PR=Prova pressiométrica; DL=Prova dilatometrica; E_{PR} = modulo pressiométrico.

Unità	Sondaggio	Tipologia	Profondità progressiva		Profondità/progressiva media	Profondità calcolata sulla verticale	Prova di deformabilità		
			da	a			PR		DL
		Pf=profondità; Pr=progressiva	m		m	m	EPR (Mpa)	E (Mpa)	E(Mpa)
UGm2e3	S6or	Pr	29	30	29.5	20.8			675.9
UGm2e3	S6or	Pr	40	41	40.5	29.4			420.5
UGm4	S6or	Pr	49	50	49.5	35			1511.5
UGm4	S6or	Pr	59	60	59.5	39			2023.1
UGm4	S6or	Pr	69	70	69.5	43.7			1754.3
UGm4	S7P	Pf	21	22	20.5	-			371.5

Unità	Sondaggio	Tipologia	Profondità progressiva		Profondità/progressiva media	Profondità calcolata sulla verticale	Prova di deformabilità		
			da	a			PR		DL
		Pf=profondità; Pr=progressiva	m		m	m	EPR (Mpa)	E (Mpa)	E(Mpa)
UGm2e3	S7P	Pf	30	31	30.5	-			5089.9
UGm4	S7P	Pf	40	41	40.5	-			625.3
UGm4	S7P	Pf	49	50	49.5	-			350.7
UGm4	S7P	Pf	59	60	59.5	-			1670.1
UGm1	S8 or	Pr	20	21	20.5	23.7			2262.2
UGm1	S8 or	Pr	29	30	29.5	28.4			5366.6
UGm1	S8 or	Pr	39	40	39.5	34.3			1585.9
UGm4	S10 P	Pf	-	-	9.2	-	127.5	191.25	
UGm4	S10 P	Pf	10	11	10.5	-			161.9
UGm2e3	S10 P	Pf	21	22	21.5	-			321.1
UGm2e3	S11 DH	Pf	20	21	20.5	-			346.7
UGm2e3	S11 DH	Pf	24	25	24.5	-			397.6

Nella tabella seguente è stata riportata una sintesi dei moduli di deformabilità (E) ricavati dalle prove eseguite.

Analizzando i risultati ottenuti si può chiaramente osservare che l'Unità geomeccanica UGm1 evidenzia i valori di E più elevati (minimo, medio e massimo) sebbene ricavati da un numero ridotto di prove eseguite (n°3 prove).

I valori del modulo E ricavati per l'Unità UGm4 sono circa 3 volte superiori a quelli ricavati per le Unità UGm2 ed UGm3 (modulo E medio rispettivamente pari a circa 1375 MPa rispetto a 432 MPa); tale aspetto è probabilmente legato alla maggiore profondità di esecuzione delle prove di deformabilità associate all'Unità UGm4 (profondità massima pari a circa 60m) rispetto a quelle eseguite per le Unità UGm2 e UGm3 (profondità massima circa 30m) in quanto generalmente (ed in particolare per i materiali

a comportamento litoide debole/coesivo/incoerente) all'aumentare della profondità si osserva un aumento del modulo E.

Tabella 26: Sintesi dei valori dei moduli di deformabilità (E) ricavati dalle prove pressiometriche e dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio ubicati presso il rilievo Podio. I valori sono espressi in MPa.

Unità geotecnica/geomeccanica	Numero di misure	Valore minimo	Valore massimo	Media
UGm1	3	1585,9	5366,6	3071,57
UGm2	5	321,1	5089,9	1208,6
UGm3				
UGm4	10	161,9	2023,1	1058,55

6.2.3 PROVE DI PERMEABILITÀ LUGEON

In corrispondenza dei fori di indagine S7-P, S10-P ed S10-Pbis sono state rispettivamente eseguite n°2, n°1 e n°2 prove di permeabilità tipo Lugeon.

Tabella 27: Sintesi delle determinazioni delle prove di permeabilità tipo Lugeon eseguite.

Unità	Sondaggio	Tipologia	Profondità/progressiva		Profondità/progressiva media	Prova LUGEON		
			Pf=profondità; Pr=progressiva	da		a	UL	K (m/s)
				m		m		
UGm4	S7P	Pf	50	53	51.5	1.59	1.56774E-07	
UGm4	S7P	Pf	50	53	51.5	1.34	1.32124E-07	
UGm2e 3	S10 P	Pf	21	23.5	22.25	3.35	3.3031E-07	
UGm2e 3	S10-Pbis	Pf	11.5	13	12.25	309.6	3.05266E-05	
UGm2e 3	S10-Pbis	Pf	13.5	16	14.75	13.82	1.36265E-06	

Nella tabella precedente sono stati riportati i risultati ottenuti dalle prove eseguite; tali prove hanno permesso di ricavare i valori dei coefficienti di permeabilità (K) stimati localmente entro le unità UGm2-UGm3 ed entro l'Unità UGm4.

