

COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



APPALTATORE:



PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:



MANDANTI:



IL DIRETTORE DELLA PROGETTAZIONE:

Ing. Paolo Cucino

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROV. DI TRENTO
Responsabile integrazione fra le varie prestazioni specialistiche
Dott. Paolo Cucino
ISCRIZIONE ALBO N° 2216

PROGETTO ESECUTIVO

PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"

RELAZIONE

06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO

Opere parte A

Relazione geotecnica di caratterizzazione

APPALTATORE		SCALA:
IL DIRETTORE TECNICO  Ing. Pietro Gianverchi		-

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I B O U	1 A	E	Z Z	G E	G E 0 0 0 6	0 0 2	B

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione	C. Amoroso	18/10/2021	M. Pietrantoni	19/10/2021	D. Buttafoco (Dolomiti)	20/10/2021	IL PROGETTISTA P. Cucino
B	Revisione a seguito di commenti Committenza	C. Amoroso	20/12/2021	M. Pietrantoni	21/12/2021	D. Buttafoco (Dolomiti)	22/12/2021	

File: IB0U1AEZZGEGE0006002A.docx

n. Elab.: X

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 2 di 58

SOMMARIO

1. PREMESSA	4
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
3. ELABORATI DI RIFERIMENTO	5
4. CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E GEOMECCANICA	7
4.1 GENERALITA'	7
4.2 MATERIALI A GRANA GROSSA (SABBIE E GHIAIE PIÙ O MENO LIMOSE)	8
4.2.1 Introduzione.....	8
4.2.2 Stato iniziale del deposito	8
4.2.3 Angolo di resistenza al taglio.....	10
4.2.4 Caratteristiche di deformabilità	12
4.3 CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI	17
4.3.1 Premesse	17
4.3.2 Assetto geostrutturale, grado di fratturazione e di alterazione delle discontinuità.....	19
4.3.3 Metodi di classificazione degli ammassi rocciosi	20
4.3.4 Resistenza al taglio dell'ammasso. Modello costitutivo di Hoek-Brown	23
4.3.5 Deformabilità dell'ammasso roccioso	25
4.3.6 Resistenza al taglio lungo i giunti	25
5. FINESTRA DI FORCH	26
5.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	26
5.2 INDAGINI ESEGUITE.....	28
5.3 SCHEMI GEOTECNICI DI CALCOLO	28
5.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE	28
5.5 MODELLO GEOTECNICO	35
6. FINESTRA DI FUNES	37
6.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	37
6.2 INDAGINI ESEGUITE.....	37
6.3 SCHEMI GEOTECNICI DI CALCOLO	38
6.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE	38
6.5 MODELLO GEOTECNICO	43

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	<u>Mandatario:</u> SWS Engineering S.p.A.	<u>Mandanti:</u> PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 3 di 58

7. FINESTRA DI CHIUSA	45
7.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	45
7.2 INDAGINI ESEGUITE.....	47
7.3 SCHEMI GEOTECNICI DI CALCOLO	48
7.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE	48
7.5 MODELLO GEOTECNICO	57

APPALTATORE: 	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandataria: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 4 di 58

1. PREMESSA

Nell'ambito della progettazione esecutiva del lotto 1 del quadruplicamento della linea ferroviaria Fortezza-Ponte Gardena, tratta "Fortezza – Ponte Gardena", è prevista la consegna anticipata del progetto esecutivo delle opere ricadenti in Fase A. Le opere previste in questa fase A sono:

- 1) Imbocco della finestra di Forch (GA03.A)
- 2) Imbocco della finestra di Funes (GA06.A)
- 3) Imbocco della finestra di Chiusa con la relativa viabilità di accesso (GA05.A)

Nella figura successiva viene mostrata l'ubicazione dei tre interventi nel contesto generale del progetto

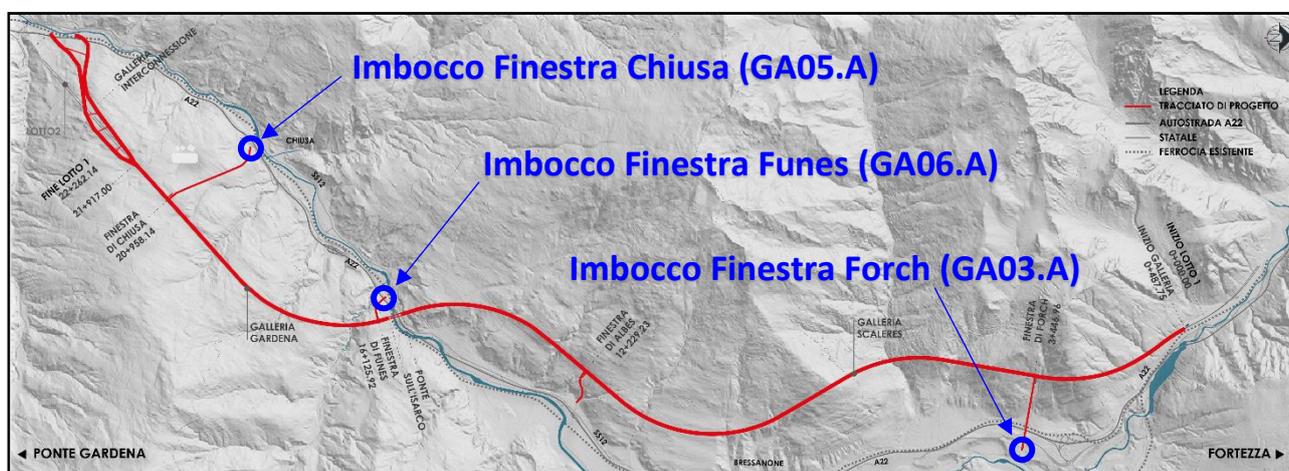


Figura 1: carta schematica raffigurante l'intero percorso del tracciato di progetto, con evidenziate le posizioni delle WBS in oggetto

Nella presente relazione vengono illustrati i modelli geotecnici di riferimento per la progettazione delle opere incluse in queste WBS.

In particolare, vengono descritti e commentati i risultati delle indagini afferenti a diversi siti e, sulla base di questi risultati, è stata sviluppata la caratterizzazione geotecnica dei terreni definendo i modelli geotecnici di sottosuolo da adottare per la progettazione delle varie parti dell'opera.

L'impostazione dello studio geotecnico ha previsto prima la determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche delle unità ritenute omogenee dal punto di vista geotecnico, partendo dalla suddivisione in formazioni dello studio geologico. quindi, laddove necessario, si è proceduto ad una suddivisione in tratte (pseudo) omogenee per stratigrafia e parametri geotecnici.

Questi schemi sono stati ricostruiti anche sulla base del profilo geologico e delle sezioni geologiche, specificamente ricostruiti per queste opere. Per una piena lettura degli aspetti geotecnici si rimanda quindi anche alla relazione geologica e ai relativi elaborati grafici.

I risultati dei calcoli e delle verifiche geotecniche sono invece riportati nelle specifiche relazioni di calcolo delle singole opere.

La presente Relazione tiene conto delle osservazioni riportate nel Rapporto di Verifica IB0U-RV-000000052 inserendo le necessarie integrazioni, modifiche e chiarimenti.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 5 di 58

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Si riporta di seguito l'elenco delle Normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente Relazione:

- [1] Decreto Ministeriale del 14 Gennaio 2008: "Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. N.29 Del 04.2.2008, Supplemento Ordinario N.30.
- [2] Circolare 2 Febbraio 2009, N. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui Al D.M. 14 Gennaio 2008.
- [3] RRFI Dtc Inc Cs Sp Ifs 001 A Del 21.12.2011 - "Specifica per la Progettazione Geotecnica delle Opere Civili Ferroviarie".
- [4] RFI Dtc Sics Sp Ifs 001 A Del 30.06.2014 - Capitolato Generale Tecnico di Appalto delle Opere Civili – Parte LI – Sezione 5 – "Opere in Terra e Scavi" – Rfi.
- [5] Uni En 1997-1: Eurocodice 7 – Progettazione Geotecnica – Parte 1: Regole Generali
- [6] Uni En 1998-5: Eurocodice 8 – Progettazione delle Strutture per la Resistenza Sismica – Parte 5: Fondazioni, Strutture di Contenimento ed Aspetti Geotecnici.

3. ELABORATI DI RIFERIMENTO

- [7] Hoek E., Brown E.T. (1997), "Practical estimates of rock mass strength", Intl. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186.
- [8] Skempton A.W. (1986) "Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation" Geotechnique 36, N° 3.

Elaborati descrittivi delle indagini geognostiche (sito e laboratorio):

Indagini del Progetto Definitivo

- [9] Sondaggi geognostici ordinari (Sondaggi C15-C16-C17-C18-C19-C20-C21) IBL110D69SGGE0005014;
- [10] Prove di laboratorio sondaggi geognostici ordinari-volume 1 IBL110D69PRGE0005002;
- [11] Prove di laboratorio sondaggi geognostici ordinari-volume 2 IBL110D69PRGE0005003;
- [12] Prove di laboratorio sondaggi (TERRE: EO14-EO29-EO30-EO30b-EO32-EO36-EO41-EO50-EO60. ROCCE: EO3-EO7-EO13-EO14-EO19-EO30-EO36-EO41-EP2-EP3-EP6-EP8-EP9) VOLUME 1 IBL11BD69PRGE0105;
- [13] Prove di laboratorio sondaggi (TERRE: EO14-EO29-EO30-EO30b-EO32-EO36-EO41-EO50-EO60. ROCCE: EO3-EO7-EO13-EO14-EO19-EO30-EO36-EO41-EP2-EP3-EP6-EP8-EP9) VOLUME2 IBL11BD69PRGE0105;
- [14] Sondaggi geognostici ordinari sito Forch (Sondaggi EO63-EO64-EO65-EO66-EO67) IBL11BD69SGGE0105012A;
- [15] INDAGINI GEOFISICHE – ZONA VARNA E FORCH Tomografia sismica superficiale: Profili sismici Pes 15, Pes 15b, Pes 16, IBL11BD69IGGE0105018A.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 6 di 58

[16]INDAGINI GEOFISICHE – ZONA VARNA E FORCH Relazione generale: Profili sismici Pes 15, Pes 15b, Pes 16, Pes 26, Pes 26b, Pes 26c, Pes 26d, Pes 26e, Pes 26f, Pes 26g; MASW/Re.Mi: Res21, Res22; Rilievi Magnetotellurici: Sezioni A-A', B-B', C-C', IBL11BD69IGGE0105022A.

[17]INDAGINI GEOFISICHE – ZONA FUNES Relazione generale: prove sismiche HVSR; MASW/Re.Mi: Res5, Res6, Res18, Res19, Res20; Down-hole HO41, IBL11BD69IGGE0105010A.

Indagini del Progetto Esecutivo

[18] SONDAGGI INTEGRATIVI OPERE PARTE A – IBOU1AEZZSGGE0000001A

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
Mandatario:	Mandanti:	PROGETTO ESECUTIVO				
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione geotecnica di caratterizzazione	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	7 di 58

4. CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E GEOMECCANICA

4.1 GENERALITA'

Per la definizione dei parametri geotecnici sono stati utilizzati tutti i dati acquisiti con le prove in sito (SPT, pressiometriche, dilatometriche in foro) e in laboratorio.

Per la definizione delle unità geotecniche si è seguito un approccio che, nella sostanza, segue quello formazionale di tipo geologico. Questo approccio necessita ovviamente di un controllo puntuale che permetta di evidenziare eventuali differenze e anomalie all'interno delle stesse formazioni geologiche, in modo da distinguere eventuali porzioni o corpi assimilabili dal punto di vista geologico, ma geotecnicamente differenziati. In questi casi le unità geologiche sono state suddivise in sub-unità geotecniche.

Nel caso specifico in esame della NV062, vista la ristrettezza dell'area di interesse, tale suddivisione non è risultata necessaria.

Una volta definite le unità geotecniche, i risultati delle indagini (in sito e in laboratorio) sono stati catalogati nell'ambito di queste unità e interpretati con i criteri classici della meccanica delle terre o delle rocce.

Questa caratterizzazione ha portato quindi all'individuazione, per ogni unità geotecnica, di un campo di valori che sarà più o meno ampio a secondo della omogeneità dei materiali. Questo approccio consente di poter estrapolare, in mancanza di dati specifici e puntuali, i parametri geotecnici su basi formazionali, fermo restando che è necessario, per le principali opere d'arte, verificare che i dati specifici acquisiti nel sito rientrino nel suddetto campo di valori, cercando di limitare il più possibile il range di valori indicato in modo da limitare il livello di aleatorietà della caratterizzazione e quindi dei calcoli di dimensionamento.

Con tale impostazione, in questa relazione saranno descritti i criteri utilizzati per la caratterizzazione geotecnica, e quindi sarà esposta la caratterizzazione geotecnica delle varie unità. Infine, vengono forniti i modelli geotecnici di calcolo.

I criteri con i quali vengono elaborati e interpretati i dati di indagine e gli approcci metodologici per la relativa caratterizzazione geotecnica devono essere necessariamente differenziati in funzione delle caratteristiche delle singole unità.

Da quanto si evince dal modello geologico, confermato dalle indagini, nell'ambito dei terreni detritici di copertura del substrato roccioso prevalgono i terreni granulari (non coesivi).

I terreni prevalentemente granulari, per i quali è notoriamente difficile, se non impossibile, prelevare campioni indisturbati per le prove di laboratorio, sono stati caratterizzati attraverso parametri geotecnici in condizioni drenate stimati con correlazioni empiriche a partire dai risultati di prove penetrometriche in foro (SPT). Per la stima delle caratteristiche di deformabilità si può fare riferimento anche alle correlazioni con le prove geofisiche

Per quanto riguarda le rocce, la caratterizzazione geotecnica (geomeccanica) verrà fatta facendo riferimento alla classificazione dell'ammasso roccioso secondo i cosiddetti indici di ammasso (GSI di Hoek), adottando uno schema concettuale di mezzo continuo (pseudo-omogeneo o stratificato) e riferendosi ai criteri di rottura proposti e aggiornati da Hoek & Brown a partire dal 1980.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 8 di 58

4.2 MATERIALI A GRANA GROSSA (SABBIE E GHIAIE PIÙ O MENO LIMOSE)

4.2.1 Introduzione

Secondo la classifica USCS si intendono a grana grossa i materiali caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori al 50%.

In conseguenza del fatto che in tali materiali risulta difficile (se non impossibile) prelevare campioni indisturbati, la caratterizzazione geotecnica è affidata principalmente all'interpretazione delle prove in sito (mediante correlazioni empiriche) e delle prove di classificazione di laboratorio effettuate su campioni rimaneggiati in accordo ai criteri descritti nei paragrafi successivi.

L'interpretazione delle prove è finalizzata a determinare principalmente i seguenti parametri:

- stato iniziale del deposito (grado di addensamento o densità relativa);
- resistenza al taglio;
- deformabilità;

Si evidenzia che le correlazioni empiriche riportate nei paragrafi seguenti sono applicabili nei casi in cui è ragionevole ritenere che le prove siano avvenute in condizioni drenate, ovvero nei seguenti casi:

- terreni sopra falda purché caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori a $\cong 50\%$.
- terreni sottofalda purché caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori a $\cong 35\div 40\%$.

4.2.2 Stato iniziale del deposito

IN SABBIA

In accordo a quanto indicato in Skempton (1986) [8] la densità relativa D_r può essere correlata al valore N_{SPT} con la seguente legge:

$$D_r = \left(\frac{1}{A + B \cdot \sigma_{vo}'} \cdot N_{SPT} \right)^{0.5} \quad [1]$$

essendo:

A, B	=	costanti empiriche indicate in Tab 1: COSTANTI EMPIRICHE A e B (SKEMPTON, 1986)
σ_{vo}'	=	pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova SPT (kg/cm ²)
N_{SPT}	=	numero di colpi per 30 cm di infissione
$(K_o)_{nc}$	=	$1 - \sin \phi'$ = coefficiente di spinta a riposo per terreni normalmente consolidati (-)
$(K_o)_{sc}$	=	$(k_o)_{nc} \cdot (GSC)^{0.5}$ = coefficiente di spinta a riposo per terreni sovra consolidati (-)
GSC	=	grado di sovra consolidazione (-)
D_r	=	densità relativa (-)

tipo di materiale	A	B
sabbie fini normalmente consolidate	27,5	27,5
sabbie grosse normalmente consolidate	43,3	21,7
sabbie sovra consolidate	27,5÷43,3	$\frac{1 + 2 \cdot (k_o)_{sc}}{(21,7 \div 27,5) \cdot 1 + 2 \cdot (k_o)_{nc}}$

Tab 1: costanti empiriche A e B (Skempton, 1986)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 9 di 58

In questa sede, ove non specificato, si assumeranno valori di A e B corrispondenti alle sabbie medie.

IN SABBIE E GHIAIE

Nelle sabbie e ghiaie la determinazione della densità relativa D_r risulta meno agevole che nelle sabbie per i seguenti ordini di problemi:

- per motivi esecutivi il campionatore standard a punta aperta deve essere spesso sostituito con quello a punta conica; in linea di principio non è detto che i risultati ottenibili con il campionatore standard a punta aperta in termini di numero di colpi/30 cm risultino uguali a quelli conseguiti con la punta conica e quindi possano essere interpretati direttamente con le correlazioni empiriche di letteratura sviluppate per la prova SPT con campionatore standard a punta aperta;
- a causa della presenza della ghiaia spesso vengono raggiunte condizioni di rifiuto che non necessariamente sono indice di elevati gradi di addensamento (difficoltà di penetrazione in caso di clasti lapidei di dimensioni elevate).

Per il superamento delle difficoltà in questa sede si opererà come segue:

- ove possibile, nell'ambito della stessa formazione sabbioso-ghiaiosa, verrà fatto un confronto tra i risultati delle prove SPT eseguite con il campionatore standard a punta aperta e quelle eseguite con la punta conica; in base a tale confronto si valuterà la possibilità di trasformare i risultati ottenuti con la punta conica in valori N_{SPT} equivalenti con il campionatore standard. ove tale confronto non sia possibile, i valori N_{SPT} misurati con la punta conica verranno equiparati ai valori N_{SPT} ottenibili con il campionatore standard.
- ove possibile ad ogni valore N_{SPT} verrà associato:
 - ✓ il corrispondente valore misurato di D_{50} (D_{50} = diametro delle particelle corrispondente al 50% di passante);
 - ✓ un valore di d_{50} ipotizzato sulla base di curve granulometriche disponibili a quote superiori ed inferiori a quella della profondità di prova.

In mancanza di dati granulometrici puntuali, l'interpretazione dei valori N_{SPT} , in accordo al metodo descritto al successivo punto, verrà effettuata facendo riferimento ad un valore di D_{50} medio stimato.

Nel caso di raggiungimento delle condizioni di rifiuto, l'interpretazione geotecnica del dato sperimentale verrà effettuata facendo riferimento ad un valore N_{SPT} calcolato come segue:

$N_{SPT} = 100$ se le condizioni di rifiuto sono raggiunte nel primo o secondo tratto di 15 cm

$N_{SPT} = N_2 + \frac{50}{a} \cdot 15 \leq 100$ se le condizioni di rifiuto sono raggiunte nel terzo tratto di 15 cm

Essendo (a) l'affondamento misurato (in centimetri) per un numero di colpi pari a 50.

Verranno inoltre scartati i valori (troppo bassi o troppo alti) che si scostano decisamente dalla linea di tendenza caratteristica.

L'interpretazione dei valori N_{SPT} verrà fatta in accordo al metodo proposto da Cubrinowski & Ishihara (1999) per materiali normalmente consolidati, caratterizzati da un coefficiente di spinta a riposo k_0 dell'ordine di 0,4÷0,5, successivamente esteso da Ishihara et al. (2001) anche al caso dei terreni sovraconsolidati; tale metodo utilizza la seguente espressione:

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 10 di 58

$$D_r = \left\{ \frac{(N_{SPT})_{78\%} \cdot \left(0,23 + \frac{0,06}{D_{50}}\right)^{1,7}}{9} \cdot \left(\frac{98}{\sigma'_{vo}}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{k_{o,NC}}{k_{o,SC}}\right)^{1/2} \right\}^{1/2} \quad [2]$$

essendo:

D_r = densità relativa (-)

$(N_{SPT})_{78\%}$ = numero di colpi/30 cm associabile ad un'energia trasferita alle aste pari al 78% di quella teorica (-)

D_{50} = diametro delle particelle corrispondente al 50% di passante (mm)

σ'_{vo} = pressione verticale efficace geostatica (kPa)

$k_{o,nc}$ = coefficiente di spinta a riposo di terreni normalmente consolidati (-)

$k_{o,sc}$ = coefficiente di spinta a riposo di terreni sovraconsolidati (-)

si rileva che l'espressione sopra indicata è applicabile al caso di:

- energia trasferita alle aste pari al 78%. l'esperienza acquisita nelle indagini eseguite in Italia ha mostrato che mediamente l'energia trasferita alle aste è inferiore al 78% e pari mediamente al 60%; nell'applicazione della formula, il valore N_{SPT} misurato, assunto pari a $(N_{SPT})_{60\%}$, viene pertanto corretto in base alla seguente equazione:

$$(N_{SPT})_{78\%} = (N_{SPT})_{60\%} \cdot \frac{60}{78}$$

- resistenze ottenute con il campionatore standard nelle sabbie e con il campionatore lpt, di diametro maggiore rispetto a quello standard, nel caso delle ghiaie.

