

COMMITTENTE:



ALTA SORVEGLIANZA:



GENERAL CONTRACTOR:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

**TRATTA A.V. /A.C. TERZO VALICO DEI GIOVI  
PROGETTO ESECUTIVO**

**GALLERIA NATURALE DI VALICO  
GALLERIA A SINGOLO BINARIO  
Tratta 6 – WBS GN15X  
Relazione geotecnica**

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI	
Consorzio <b>Cociv</b> Ing. N. Meistro		

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
I G 5 1	0 4	E	C V	R B	G N 0 0 0 0	0 0 1	A

Progettazione :								IL PROGETTISTA
Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	
A00	Prima emissione	COCIV	25/05/2017	Di Salvo 	25/05/2017	A. Mancarella 	25/05/2017	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

n. Elab.:	File: IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00
-----------	---------------------------------------



<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 3 di 73</p>

## INDICE

INDICE.....	3
1 PREMESSA.....	5
2 DOCUMENTAZIONE, NORMATIVA E STRUMENTI TERRITORIALI DI RIFERIMENTO	
6	
2.1 Documentazione di riferimento.....	6
2.2 Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento .....	6
3 INQUADRAMENTO DELL'OPERA.....	8
3.1 Note generali .....	8
3.2 Inquadramento geologico-geomorfologico .....	9
3.2.1 Caratteristiche stratigrafico-sedimentologiche delle unità del Bacino Terziario Piemontese interessate dall'opera in progetto.....	14
3.2.2 Formazione di Costa Areasa.....	14
3.2.3 Depositi quaternari .....	15
3.3 Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera .....	15
3.3.1 Note sulle problematiche superficiali legate alla geomorfologia del Quaternario .....	16
3.4 Inquadramento idrogeologico .....	16
3.4.1 Considerazioni generali.....	16
3.4.2 Complessi idrogeologici.....	18
3.5 Condizioni idrogeologiche attese in corrispondenza dell'opera .....	20
3.6 Sintesi delle problematiche di scavo .....	22
4 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA/GEOMECCANICA .....	23
4.1 Note generali .....	23
4.2 Materiali a grana medio-fine (sabbie localmente ghiaiose in matrice limosa).....	23
4.2.1 Determinazione della densità relativa $D_r$ da prove SPT .....	24
4.2.2 Angolo di resistenza al taglio.....	26
4.2.3 Caratteristiche di deformabilità .....	26
4.3 Materiali a grana fine (limi e argille) saturi.....	29
4.3.1 Resistenza al taglio non drenata .....	30
4.3.2 Parametri di resistenza al taglio in termini di sforzi efficaci.....	30
4.3.3 Caratteristiche di deformabilità .....	30
4.4 Formazioni rocciose.....	32
4.4.1 Valutazione del parametro RMR'89 .....	33
4.4.2 Criteri di rottura .....	35
4.4.3 Caratteristiche di deformabilità .....	40
5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA – GEOMECCANICA DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI INTERAGENTI CON L'OPERA .....	42
5.1 Note generali .....	42
5.2 Indagini geognostiche.....	45
5.2.1 Descrizione dei sondaggi .....	45
5.2.2 Indagini geofisiche e ipotesi di stratigrafia.....	49
5.3 Caratterizzazione geotecnica .....	56
5.3.1 Depositi colluviali – Unità L/S.....	56
5.3.2 Marne alterate – Unità FC_alt .....	56
5.3.3 Formazione di Costa Areasa.....	57
5.3.4 Quadro di sintesi caratterizzazione geomeccanica.....	71
6 BIBLIOGRAFIA.....	72

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00

Foglio  
4 di 73

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 5 di 73</span>

## 1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è la descrizione delle principali problematiche legate allo scavo della galleria di Valico, facente parte del tracciato della linea ferroviaria del “Terzo Valico dei Giovi” che si estende da Genova a Tortona. Il progetto nel suo complesso prevede la realizzazione di una galleria a doppia canna di 27 km a binario, dei quali 5.3km circa per fornice verranno eseguiti mediante scavo meccanizzato mentre il restante verrà scavato in tradizionale.