Per la determinazione del coefficiente di permeabilità associato ad ogni prova Lugeon eseguita è stata utilizzata la seguente uguaglianza determinata dalla letteratura tecnico-scientifica di settore, $1 \text{ UL} = 9,86 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, in quanto derivante direttamente dalla modalità e dalle specifiche geometriche di esecuzione della prova Lugeon stessa.

Analizzando i valori ricavati dalle prove è quindi emerso che:

- L'Unità UGm4 evidenzia valori di K molto bassi compresi tra $1,3 \div 1,6 \cdot 10^{-7}$ m/s e caratteristici di rocce praticamente impermeabili;
- Le Unità geomeccaniche UGm2 ed UGm3 evidenziano un valore di K variabile da un minimo di $3,3 \cdot 10^{-7}$ m/s ad un valore massimo di $3,05 \cdot 10^{-5}$ m/s caratteristici di rocce molto permeabili.

7 CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

La classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso affiorante presso il rilievo Podio ed interessata dalla realizzazione delle opere in sotterraneo è stata eseguita mediante l'applicazione dei due seguenti sistemi di classificazione:

- Sistema RMR (Rock Mass Rating) proposto da Bieniawski, 1989;
- Sistema GSI (Geological Strength Index) proposto da Hoek & Marinos, 2001 e Marinos, 2010.

Per quanto concerne la descrizione dei rilievi geomeccanici eseguiti per la classificazione dell'ammasso roccioso mediante l'applicazione del sistema RMR si rimanda alla Relazione Geologica specificamente redatta per la presente fase progettuale (Progetto Definitivo).

Per quanto concerne invece l'applicazione del sistema di classificazione GSI nel presente studio è stata utilizzata la tabella di valutazione dell'indice GSI proposta da Marinos nel 2010, e specificamente ottimizzata per la descrizione di ammassi rocciosi carbonatici caratterizzati anche dalla presenza di disturbi tettonici, argilliti, siltiti o intercalazioni di selce (vedi figura seguente).

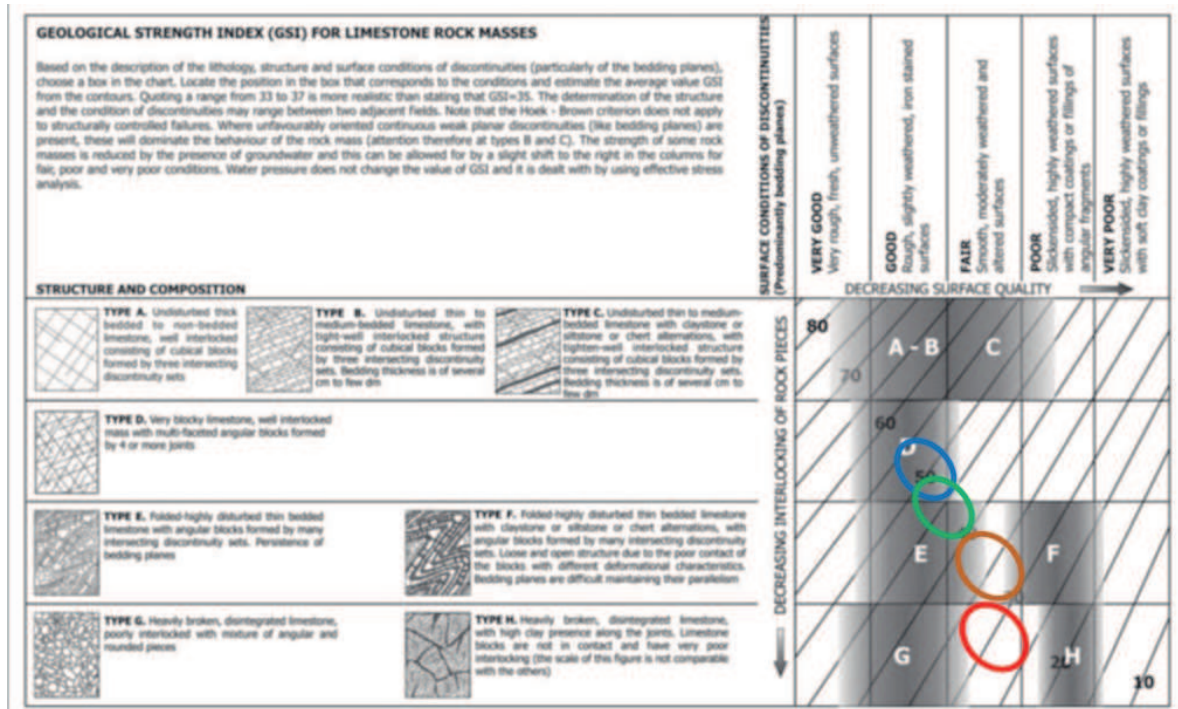


Figura 30: Classificazione GSI proposta per ammassi rocciosi carbonatici, inclusi ammassi rocciosi disturbati tettonicamente con o senza argille, siltiti o intercalazioni di selce. Gli ellissi disegnati identificano i campi di valori attribuiti alle diverse unità geomeccaniche: blu=UGm1; verde=UGm2; arancione=UGm3 e rosso=UGm4.