In questa sede, in mancanza di prove con il campionatore lpt, l'applicazione della formula in presenza di terreni sabbioso-ghiaiosi ($d_{50} \geq 1$ mm) verrà fatta senza apportare alcuna correzione ai valori NSPT misurati (vedi su tale aspetto Clayton, 1995; Skempton, 1986; Tokimatsu & Yoshimi, 1983).

4.2.3 Angolo di resistenza al taglio

L'angolo di resistenza al taglio di picco φ' può essere determinato facendo riferimento al metodo proposto da Bolton (1986) in base al quale:

$$\varphi' = \varphi_{cv}' + m \cdot DI \quad [3]$$

$$DI = D_r \cdot [Q - \ln(p_f')] - 1$$

essendo:

φ' (°) angolo di resistenza al taglio di picco riferito a pressioni $\sigma'_{ff} = 272$ kPa

Q (-) coefficiente che dipende dalla composizione mineralogica e dalla forma delle particelle, assunto pari a 10

p_f' (kPa) $1,4 \cdot \sigma'_{ff}$ (vedi Jamiolkowski et al. 1988)

σ'_{ff} (kPa) tensione efficace normale alla superficie di rottura assunto pari a 272 kPa

APPALTATORE: 	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 11 di 58

m costante empirica dipendente dalle condizioni di deformazione prevalenti a rottura (vedi Tab 2)
 φ_{cv}' (°) angolo di resistenza al taglio a volume costante o di stato critico
 D_r (-) densità relativa

condizioni di rottura	m(·)
prova triassiale di compressione ($\sigma_2' = \sigma_3'$)	3
prova triassiale in estensione o di deformazione piana ($\sigma_2' \neq \sigma_3'$)	5
σ_2' = tensione principale efficace intermedia	
σ_3' = tensione principale efficace minore	

Tab 2: valori della costante empirica m secondo Bolton (1986)

I valori dell'angolo di resistenza al taglio φ_{cv}' sono ricavabili da prove di laboratorio (triassiali o di taglio diretto) su provini ricostituiti a basse densità relative o, in assenza di queste ultime, ipotizzabili in base a quanto indicato nella Tab 3 (vedi ad esempio Youd, 1972; Stroud, 1988).

	sabbie ben gradate	sabbie uniformi
sabbie a spigoli vivi	$\varphi_{cv}' = 38^\circ$	$\varphi_{cv}' = 34^\circ$
sabbie a spigoli arrotondati	$\varphi_{cv}' = 33^\circ$	$\varphi_{cv}' = 30^\circ$

Tab 3: angolo di resistenza al taglio φ_{cv} per sabbie silicee secondo quanto riportato in Stroud (1988) e Youd (1972)

Nel caso delle ghiaie a spigoli arrotondati si può assumere mediamente $\varphi_{cv}' = 34^\circ \div 36^\circ$.

In accordo al metodo di Bolton (1986) si può assumere cautelativamente, in considerazione del generalmente elevato contenuto di fine (limi e argille):

$\varphi_{cv}' = 30^\circ$ per le sabbie
 $\varphi_{cv}' = 33^\circ$ per le sabbie e ghiaie
m = 3.

Un altro metodo per la stima dell'angolo di attrito è quello di Schmertmann 1977:

Schmertmann, 1977	φ (°) = 28 + 0.14 D_r Ghiaietto uniforme - Sabbie e ghiaie poco limose
	φ (°) = 31.5 + 0.115 D_r Sabbia grossa uniforme - Sabbia media ben gradata
	φ (°) = 34.5 + 0.1 D_r Sabbia media uniforme - Sabbie fini ben gradata
	φ (°) = 38 + 0.08 D_r Sabbia fine uniforme

Per la determinazione dell'angolo di attrito in questa sede si preferisce far riferimento in particolare alla formulazione più cautelativa descritta dalla equazione [4]

$$\phi' = 28 + 0.14 D_r \quad [4]$$

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 12 di 58

anche senza riferirla ad una specifica granulometria in quanto le relazioni per terreni sabbiosi porterebbero a valori di angolo di attrito delle sabbie superiori a quelli delle ghiaie.

Altre correlazioni, di tipo diretto, per la stima diretta dell'angolo di attrito sono quelle della Japan Road Association:

$$\phi' = \sqrt{15 N_{SPT}} + 15 \quad [5]$$

La stessa relazione con il valore 20 invece di 15 fuori radice è proposta da Owasaki e Iwasaki.

La relazione proposta da Japanese National Railway:

$$\phi = 27 + 0.3 N_{SPT} \quad [6]$$

4.2.4 Caratteristiche di deformabilità

MODULI ELASTICI INIZIALI

I moduli iniziali di taglio (G_0) e di Young (E_0) possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio V_s utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa}) \quad [7]$$

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu') \quad (\text{kPa}) \quad [8]$$

essendo:

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

ν' = rapporto di Poisson del terreno = 0,15 ÷ 0,20

V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s .

Avendo a disposizione numerose prove down-hole, la determinazione della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s è preferenzialmente ricavata direttamente da prove geofisiche e, ove necessario, indirettamente, interpretando i risultati delle prove SPT come descritto nel punto successivo.

G_0 DA PROVE SPT

La velocità delle onde di taglio da prove SPT in sabbie e ghiaie normalmente consolidate, silicee non cementate, può essere ricavata sulla base alla correlazione proposta da Ohta & Goto (1978) (vedi anche Baldi et al. 1989); in base a tale correlazione vale quanto segue:

$$V_s = C \cdot (N_{SPT})_{60\%}^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \quad (\text{m/s}) \quad [9]$$

essendo:

$C = 67,3$

z = profondità dal p.c. in metri

f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedi la Tab 4)

APPALTATORE: 	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 13 di 58

f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedi la Tab 5)

F_A	OLOCENE	PLEISTOCENE
	1,0	1,3

Tab 4: Relazione di Ohta e Goto, 1978 - coefficiente f_A (funzione dell'epoca geologica del deposito)

F_G	GHIAIE	SABBIE GHIAIOSE	SABBIE GROSSE	SABBIE MEDIE	SABBIE FINI
	1,45	1,15	1,14	1,07	1,09

Tab 5: Relazione di Ohta e Goto, 1978 - coefficiente f_G (funzione della composizione granulometrica del deposito)

MODULI ELASTICI "OPERATIVI"

GENERALITÀ

Il comportamento dei terreni a grana grossa risulta non lineare; i moduli di deformazione risultano infatti funzione sia delle pressioni efficaci medie correnti p' sia del livello di deformazione indotto o del grado di mobilitazione della resistenza al taglio.

In relazione a quanto sopra la scelta dei moduli di deformazione per le analisi ingegneristiche viene a dipendere anche dal metodo di analisi adottato.

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo elastico-non lineari, i dati di ingresso per le analisi sono:

- i moduli elastici iniziali di cui al precedente paragrafo.
- curve di degrado del modulo in funzione del livello di deformazione indotto. tipiche curve di degrado del modulo di taglio G in funzione del livello di deformazione γ indotto, tratte da Lo Presti (1989), sono riportate nella Fig. 1 e nella Fig. 2. In alternativa alle curve di degrado indicate nella Fig. 1 e nella Fig. 2 possono essere adottate le seguenti espressioni (vedi ad esempio la Fig. 3 Fahey, 1992 e Fahey & Carter, 1993):

$$\frac{E'}{E_0} = \frac{1}{1 + 0.8 \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda_r} \right)} \quad [10]$$

$$\frac{E'}{E_0} = 1 - 0.8 \cdot \frac{\tau}{\tau_{\max}} \quad [11]$$

o meglio (vedi ad esempio Byrne et al, 1990):

$$\frac{E'}{E_0} = 1 - 0.8 \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta \tau_{\max}} \quad [12]$$

essendo:

γ = deformazione di taglio corrente

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 14 di 58

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_0}$$

τ_{\max} = tensione di taglio limite

τ = tensione di taglio corrente

G_0 = modulo di taglio iniziale

$\Delta\tau$ = variazione della tensione di taglio (vedi la Fig. 3)

$\Delta\tau_{\max}$ = variazione massima della tensione di taglio.

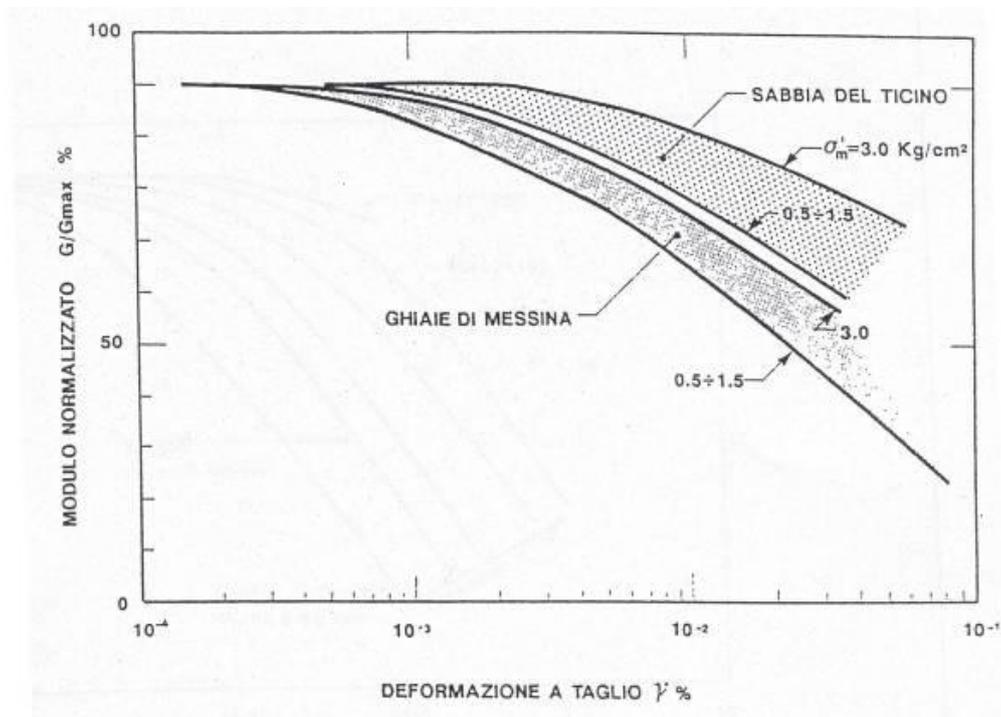


Fig. 1: degrado del modulo G per terreni incoerenti

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA - PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 15 di 58

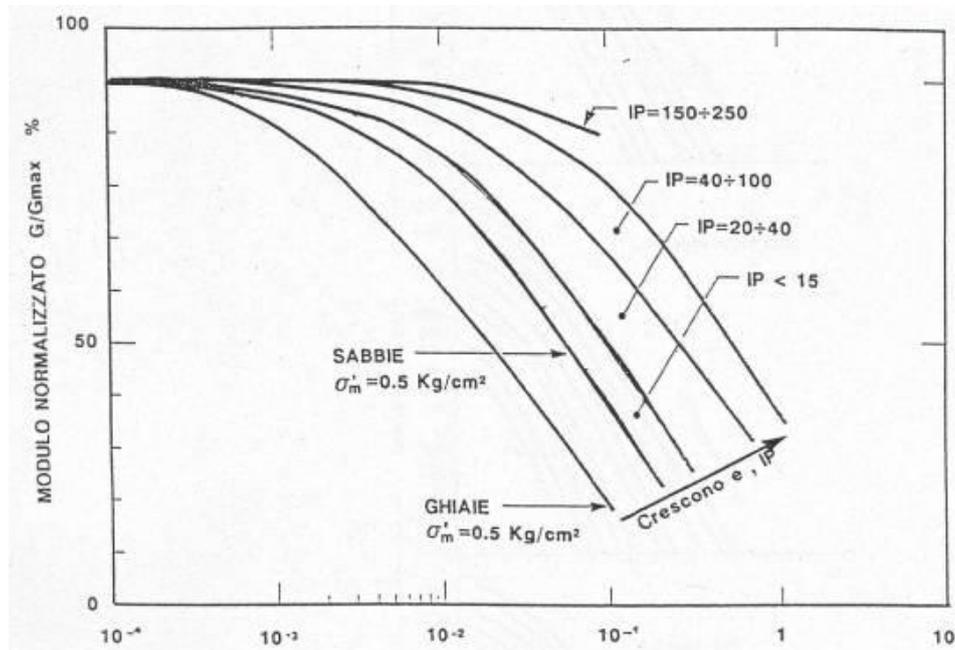


Fig. 2: degrado del modulo G per vari tipi di terreno

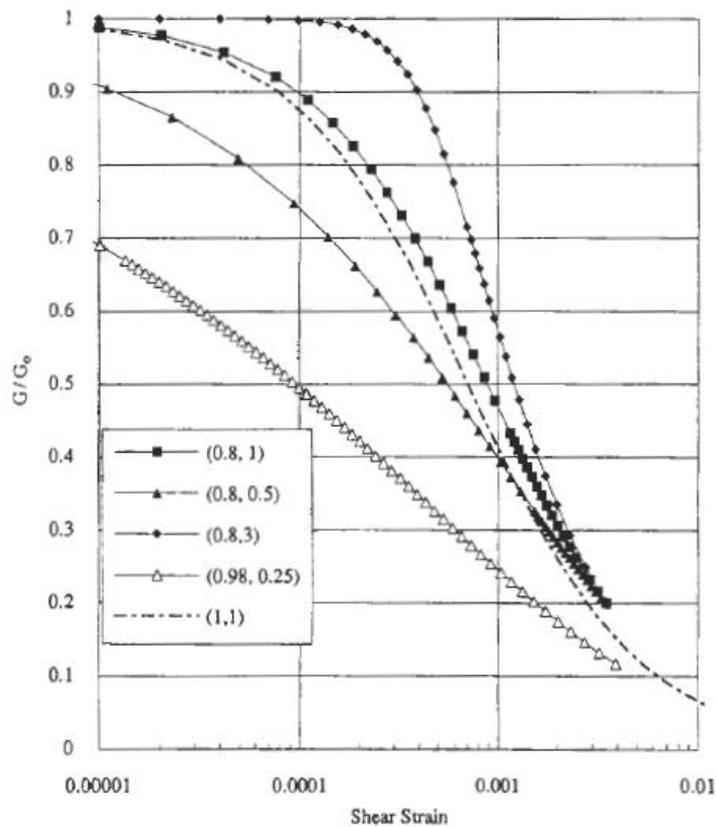


Fig. 3: degrado del modulo g (Fahey, 1992 e Fahey & Carter, 1993)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 16 di 58

Va rilevato che la procedura suddetta, associata all'utilizzo delle curve di degrado riportate nella Fig. 1 e nella Fig. 2, risulta rigorosamente applicabile in condizioni di scarico e/o di scarico e ricarico tensionale; nel caso di problemi di "primo carico", caratterizzati da incrementi di tensione rispetto alla condizione geostatica iniziale, potrebbe condurre ad una sottostima degli spostamenti. Nel caso in esame ci si trova quasi sempre nel secondo caso.

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo elastico-lineari o elastico – lineari - plastici, per la stima dei moduli "operativi" da associare allo specifico problema al contorno verranno fatte le seguenti assunzioni "convenzionali":

- nell'analisi di fondazioni profonde e dirette i moduli di Young "operativi" E_{op} sono pari a circa $1/5 \cdot E_0$, ciò in considerazione del fatto che:
 - gli spostamenti totali e differenziali ammissibili per l'opera sono contenuti (i cedimenti ammissibili sono infatti generalmente inferiori a $0.01 \cdot B$, essendo B la dimensione minore della fondazione).
 - da ciò deriva che, in base alla normativa vigente e alla pratica corrente, tale tipo di opere è caratterizzato infatti da coefficienti di sicurezza nei confronti della rottura per capacità portante generalmente superiori a $2.5 \div 3$;
- nel calcolo dei cedimenti dei rilevati i moduli di Young "operativi" E_{op} sono pari a circa $(1/5 \div 1/10) \cdot E_0$ o, in alternativa, pari a quelli desumibili dalle correlazioni empiriche riportate precedentemente; per tali strutture in terra possono essere infatti ammessi cedimenti totali e differenziali maggiori di quelli delle fondazioni profonde e dirette.

MODULI ELASTICI "OPERATIVI" DA PROVE SPT IN SABBIA E GHIAIA

In accordo a Jamiolkowski et al. (1988) per la stima dei moduli elastici operativi da prove SPT valgono le seguenti espressioni:

$$E'_{25} = (10,5 - 3,5 \cdot D_r) \cdot N_{SPT} / 10 \quad [13] \quad \text{MPa} \quad \text{nel caso dei terreni normalmente consolidati}$$

$$E'_{25} = (52,5 - 35 \cdot D_r) \cdot N_{SPT} / 10 \quad [14] \quad \text{MPa} \quad \text{nel caso dei terreni sovraconsolidati}$$

essendo:

E'_{25} = modulo di Young secante cui corrisponde il 25% della resistenza ultima;

D_r = densità relativa espressa come frazione dell'unità;

N_{SPT} = numero di colpi in prova SPT.

Si rileva che nel caso di materiali ghiaioso-sabbiosi e per valori di densità relativa D_r inferiori a 50% le espressioni suddette conducono ad una sottostima dei valori di E'_{25} .

per la stima del modulo di deformazione sono disponibili numerose altre correlazioni tra le quali:

correlazioni proposte nel "Manual on estimating soil properties" (Cornell University, 1990)

$$E = 10 N_{60} \quad [15] \quad \text{valida per "clean NC sands"}$$

$$E = 15 N_{60} \quad [16] \quad \text{valida per "clean OC sands"}$$

in cui:

APPALTATORE: 	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 17 di 58

E = modulo di deformabilità in kg/cm^2

N_{60} = valore corretto per le procedure esecutive

correlazioni proposte da D'Appolonia et al. (1970)

$$E = 7.71 N_{SPT} + 191 \quad [17] \quad (\text{kg/cm}^2) \text{ valida per sabbia e ghiaia NC}$$

$$E = 10.63 N_{SPT} + 375 \quad [18] \quad (\text{kg/cm}^2) \text{ valida per sabbia OC}$$

in cui:

N_{SPT} = valore non corretto

correlazione proposta da Schultze & Menzenbach (1961)

$$E = 0.517 N_{SPT} + 7.46 \text{ in MPa} \quad [19]$$

correlazione proposta in Pasqualini: Standard Penetration Test (Politecnico di Torino 1983)

la seguente correlazione interpola i risultati di correlazioni tra prove SPT e prove pressiometriche eseguite da Tornaghi, Franke, Ghionna-Lancellotta-Maniscalco, Albert-Hegg-Manassero.

$$E = B \sqrt{N_{SPT}} \quad [20]$$

con $B = 7 \text{ MPa}$.

4.3 CRITERI DI CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

4.3.1 Premesse

Come è noto, per la caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi vengono seguiti criteri e approcci diversi da quelli tipici della meccanica delle terre, a causa della forte disomogeneità e, spesso, anisotropia degli ammassi rocciosi. questi sono infatti strutture composte da una matrice rocciosa intatta (o più o meno alterata) separata da giunti di discontinuità (primarie e secondarie, cioè giunti di strato o di origine tettonica), serrate o più o meno aperte, a volte riempite da materiale di origine secondaria. le discontinuità hanno pertanto una fondamentale importanza nel comportamento meccanico dell'ammasso roccioso che, dal punto di vista ingegneristico, viene assimilato ad un aggregato di blocchi, più o meno giustapposti.