Il presente documento, introdotto nella WBS GN00, è relativo allo sviluppo del binario dispari dal pozzo fresa di Cascina Radimero al Camerone Tipo “D” (tratto 6, da pk 27+579 a pk 27+668 circa) dove le due gallerie di linea confluiscono in un’unica galleria, prima di uscire in corrispondenza dell’imbocco nord di valico.

Tale tratta, denominata WBS GN15X, si sviluppa per una lunghezza di circa 76 m, con coperture che variano da 6 m a 23 m, ed è realizzata mediante scavo tradizionale impiegando una canna a singolo binario di sezione policentrica. Nelle stesse progressive il binario pari è scavato mediante sistema meccanizzato (WBS GN14V), con interasse tra le due canne variabile (da 16m a 20m).

Dal punto di vista geologico e geomorfologico, la galleria si innesta ai piedi di un versante modellato nella Formazione di Costa Areasa, sovrastato da accumuli di depositi quaternari, misti detritico-alluvionali, come verrà meglio precisato in seguito.

Dal punto di vista geotecnico, lo scavo dovrebbe avvenire sempre nella formazione marnosa, che si presenta destrutturata e molto alterata nella prima parte dello scavo, in cui la modesta copertura è formata principalmente da depositi di terreni sciolti a granulometria prevalentemente argilloso-limosa più o meno sabbiosa, per poi passare, all’aumentare delle coperture in cui si riduce sempre più la potenza del suddetto deposito, ad un substrato molto più compatto e poco alterato.

La relazione si articola come segue:

- il **capitolo 2** elenca i documenti, le normative e la bibliografia di riferimento.
- il **capitolo 3** propone l’inquadramento geologico e idrogeologico di sintesi riprendendo quanto descritto nella relazione geologica e idrogeologica di progetto, e delinea in maniera organica gli elementi geologici essenziali ai fini della caratterizzazione geomeccanica
- il **capitolo 4** descrive i criteri di interpretazione delle indagini geotecniche,
- il **capitolo 5** riporta un riepilogo delle indagini geotecniche disponibili e la caratterizzazione geotecnica/geomeccanica degli ammassi rocciosi presenti nell’area di intervento, quali risultano sia dagli studi di carattere geologico (cfr. profilo geologico), sia dall’interpretazione delle indagini e dei rilievi eseguiti, effettuata in base ai criteri descritti nel capitolo 6, definendo infine la sintesi dei parametri geotecnici.

Il documento revisiona, ove necessario, ed integra gli aspetti geotecnici del Progetto Definitivo.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 6 di 73</span>

## 2 DOCUMENTAZIONE, NORMATIVA E STRUMENTI TERRITORIALI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Documentazione di riferimento

Nella stesura della relazione si è fatto riferimento a quanto elencato di seguito.

- Profilo geologico - geotecnico longitudinale lungo il tracciato di linea e delle finestre
- Profilo geologico in corrispondenza della tratta interessata dall'intervento a progetto
- Studi a carattere geologico, composti dai seguenti elaborati:
  - o Carta geologico-geomorfologica
  - o Carta idrogeologica
  - o Profilo geologico ed idrogeologico
- Indagini geognostiche eseguite durante la fase di Progetto Preliminare della galleria di linea.
- Indagini in situ eseguite durante lo scavo della prima tratta dei cunicoli esplorativi Vallemme e Castagnola
- Elaborazione ed analisi di tutti i rilievi strutturali dei fronti di scavo
- Indagini effettuate durante la fase di Progetto Definitivo.
- Indagini effettuate per la presente fase di Progetto Esecutivo.