Sulla base di tale tabella sono stati quindi confrontati gli affioramenti osservati presso il rilievo Podio e le risultanze delle indagini geognostiche al fine di attribuire ad ogni unità geomeccanica individuata un intervallo di valori dell'indice GSI.

In particolare sono stati attribuiti i seguenti intervalli di valori dell'indice GSI per le rocce carbonatiche (Marinos, 2010):

- Unità UGm1 - GSI compreso tra 45-55;
- Unità UGm2 - GSI compreso tra 40-50;
- Unità UGm3 - GSI compreso tra 30-40;
- Unità UGm4 - GSI compreso tra 25-35.

Per l'unità geomeccanica UGm_i non è stato determinato il valore dell'indice GSI in quanto essa presenta un comportamento non litoide, ma bensì coesivo/incoerente.

8 CARATTERIZZAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE E GEOMECCANICHE

Sulla base delle prove di laboratorio geotecnico e delle prove in situ eseguite è stato possibile fornire i parametri geotecnici relativi alle diverse unità geotecniche e geomeccaniche individuate e descritte nel Capitolo 5.

Per quanto concerne le unità geomeccaniche sono stati inoltre ricavati i parametri equivalenti relativi al criterio di resistenza di Mohr Coulomb a partire da un processo di linearizzazione del criterio di resistenza proposto da Hoek e Brown (Hoek et Al., 2002).

In dettaglio tale operazione, condotta per ogni unità geomeccanica individuata, ha previsto la realizzazione delle seguenti fasi:

- Determinazione del criterio di resistenza di Hoek e Brown sulla base dei parametri della roccia intatta e sulla base dell'indice GSI;
- Determinazione delle coppie di parametri c e Φ equivalenti per le massime, minime e medie coperture misurate in estradosso galleria per ogni unità geomeccanica interessata dallo scavo;
- Determinazione delle coppie di parametri c e Φ equivalenti per le massime, minime e medie coperture misurate presso il base scavo della galleria per ogni unità geomeccanica interessata dallo scavo;
- Determinazione dell'intervallo di valori massimo così ottenuto per i parametri c e Φ equivalenti.

Nelle tabelle seguenti è stato riportato uno schema riassuntivo delle determinazioni eseguite per le varie coperture considerate.

Nei paragrafi seguenti sono stati invece riportati i parametri assegnati ad ogni unità ricavati in funzione dei risultati ottenuti dalle prove di laboratorio, dalla loro elaborazione e dalle prove in sito.

Data la presente fase progettuale è stata operata la scelta di fornire un intervallo di riferimento per ogni parametro considerato, in modo da mediare la presenza di incertezze residue legate alle campagne di indagine effettuate.

Tabella 28: Linearizzazione del criterio di resistenza di Hoek e Brown per la determinazione dei parametri equivalenti del criterio di Mohr-Coulomb.

Unità geo-meccanica	Profondità di riferimento						Parametri di calcolo utilizzati per la determinazione del criterio di resistenza di Hoek e Brown						Modulo di deformabilità ammasso roccioso (E) (Mpa) determinato dal criterio di Hoek e Brown	Determinazione dei parametri equivalenti di Mohr Coulomb per l'ammasso roccioso mediante linearizzazione del criterio di Hoek e Brown			
	Base scavo (m)			Estradosso calotta (m)			γ (kN/m ³)	GSI	σ_{ci} (Mpa)	mi	D	E _i (Mpa)		Parametri equivalenti di Mohr Coulomb		Range dei parametri equivalenti di Mohr Coulomb	
	Max	Media	Min	Max	Media	Min								c (kPa)	Φ (°)	c (kPa)	Φ (°)
UGm1	63						25.67	50	13.21	12	0.2	9353	2162	251	42.53	85-224	42-59
UGm1		39.9					25.67	50	13.21	12	0.2	9353	2162	194	46		
UGm1			16.8				25.67	50	13.21	12	0.2	9353	2162	126	52		
UGm1				51.7			25.67	50	13.21	12	0.2	9353	2162	224	44		
UGm1					28.55		25.67	50	13.21	12	0.2	9353	2162	163	48.43		
UGm1						5.4	25.67	50	13.21	12	0.2	9353	2162	85	58.71		
UGm2	82.8						22	45	12	10	0	9354	2092	248	39.36	174-248	39,36-44,08
UGm2		69.4					22	45	12	10	0	9354	2092	223	40.73		