Caratteristica comune dei giunti di discontinuità è una trascurabile resistenza alla trazione e valori di resistenza a taglio sensibilmente inferiori a quelli della roccia intatta. le caratteristiche meccaniche alla scala dell'ammasso roccioso, quindi, dipendono in gran parte dalle resistenze disponibili lungo i piani di discontinuità e dall'orientazione di queste nello spazio.

Il passo principale e propedeutico per una caratterizzazione dell'ammasso roccioso è rappresentato quindi dall'analisi della geometria dei vari sistemi di discontinuità in relazione alla situazione specifica da analizzare (orientazione del fronte di scavo, della galleria, ecc.). Da questa analisi preliminare si deve decidere se l'orientazione dei giunti condiziona o meno la stabilità (o più in generale il comportamento meccanico d'insieme dell'ammasso). nel primo caso l'ammasso va trattato come un mezzo anisotropo e le caratteristiche meccaniche del giunto (e la sua geometria) condizionano direttamente il comportamento d'insieme dell'ammasso (con la formazione di cunei e diedri di roccia). Nel secondo caso, l'ammasso roccioso

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 18 di 58

può essere trattato come un mezzo “pseudo-omogeneo”, in cui i giunti condizionano il comportamento di ammasso in termini di frequenza e caratteristiche, senza tuttavia condizionarne il cinematiso di rottura. Il concetto è ben espresso dalla Figura seguente tratta dal testo di Catrin Edelbro (Evaluation of rock mass strength criteria). Si può quindi passare da un mezzo continuo, cioè roccia intatta (di fatto un caso mai applicabile nei contesti geologici italiani), a mezzi variamente discontinui fino ad un “continuo equivalente”, nel caso in cui il reticolo di discontinuità suddivide fittamente l’ammasso (con riferimento anche al volume del problema) senza orientazioni preferenziali (sempre rispetto al problema da trattare).

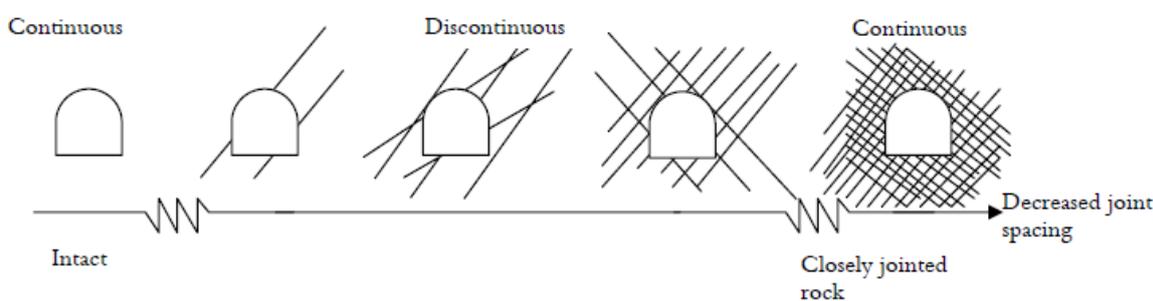


Fig. 4: concetto del volume significativo (da Catrin Edelbro)

Il concetto è ben espresso da Hoek (vedi Figura seguente) riferendosi a uno dei metodi più noti e utilizzati nel campo della geomeccanica, che si basa su “indici” di ammasso (GSI) e su uno specifico modello costitutivo (Hoek-Brown).

La Figura individua vari casi in cui il metodo Hoek-Brown non è applicabile (roccia intatta o suddivisa da uno o due sistemi, o “famiglie”, di giunti preferenziali) e i casi in cui il metodo è applicabile (ammasso suddiviso da molti giunti in relazione al volume del problema o ammasso fittamente suddiviso, tale da renderlo, appunto, “pseudo-omogeneo”).

Per mezzi discontinui, la caratterizzazione si basa sui parametri dei giunti e sulla definizione della loro geometria.

Nel caso di mezzi pseudo-omogenei la caratterizzazione geomeccanica dell’ammasso consiste invece nella definizione dei parametri meccanici e geometrici più significativi della roccia intatta e dei giunti e quindi nell’individuazione di un modello che meglio approssimi il comportamento dell’ammasso, assimilandolo ad un mezzo “continuo” equivalente.

Gli usuali approcci in campo progettuale prevedono quindi l’utilizzo di “indici” di caratterizzazione e l’applicazione poi di uno specifico modello costitutivo.

Tra questi metodi, il primo in ordine cronologico è quello introdotto da Bieniawski (1973) noto come metodo RMR, la cui naturale evoluzione può essere considerato il metodo di Hoek-Brown (noto come metodo GSI, Global Strength Index). Altri metodi molto usati in campo applicativo sono il metodo “Q” di Barton e il metodo RMI di Palmstrom. In questa sede si farà un diretto utilizzo del metodo GSI.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 19 di 58

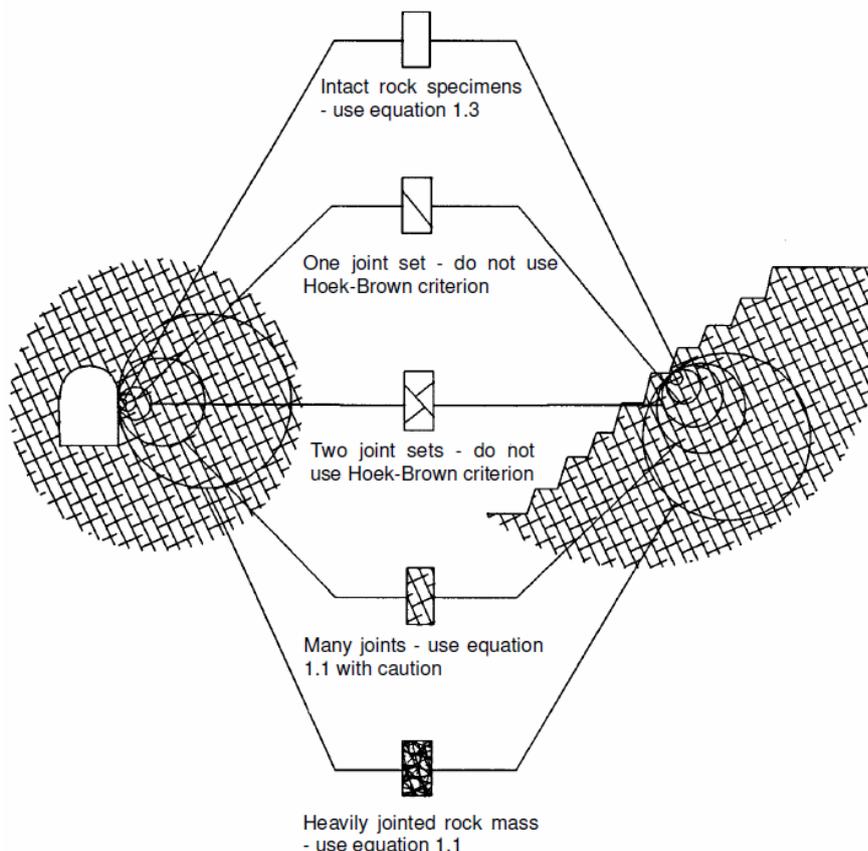


Fig. 5: applicabilità del criterio Hoek-Brown (da Hoek)

Prima della descrizione dei metodi di caratterizzazione è però necessario richiamare i criteri utilizzati per la descrizione quantitativa dei sistemi di discontinuità degli ammassi rocciosi.

In considerazione della complessità dei problemi e dei numerosissimi riferimenti di letteratura, nei paragrafi seguenti vengono ovviamente riportati solo alcuni elementi sintetici, rimandando ai testi e agli articoli scientifici specifici per una trattazione di maggiore dettaglio (v. bibliografia di riferimento).

4.3.2 Assetto geostrutturale, grado di fratturazione e di alterazione delle discontinuità

Per la definizione delle caratteristiche delle discontinuità viene seguito il criterio ISRM 1988 (Suggested Methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses) da applicare su stazioni di misure. In tali stazioni vengono analizzate le caratteristiche strutturali della roccia in corrispondenza di allineamenti (traverse); le traverse sono rappresentate da ideali linee sull'affioramento, posizionate a discrezione dal rilevatore in modo che esse intercettino in maniera significativa le discontinuità che intersecano l'ammasso. Per le discontinuità intercettate vengono rilevati i seguenti dati:

- distanza dal punto di inizio della traversa;
- giacitura del piano di discontinuità (immersione e inclinazione);
- lunghezza visibile della frattura;

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IB0U	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 20 di 58

- apertura/larghezza della frattura;
- rugosità della superficie di frattura;
- tipo di riempimento (se presente).

I dati di giacitura delle discontinuità sono elaborati e rappresentati graficamente con i metodi di proiezione stereografica.

I dati delle discontinuità così rappresentati sono poi elaborati statisticamente e rappresentati graficamente sempre sulle proiezioni stereografiche con una rappresentazione delle isodense (linee di uguale densità dei punti rappresentativi delle discontinuità).

Per maggiori informazioni si rimanda alla relazione geologica dove si commentano i rilievi eseguiti sul campo.

Ulteriori rilievi geomeccanici possono essere effettuati sulle carote dei sondaggi riferendosi quantomeno agli indici TCR (Total Core Recovery), SCR (Standard Core Recovery) e RQD (Rock Quality Designation), che forniscono indicazioni sullo stato di fratturazione della roccia.

Per la definizione del grado di alterazione della roccia ci si è analogamente riferiti alla metodologia proposta dall'ISRM.

4.3.3 Metodi di classificazione degli ammassi rocciosi

Il **metodo di Hoek-Brown GSI** (Geological Strength Index) è nato negli anni '80 per un ammasso roccioso generico ed è poi stato ampliato, dettagliato e integrato anche da altri autori per renderlo applicabile a vari tipi di ammasso e per superare l'approccio strettamente qualitativo originario.

Nella Figura seguente si riporta lo schema base del criterio GSI che viene utilizzato per la determinazione del valore indice di riferimento in relazione al grado di fratturazione e alle condizioni dei giunti.

Il giudizio si basa sostanzialmente sulla struttura dell'ammasso, intensità della fratturazione e caratteristiche delle superfici dei giunti trascurando la resistenza del materiale roccioso.

Questo schema è poi stato modificato, integrato e adattato anche per altre tipologie di ammassi rocciosi (flysch, rocce scistose, ecc..) rimanendo però invariato l'approccio di base.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 21 di 58

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		DISCONTINUITY SURFACE CONDITION				
According to geological conditions, pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index GSI from the contours		VERY GOOD Very rough, unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered or altered surfaces	POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings containing angular rock fragments	VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE						
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY - interlocked, partially distributed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets		60	50		
	BLOCKY/FOLDED - folded and faulted with many intersecting discontinuities forming angular blocks			40	30	
	CRUSHED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded blocks				20	10

Fig. 6: schema base del metodo GSI (da Hoek)

L'apparente semplicità del metodo GSI ha portato ad un uso intensivo (e spesso non consono alle effettive intenzioni degli autori) di questo criterio. L'applicazione corretta di questo metodo presuppone la realizzazione di approfonditi studi e rilevamenti geomeccanici sul campo, con la disponibilità di affioramenti e fronti di scavo di dimensioni e qualità tali da garantire una significatività statistica dei dati di acquisizione oltre che una affidabilità degli stessi. La "sensibilità" ed esperienza del geologo che effettua questa caratterizzazione sono stati evidenziati dallo stesso Hoek come elemento imprescindibile per l'affidabilità del metodo.

Molto spesso gli affioramenti sono limitati, di ridotte dimensioni e disturbati da fenomeni di alterazione dell'ammasso. I dati principali circa lo stato di fratturazione della roccia derivano spesso dai soli dati di carotaggio (RQD ed esame delle condizioni delle superfici di discontinuità sulle carote).

Tali circostanze hanno indotto Hoek ed altri autori a proporre un metodo "quantitativo" del GSI ("Quantification of the Geological Strength Index chart" – Hoek, Carter, Diederichs – 2013) che prevede

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
Mandatario:	Mandanti:	PROGETTO ESECUTIVO				
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione geotecnica di caratterizzazione	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	22 di 58

l'utilizzo dei soli dati RQD e j (condizioni delle discontinuità, già impiegate da Bieniawski con la sigla Jcond₈₉, ad indicare "Joint Condition" secondo il sistema di Bieniawski del 1989).

Il sistema proposto è illustrato nella scheda seguente ed è rappresentabile dalla formula:

$$GSI = 1.5 Jcond_{89} + RQD/2$$

La metodologia di calcolo del Jcond₈₉ è riportata nella Tabella seguente (ripresa dalla pubblicazione citata).

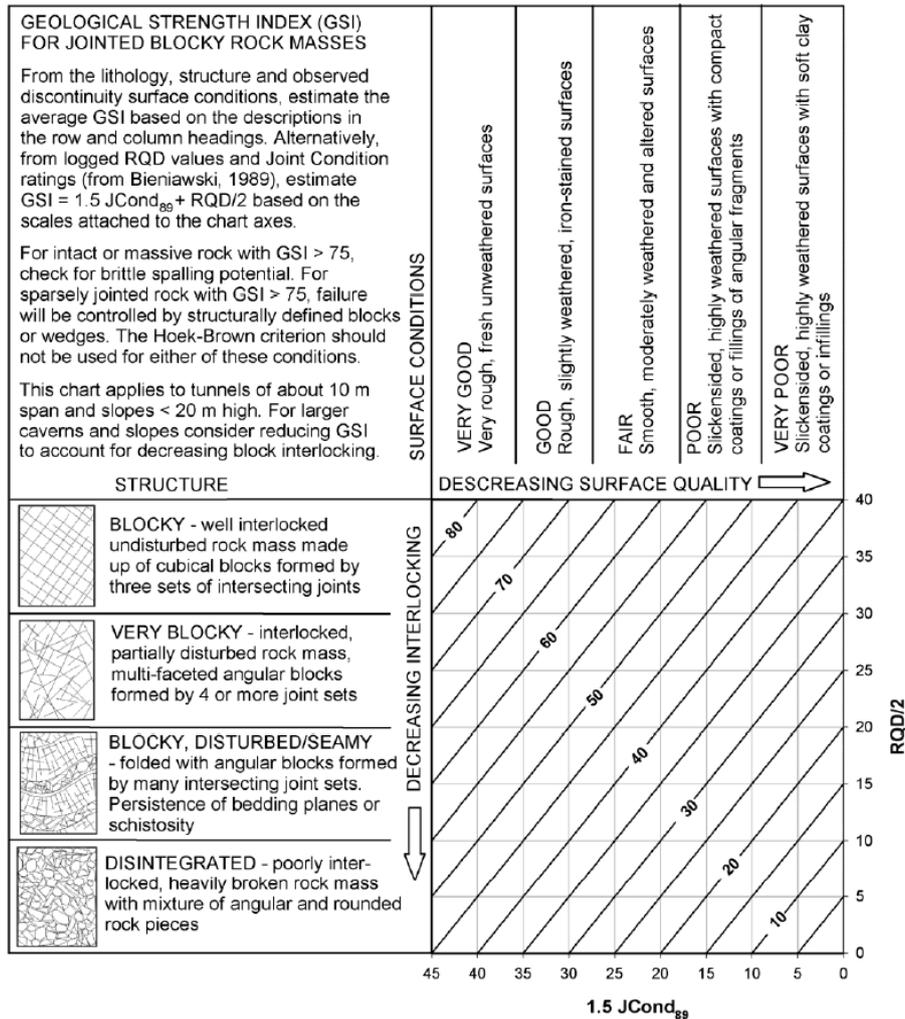


Fig. 7: metodo GSI quantitativo (da Hoek)

APPALTATORE:  CONSORZIODOLOMITI	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 23 di 58

Table 1: Definition of $J_{Cond_{89}}$, after Bieniawski (1989) [5].

Condition of discontinuities	Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1 – 5 mm Continuous	Soft gouge > 5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous
Rating	30	25	20	10	0

Guidelines for classification of discontinuity conditions

Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 to 3 m	3 to 10 m	10 to 20 m	More than 20 m
Rating	6	4	2	1	0
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 – 1.0 mm	1 – 5 mm	More than 5 mm
Rating	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided
Rating	6	5	3	1	0
Infilling (gouge)	None	Hard infilling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft infilling < 5 mm	Soft infilling > 5 mm
Rating	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderate weathering	Highly weathered	Decomposed
Rating	6	5	3	1	0

Fig. 8: determinazione del $J_{cond_{89}}$ (da Hoek)

4.3.4 Resistenza al taglio dell'ammasso. Modello costitutivo di Hoek-Brown

Il comportamento meccanico dell'ammasso roccioso è descritto dal criterio di resistenza non lineare di Hoek e Brown (1980). questo criterio di resistenza è contraddistinto, nel piano di Mohr, da una marcata curvatura con concavità verso il basso; ciò comporta che, a modeste pressioni di confinamento, la superficie di rottura tende a seguire piani di discontinuità con giacitura prossima a quella di rottura, mentre ad elevate sollecitazioni la rottura interessa più estese porzioni di roccia integra.

In termini di sollecitazioni principali efficaci σ_1 e σ_3 il criterio di resistenza è espresso dalle relazioni:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_3 + \left\{ m_i \sigma_c \sigma_3 + s_i \sigma_c^2 \right\}^{1/2} && \text{materiale roccioso} \\ \sigma_1 &= \sigma_3 + \left\{ m_a \sigma_c \sigma_3 + s_a \sigma_c^2 \right\}^{1/2} && \text{ammasso roccioso} \quad [21]\end{aligned}$$

in cui σ_c è la resistenza a compressione uniaassiale del materiale roccioso e m ed s sono due parametri legati alla resistenza, rispettivamente di tipo attritivo e di tipo coesivo.

Per il materiale roccioso viene usualmente assunto $m_i = 1$.

La resistenza a compressione uniaassiale σ_{ca} e a trazione σ_{ta} dell'ammasso risultano rispettivamente pari a:

$$\begin{aligned}\sigma_{ca} &= \sqrt{s_a} \sigma_c \\ \sigma_{ta} &= \frac{\sigma_c}{2} \left(m_a - \sqrt{m_a^2 + 4s_a} \right)\end{aligned}$$

Il criterio, parte dalle caratteristiche meccaniche della roccia intatta, per poi introdurre dei coefficienti correttivi per tenere conto delle caratteristiche dei giunti dell'ammasso.

Per tenere conto di effetti di disturbo dell'ammasso, Hoek ha introdotto un criterio di rottura modificato e successivamente "generalizzato" in cui nell'equazione [21] è stato introdotto un coefficiente "a" per adattare meglio la forma della curva nel piano di Mohr.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO				
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 24 di 58

In tal modo la [21] diventa:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \left\{ m_i \sigma_c \sigma_3' + s_i \sigma_c^2 \right\}^a \quad \text{materiale roccioso}$$

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \left\{ m_a \sigma_c \sigma_3' + s_a \sigma_c^2 \right\}^a \quad \text{ammasso roccioso}$$

Hoek e Brown (1980), per stimare i valori di m_a e s_a dell'ammasso roccioso a partire dall'indice GSI, hanno proposto le seguenti relazioni:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \quad s_b = s_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right)$$

Successivamente, alcuni autori (Hoek, Carranza-Torres and Corkum, 2002), al fine di tenere conto di effetti di disturbo o allentamento dell'ammasso, i valori di m_b , s e a sono stati ricavati dalle seguenti espressioni:

$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

m_i costante adimensionale dipendente dal tipo litologico.

D coefficiente che tiene conto dell'effetto di disturbo per l'abbattimento della roccia con esplosivo.

Ai fini delle verifiche di stabilità, il criterio di Hoek e Brown viene più convenientemente espresso in termini di curva intrinseca $\tau-\sigma_n'$ anziché in termini di sforzi principali, correlando in base a relazioni geometriche, lo sforzo di taglio in funzione della sollecitazione normale.

Lo sforzo normale e di taglio sono correlate agli sforzi principali dalle relazioni (Balmer, 1952):

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} \cdot \frac{d\sigma_1'/d\sigma_3' - 1}{d\sigma_1'/d\sigma_3' + 1}$$

$$\tau = (\sigma_1' - \sigma_3') \cdot \frac{\sqrt{d\sigma_1'/d\sigma_3'}}{d\sigma_1'/d\sigma_3' + 1}$$

dove

$$d\sigma_1'/d\sigma_3' = 1 + am_b(m_b \sigma_3' / \sigma_c + s)^{a-1}$$

Per il calcolo dei parametri di resistenza espressi in termini di coesione ed angolo di attrito efficaci lo stesso Hoek (1980) ha proposto la seguente procedura di calcolo:

$$\varphi' = \arcsen \left[\frac{6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b \sigma_{3n}')^{a-1}} \right]$$

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

dove

$$\sigma_{3n}' = \sigma_{3\max}' / \sigma_c$$

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 25 di 58

Il valore di $\sigma'_{3\max}$ è il limite superiore della tensione di confinamento per il quale viene considerata la correlazione tra il criterio di Hoek-Brown e di Mohr-Coulomb.