### 2.2 Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento

Per l'attività di caratterizzazione geotecnica-geomeccanica delle formazioni interagenti con l'opera e, più in generale, per l'analisi di tutti gli aspetti progettuali legati al contesto geologico-geomeccanico, sono state prese a riferimento le seguenti normative di legge e strumenti territoriali di riferimento:

- D.M. 11.03.1988 e s.m.i. "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e le scarpate, i criteri generali, e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione"
- Istruzioni relative alle "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" - Cir. Dir. Cen. Tecn. n° 97/81.
- Circ. LL.PP. 24 settembre 1988 n. 30483 "Norme tecniche per terreni e fondazioni - Istruzioni applicative"

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 7 di 73</p>

- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 Marzo 2003. “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3316. “Modifiche ed integrazioni all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20.03.03”.
- Variante al P.T.C. Bacini Padani” (VBP) redatto dalla Provincia di Genova.
- Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico PAI - (Autorità di Bacino del Fiume Po).
- "Indagine geologica per verifiche di compatibilità idraulica ed idrogeologica del P.A.I." - Comunità Montana Alta Val Lemme Alto Ovadese
- EN 1997 Eurocodice 7 “Geotechnical Design”
  - Part 1: General rules
  - Part 2: Standards for laboratory testing
  - Part 3: Standards for field testing.
- ASTM D1557 “Test method for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort”.
- CNR UNI 10009 “Costruzione e manutenzione delle strade – Tecnica di impiego delle terre”.

### 3 INQUADRAMENTO DELL'OPERA

#### 3.1 Note generali

L'opera in oggetto rientra nella realizzazione della Linea AV/AC Milano- Genova III Valico ed in particolare della tratta 6 della galleria di Valico; tale tratta si sviluppa tra le progressive pk 27+579 e pk 27+668 circa per una lunghezza di circa 76 m, con coperture che variano da 6 m a 23 m, ed è realizzata mediante scavo tradizionale impiegando una canna a singolo binario di sezione policentrica. In particolare lo scavo collega il pozzo fesa di Cascina Radimero (WBS GA1U) e il Camerone tipo "D" (WBS GN16). Nelle stesse progressive il binario pari è scavato mediante sistema meccanizzato (cfr. WBS GN14V), con interasse tra le canne variabile (da 16m a 20m). In corrispondenza del Camerone tipo D le due gallerie di linea confluiscono in un'unica galleria, prima di uscire in corrispondenza dell'imbocco nord di valico.