Unità geo-meccanica	Profondità di riferimento						Parametri di calcolo utilizzati per la determinazione del criterio di resistenza di Hoek e Brown							Modulo di deformabilità ammasso roccioso (E) (Mpa) determinato dal criterio di Hoek e Brown	Determinazione dei parametri equivalenti di Mohr Coulomb per l'ammasso roccioso mediante linearizzazione del criterio di Hoek e Brown			
	Base scavo (m)			Estradosso calotta (m)			γ (kN/m ³)	GSI	σ_{ci} (Mpa)	mi	D	E _i (Mpa)	Parametri equivalenti di Mohr Coulomb		Range dei parametri equivalenti di Mohr Coulomb			
	Max	Media	Min	Max	Media	Min							c (kPa)		Φ (°)	c (kPa)	Φ (°)	
UGm2			56				22	45	12	10	0	9354	2092	198	42.38			
UGm2				71.58			22	45	12	10	0	9354	2092	227	40.49			
UGm2					58.14		22	45	12	10	0	9354	2092	202	42.09			
UGm2						44.7	22	45	12	10	0	9354	2092	174	44.08			
UGm3	84.7						22	35	12	8	0	8110	919.73	192	34.1	47-192	34,1-54,07	
UGm3		50.57					22	35	12	8	0	8110	919.73	141	38.06			
UGm3			16.43				22	35	12	8	0	8110	919.73	76	46.44			
UGm3				73.3			22	35	12	8	0	8110	919.73	176	35.21			
UGm3					39.2		22	35	12	8	0	8110	919.73	121	40.01			
UGm3						5.09	22	35	12	8	0	8110	919.73	47	54.07			

Unità geo-meccanica	Profondità di riferimento						Parametri di calcolo utilizzati per la determinazione del criterio di resistenza di Hoek e Brown							Modulo di deformabilità ammasso roccioso (E) (Mpa) determinato dal criterio di Hoek e Brown	Determinazione dei parametri equivalenti di Mohr Coulomb per l'ammasso roccioso mediante linearizzazione del criterio di Hoek e Brown			
	Base scavo (m)			Estradosso calotta (m)			γ (kN/m ³)	GSI	σ_{ci} (Mpa)	mi	D	E _i (Mpa)	Parametri equivalenti di Mohr Coulomb		Range dei parametri equivalenti di Mohr Coulomb			
	Max	Media	Min	Max	Media	Min							c (kPa)		Φ (°)	c (kPa)	Φ (°)	
UGm4	62.43						21	30	4.96	8	0	3399	276.62	98	28.46	39-98	28,46-39,69	
UGm4		43.89					21	30	4.96	8	0	3399	276.62	79	31.05			
UGm4			25.35				21	30	4.96	8	0	3399	276.62	56	35.19			
UGm4				51.8			21	30	4.96	8	0	3399	276.62	87	29.83			
UGm4					32.9		21	30	4.96	8	0	3399	276.62	66	33.21			
UGm4						14	21	30	4.96	8	0	3399	276.62	39	39.69			

8.1 UNITÀ GEOTECNICA DR

Tabella 29: Parametri geotecnici ricavati per l'unità geotecnica DR

Unità DR					
Peso di volume	Coesione	Angolo di resistenza al taglio drenato di picco	Modulo di deformabilità	Coesione non drenata	Coeff. di Poisson
γ (kN/m ³)	C' (kPa)	Φ'_p (°)	E (MPa)	C_u (kPa)	ν (adim)
19-22	0	35-40	50-100	-	0,3-0,4

8.2 UNITÀ GEOMECCANICA UGM1

8.3

Tabella 30: Parametri geotecnici ricavati per l'unità geomeccanica UGm1.

UGm1							
Peso di volume	GSI	Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta	Modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso	Coeff. di Poisson	Coesione	Angolo di resistenza al taglio	Permeabilità
γ (kN/m ³)		σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	ν (adim)	c (MPa)	Φ' (°)	K (m/s)
24-26	45-55	13-37	1500-1600	0,25-0,27	85-225	42-59	-

8.4 UNITÀ GEOMECCANICA UGM2

8.5

Tabella 31: Parametri geotecnici ricavati per l'unità geomeccanica UGm2.

UGm2							
Peso di volume	GSI	Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta	Modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso	Coeff. di Poisson	Coesione	Angolo di resistenza al taglio	Permeabilità
γ (kN/m ³)		σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	ν (adim)	c (MPa)	Φ' (°)	K (m/s)
22-26	40-50	3-43	1500-2100	0,25-0,29	175-245	39-44	$3,3 \cdot 10^{-7}$ - $3,05 \cdot 10^{-5}$

8.6 UNITÀ GEOMECCANICA UGM3

Tabella 32: Parametri geotecnici ricavati per l'unità geomeccanica UGm3.