4.3.5 Deformabilità dell'ammasso roccioso

Anche in questo caso, come per la resistenza, anche per la deformabilità vanno distinte le caratteristiche a livello di campione intatto da quelle dell'ammasso, dove in quest'ultimo ovviamente influiscono la frequenza, l'apertura e le altre condizioni dei giunti di discontinuità.

Esistono in letteratura numerosissime relazioni proposte da vari autori (a iniziare da Bieniawski, Hoek, Serafim e Pereira, Barton e altri).

Hoek and Diederichs (2005) hanno riesaminato vari metodi empirici per stimare il modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso ed hanno proposto la seguente relazione che verrà proposta in questa sede.

$$E_d (MPa) = 100000 \left(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}} \right) \quad [22]$$

4.3.6 Resistenza al taglio lungo i giunti

Per i motivi prima descritti, quando le condizioni geostrukturali dell'ammasso rapportate all'interazione con l'opera in progetto (anche nel caso si scavi in roccia non sostenuti) non consentono l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per ammassi pseudo-omogenei, le verifiche vanno condotte con riferimento allo scorrimento di cunei e diedri di roccia (che si formano dalla combinazione dei giunti di discontinuità, della superficie topografica e di quella di scavo). La geometria dei blocchi instabili deriva dalle effettive condizioni geostrukturali, ricostruite con le stazioni di rilievo commentate nella relazione geologica.

Le analisi possono essere condotte con i classici sistemi all'equilibrio e/o con le analisi cinematiche su proiezioni stereografiche.

Per i criteri applicati nel caso in esame si rimanda alle relazioni di calcolo.

Nei riguardi della stima delle resistenze a scorrimento lungo le discontinuità può farsi riferimento al noto schema di Barton, tradotto in una relazione che esprime la resistenza a taglio solo in termini attritivi

$$\tau_{\text{lim}} = \sigma \cdot \tan \varphi^* \quad [23a]$$

$$\varphi^* = \left(\varphi + JRC \cdot \log_{10} \frac{\sigma_j}{\sigma} \right) \quad [23b]$$

- σ : pressione efficace normale al giunto
- φ : angolo di attrito base (giunto piano, liscio)
- JRC : indice di scabrezza di Barton
- σ_j : resistenza a compressione della roccia adiacente il giunto
- φ^* : angolo di attrito apparente in relazione con σ e l'indice di scabrezza

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 26 di 58

5. FINESTRA DI FORCH

5.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nell'area di imbocco della Finestra Forch, ubicata all'interno di una cava di ghiaia in corso di coltivazione, sono presenti esclusivamente terreni di pertinenza dei depositi superficiali di età quaternaria. Il basamento roccioso non è stato raggiunto da nessuno dei numerosi sondaggi, spinti fino alla profondità di 60 m da piano campagna, realizzati nei dintorni dell'imbocco.

Lo schema geologico delineato per questo imbocco è raffigurato nello stralcio della sezione geologica seguente.

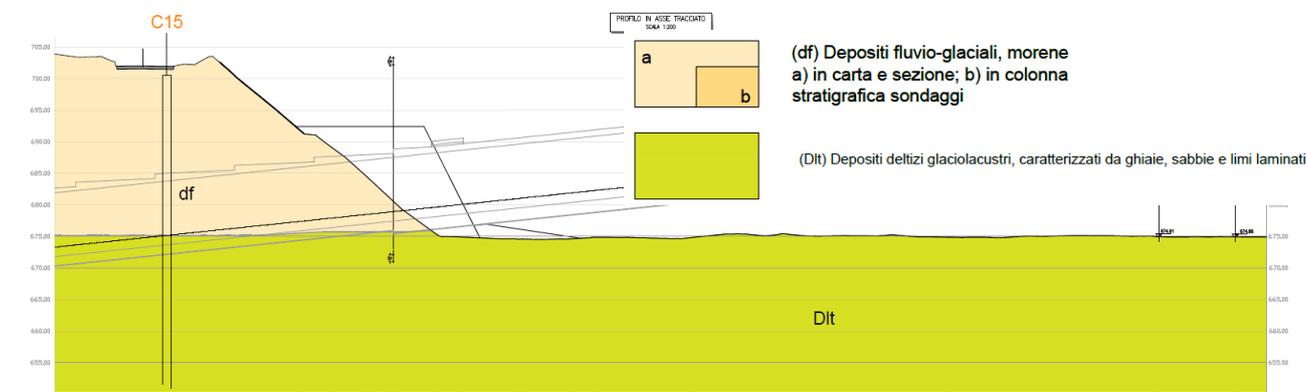


Fig. 9 – Sezione geologica dell'imbocco della Finestra di Forch

I *Depositi fluvio-glaciali (df)* sono caratterizzati da una sensibile variabilità granulometrica e litologica. Sono costituiti principalmente da termini a matrice sabbiosa con ghiaia, ciottoli e blocchi anche di dimensioni superiore al metro. La natura petrografica dei blocchi di maggiori dimensioni è solitamente granitica o gneissica. La potenza dei depositi di rimaneggiamento fluviale può raggiungere alcune decine di metri. Nel dettaglio dell'area di imbocco della Finestra Forch i depositi fluvio-glaciali interessano all'incirca i primi 20-30 m di profondità dalla superficie topografica originaria della zona di cava.

Sono largamente esposti nei fronti dell'area di cava all'interno della quale è ubicato l'imbocco. Le foto seguenti mostrano direttamente i materiali interessati dall'opera. In corrispondenza dell'imbocco si rilevano ciottoli e massi voluminosi del diametro fino ad alcuni decimetri.

Al di sotto dei depositi fluvio glaciali (df) i *Depositi deltizi glaciolacustri (Dlt)* sono rappresentati da una successione costituita verso l'alto da facies prevalentemente sabbiose con ghiaia in transizione verso il basso a limi sabbiosi laminati con ciottoletti.

Il top sabbioso gradato con ciottoli dispersi dei depositi glaciolacustri è stato raggiunto al fondo scavo della cava di prestito per inerti in cui è previsto l'imbocco della finestra Forch, come mostrato dalle foto seguenti.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 27 di 58

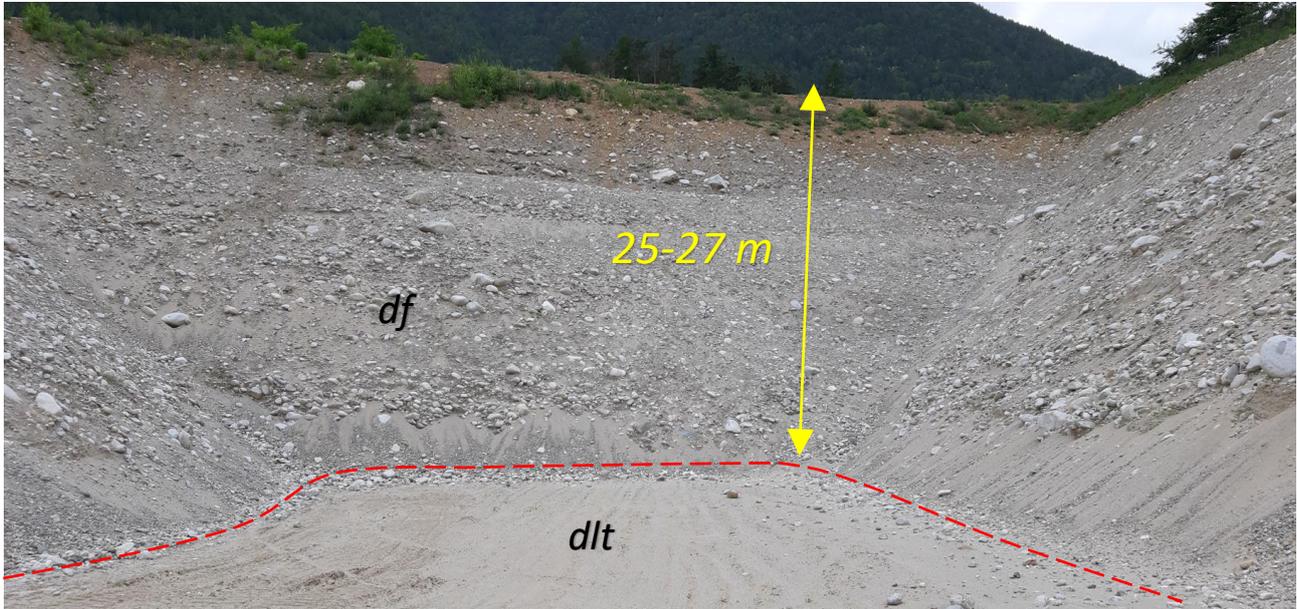


Fig. 10 – Cava di Forch vista della zona di imbocco; lo scavo si è arrestato al tetto dell'unità sabbiosa affiorante sul fondo delle scavo

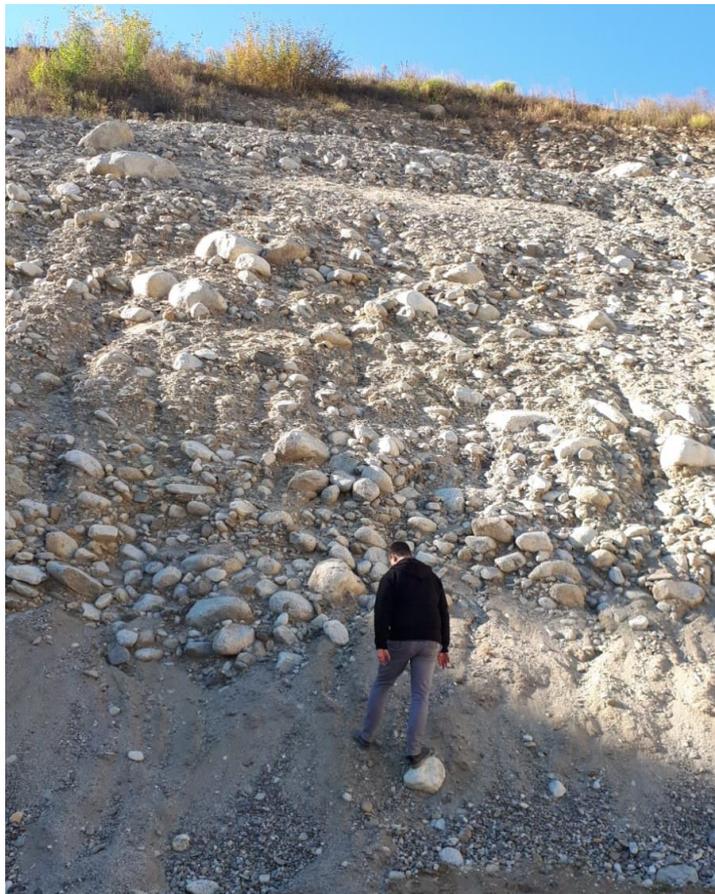


Fig. 11 – Dettaglio dei depositi formati da ghiaie e blocchi in matrice sabbiosa

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 28 di 58

5.2 INDAGINI ESEGUITE

Per la finestra di Forch si può fare riferimento alle indagini eseguite in fase di PD. L'estesa esposizione nei fronti di cava dei terreni che saranno interessati dall'imbocco ha permesso di accertare la congruenza dei dati di PD.

Per l'estesa zona della finestra di Forch e della viabilità d'accesso sono disponibili sei sondaggi ordinari a carotaggio continuo, di cui tre realizzati durante la campagna 2012-2013 denominati C15, C16, C19 [9] e tre durante la campagna 2017-2018 denominati "EO32", "EO63", "EO65" [13][14]. Nella medesima campagna indagini, sono state effettuate due tomografie sismiche a rifrazione PES15 e PES16 [15]. Inoltre, un ulteriore sondaggio a carotaggio continuo è stato effettuato nell'ambito del Progetto Esecutivo, denominato S21-3 quest'ultimo peraltro riferito al tratto di galleria profonda.

Sono quindi di particolare interesse per la WBS oggetto della Fase A:

- ✓ Sondaggio C15 a carotaggio continuo della profondità di 60 m con prelievo di 7 campioni rimaneggiati 10 prove SPT, 4 prove di permeabilità di tipo Lefranc e 4 prove pressiometriche. Il foro è stato attrezzato con piezometro DN50 a tubo aperto.
- ✓ Stendimento sismico a rifrazione, denominato "Pes15b" con 96 geofoni ad intervalli regolari di 2,5 m, condotto con la tecnica della tomografia sismica attraverso l'intera area di indagine a S dell'imbocco in oggetto, seguendo una direzione E-W per una lunghezza di 237,5 m.

5.3 SCHEMI GEOTECNICI DI CALCOLO

Nel caso in esame, gli schemi geotecnici da prendere come base per le modellazioni di calcolo derivano direttamente dagli schemi geologici rappresentati nella sezione geologica della figura precedente.

Lo schema prevede quindi due unità geotecniche corrispondenti alle formazioni geologiche df e Dlt.

5.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

La verticale di indagine di più diretto interesse per la stima dei parametri geotecnici è il sondaggio C15 [9] che ricade a pochissima distanza dall'asse e quindi può essere preso come riferimento anche con riferimento alle osservazioni sui fronti di cava.

I valori di N_{SPT} riscontrati nel sondaggio sono i seguenti e sono riportati in Fig. 12:

z (m)	N_{SPT}	Litologia
3.0	R	Ghiaie
7.5	39	Ghiaie
11.0	35	Sabbie con ghiaia
16.0	74	Sabbie con ghiaia
18.6	55	Sabbie con ghiaia
24.0	56	Sabbie con ghiaia
27.0	68	Sabbie
31.5	72	Sabbie
37.5	46	Sabbie
40.5	76	Sabbie

Tab 6: Valori di N_{SPT} sondaggio C15

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 29 di 58

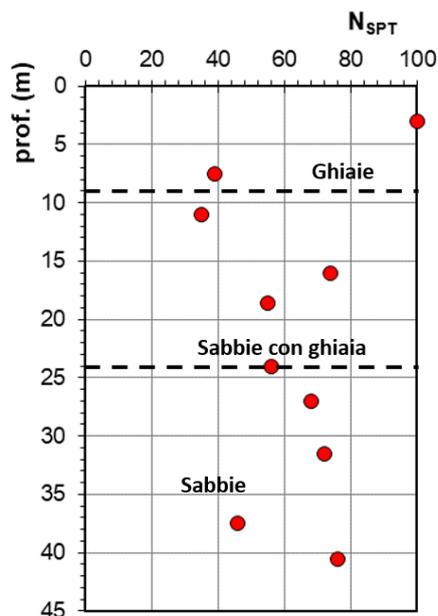


Fig. 12 – Grafico risultati SPT nel sondaggio C15

Si tratta di valori molto elevati che indicano un grado di addensamento molto alto, soprattutto nelle sabbie dove la prova SPT non è condizionata dall'eventuale presenza di elementi lapidei.

Non si notano particolari tendenze con la profondità.

Dal sondaggio C15 si evince che fino alla profondità di 25 m la composizione granulometrica è costituita principalmente da sabbia con ghiaia, mentre da 25 m in poi la percentuale di sabbia supera il 50% (Fig. 13).

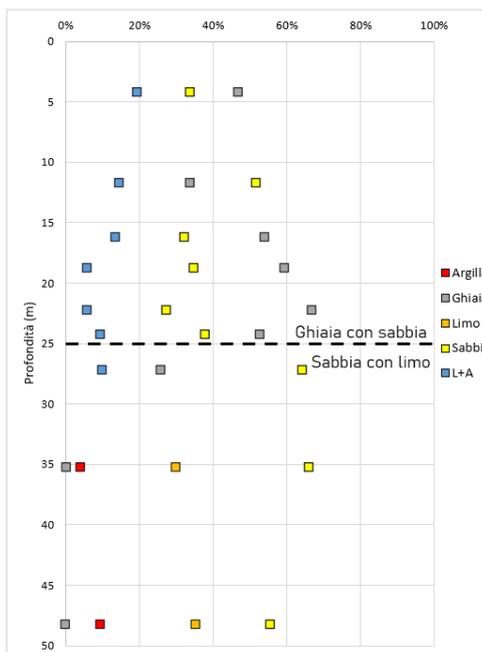


Fig. 13 – Granulometria sondaggio C15

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 30 di 58

In accordo con la formulazione di Skempton (1986) riportata nell'equazione [1], è stata calcolata la densità relativa ottenuta dalle prove SPT.

I valori utilizzati per i coefficienti A e B fanno riferimento a sabbie grosse normalmente consolidate fino alla profondità di 25 m e poi a sabbie fini normalmente consolidate da 25 m in poi.

I risultati sono riportati in Tab 7 e graficati in Fig. 14.

Materiale	Z (m)	N _{SPT}	σ_{v0} (kg/cm ²)	A	B	D _r (%)
Ghiaie	7.5	39	1.5	43.3	21.7	72%
Sabbie con ghiaia	11	35	2.2	43.3	21.7	62%
Sabbie con ghiaia	16	74	3.2	43.3	21.7	81%
Sabbie con ghiaia	18.6	55	3.72	43.3	21.7	67%
Sabbie con ghiaia	24	56	4.8	43.3	21.7	62%
Sabbie	27	68	5.4	27.5	27.5	62%
Sabbie	31.5	72	6.3	27.5	27.5	60%
Sabbie	37.5	46	7.5	27.5	27.5	44%
Sabbie	40.5	76	8.1	27.5	27.5	55%

Tab 7: Valutazione della densità relativa secondo Skempton (1986)

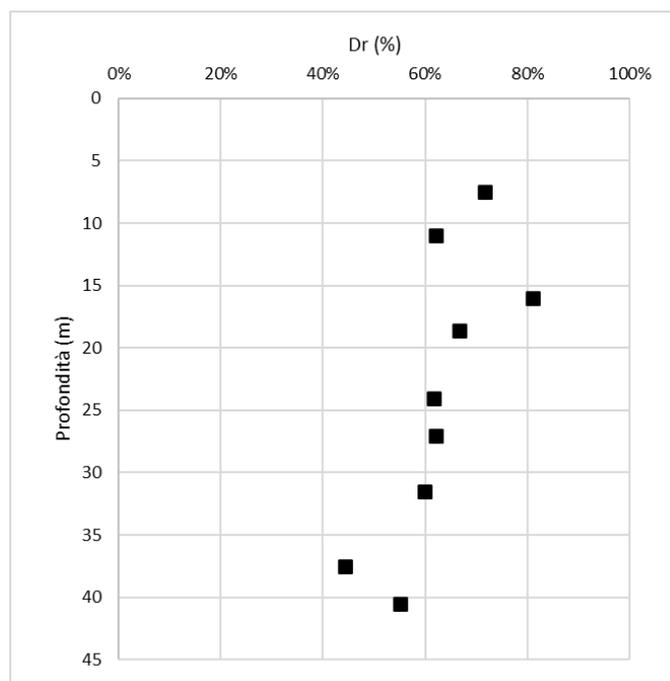


Fig. 14 –Densità relativa Skempton (1986)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE:		PROGETTO ESECUTIVO					
Mandatario:	Mandanti:	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	31 di 58
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione							

Applicando le correlazioni prima descritte si ottiene un range di valori che varia tra 36° e 44° con una lieve tendenza alla diminuzione dei valori con la profondità in accordo con il passaggio granulometrico dalle ghiaie alle sabbie descritto dal modello geologico.