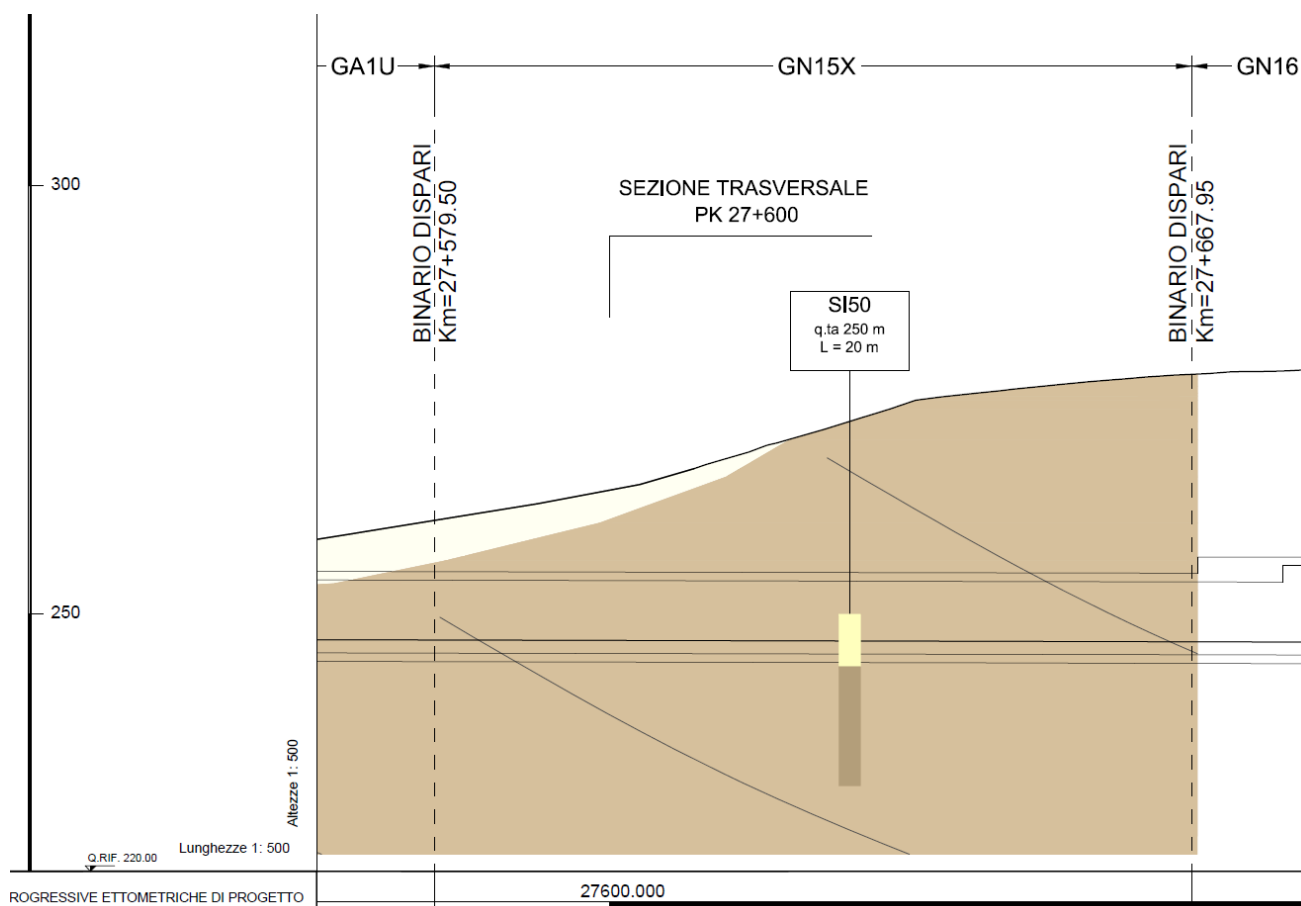


Figura 3-1. Profilo longitudinale

La sezione corrente adottata, per consentire il traffico ferroviario, è caratterizzata da un raggio interno in chiave calotta di 3.75m e da una larghezza massima misurata in intradosso pari a 8.40m.