UGm3							
Peso di volume	GSI	Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta	Modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso	Coeff. di Poisson	Coesione	Angolo di resistenza al taglio	Permeabilità
γ (kN/m ³)		σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	ν (adim)	c (MPa)	Φ' (°)	K (m/s)
22-26	30-40	3-43	500-1200	0,25-0,29	45-190	34-54	$3,3 \cdot 10^{-7}$ - $3,05 \cdot 10^{-5}$

8.7 UNITÀ GEOMECCANICA UGM4

Tabella 33: Parametri geotecnici ricavati per l'unità geomeccanica UGM4.

UGM4							
Peso di volume	GSI	Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta	Modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso	Coeff. di Poisson	Coazione	Angolo di resistenza al taglio	Permeabilità
γ (kN/m ³)		σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	ν (adim)	c (MPa)	Φ' (°)	K (m/s)
21-26	25-35	4-11	200-400	0,26-0,27	39-98	28-39	1,3-1,6*10 ⁻⁷

8.8 UNITÀ GEOMECCANICA UGM_i

Tabella 34: Parametri geotecnici ricavati per l'unità geomeccanica UGM_i.

UGM _i							
Peso di volume	GSI	Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta	Modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso	Coeff. di Poisson	Coazione	Angolo di resistenza al taglio	Permeabilità
γ (kN/m ³)		σ_{ci} (MPa)	E (MPa)	ν (adim)	c (MPa)	Φ' (°)	K (m/s)
14-22	-	-	50-100	0,3-0,4	8-15	25-29	-

9 MODELLO GEOMECCANICO DI RIFERIMENTO

In seguito alla classificazione dei litotipi presenti nell'area in esame in unità geotecniche e geomeccaniche è stato realizzato un relativo modello concettuale in grado di descrivere la distribuzione di tali unità lungo il tracciato della galleria stradale e del relativo cunicolo di esodo.

Tale modello concettuale è stato rappresentato entro il profilo geomeccanico della galleria stradale e del relativo cunicolo di esodo redatto in scala 1:1000/200 e riportato nelle figure seguenti.

Tale profilo è stato redatto sulla base del Profilo geologico allegato alla presente fase progettuale.

Analizzando la distribuzione delle unità individuate si può osservare la presenza di un importante contatto geologico ripreso dal modello geomeccanico tra i calcari posti a tetto (UGm1) e le carniolate poste a tetto (UGm2 ed UGm3).

In corrispondenza di tale contatto sono inoltre presenti due diverse lenti di depositi giurassici e triassici inclusi entro l'unità UGm4.

Data la presenza di fenomeni di alterazione e fratturazione a carico dei calcari, delle carniolate e dei depositi triassico-giurassici è stata inoltre istituita l'unità UGm_i che risulta quindi sovrapposta sia ai calcari (vedasi parte sommitale del sondaggio S7-P ed imbocco lato Vinadio) che ai depositi triassico-giurassici (parte iniziale del sondaggio S10-P ed S10-Pbis).

Analizzando i litotipi e le unità presenti a partire dall'imbocco lato Borgo San Dalmazzo (imbocco Nord-Est) e proseguendo verso l'imbocco lato Vinadio (imbocco lato Sud-Ovest) si può osservare che lo scavo delle gallerie naturali ed artificiali intercetteranno approssimativamente in sequenza:

- 12 m di depositi detritici di falda (DR);
- 57m di calcari associati all'unità geomeccanica UGm1 (così come descritto dal sondaggio S8_orizz);
- 109 m di carniolate litoidi scarsamente alterate (unità UGm2);
- 81m di carniolate litoidi ma mediamente alterate (unità UGm3) sulle quali saranno presenti dei materiali coesivi/incoerenti prodotti dall'alterazione dei depositi triassico-giurassici ed intercettati in calotta (UGm_i);
- 174m di carniolate litoidi scarsamente alterate (unità UGm2);
- 18m di carniolate litoidi ma mediamente alterate (unità UGm3);
- 36 m di depositi triassico-giurassici associati all'unità geomeccanica UGm4 ed intercettati dal sondaggio S7-P;
- 96 m di materiali coesivi/incoerenti (unità UGm_i) prodotti dall'alterazione dei depositi triassico-giurassici;
- 35 m di depositi triassico-giurassici associati all'unità geomeccanica UGm4 ed intercettati dai son-

daggi S6_orizz ed S10-P ed S10-Pbis;

- 9 m di carnioli litoidi ma mediamente alterate (unità UGm3) così come intercettato dai sondaggi S10-P ed S10-Pbis;
- 12m di calcari intensamente fratturati ed alterati ed associati all'unità UGm_1 così come descritto dal sondaggio S6_orizz;
- 4 m finali di depositi detritici di falda (DR).