In generale, facendo riferimento alla prima relazione per ghiaie si ottengono valori tra 37 e 39° per le ghiaie e sabbie ghiaiose e valori tra 34° e 37° per le sabbie. A valori più elevati (fino a 44° per le ghiaie) si arriva utilizzando le altre relazioni.

z (m)	D _r (%)	Ghiaietto uniforme - Sabbie e ghiaie poco limose	Sabbia fine uniforme	Sabbia grossa uniforme - Sabbia media ben gradata	Sabbia media uniforme - Sabbie fini ben gradata
		φ' (°)	φ' (°)	φ' (°)	φ' (°)
7.5	72%	38	44	40	42
11	62%	37	43	39	41
16	81%	39	44	41	43
18.6	67%	37	43	39	41
24	62%	37	43	39	41
27	62%	37	43	39	41
31.5	60%	36	43	38	40
37.5	44%	34	42	37	39
40.5	55%	36	42	38	40

Tab 8: Valutazione dell'angolo di resistenza al taglio Schmertmann 1977

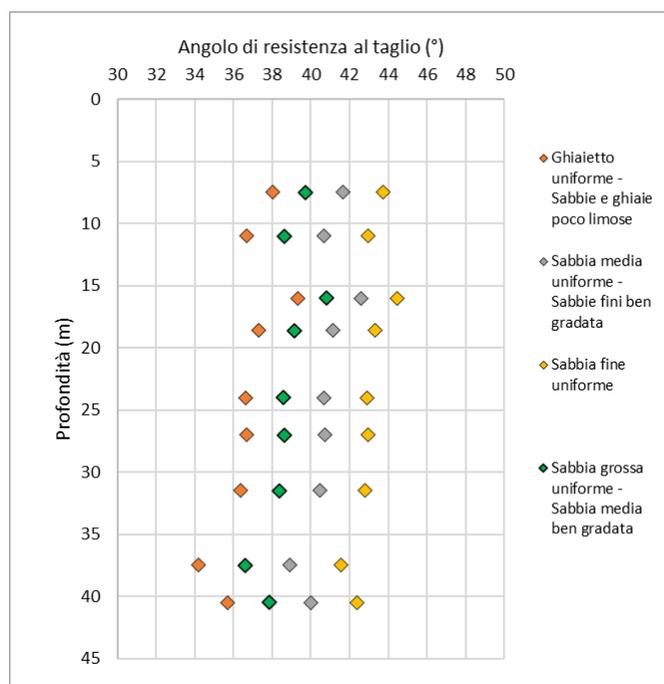


Fig. 15 – Angolo di resistenza al taglio Schmertmann 1977

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 32 di 58

Utilizzando le correlazioni dirette che stimano l'angolo di attrito direttamente dal valore N_{SPT} , senza il passaggio che intermedio che porta a valutare prima la densità relativa (dalle prove SPT) e poi l'angolo di attrito dalla densità relativa (relazioni [5] e [6]) si ricavano valori di angolo di attrito che sono quasi sempre superiori a 40° .

Per il modulo elastico, da gran parte delle relazioni prima elencate si ricaverebbe un valore del modulo E prossimo o superiore a 50 MPa, come riportato nella tabella seguente in cui sono state utilizzate le equazioni [17], [19] e [20]. In questo caso si apprezza un aumento dei valori con la profondità.

z (m)	N_{SPT}	D'Appolonia	Schultze & Menenbach	Tornaghi et al.
		E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
7.5	39	49	28	44
11	35	46	26	41
16	74	76	46	60
18.6	55	62	36	52
24	56	62	36	52
27	68	72	43	58
31.5	72	75	45	59
37.5	46	55	31	47
40.5	76	78	47	61

Tab 9: Definizione del Modulo Elastico in funzione del valore di N_{SPT}

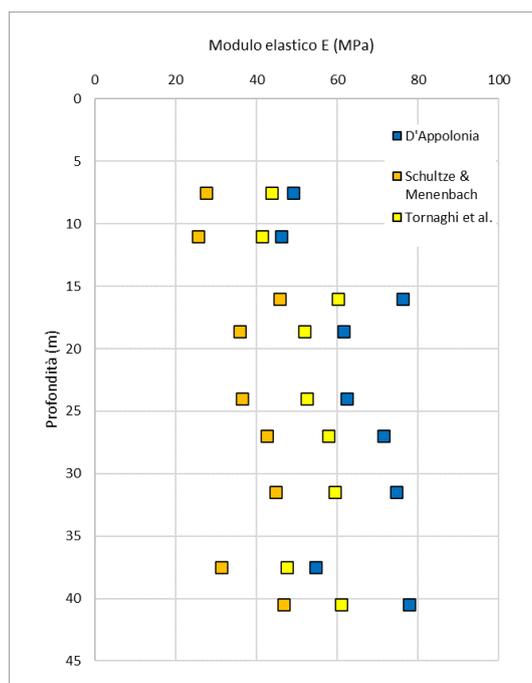


Fig. 16 – Modulo Elastico ricavato da prove SPT

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 33 di 58

A valori sostanzialmente analoghi si arriverebbe applicando le relazioni con V_s (velocità delle onde di taglio) che partendo dalla stima di G_0 si arriva, tramite E_0 (vedi relazioni [7] e [8]), alla valutazione del modulo operativo.

Dalla prova sismica si ricava un valore medio di V_s nei primi metri detritici intorno a 300 m/s per aumentare con la profondità fino ad arrivare a valori di 600 m/s alla profondità della galleria (Fig. 17).

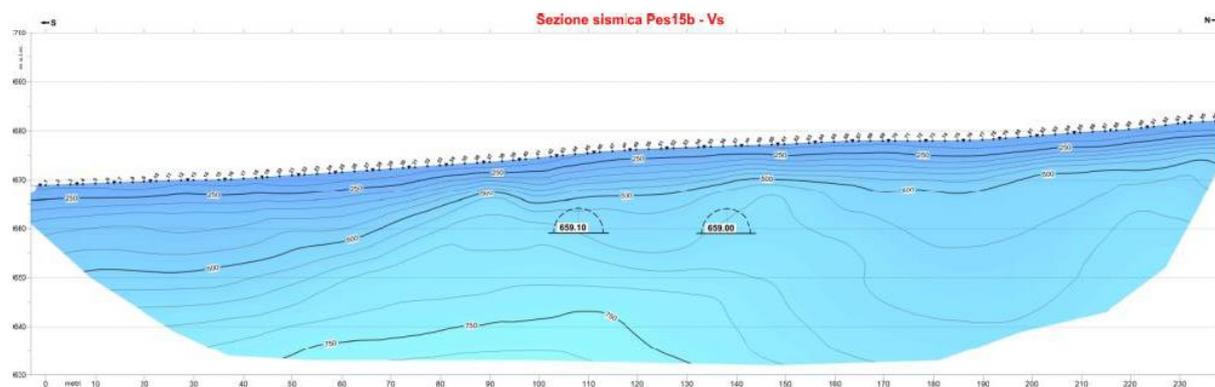


Fig. 17 – Sezione sismica Pes15b - Vs

Dalle relazioni prima descritte [7] e [8] si ottiene un valore di $E_0 = 500$ MPa per gli strati superficiali e $E_0 = 1000-1500$ MPa più in profondità. Nel caso in esame, considerando le tipologie di opere previste per questo imbocco (protesi per preparazione del fronte di attacco della galleria, senza particolari opere di sostegno) gli aspetti deformativi nel sottosuolo possono interessare le tematiche del cedimento del terreno sottoposto al sovraccarico della protesi. Applicando il massimo valore di “degrado” E_0 (pari a 10), si ricava un valore del modulo operativo nel range 50-150 MPa negli intervalli di profondità di più stretto interesse.

Dalle prove pressiometriche, prendendo come riferimento i valori ricavati come modulo di primo carico (quindi i valori più cautelativi), si hanno i seguenti valori del modulo elastico (Fig. 18):

m 12.5 $E_p = 49$ MPa

m 23.2 $E_p = 58.9$ MPa

m 30.5 $E_p = 100$ MPa

m 37.5 $E_p = 174$ MPa

Tali valori si ricavano direttamente dalla documentazione sulle indagini e mostrano una tendenza all’aumento dei valori con la profondità.

Dall’insieme delle prove sismiche, sia dalle prove pressiometriche, si può affermare che il modulo Elastico sia compreso nel range che va da 50 MPa a 100 MPa per le profondità di interesse.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE:		PROGETTO ESECUTIVO					
Mandataria:	Mandanti:	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	34 di 58
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione							

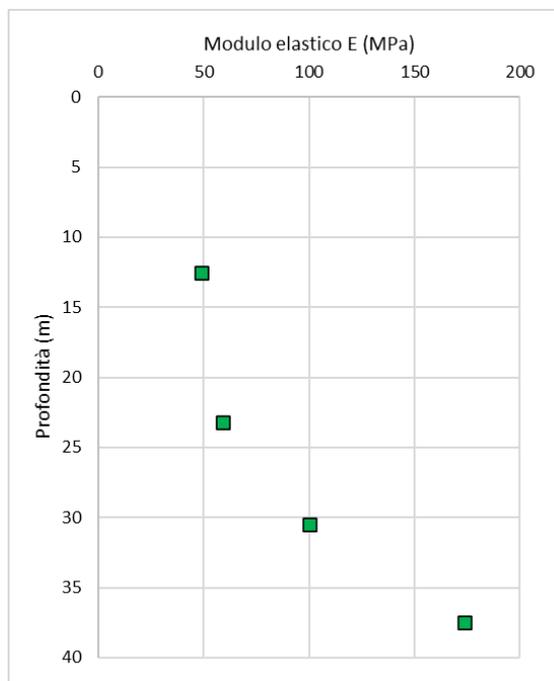


Fig. 18 – Prove pressimetriche sondaggio C15 – Modulo Elastico

Valori sempre più elevati di quelli ricavabili dalle correlazioni con SPT.

Le prove Lefranc hanno fornito i seguenti valori di permeabilità:

m 6.0-6.9 $K = 1.9 \cdot 10^{-5}$ m/s

m 15.0-16.0 $K = 1.4 \cdot 10^{-5}$ m/s

m 33.0-34.0 $K = 8.8 \cdot 10^{-6}$ m/s

m 45.0-46.0 $K = 2.7 \cdot 10^{-5}$ m/s

Si tratta di valori che rientrano nei range che si possono aspettare per terreni granulari.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	<u>Mandatario:</u> SWS Engineering S.p.A.	<u>Mandanti:</u> PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 35 di 58

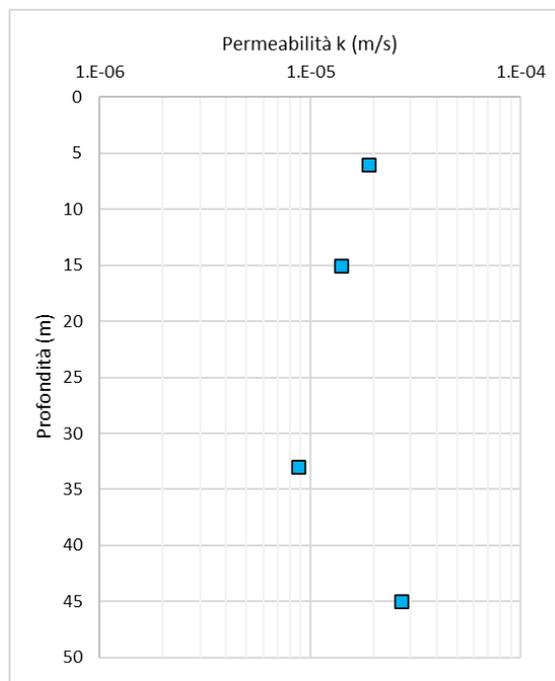


Fig. 19 – Prove Lefranc sondaggio C15 – Permeabilità

Per il peso di volume, non essendo disponibili campioni indisturbati, si è stimato un valore di $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$.

5.5 MODELLO GEOTECNICO

Per i motivi esposti in precedenza si può confermare nella sostanza il range di parametri assunti nel PD per le due unità geotecniche interessate dalle opere di imbocco.

Con riferimento in particolare all'angolo di attrito, le relazioni empiriche che stimano l'angolo di attrito forniscono valori che, soprattutto nel caso delle ghiaie, si avvicinano ai valori minimi del range e spesso sono leggermente inferiori a questi. Non si deve ignorare però il fatto che le prove SPT in terreni a grana grossa (anche a blocchi) sono rappresentative della matrice sabbioso-ghiaiosa e non tengono conto della presenza degli elementi lapidei più grossolani. I parametri così ricavati sono quindi inferiori a quelli che ragionevolmente possono stimarsi per volumi di terreno maggiori di quelli strettamente interessati dalle prove SPT. Per questi motivi si è mantenuto valido il range di parametri indicato nel PD (che sembrerebbe sovrastimare i parametri rispetto a quelli ricavabili dalle prove) scegliendo però come valore caratteristico quello inferiore dell'angolo di attrito.

Per il modulo elastico, vista la tendenza all'aumento dei valori con la profondità, si è indicato come valore caratteristico quello medio del range.

Si riassume quindi nel seguito il range dei parametri rappresentativi delle due formazioni e, a seguire, i parametri caratteristici adottati nelle modellazioni geotecniche.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 36 di 58

Depositi fluvio-glaciali ("df"). Ghiaie prevalenti

peso di volume	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 0$
angolo di attrito	$\varphi = 40-45^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 50-100 \text{ MPa}$
coefficiente di permeabilità	$k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

Depositi deltizi ("Dlt"). Sabbie prevalenti

peso di volume	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 0$
angolo di attrito	$\varphi = 37-43^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 100-150 \text{ MPa}$
coefficiente di permeabilità	$k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

La falda è indicata a profondità superiore alla decina di metri dalla quota di fondo scavo della cava e quindi non interferente con le opere in progetto.

Il valore del coefficiente di spinta a riposo k_0 è calcolato come segue:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\varphi$$

I valori caratteristici di angolo di attrito e modulo elastico per le due formazioni in esame, in accordo con quanto già definito in fase di Progetto Definitivo, sono i seguenti:

Unità	$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$c \text{ (kPa)}$	$\varphi \text{ (}^\circ\text{)}$	$E \text{ (MPa)}$	$k_0 \text{ (-)}$
Df	20	0	40	70	0.36
Dlt	20	0	37	125	0.40

Tab 10: Definizione valori caratteristici

In termini di categoria sismica i dati commentati nella Relazione Geologica non lasciano incertezze sulla categoria di suolo B e categoria topografica T1.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 37 di 58

6. FINESTRA DI FUNES

6.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'imbocco della Finestra Funes interessa direttamente depositi antropici costituenti il rilevato della Strada Provinciale della Val di Funes SP27 e i sottostanti depositi alluvionali di riempimento del fondovalle Isarco.

Procedendo verso l'interno del versante la finestra di Funes interessa anche il rilevato autostradale sovrapposto a depositi di frana inattiva (fi) e poi il substrato.

Tuttavia, poiché la presente Reazione si riferisce esclusivamente all'imbocco, si farà riferimento alla caratterizzazione geotecnica dei soli terreni del rilevato stradale e dei sottostanti depositi alluvionali.

Nella documentazione geologica i terreni del rilevato stradale sono indicati come *Depositi antropici (h)* e sono costituiti da materiale di natura sabbioso-ghiaiosa.

I *Depositi alluvionali recenti (ar)* costituiscono tutto il tratto di fondovalle al piede del versante di interesse, costituendo la base di appoggio dei rilevati stradali della provinciale e dell'autostrada. Essi sono costituiti da sabbie fini o medie di colore grigio con ghiaie e ciottoli di natura poligenica con elementi eterometrici, contenenti localmente anche blocchi decimetrici. Il loro spessore è variabile e tende ovviamente ad aumentare significativamente spostandosi dal piede del versante verso il centro della valle.

Lo schema geologico del sito è rappresentato graficamente nella sezione geologica della figura seguente.

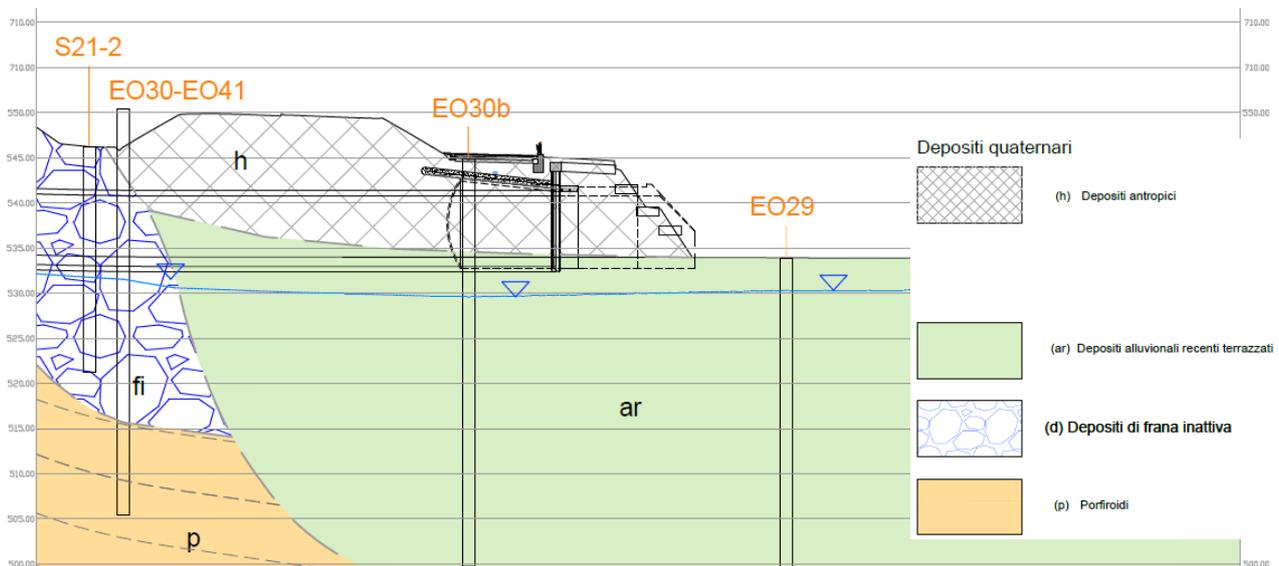


Fig. 20 – Sezione geologica dell'imbocco della Finestra di Funes

6.2 INDAGINI ESEGUITE

Per l'imbocco della finestra di Funes si può fare riferimento in gran parte alle indagini eseguite in fase di PD.

Riferendosi all'area più ampia dell'imbocco e del tratto di galleria iniziale si può fare riferimento a quattro sondaggi ordinari a carotaggio continuo realizzati durante la campagna 2017-2018, denominati "EO29",

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 38 di 58

“EO30”, “EO30b”, “EO41” e diverse prove geofisiche, di cui due prove sismiche di tipo MASW/Re.Mi. denominate “Res6” e Res19” e tre stazioni di misura HVSR denominate “TR35”, “TR36”, “TR38bis” e “TR60”. Inoltre, nell’ambito del Progetto Esecutivo è stato realizzato un sondaggio a carotaggio continuo denominato “S21-2” con prove SPT e prova down-hole. Tale sondaggio è ubicato a monte dell’autostrada al piede del versante e riguarda quindi il tratto di galleria in naturale, ma è stato comunque utilizzato per la conferma della geologia del tratto di imbocco rappresentata nella sezione geologica precedente.

Con riferimento ai sondaggi più specifici per l’imbocco **EO29** e **EO30b [12] [13]** si può fare affidamento alle seguenti prove geotecniche.

- Per il Sondaggio “EO29”: prelievo di 5 campioni rimaneggiati, 5 prove SPT e 3 prove di permeabilità di tipo Lefranc. Il foro è stato attrezzato con piezometro a tubo aperto di tipo Norton, con tratto filtrante dai 6 ai 30 m di profondità. Essendo ubicato nella piana alluvionale la stratigrafia mostra per l’intera lunghezza del sondaggio depositi alluvionali quaternari (ar) prevalentemente sabbiosi.
- Per il Sondaggio “EO30b”, sul corpo del rilevato stradale: prelievo di 4 campioni rimaneggiati, 10 prove SPT e 3 prove di permeabilità di tipo Lefranc. Il foro è stato attrezzato con piezometro a tubo aperto di tipo Norton, con tratto filtrante dai 3 ai 35 m di profondità.

Il sondaggio ha attraversato per circa 13 m il rilevato della SP27 e per la rimanente lunghezza del sondaggio i depositi alluvionali quaternari sabbiosi.

È stata eseguita nel sito in esame una prova MASW/Re.Mi., denominata “Res 6”.

6.3 SCHEMI GEOTECNICI DI CALCOLO

Gli schemi geotecnici da prendere come base per le modellazioni di calcolo derivano direttamente dagli schemi geologici rappresentati nella sezione geologica della figura precedente.

Lo schema prevede quindi due unità geotecniche corrispondenti al materiale del rilevato stradale e alle alluvioni (ar).

6.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

Nelle due verticali di indagine di più diretto interesse sono state eseguite numerose prove SPT.