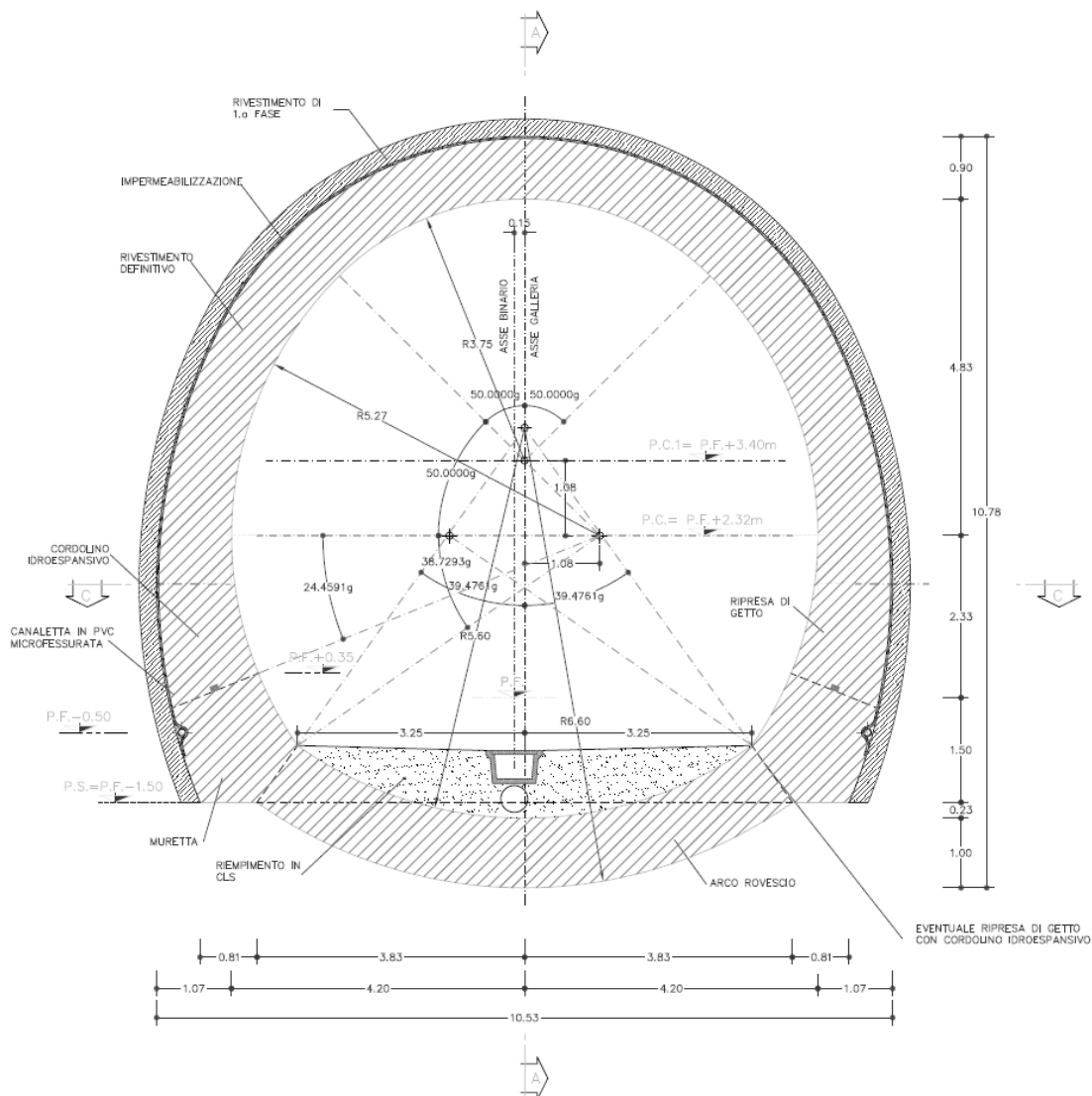


Figura 3-2. Sezione corrente

Si riporta nei paragrafi che seguono un inquadramento geologico, geomorfologico e idrogeologico generale, la descrizione delle formazioni interessate dallo scavo della tratta in oggetto e le principali criticità. E' data attenzione, essenzialmente, agli elementi di natura geologica influenti ai fini del comportamento geo-meccanico dell'ammasso in risposta all'apertura del cavo. La trattazione specifica degli aspetti geologici è pertanto demandata alla relazione geologica relativa.

### 3.2 Inquadramento geologico-geomorfologico

La Galleria di Valico, nella tratta in esame, ricade interamente nelle successioni sedimentarie terrigene, prevalentemente silicoclastiche, riferibili al settore meridionale del Bacino Terziario Piemontese (BTP). Verso sud le unità del BTP poggiano in discordanza sulle unità metamorfiche del "Gruppo di Voltri" Auct. (unità tettonometamorfiche Figogna e Cravasco-Voltaggio; cfr. Foglio 213-230 "Genova" della Carta Geologica d'Italia), mentre a nord, verso la pianura alessandrina, esse sono sormontate dai depositi post-messiniani (Argille di Lugagnano/Argille Azzurre, Sabbie di Asti