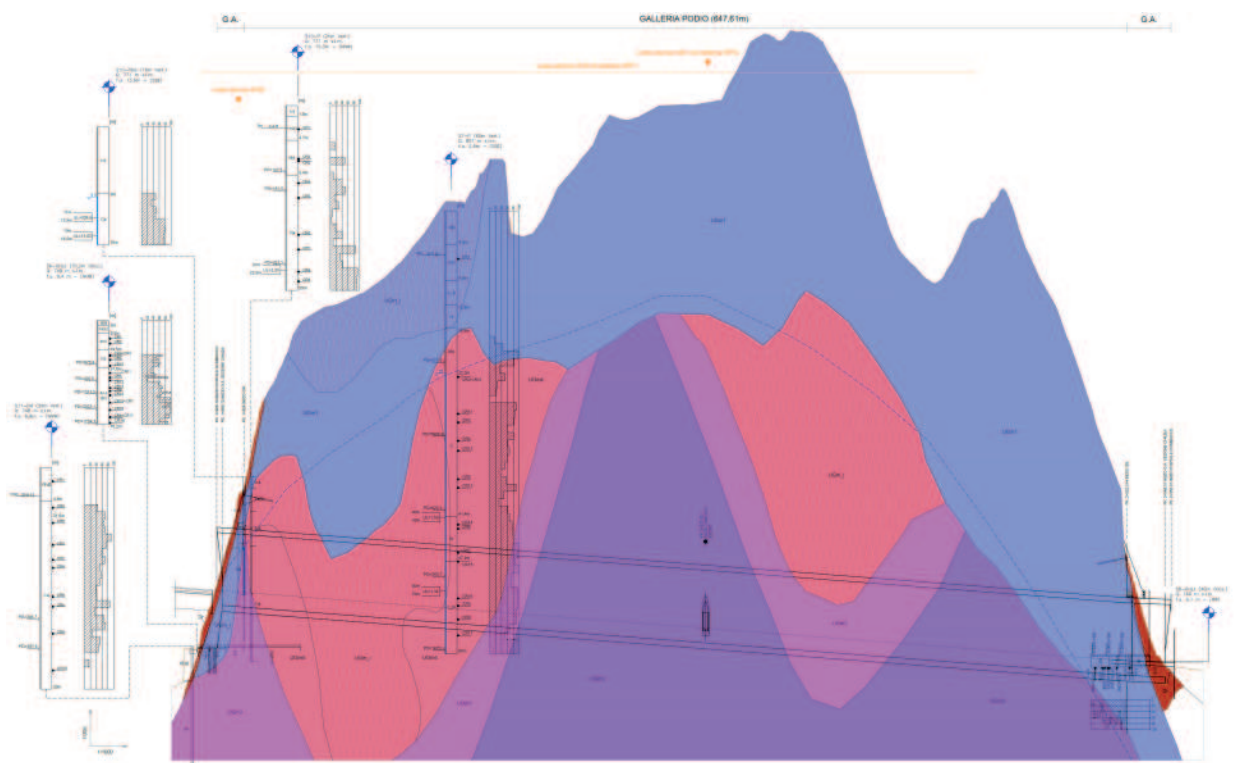


Figura 31: Modello geomeccanico di riferimento della galleria da realizzare nel rilievo Podio.

Analogamente il profilo geomeccanico realizzato lungo il profilo del cunicolo di esodo a partire dall'imbocco intercetterà:

- 18m di depositi detritici di falda (DR);
- 13 m di calcari (unità UGm1);
- 150 m di carnioli litoidi scarsamente alterate (unità UGm2).

Figura 32: Modello geomeccanico di riferimento del cunicolo di esodo della galleria da realizzare nel rilievo Podio.

Figura 33: Legenda del profilo geomeccanico di riferimento del cunicolo di esodo e della galleria stradale da realizzare nel rilievo Podio.

Per quanto concerne invece una valutazione preliminare dei rischi geologici legati alla realizzazione delle opere in sotterraneo, si segnala che nei profili geomeccanici eseguiti sono stati valutati i seguenti rischi potenziali:

- Presenza di terreni incoerenti;
- Terreni spingenti;
- Cavità carsiche;
- Presenza di litologie miste;
- Presenza di irruzioni acquifere;
- Presenza di gas metano.

La presenza di terreni incoerenti è caratterizzata da un rischio elevato in presenza delle unità DR ed UGm_i, mentre tale rischio diviene medio in presenza delle unità UGm4 ed UGm3 e nullo per le unità UGm2 ed UGm1.

La presenza di terreni spingenti è stata associata ad un rischio basso in presenza delle unità DR, UGm3, UGm4 ed UGm_i.

La presenza di cavità carsiche è stata associata ad un rischio basso lungo tutto il tracciato della galleria, in quanto esso è impostato prevalentemente entro le carniolate, soggette a fenomeni di dissoluzione solo a piccola scala.