I valori di N_{SPT} riscontrati nei due sondaggi sono i seguenti:

SONDAGGIO EO29			SONDAGGIO EO30b		
Prof (m)	N_{SPT}	Litologia	Prof (m)	N_{SPT}	Litologia
3.0	13	Sabbie alluvionali (ar)	3.0	74	Rilevato stradale
7.0	38	Sabbie alluvionali (ar)	6.0	20	Rilevato stradale
11.0	35	Sabbie alluvionali (ar)	9.0	R	Rilevato stradale
14.0	65	Sabbie alluvionali (ar)	12.0	R	Rilevato stradale
19.0	55	Sabbie alluvionali (ar)	16.0	62	Sabbie alluvionali (ar)
			19.0	R	Sabbie alluvionali (ar)
			22.0	37	Sabbie alluvionali (ar)
			26.0	35	Sabbie alluvionali (ar)
			30.0	51	Sabbie alluvionali (ar)
			33.0	48	Sabbie alluvionali (ar)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO				
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 39 di 58

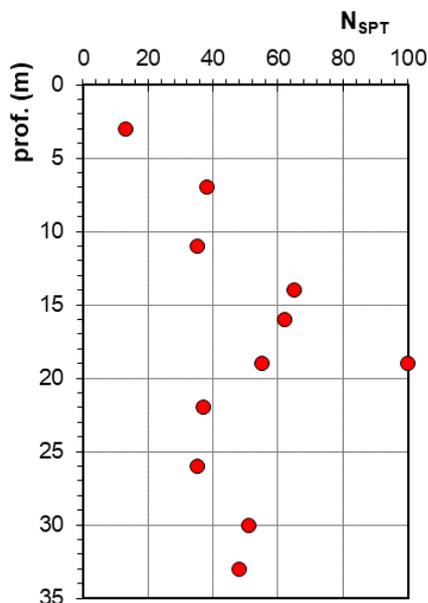


Fig. 21 – Grafico risultati SPT nelle sabbie alluvionali

Per le sabbie alluvionali, escludendo la prima prova molto superficiale, le altre forniscono valori di N_{SPT} mai inferiori a 35 senza apprezzabili variazioni con la profondità.

Per il rilevato stradale si hanno valori elevati o a rifiuto (tranne un solo valore di $N_{SPT} = 20$).

Per il rilevato stradale, con il valore $N_{SPT} = 20$ si ricaverebbe un angolo di attrito di 34° che però è da considerare puntuale e non rappresentativo del complesso.

In accordo con la formulazione di Skempton (1986) riportata nell'equazione [1], è stata calcolata la densità relativa delle sabbie alluvionali ottenuta dalla prova SPT precedentemente descritta per le sabbie alluvionali.

I valori utilizzati per i coefficienti A e B fanno riferimento a sabbie fini normalmente consolidate.

I risultati sono riportati in Tab 11 e graficati in Fig. 22.

Materiale	Z (m)	N _{SPT}	σ_{vo} (kg/cm ²)	A	B	D _r (%)
sabbia	7	38	1.4	27.5	27.5	76%
sabbia	11	35	2.2	27.5	27.5	63%
sabbia	14	65	2.8	27.5	27.5	79%
sabbia	19	55	3.8	27.5	27.5	65%
sabbia	16	62	3.2	27.5	27.5	73%
sabbia	22	37	4.4	27.5	27.5	50%
sabbia	26	35	5.2	27.5	27.5	45%
sabbia	30	51	6	27.5	27.5	51%
sabbia	33	48	6.6	27.5	27.5	48%

Tab 11: Valutazione della densità relativa secondo Skempton (1986)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 40 di 58

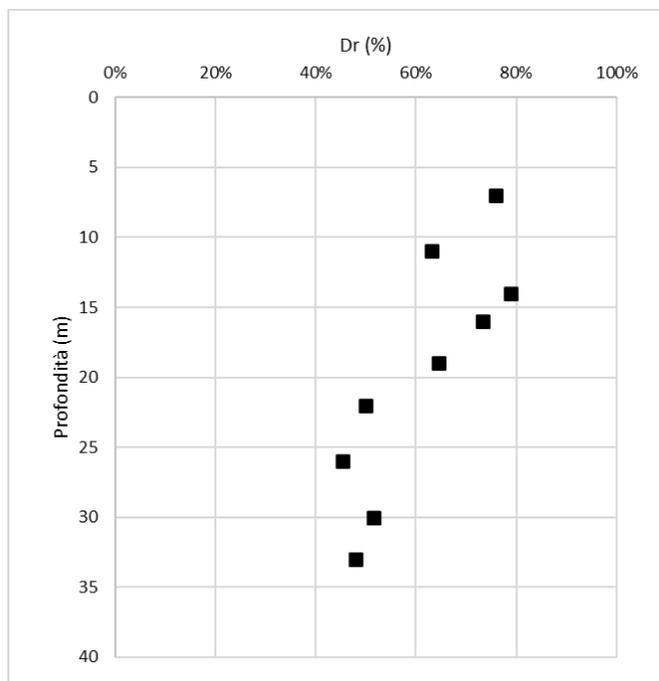


Fig. 22 –Densità relativa Skempton (1986)

Applicando la relazione per sabbie medie e sabbie fini $\phi' (^{\circ}) = 34.5 + 0.1 D_r$ anche al più basso dei valori N_{SPT} per le sabbie si ricaverebbero valori di angolo di attrito all'incirca pari o superiori a 40° :

		Sabbia media uniforme - Sabbie fini ben gradata
z (m)	Dr (-)	$\phi' (^{\circ})$
7	0.76	42
11	0.63	41
14	0.79	42
19	0.65	41
16	0.73	42
22	0.50	39
26	0.45	39
30	0.51	40
33	0.48	39

Tab 12: Valutazione dell'angolo di resistenza al taglio Schmertmann 1977

Applicando invece le due relazioni dirette

$$\phi' = \sqrt{15 N_{SPT}} + 15 \quad [5]$$

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 41 di 58

$$\varphi = 27 + 0.3N_{SPT} \quad [6]$$

Si ottengono valori di angolo di attrito tra 38 e 46°

Per il modulo elastico, dalle relazioni prima elencate si ricaverebbe un valore del modulo E che varia nell'ambito 40-50 MPa senza particolari tendenze con la profondità, come riportato nella tabella seguente in cui sono state utilizzate le equazioni [17], [19] e [20]:

z (m)	Nspt	D'Appolonia	Schultze & Menenbach	Tornaghi et al.
		E (MPa)	E (MPa)	E (MPa)
7	38	48	27	43
11	35	46	26	41
14	65	69	41	56
19	55	62	36	52
16	62	67	40	55
22	37	48	27	43
26	35	46	26	41
30	51	58	34	50
33	48	56	32	48

Tab 13: Definizione del Modulo Elastico in funzione del valore di N_{SPT}

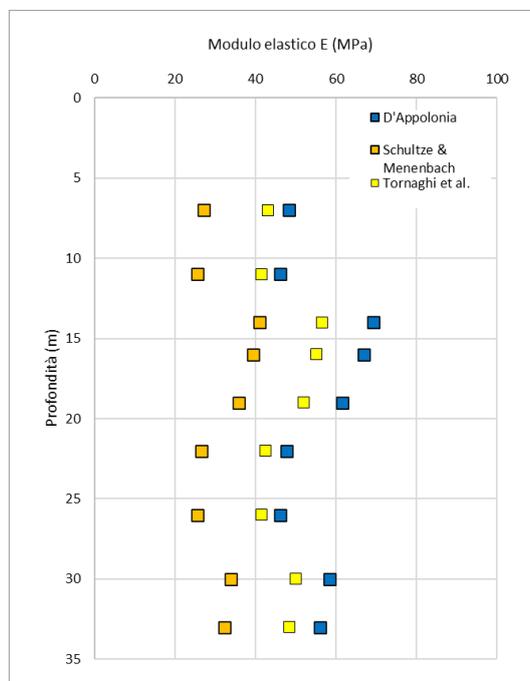


Fig. 23 – Modulo Elastico ricavato da prove SPT

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:		PROGETTO ESECUTIVO				
Mandatario:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione geotecnica di caratterizzazione	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	42 di 58

A valori sostanzialmente analoghi si arriverebbe applicando le relazioni con V_s (velocità delle onde di taglio) che partendo dalla stima di G_0 si arriva, tramite E_0 (vedi relazioni [7] e [8]), alla valutazione del modulo operativo.

Dalla prova MASW/Re.Mi. "Res 6" [17] è stata misurata una velocità delle onde s nei primi 30 m di profondità (V_{s30}) pari a 295 m/s (valida per le sabbie alluvionali).

Dalle relazioni prima descritte si ottiene un valore di $E_0 = 500$ MPa. Per l'imbocco della finestra di Funes gli aspetti deformativi legati alle sabbie alluvionali interessano esclusivamente le "code" dei pali delle paratie di imbocco. Considerando i criteri con i quali si scelgono i rapporti di riduzione tra moduli iniziali e moduli operativi, si può definire un rapporto compreso tra 1/5 e 1/10 per i motivi esposti al par. 4.2.4.

Si ricaverebbero quindi, per le sabbie, valori tra 50 e 100 MPa.

Per il rilevato stradale la forte variabilità dei valori non permette una stima affidabile dalle prove SPT. Per questo materiale si può fare riferimento ai valori tipici del modulo di deformabilità ottenuti nei rilevati stradali, anche considerando che si tratta di un rilevato esistente da molto tempo e quindi assestato naturalmente anche attraverso i carichi stradali. Un valore tipico del modulo può essere indicato in 35 MPa.

Le prove Lefranc hanno fornito i seguenti valori di permeabilità (Fig. 24):

SABBIE ALLUVIONALI

(EO29) m 6.0-6.5 $K = 5.9 \cdot 10^{-5}$ m/s

(EO29) m 16.0-16.5 $K = 3.1 \cdot 10^{-5}$ m/s

(EO29) m 20.0-20.5 $K = 4.5 \cdot 10^{-5}$ m/s

(EO30b) m 15.0-15.8 $K = 5.2 \cdot 10^{-6}$ m/s

(EO30b) m 23.0-24.2 $K = 7.0 \cdot 10^{-6}$ m/s

RILEVATO STRADALE

(EO30b) m 7.0-7.6 $K = 1.5 \cdot 10^{-5}$ m/s

I valori di permeabilità sono compatibili con la granulometria dei materiali.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 43 di 58

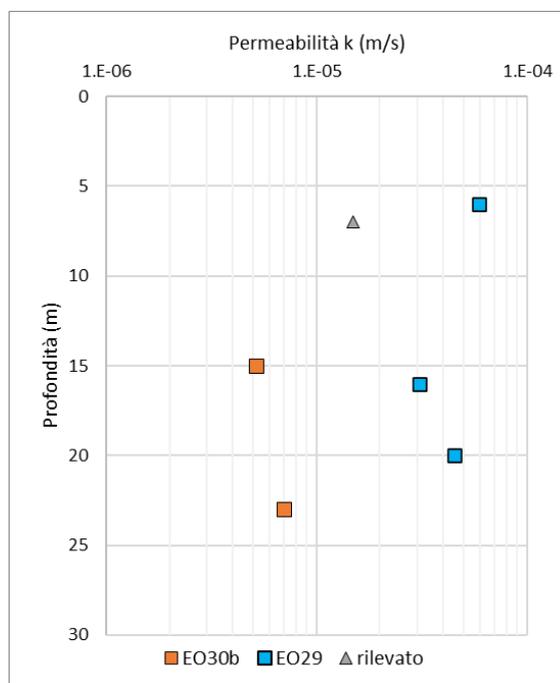


Fig. 24 – Prove Lefranc sondaggi EO29, EO30b – Permeabilità

Per il peso di volume, non essendo disponibili campioni indisturbati, si è stimato un valore di $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ per entrambi i materiali.

6.5 MODELLO GEOTECNICO

Per i motivi esposti in precedenza si può confermare nella sostanza il range di parametri assunti nel PD per le due unità geotecniche interessate dalle opere di imbocco.

Rilevato stradale

peso di volume	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 0$
angolo di attrito	$\varphi = 35^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 35 \text{ MPa}$
coefficiente di permeabilità	$k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

Depositi alluvionali ("ar"). Sabbie prevalenti

peso di volume	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 0$
angolo di attrito	$\varphi = 37^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 70 \text{ (60-90) MPa}$
coefficiente di permeabilità	$k = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

I contatti tra i due terreni possono essere letti direttamente nella sezione geologica.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:		PROGETTO ESECUTIVO				
Mandatario:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione geotecnica di caratterizzazione	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	44 di 58

Il valore del coefficiente di spinta a riposo k_0 è calcolato come segue:

$$k_0 = 1 - \text{sen}\varphi$$

I valori caratteristici di angolo di attrito e modulo elastico per le due formazioni in esame, in accordo con quanto già definito nel Progetto Definitivo, sono i seguenti:

Unità	γ (kN/m ³)	c (kPa)	φ (°)	E (MPa)	k_0 (-)
Rilevato autostradale	20	0	35	35	0.43
ar	20	0	37	70	0.40

Tab 14: Definizione valori caratteristici

Il livello di falda, rilevato nei piezometri dei due sondaggi EO30b ed EO29 si posiziona circa 2 m al di sotto della base del rilevato e 3-4 m sotto il piano campagna dell'area pianeggiante antistante l'imbocco, ossia ad una quota di circa 531 m slm. In tale contesto le opere di imbocco e la galleria si posizionano al di sopra del livello di falda, mentre i pali delle paratie saranno infissi in parte in terreno saturo sottofalda.

Per la definizione della categoria sismica di sottosuolo si può fare riferimento ai risultati delle indagini geognostiche eseguite nel rilevato stradale ove è previsto l'imbocco, all'indagine sismica MASW "Res 6" [17] eseguita nella zona antistante l'imbocco occupata dai depositi alluvionali dell'Isarco e alle altre prove sismiche eseguite in contesto litostratigrafico simile (depositi alluvionali di spessore superiore a 30 m) nella zona delle pile del Ponte Isarco (Cross Hole D7 e MASW "Res 5"):

- I valori di N_{SPT} delle prove eseguite nel sondaggio EO30b sono prevalentemente maggiori di 50 e in alcuni casi le prove sono andate a rifiuto, configurando quindi una possibile categoria di sottosuolo B per l'insieme del rilevato antropico della SP27 e dei sottostanti depositi.
- La prova MASW "Res 6" restituisce un valore di V_{S30} pari a 295 m/s, corrispondente a una categoria C, caratterizzante localmente la verticale d'indagine sui depositi alluvionali dell'Isarco.
- La prova Cross Hole D7, eseguita nei depositi alluvionali dell'Isarco nei pressi della posizione prevista per le pile del nuovo ponte ferroviario, in un settore dove il modello geologico prevede uno spessore di depositi alluvionali superiore a 30 m, restituisce un valore di V_{S30} pari a 469 m/s, corrispondente alla categoria di sottosuolo B.
- La prova MASW "Res 5" eseguita anch'esse in prossimità dell'ubicazione delle pile del futuro ponte sull'Isarco, quindi in contesto litostratigrafico comparabile con quelli di cui sopra, restituisce un valore di V_{S30} pari a 469 m/s, corrispondente alla categoria di sottosuolo B.
- La prova down-hole sul sondaggio della fase di PE S21/2 (anche se ubicato a monte dell'autostrada), indica valori di Vs riconducibili ad una categoria B

Su queste basi si può stimare per il sito specifico dell'opera di imbocco una categoria di suolo B.

La categoria topografica ricade nella T1.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 45 di 58

7. FINESTRA DI CHIUSA

7.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Il modello geologico di riferimento per l'imbocco della Finestra di Chiusa è stato ricostruito sulla base dei risultati dei rilievi geologici integrativi eseguiti nella presente fase progettuale, nonché dei dati delle indagini geognostiche disponibili dalle campagne di investigazione pregresse (in particolare la stratigrafia del sondaggio C11) e della campagna integrativa della presente fase di progetto Esecutivo, con la stratigrafia del sondaggio S21/1.

La posizione prevista per l'imbocco è a una quota di circa 613 m slm, alla base di un pendio detritico che si affaccia su di un ripiano morfologico occupato da un'area prativa nel cui sottosuolo sono presenti depositi fluvioglaciali. Lungo la scarpata del pendio, durante i rilievi di terreno integrativi, si è evidenziata in superficie l'assenza di affioramenti rocciosi e la presenza di una copertura detritica di versante formata da clasti di natura essenzialmente filladica di dimensioni non superiori alcuni decimetri in matrice sabbioso-limosa.

Come più ampiamente descritto nella Relazione Geologica. Il modello geologico di sottosuolo di questo imbocco è rappresentato dal profilo geologico della figura seguente.

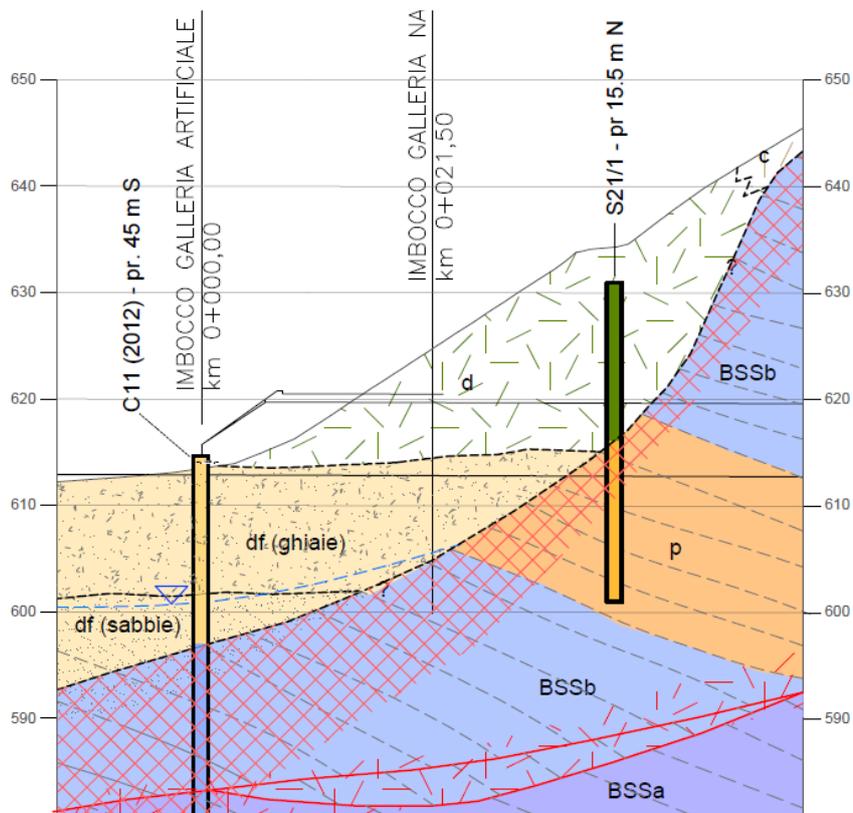


Fig. 25: stralcio del Profilo geologico dell'imbocco della finestra di Chiusa.

Al piede del versante, in posizione corrispondente all'inizio della galleria artificiale, è stato riscontrato un deposito da fine a grossolano, fino alla profondità di 10,5 m, seguito da sabbie limose da fini a grossolane con un livello di ciottoli e blocchi poligenici, fino alla profondità di 17,6 m dove viene incontrato il substrato

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 46 di 58

roccioso di natura filladica. I depositi ghiaiosi e sabbiosi presenti tra 2 e 17,6 m sono stati interpretati come appartenenti all'unità dei depositi fluvioglaciali (df). Il settore più superficiale del substrato roccioso presenta un elevato grado di fratturazione e alterazione, per uno spessore di circa 16-17 m fino a 33-34 m di profondità, intervallo nel quale l'indice RQD dell'ammasso roccioso è costantemente inferiore al 50%, con frequenti livelli ove è pari a zero. All'altezza di questa zona di ammasso roccioso di bassa qualità il modello di PD ipotizza la presenza di una importante zona di taglio a basso angolo.

Alla sommità del versante detritico boscoso il nuovo sondaggio integrativo S21/1, ha incontrato un primo livello superficiale esteso fino a 4,6 m di profondità composto da detrito eterometrico ed eterogeneo in matrice sabbiosa grossolana, seguito da un trovante lapideo di fillade quarzifica poco fratturato nei primi 2 m circa e poi molto fratturato, fino alla profondità di 8,3 m. Al di sotto del trovante e fino a 10 m si trova nuovamente detrito eterometrico in matrice sabbiosa grossolana, seguito da ghiaie sabbiose e ghiaie grossolane fino alla profondità di 16.55 m, dove viene raggiunto il substrato roccioso rappresentato da filladi e porfiroidi scistosi (p). I materiali sciolti attraversati dal sondaggio sono stati attribuiti ai detriti di versante (d). L'ammasso roccioso si presenta inizialmente più fratturato, fino alla profondità di 22 m circa, per poi migliorare la qualità geomeccanica fino a fondo foro alla profondità di 30 m.

Dal punto di vista idrogeologico, è stata ipotizzata cautelativamente la presenza di due distinte falde: una nei depositi fluvioglaciali del pianoro antistante l'imbocco, ad una profondità di circa 13 m da p.c. ed una seconda più profonda nel substrato roccioso ad una profondità maggiore di 34 m (quindi non rappresentata nel profilo geologico di dettaglio dell'imbocco). Nel sondaggio S21/1 invece non è stata rinvenuta la presenza di falda fino a fondo foro. Si può quindi escludere che le opere di imbocco e la sezione di attacco della galleria naturale possano essere interessate da condizioni di saturazione dei terreni e venute d'acqua legate alla presenza della falda che, secondo i dati disponibili, si localizza ad una quota di molto inferiore rispetto a quella dell'arco rovescio.

Sulla base di questo modello geologico si riassumono nel seguito le descrizioni litologiche delle unità presenti nell'ampia area di interesse dell'imbocco e della relativa viabilità.

Formazioni del substrato

Filladi (BSSb). Si tratta di filladi caratterizzate da percentuali variabili di quarzo, presente prevalentemente sotto forma di vene nastriformi e letti trasposte lungo la scistosità, con livelli prevalentemente fillosilicatici intercalati livelli di micascisti.

Porfiroidi (p). Si tratta di metavulcaniti disposti generalmente in lenti e corpi più o meno estesi all'interno delle filladi. Le rocce presentano un colore generalmente grigio-verdastro e una struttura foliata con locali passaggi massivi e di aspetto gneissico.

I *depositi superficiali* di età quaternaria nel settore in esame presentano, in base alle risultanze delle indagini dirette e indirette disponibili, degli spessori significativi che raggiungono i 15-20 m proprio in corrispondenza dell'imbocco della finestra. Come precedentemente detto, i terreni superficiali presenti che interessano direttamente le opere di imbocco sono rappresentati essenzialmente dai depositi fluvioglaciali (df), presenti nel sottosuolo del ripiano morfologico terrazzato ubicato di fronte all'imbocco della galleria ed attraversato

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
Mandatario:	Mandanti:	PROGETTO ESECUTIVO				
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA	GDP GEOMIN	SIFEL	SIST		
	M Ingegneria					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
Relazione geotecnica di caratterizzazione	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	47 di 58

dalla nuova viabilità di accesso (NV072) e i depositi detritici di versante (d) presenti alla base del versante dell'imbocco, verosimilmente sovrapposti ai depositi fluvioglaciali. Altri terreni superficiali, che tuttavia non interessano direttamente le opere di imbocco, sono i depositi di frana inattiva (f) presenti nella parte meridionale dell'area e che interessano una parte della viabilità di accesso NV072 e i depositi eluvio-colluviali (c).

Depositi fluvioglaciali (df). I depositi fluvio-glaciali sono presenti prevalentemente all'altezza del ripiano morfologico terrazzato antistante l'imbocco della finestra. Sono costituiti da clasti poligenici di dimensione da centimetrica e decimetrica, fino a raggiungere anche blocchi di dimensioni superiori al metro, all'interno di una matrice prevalentemente sabbiosa di colore beige.

Detrito di falda (d). Il detrito di falda locale è costituito da blocchi di dimensione variabile, prevalentemente decimetrica e sporadicamente metrica (il sondaggio S21/1 ha campionato un trovante di 2-4 m), di prevalenti filladi, immersi in matrice sabbioso-limosa. Il detrito di falda assume spessori significativi nel settore indagato dal sondaggio stesso, poco a monte dell'imbocco della finestra.

Depositi colluviali (c). I depositi eluviali e colluviali sono costituiti da materiale a granulometria medio-fine, derivante da alterazione in posto del substrato roccioso. È presente prevalentemente nella zona al di sopra dell'imbocco della finestra, dove ricopre con uno spessore di pochi metri il substrato roccioso localmente affiorante.

Depositi di frana inattiva (fi). I depositi di frana inattiva sono presenti in una vasta area nel settore meridionale della zona rappresentata nella carta geologica allegata, tale frana inattiva è stata definita nell'ambito degli studi geologici del progetto definitivo, sulla base delle evidenze morfologiche del versante e dei risultati delle indagini eseguite nell'area in questione. Lo studio geologico del PE ha portato a ridimensionare l'accumulo di frana nella sua parte più bassa, a seguito dell'individuazione di substrato affiorante lungo parte della scarpata di monte della strada statale. I depositi di frana inattiva sono caratterizzati da accumuli di materiale caotico, costituiti da clasti e blocchi spigolosi di dimensione eterometrica da decimetrica a blocchi metrici, all'interno di una matrice sabbiosa o sabbioso limosa di colore marroncino-beige. I depositi di frana inattiva non interessano direttamente le opere di imbocco ma parte della viabilità di accesso, in particolare la scarpata di monte del settore iniziale della NV072.

7.2 INDAGINI ESEGUITE

Le indagini disponibili per la viabilità d'accesso e l'imbocco della finestra Chiusa sono tre sondaggi ordinari a carotaggio continuo, di cui uno realizzato durante la campagna 2012-2013, denominato "C11", uno durante la campagna 2017-2018 denominato "EO36" ed infine un ultimo nell'ambito del Progetto Esecutivo denominato "S21-1". Inoltre, sono state effettuate durante la campagna 2017-2018 diverse prove geofisiche, di cui tre tomografie sismiche a rifrazione denominate "Pes19", "Pes20" e "Pes21" e due tomografie elettriche denominate "L27" e "L28".

Il **sondaggio a carotaggio continuo C11** (zona nuova viabilità) ha una profondità di 50 m, con prelievo di 7 campioni rimaneggiati e 5 prove SPT, 2 prove di permeabilità di tipo Lefranc e 2 di tipo Lugeon. Il foro è stato attrezzato con piezometro a tubo aperto di tipo Norton, microfessurato dai 5 ai 15 m di profondità ed è stata installata una cella di Casagrande a 40 m dal p.c.

APPALTAZIONE:  CONSORZIODOLOMITI	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 48 di 58

La stratigrafia mostra 17,6 m di depositi alluvionali quaternari al di sopra del basamento metamorfico.

Il **sondaggio a carotaggio continuo S21-1**, nella zona di imbocco, ha una profondità di 30 m, con prelievo di 7 campioni rimaneggiati e 4 prove SPT, una prova pressiométrica e 2 prove dilatometriche. Il foro è stato strumentato con foro in PVC per prova sismica down hole.

La stratigrafia mostra 16,55 m di depositi detritici al di sopra del substrato metamorfico.

Si hanno a disposizione anche i risultati di prove geofisiche.

La terna di fori D11 attrezzata per la prova cross-hole e ha fornito i seguenti differenti settori a velocità V_p :

- uno superficiale con valori attorno ai 600-700 m/s fino a 10 m di profondità;
- un valore intermedio intorno ai 2000 m/s;
- valori intorno ai 3300-3400 m/s tra i 22 e i 35 m di profondità;
- valori tendenti a velocità di 4200-4300 m/s fino a fondo foro (5 m).

Relativamente alle V_s esse riportano lo schema di cui sopra con valori compresi fra 750/1400/1700 m/s.

La prova sismica a rifrazione, denominata "Pes21" è stata eseguita attraverso l'intera area di indagine a S dell'imbocco in oggetto, seguendo una direzione circa E-W per una lunghezza di 237,5 m.

L'analisi della sezione sismica per le onde P evidenzia:

- un accumulo di materiali a bassa velocità sismica (inferiore a 1000-1500 m/s) nella porzione meridionale;
- lateralmente un nucleo rigido con elevata velocità tendente a 2500-3000 m/s.

L'analisi della sezione sismica per le onde S evidenzia:

- un'unità di copertura con velocità intorno ai 700 m/s;
- un'unità più rigida con valori variabili superiori a 1000 m/s.

7.3 SCHEMI GEOTECNICI DI CALCOLO

Gli schemi geotecnici da prendere come base per le modellazioni di calcolo derivano direttamente dagli schemi geologici rappresentati nelle sezioni geologiche allegate al progetto esecutivo.

Lo schema prevede quindi due unità geotecniche delle coperture detritiche (detriti di falda e depositi alluvionali terrazzati) sovrapposte al substrato roccioso.

7.4 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE

Nelle due verticali di indagine di più diretto interesse sono state eseguite varie prove SPT che hanno interessato le due unità geotecniche della copertura quaternaria.

I valori di N_{SPT} riscontrati nei due sondaggi sono i seguenti:

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO				
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione		COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 49 di 58

SONDAGGIO C11			SONDAGGIO S21/1		
Prof (m)	N _{SPT}	Litologia	Prof (m)	N _{SPT}	Litologia
3.0	47	Sabbie e ghiaie (df)	3.0	R	Detrito (d)
6.0	31	Sabbie e ghiaie (df)	10.0	35	Detrito (d)
10.0	54	Sabbie e ghiaie (df)	13.5	40	Detrito (d)
13.0	98	Sabbie e ghiaie (df)	16.5	R	Detrito (d)
16.0	R	Sabbie e ghiaie (df)			

Per tutti i terreni quaternari i valori di N_{SPT} non sono mai inferiori a 30 con alcuni valori a rifiuto da attribuire però alla presenza di clasti e trovanti.

In accordo con la formulazione di Skempton (1986) riportata nell'equazione [1], è stata calcolata la densità relativa ottenuta dalla prova SPT precedentemente descritta per le sabbie e ghiaie (df).

I valori utilizzati per i coefficienti A e B fanno riferimento a sabbie grosse normalmente consolidate.

Materiale	Z (m)	N _{SPT}	σ_{vo} (kg/cm ²)	A	B	D _r (%)
Sabbie con ghiaia	3	47	0.6	43.3	21.7	91%
Sabbie con ghiaia	6	31	1.2	43.3	21.7	67%
Sabbie con ghiaia	10	54	2	43.3	21.7	79%
Sabbie con ghiaia	13	98	2.6	43.3	21.7	99%

Tab 15: Valutazione della densità relativa sondaggio C11 Skempton (1986)

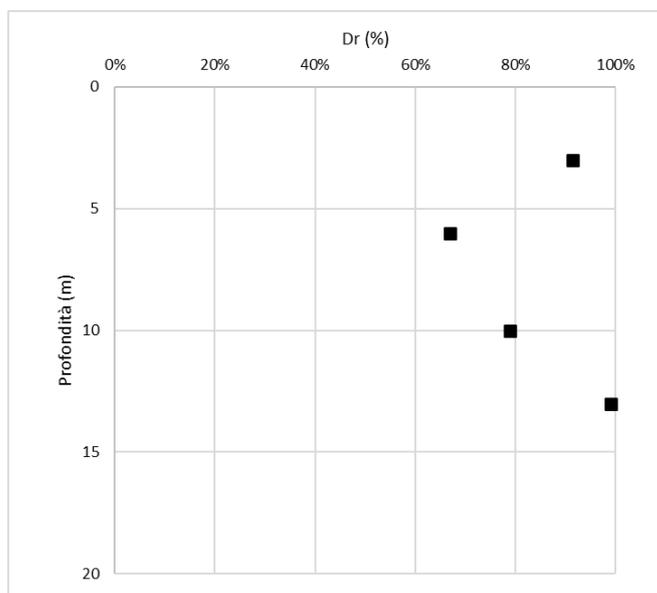


Fig. 26 –Densità relativa sondaggio C11 Skempton (1986)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 50 di 58

Applicando le correlazioni prima descritte anche al più basso dei valori N_{SPT} per le sabbie si ricaverebbero valori di angolo di attrito di almeno 37° anche con la correlazione più cautelativa, come riportato nella tabella seguente per cui è stata utilizzata la formulazione di Schmertmann 1977:

z (m)	Dr (-)	Ghiaietto uniforme - Sabbie e ghiaie poco limose $\varphi' (^\circ)$	Sabbia fine uniforme $\varphi' (^\circ)$	Sabbia grossa uniforme - Sabbia media ben gradata $\varphi' (^\circ)$	Sabbia media uniforme - Sabbie fini ben gradata $\varphi' (^\circ)$
3	0.91	41	45	42	44
6	0.67	37	43	39	41
10	0.79	39	44	41	42
13	0.99	42	46	43	44

Tab 16: Valutazione dell'angolo di resistenza al taglio Schmertmann 1977

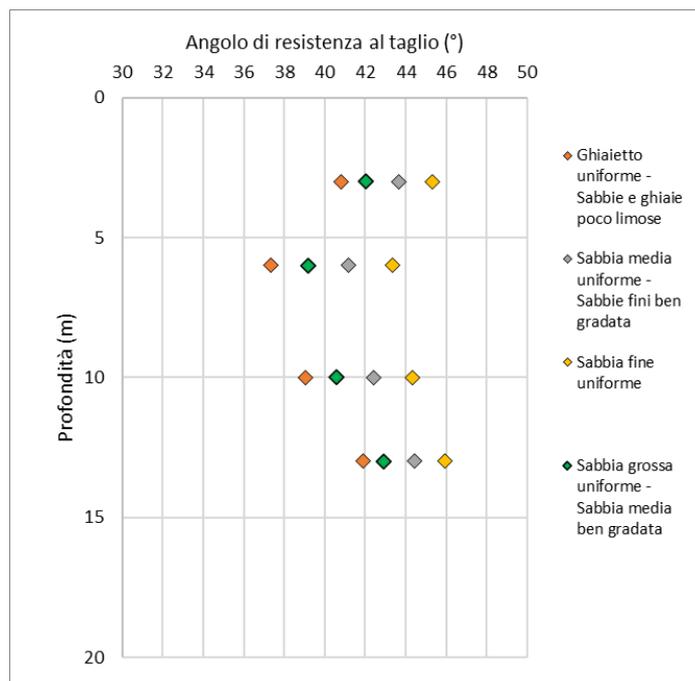


Fig. 27 – Angolo di resistenza al taglio Schmertmann 1977

Per il modulo elastico, dalle principali relazioni prima elencate si ricaverebbe un valore del modulo E tra 40 e 50 MPa nei primi metri e gradualmente crescente con la profondità fino a quasi 100 MPa come riportato nella figura seguente in cui sono state utilizzate le equazioni [17], [19] e [20]:

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 51 di 58

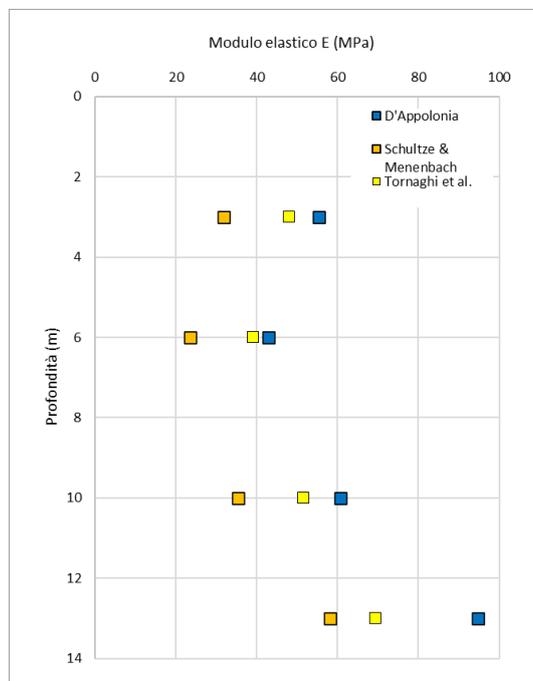


Fig. 28 – Modulo Elastico ricavato da prove SPT

Applicando invece le relazioni con Vs (velocità delle onde di taglio) si arriva a valori del modulo ben più elevati.

Dalla prova down-hole S21/1 si ottengono valori delle Vs intorno a 500 m/s per la coltre detritica. Valori ancora più elevati si ottengono dalle altre prove geofisiche.

Dalle relazioni prima descritte si ottiene, per il valore di Vs inferiore, $E_0 = 1.3$ GPa. Applicando il massimo valore di “degrado” E_0 (pari a 10) ammettendo spostanti rilevanti, si ricava un valore del modulo operativo di 130 MPa per le sabbie alluvionali.

Dalla prova pressiometrica nel sondaggio C11 si ricava un valore di modulo elastico del materiale detritico (df) a profondità di 9.50m di 97 MPa.

Dalla prova pressiometrica nel sondaggio S21/1 a 13 m di profondità si ottiene invece un valore decisamente più basso, E intorno a 40 MPa.

Nel sondaggio C11 sono stati prelevati alcuni campioni rimaneggiati di terreni e carote di roccia.

- SPT1 prelevato a -3.00m dal p.c.;
- SPT2 prelevato a -6.00m dal p.c.;
- SPT3 prelevato a -10.00m dal p.c.;
- RIM2 prelevato a -12.45m dal p.c.;
- SPT5 prelevato a -16.00m dal p.c.;
- RIM3 prelevato a -21.25m dal p.c.;
- RIM4 prelevato a -22.00m dal p.c.;
- RIM5 prelevato a -33.18m dal p.c.;
- RIM6 prelevato a -41.00m dal p.c.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:						
Mandatari:	Mandanti:					
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO				
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 52 di 58

I campioni di materiale sciolto sono stati sottoposti ad analisi granulometrica e classificazione (USCS, CNR UNI 10006) e determinazione dei limiti di Atterberg, i campioni lapidei a prove di point load test.

Nella tabella seguente estratta dalla documentazione del PD sono riassunti i risultati delle prove.

Dalle analisi granulometriche si conferma la natura grossolana (sabbie e ghiaie) con scarso contenuto di fine non plastico (Fig. 29).

I campioni rientrano nelle classi G e S della classifica USCS (GW-GM-SM) e A1 (A1-a e A1-b) e A2-4 della classifica CNR-UNI 10006.