La presenza di litologie miste è associata ad un rischio alto in presenza delle unità UGm4 ed UGm_i, mentre per l'unità UGm3 tale rischio diviene medio, per l'unità UGm2 basso e per l'unità UGm1 nullo.

La possibile presenza di irruzioni acquifere è caratterizzata da rischio alto in presenza delle unità UGm4 e UGm_i, mentre per le restanti unità (UGm3, UGm2 ed UGm1) esso presenta un rischio medio.

La presenza di gas, in funzione delle litologie attraversate, è stata ritenuta molto poco probabile e pertanto ad essa è stato associato un rischio nullo.

10 INQUADRAMENTO SISMICO DELL'AREA IN ESAME

Nel presente Capitolo verrà riportato l'inquadramento sismico ai sensi del D.M 14 Gennaio 2008 per la progettazione delle seguenti opere:

- Galleria stradale naturale e cunicolo di esodo;
- Galleria artificiale ed opere di presidio dell'imbocco della galleria stradale lato Borgo San Dalmazzo (imbocco lato Nord-Est);
- Galleria artificiale ed opere di presidio dell'imbocco della galleria stradale lato Vinadio (imbocco lato Sud-Ovest);
- Galleria artificiale ed opere di presidio dell'imbocco del cunicolo di esodo.

Come prescritto dal D.M 14 Gennaio 2008, le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base dal sito di costruzione; essa, per il caso in oggetto, è definita in termini di accelerazione orizzontale attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale ed in considerazione di prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R .

Le coordinate geografiche del sito espresse in gradi sessagesimali e riferite al sistema di riferimento ED50 sono riportate nella tabella seguente e sono attribuite ad un punto compreso nell'area in oggetto (vedi immagine riportata in seguito).

Tabella 35: poli di riferimento per il sito in oggetto

	ID	Latitudine (°)	Longitudine (°)	Distanza (m)
Sito 1	16894	44,3218	7,2683	3221,754
Sito 2	16895	44,3254	7,3379	2719,965
Sito 3	17117	44,2756	7,3430	5159,862
Sito 4	17116	44,2719	7,2734	5437,457



Figura 34: Ubicazione dei poli di riferimento del sito in oggetto. Immagine non in scala tratta dal sito Geostru.

10.1 TEMPO DI RITORNO

Il valore di progetto dell'accelerazione a_g viene definito in funzione della probabilità di superamento" in un dato "tempo di ritorno". Queste due grandezze sono correlate tra loro secondo la seguente relazione:

$$T_R = -V_R / \ln(1 - P_{VR})$$

Dove:

- T_R è il tempo di ritorno,
- V_R è il periodo di riferimento dell'opera,
- P_{VR} è la probabilità di superamento nel periodo di riferimento.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , per ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 36: probabilità di superamento PVR al variare dello stato limite considerato.

	Stati limite	P_{VR}
Stati limite di servizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Per la struttura in oggetto le verifiche in condizioni sismiche saranno condotte principalmente facendo riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

Nella tabella seguente si riportano i valori della probabilità di superamento e del rispettivo tempo di ritorno relativo alla vita utile dell'opera.

Tabella 37: probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato.

Tipo di opera	V_N (anni)	C_u	V_R	P_{VR}	T_R
3	50	1,5	75	10%	712

10.2 ACCELERAZIONE MASSIMA

La definizione dell'azione sismica di progetto, nel DM 14/01/2008, non si basa sulla classificazione sismica del territorio. I parametri necessari per la determinazione dell'azione sismica di progetto sono calcolati direttamente per il sito in esame, utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (Allegato B del DM 14/01/2008).

L'area in oggetto ricade nel comune di Demonte ed è situata all'interno del reticolo tra i nodi più prossimi al sito stesso.

I valori al sito sono ottenuti mediando i parametri spettrali (a_g , F_0 , T^*c) dei quattro nodi mediante la seguente formula:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i}}$$

Dove:

- P valore del parametro nel sito in esame;
- P_i valore del parametro nell' i -esimo punto della maglia contenente il sito in esame;
- d_i distanza del sito in esame dall' i -esimo punto della maglia.

Qualora nel reticolo non siano riportati i valori dei parametri spettrali per il tempo di ritorno richiesto, è possibile ricavare i parametri di interesse mediante interpolazione tra i valori dei parametri corrispondenti ai due tempi di ritorno che comprendono il tempo di ritorno voluto secondo la seguente relazione:

$$\log(P) = \log(P_1) + \log(P_2/P_1) \cdot \log(T_R/T_{R1}) \cdot [\log(T_{R2}/T_{R1})]^{-1}$$

Dove:

- T_R è il periodo di ritorno richiesto corrispondente al periodo di riferimento ed alla probabilità di superamento nel periodo di riferimento per lo stato limite considerato
- T_{R1} e T_{R2} sono i periodi di ritorno più prossimi a T_R per i quali si dispone del generico parametro P .

Nella tabella seguente si riportano i valori dell'accelerazione massima su suolo roccioso (a_g) e dei parametri spettrali (F_0 , T^*c) per lo SLV ed il rispettivo tempo di ritorno.

Tabella 38: Accelerazione massima al suolo e parametri spettrali del sito.

Stato limite	Località	Opera	Prob. Di superamento	Tr (anni)	a_g (g)	F_0 (-)	T^*c (sec)
SLV	Demonte	Tipo 3	10%	712	0,172	2,472	0,291

10.3 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel § 7.11.5 delle NTC-08. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica, si può fare riferimento ad un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento schematizzate nella tabella seguente.

Tabella 39: Categorie di sottosuolo di riferimento

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione con spessore massimo pari a 3m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o teneri a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800m/s (ovvero $NSPT_{,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360m/s (ovvero $15 < NSPT_{,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o terreni a grana fina scarsamente consistenti con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $NSPT_{,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $cu_{,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20m, posti su substrato di riferimento con $V_s > 800$ m/s

La determinazione delle categorie di sottosuolo è stata riportata nella tabella seguente:

- le gallerie naturali verranno realizzate entro un ammasso roccioso generalmente litoide attribuito quindi alla categoria di sottosuolo tipo A;
- tutti gli imbocchi sono stati cautelativamente inseriti entro la categoria di sottosuolo tipo E in quanto caratterizzati da terreni a grana grossa con spessore delle coltri inferiori a 20m e poggianti direttamente sul substrato roccioso tipo A.

Tabella 40: Categorie di sottosuolo di riferimento determinate per le opere in progetto.

	Gallerie naturali	Imbocco lato Vinadio	Imbocco lato Borgo San Dalmazzo	Imbocco del cunicolo di esodo
Categoria si sottosuolo	A	E		

10.4 CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la classificazione riportata nella tabella riportata in seguito.

Tabella 41: Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

La determinazione delle categorie topografiche è stata riportata nella tabella seguente:

- le gallerie naturali possono essere associate ad una categoria topografica fittizia tipo A, in modo da non considerare alcun contributo topografico;
- tutti gli imbocchi sono stati cautelativamente inseriti entro la categoria topografica tipo T2 in quanto caratterizzati da pendii con inclinazione media maggiore di 15° .

Tabella 42: Categorie topografiche di riferimento determinate per le opere in progetto.

	Gallerie naturali	Imbocco lato Vinadio	Imbocco lato Borgo San Dalmazzo	Imbocco del cunicolo di esodo
Categoria si sottosuolo	-	T2		

10.5 ACCELERAZIONE MASSIMA AL SUOLO

Gli effetti di amplificazione locale dovuti alla stratigrafia ed alla conformazione topografica vengono considerati mediante i parametri S_S ed S_T .

Sulla base delle risultanze delle indagini geognostiche precedentemente descritte si è scelto di adottare per i terreni presenti in sito la categoria E; pertanto, in considerazione dei parametri a_g ed F_0 precedentemente definiti, si ottiene $S_S=1,6$ (DM 14/01/2008 Tab.3.2.V).

Per tener conto delle condizioni topografiche si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella Tab.3.2.VI del DM 14/01/2008; per il caso in esame si assume $S_T=1.2$.

L'accelerazione massima orizzontale al sito (a_{max}) è dunque calcolata come prodotto dell'accelerazione su suolo roccioso e dei fattori di amplificazione secondo la seguente relazione:

$$a_{max}=a_g*S_T*S_S$$

L'accelerazione massima orizzontale relativa al sito in oggetto ed alle opere in progetto, per lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) derivante da questo calcolo, è dunque riportata nelle tabelle seguenti.

Tabella 43: accelerazione massima del sito e coefficienti sismici determinati per le gallerie naturali.

Stato limite	Ss (-)	Cc (-)	ST(-)	Kh(-)	Kv(-)	amax (m/s ²)	Beta (-)
SLO	1	1	1	0.010	0.005	0.497	0.200
SLD	1	1	1	0.014	0.007	0.662	0.2
SLV	1	1	1	0.046	0.023	1.688	0.270
SLC	1	1	1	0.066	0.033	2.150	0.300

Tabella 44: accelerazione massima del sito e coefficienti sismici determinati per le gallerie artificiali e per le opere di presidio degli imbocchi.

Stato limite	Ss (-)	Cc (-)	ST(-)	Kh(-)	Kv(-)	amax (m/s ²)	Beta (-)
SLO	1,6	2,1	1,2	0.019	0.010	0.955	0.200
SLD	1,6	2,03	1,2	0.026	0.013	1.272	0.200
SLV	1,6	1,88	1,2	0.079	0.040	3.242	0.240
SLC	1,6	1,85	1,2	0.118	0.059	4.129	0.280