SONDAGGIO C11															
Identificativo campione			Descrizione terreno	Limiti Atterberg			Analisi granulometrica				Poin Load Test		CLASS		
				LL	LP	IP	Ghiaia (60-2 mm)	Sabbia (2,0-0,06 mm)	Limo (0,06-0,002 mm)	Argilla (<0,002mm)	Is ₅₀ Normale	Is ₅₀ Parallela	USCS	CNR UNI 10006	
V.A.	Camp.	m da p.c.		%	%	%	%	%	%	%	Mpa	Mpa	-	-	
1456-1	SPT1	3,00-3,45	Ghiaia con sabbia limosa debolmente argillosa marrone chiaro olivastro (2,5Y 5/3) , frazione ghiaiosa di natura metamorfica e quarzosa prevalentemente angolare d max= 25 mm, frazione fine umida , non plastica. Non reagente all'HCL.	N.D.	N.D.	N.P.	59.0	26.2	14.8					GM	A 1-a
1456-2	SPT2	6,00-6,45	Ghiaia con sabbia limosa argillosa marrone chiaro olivastro (2,5Y 5/3) . Frazione ghiaiosa di natura metamorfica prevalentemente angolare dmax= 25 mm, frazione fine umida e poco plastica. Non reagente all'HCL.	N.E.	N.E.	N.E.	40.9	25.6	33.5						
1456-4	SPT3	10,00-10,45	Ghiaia ben gradata con sabbia marrone chiaro olivastro (2,5Y 5/3) , frazione ghiaiosa poligenica (metamorfica, quarzosa e intrusiva) prevalentemente angolare , ellissoidale dmax= 25 mm., frazione fine umida non plastica. Reagente all'HCL.	N.D.	N.D.	N.P.	68.5	28.4	3.1					GW	A 1-a
1456-5	RIM2	12,45-12,75	Ghiaia con sabbia in matrice limosa debolmente argillosa marrone chiaro olivastro (2,5Y 5/3) , frazione ghiaiosa poligenica (metamorfica, quarzosa e intrusiva) con clasti parzialmente in contatto, prevalentemente angolare , ellissoidale dmax= 35 mm., frazione fine umida non plastica. Non reagente all'HCL.	N.D.	N.D.	N.P.	38.3	37.1	19.8	4.8				SM	A 2-4
1456-7	SPT5	16,00-16,22	Ghiaia con sabbia limosa debolmente argillosa marrone scuro grigiastro (2,5Y 4/2) frazione ghiaiosa di natura metamorfica tipo fillade angolare dmax=25,0mm. Frazione fine umida non plastica. Non reagente all'HCL.	N.D.	N.D.	N.P.	45.4	31.0	23.6					SM	A 1-b

SONDAGGIO C11															
Identificativo campione			Descrizione terreno	Limiti Atterberg			Analisi granulometrica				Poin Load Test		CLASS		
				LL	LP	IP	Ghiaia (60-2 mm)	Sabbia (2,0-0,06 mm)	Limo (0,06-0,002 mm)	Argilla (<0,002mm)	Is ₅₀ Normale	Is ₅₀ Parallela	USCS	CNR UNI 10006	
V.A.	Camp.	m da p.c.		%	%	%	%	%	%	Mpa	Mpa	-	-		
1456-8	RIM3	21,25-21,50	Fillade fortemente alterata a struttura scagliosa orientata secondo piani diversamente inclinati ad aspetto caotico, con frequenti frammenti tabulari , angolari di natura quarzosa . Graffittata, untosa al tatto , si disgrega in scaglie millimetriche se sottoposta a compressione fra lo dia. Colore grigio molto scuro (GLEY1 3/N) , non reagente all'HCL.	24.7	21.1	3.6	34.7	39.2	22.0	4.1				SM	A 2-4
1456-9	RIM4	30,60-31,00	Fillade completamente alterata e disgregata granulometricamente costituita da una sabbia con ghiaia limosa debolmente argillosa. Di colore grigio molto scuro (GLEY1 3/N) con diffusi frammenti angolari quarzosi, frazione fine umida nonplastica. Non reagente all'HCL.	20.6	N.D.	N.P.	31.8	42.0	19.9	6.3				SM	A 2-4
1456-10	RIM5	34,00-34,30	Roccia metamorfica tipo fillade di colore grigio molto scuro(GLEY1 3/N) con venature da centimetriche a millimetriche prevalentemente suborizzontali di quarzo/albite Struttura lepidoblastica , anisotropa orientata secondo piani prevalentemente suborizzontali. Tessitura medio fine , scistosità mediamente accentuata, lamellare . Non reagente all'HCL.								1.84 (6prov)	0.95 (3prov)			
1456-11	RIM6	41,00-41,40	Roccia metamorfica tipo fillade di colore grigio molto scuro(GLEY1 3/N) con diffuse laminazioni convolute in quarzo/albite e calcite .Struttura lepidoblastica , anisotropa orientata secondo piani da suborizzontali ad inclinaticirca 45°. Tessitura medio fine , scistosità mediamente accentuata , lamellare . Non reagente all'HCL.								0.80 (3prov)	0.55 (2prov)			

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 53 di 58

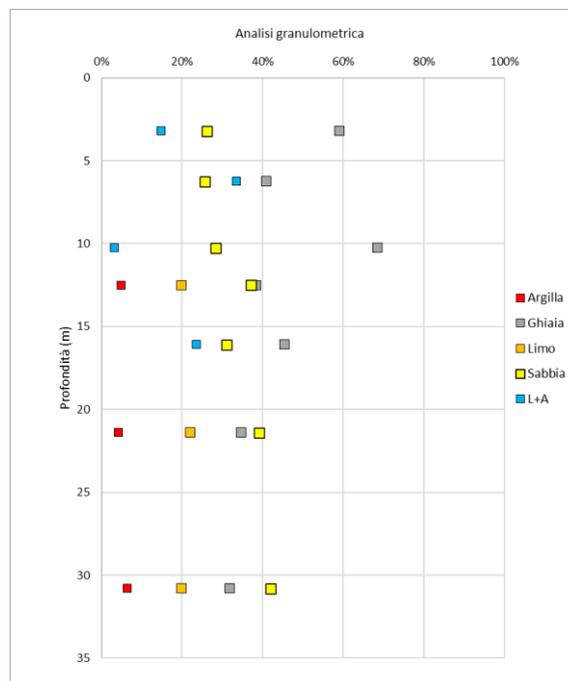


Fig. 29 – Granulometria sondaggio C11

Dalle prove Lefranc nel sondaggio C11 è stato possibile ricavare i valori di permeabilità del materiale detritico superficiale:

- a profondità di 7.0 m $K = 1.95 \cdot 10^{-5}$ m/s;
- a profondità di 14.90m $K = 8.4 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Per il peso di volume, non essendo disponibili campioni indisturbati, si è stimato un valore di $\gamma = 20$ kN/m³ per il detrito di falda e un range di 18.5-19.5 kN/m³ per i depositi fluvio-lacustri.

Per quanto riguarda la caratterizzazione geomeccanica del substrato, qui rappresentato in prevalenza da filladi e porfiroidi (con locale prevalenza di porfiroidi nell'imbocco), si è fatto riferimento agli indici di ammasso che scaturiscono dagli specifici rilievi in sito confrontati anche con i valori di RQD ricavati dai sondaggi.

Per i problemi di interesse, che riguardano in particolare gli ammassi rocciosi sottostanti la coltre detritica, dove si può presumere o stimare cautelativamente, un maggiore grado di fratturazione rispetto alle porzioni molto profonde, si è fatto riferimento a valori di GSI = 25-30 per le porzioni più detensionate e alterate (indicate nelle sezioni geologiche con specifica campitura) e valori di GSI = 30-40 per le porzioni più profonde.

Per la roccia a livello di campione si hanno a disposizione varie prove dal sondaggio S21/1, i cui risultati sono riassunti nella tabella seguente.

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:						
Mandatario:	Mandanti:	PROGETTO ESECUTIVO				
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO.
	IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B	54 di 58

Sondaggio	Campione	Profondità (m)	Massa volumica apparente (Kg/m ³)	Sforzo a rottura da prova PLT (MPa)	Indice di resistenza da prova PLT (MPa)	Indice di resistenza corretto da prova PLT (MPa)	Sforzo a rottura da prova uniaxiale (MPa)			
							σ_r (MPa)	ν	E_t (MPa)	E_s (MPa)
S21/1	C1	19.00 - 19.20	1779.38				27.83	0.340	20754	30530
S21/1	C2	22.40 - 22.60	2776.19				14.62	0.360	40053	71186
S21/1	C3	25.60 - 25.85	2685.74				44.70	0.320	41344	46038
S21/1	C4	26.75 - 27.00	2733.19				27.11	0.370	33622	46496
S21/1	C5	29.50 - 29.80	2784.60				37.76	0.340	27489	37806

Per il peso di volume, a parte un valore anomalo a 19 m di profondità, i valori si attestano tra 26.9 e 27.8 kN/m³, con un valore rappresentativo molto simile alla media di 27 kN/m³.

Dagli stessi campioni si ottengono valori di UCS variabili tra 14.6 e 44.7 MPa.

Applicando quindi questi parametri si è proceduto alla stima dei parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso considerato pseudo-omogeneo secondo i criteri di Hoek già descritti in precedenza.

Utilizzando i metodi descritti nel capitolo sulla teoria, sono stati ricavati i valori di coesione e angolo di attrito (quindi con il modello costitutivo di Mohr-Coulomb) utilizzando il software RocLab® della Roc-Science, dei quali si riportano nel seguito le schermate per i valori limite del range di GSI indicato in precedenza. Si specifica che il limite inferiore del GSI = 25 è da ritenere caratteristico di porzioni localizzate particolarmente disturbate e scadenti.

Con lo stesso software si è ricavato il modulo di deformabilità di ammasso con il criterio di Diederichs più aggiornato.

Per queste valutazioni si è fatto riferimento ad un disturbo dell'ammasso per uso di esplosivo di buona qualità o abbattimento meccanico (D = 0.7) e sono stati utilizzati i parametri m_i e MR proposti dall'autore per la litologia dei porfidi (considerata la bassa scistosità della roccia in questo settore). Nella valutazione dello stato tensionale si è utilizzato lo schema di pendio di altezza 20 m ricavando direttamente i parametri di utilizzo della conversione.

Rispetto ai valori ricavati dal software, sono stati adottati valori approssimati leggermente verso il basso, indicando un range di valori rappresentativo, nella consapevolezza del grado di approssimazione che inevitabilmente caratterizza queste metodologie.

Per la deformabilità si hanno a disposizione anche le prove dilatometriche in foro.

Dalle tre prove dilatometriche nel sondaggio C11 è stato possibile ricavare i valori di modulo di deformazione e modulo elastico:

- ✓ a profondità di 18.70m modulo di deformazione 224 MPa e modulo elastico 1.281 GPa;
- ✓ a profondità di 31.50m modulo di deformazione 118 MPa e modulo elastico 0.487 GPa;
- ✓ a profondità di 40.50m modulo di deformazione 1.822 GPa e modulo elastico 3.298 GPa.

Dalle due prove dilatometriche nel sondaggio S21/1 si ricava invece:

- ✓ a profondità di 22.0 m modulo di deformazione 672 MPa e modulo elastico 963 MPa;
- ✓ a profondità di 28.0 m modulo di deformazione 1.331 GPa e modulo elastico 2.049 GPa;

APPALTATORE:						
PROGETTAZIONE:	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
Mandataria:	Mandanti:	PROGETTO ESECUTIVO				
SWS Engineering S.p.A.	PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV. FOGLIO.
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A		IBOU	1AEZZ	GE	GE0006002	B 55 di 58
Relazione geotecnica di caratterizzazione						

Hoek-Brown Classification

sigci 25 MPa 

GSI 25 

mi 20 

D 0.7 

Ei 10000 MPa 

MR 400 

Hoek-Brown Criterion

mb 0.325

s 1.9e-5

a 0.531

Failure Envelope Range

Application: Slopes 

sig3max 0.4286 MPa

Unit Weight 0.027 MN/m3

Slope Height 20 m

Mohr-Coulomb Fit

c 0.097 MPa

phi 37.08 deg

Rock Mass Parameters

sigt -0.001 MPa

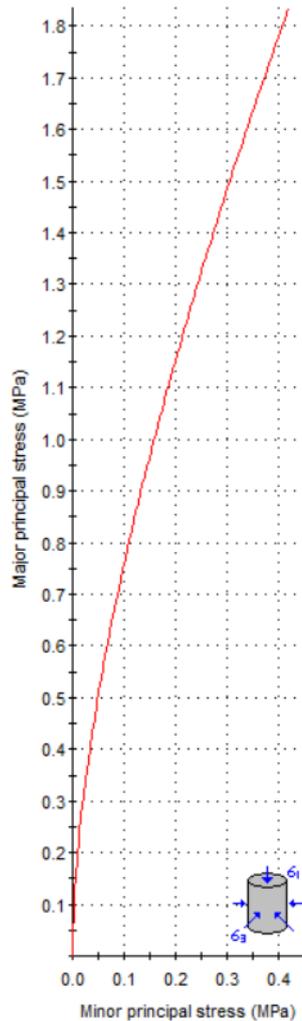
sigc 0.078 MPa

sigcm 1.594 MPa

Erm 302.24 MPa

 Copy Data


www.rocscience.com



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (sigci) = 25 MPa
 GSI = 25 mi = 20 Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (Ei) = 10000 MPa
 modulus ratio (MR) = 400

Hoek-Brown Criterion

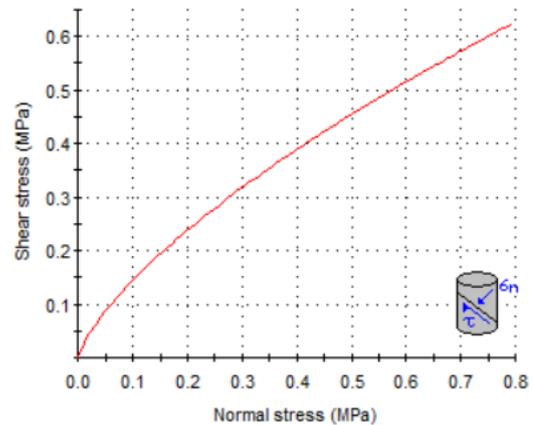
mb = 0.325 s = 1.9e-5 a = 0.531

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.097 MPa friction angle = 37.08 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.001 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.078 MPa
 global strength = 1.594 MPa
 deformation modulus = 302.24 MPa



SCHEDA DI CALCOLO PER PORFIROIDI (PORZIONE ALTERATA)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 56 di 58

Hoek-Brown Classification

sigci 40 MPa

GSI 40

mi 20

D 0.7

Ei 16000 MPa

MR 400

Hoek-Brown Criterion

mb 0.740

s 0.0002

a 0.511

Failure Envelope Range

Application: Slopes

sig3max 0.4692 MPa

Unit Weight 0.027 MN/m3

Slope Height 20 m

Mohr-Coulomb Fit

c 0.183 MPa

phi 48.66 deg

Rock Mass Parameters

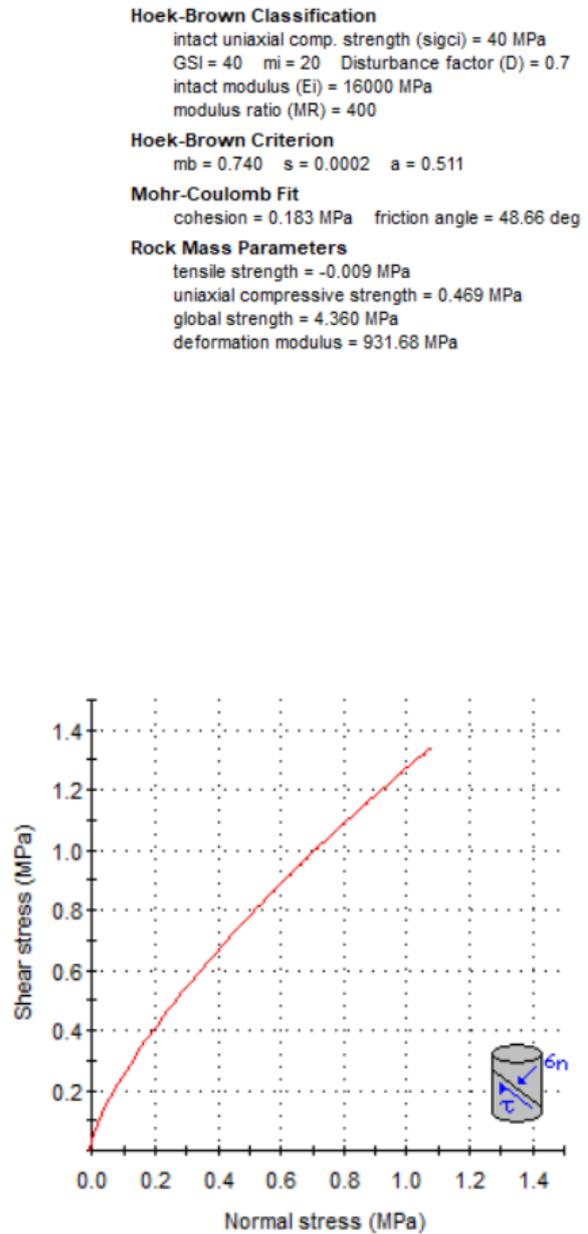
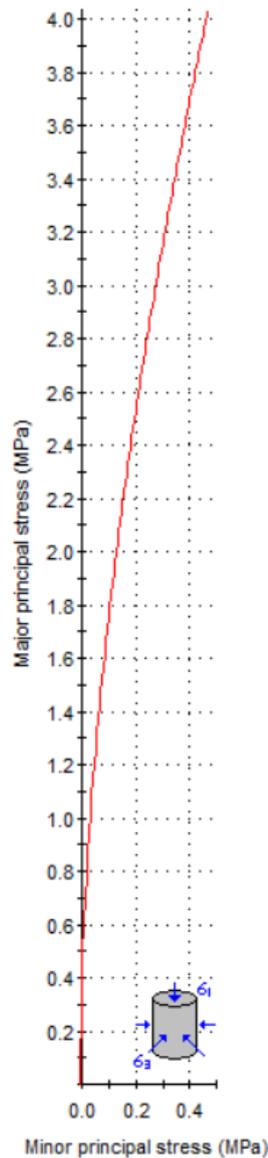
sigt -0.009 MPa

sigc 0.469 MPa

sigcm 4.360 MPa

Erm 931.68 MPa


www.rocscience.com



SCHEDA DI CALCOLO PER PORFIROIDI (PORZIONE INTEGRA)

APPALTATORE:		PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"				
PROGETTAZIONE:	Mandatario: SWS Engineering S.p.A.	Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO			
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 57 di 58

Dalle prove Lugeon nel sondaggio C11 è stato possibile ricavare i valori di permeabilità dell'ammasso roccioso:

- a profondità di 27.0 m e $K = 2.25 \cdot 10^{-6}$ m/s;
- a profondità di 36.40 m $K = 9.0 \cdot 10^{-7}$ m/s.

7.5 MODELLO GEOTECNICO

Sulla base dei risultati precedenti si fa riferimento ad un modello costituito da detrito di falda sovrapposto al substrato roccioso per l'imbocco.

Nella zona della viabilità le condizioni di sottosuolo sono più complesse come descritto ampiamente nella relazione geologica alla quale si rimanda per dettagli.

Sviluppandosi nella zona del terrazzo la strada interessa in gran parte i depositi fluvio-glaciali per spessori che sicuramente interessano tutto l'ambito di profondità interessato dalla strada che si sviluppa a raso o in trincea fino ad altezze di circa 5 m (sez. 12).

Nel tratto iniziale la paratia interessa sia i depositi fluvioglaciali (df) sovrapposti al substrato roccioso (BSSb), caratterizzato da un elevato grado di fratturazione, sia i depositi di frana inattiva (fi).

In mancanza di dati specifici su queste porzioni di ammasso, per le porzioni del substrato BSSb si è fatto riferimento ad un range di parametri intermedio tra quelli stimati per gli ammassi rocciosi ricavati nella zona di imbocco, che peraltro è in congruenza con i parametri assunti nel PD per le medesime opere.

Per le porzioni di frana inattiva, appare lecito e congruente con i dati di rilievo, assimilare questi materiali ad un terreno detritico a grana grossa del tutto analogo ai terreni "dt".

Su queste basi si riassumono i parametri geotecnici delle varie unità.

I contatti tra le varie unità si possono desumere direttamente dalle sezioni geologiche.

Depositi di falda ("d")

peso di volume	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 0$
angolo di attrito	$\varphi = 32-38^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 50 \text{ MPa}$

Depositi fluvio lacustre ("dt") e di frana inattiva (fi)

peso di volume	$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 0$
angolo di attrito	$\varphi = 36^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 50 \text{ MPa}$

APPALTAZIONE: 	PROGETTAZIONE ESECUTIVA ED ESECUZIONE DEI LAVORI DI REALIZZAZIONE DEL LOTTO 1 DEL QUADRUPPLICAMENTO DELLA LINEA FERROVIARIA FORTEZZA-VERONA TRATTA "FORTEZZA – PONTE GARDENA"					
PROGETTAZIONE: Mandatario: SWS Engineering S.p.A. Mandanti: PINI ITALIA GDP GEOMIN SIFEL SIST M Ingegneria	PROGETTO ESECUTIVO					
06 - GEOTECNICA TRATTI ALL'APERTO Opere parte A Relazione geotecnica di caratterizzazione	COMMESSA IBOU	LOTTO 1AEZZ	CODIFICA GE	DOCUMENTO GE0006002	REV. B	FOGLIO. 58 di 58

PORFIROIDI PORZIONE ALTERATA

PARAMETRI DI AMMASSO

peso di volume	$\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 100-150 \text{ kPa}$
angolo di attrito	$\varphi = 37-42^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 300-600 \text{ MPa}$

I valori della porzione alterata fanno riferimento ad un ammasso con GSI = 25 che risulta essere il valore inferiore tra quelli valutati per questa formazione..

PORFIROIDI PORZIONE INTEGRA

PARAMETRI DI AMMASSO

peso di volume	$\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 150-250 \text{ kPa}$
angolo di attrito	$\varphi = 45-50^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 900-1.500 \text{ MPa}$

I parametri ricavati dal software sono spostati verso quelli minimi del range sia pur non esattamente quelli minimi, ma ciò non è incongruente con le condizioni accertate che individuano un significativo aumento delle caratteristiche meccaniche nella porzione più superficiale, ma condizioni non molto variabili più in profondità. I parametri medio-minimi per le porzioni profonde sono quindi da ritenere accettabili.

UNITA' BSSb

PARAMETRI DI AMMASSO

peso di volume	$\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$
coesione efficace	$c' = 125-175 \text{ kPa}$
angolo di attrito	$\varphi = 45-50^\circ$
modulo di deformabilità	$E = 600-1.200 \text{ MPa}$

La falda è indicata alla profondità di 21 m dalla quota di boccaforo del sondaggio S21/1 e quindi non interessa l'ambito di profondità di interesse.

Per la categoria di sottosuolo i numerosi dati geofisici indicano con certezza una categoria B.

La categoria topografica ricade nella T1 per la viabilità e T2 (inclinazione pendio $>15^\circ$) per l'imbocco.