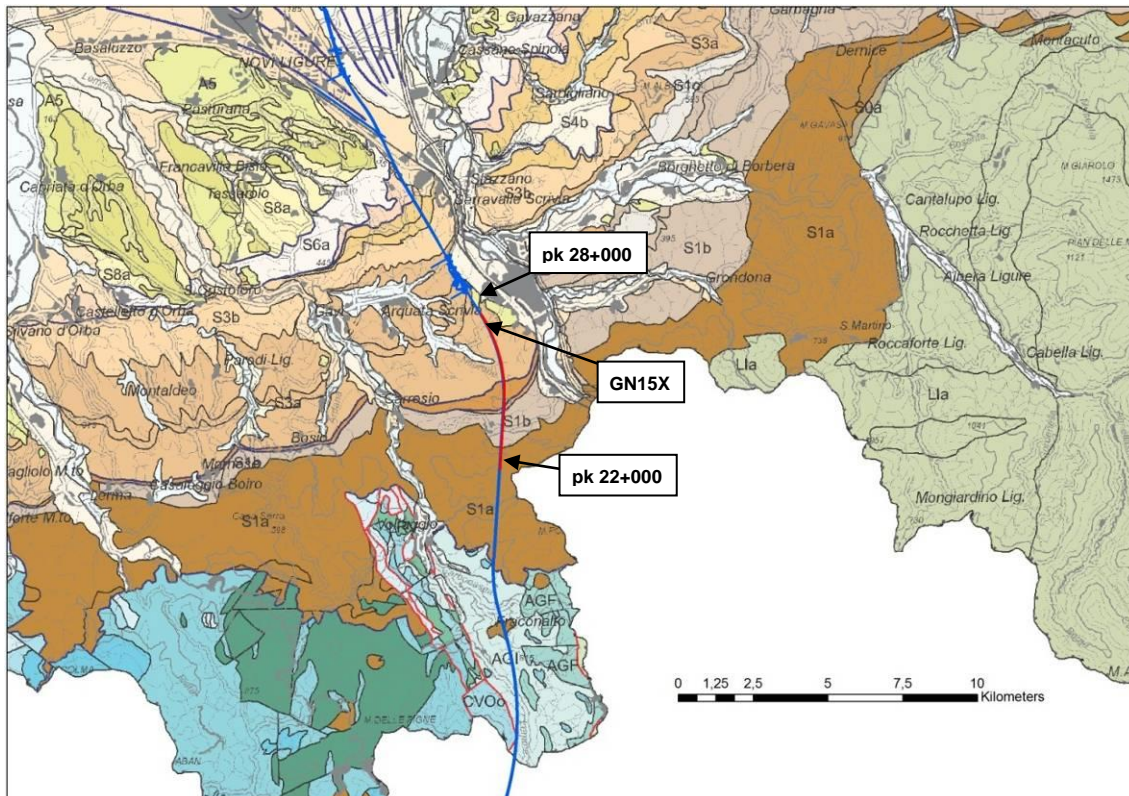
<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 10 di 73</p>

I.s. e “Villafranchiano” Auct.) e dai depositi alluvionali pleistocenico-olocenici del bacino di Alessandria, rappresentati in questo settore dai depositi del T. Scrvia (Figura 3-3).

Nel seguito verranno descritte le principali caratteristiche geologiche del tratto interessato dallo scavo, funzionali alla caratterizzazione geotecnica in oggetto. Si rimanda alla specifica relazione geologica per un quadro sull’argomento.

In coerenza con quanto riportato nella suddetta relazione, sono state riportate delle tabelle (Tabella 3-1, Tabella 3-2) in cui sono è messa a confronto la nomenclatura derivante dalla cartografia ufficiale e quella impiegata in fase di Progetto Esecutivo.

Nelle tabelle sono inoltre evidenziati (in corsivo sottolineato) i casi in cui l’implementazione delle conoscenze in fase esecutiva ha imposto una variazione/integrazione della nomenclatura, della gerarchia e/o della descrizione delle unità stratigrafiche interessate dall’opera.

**LEGENDA****Depositi alluvionali**

**A1/A6** depositi fluviali del bacino alessandrino (Pleistocene medio – Attuale)

**Bacino Terziario Piemontese**

**S8a** Successioni marnoso-siltose zancleane; **S6a** Successioni terrigene messiniane; **S4c** Evaporiti e successioni euxiniche messiniane; **S4b** Corpi arenaceo-conglomeratici tortoniano-messiniani; **S4a** Successioni marnose tortoniano-messiniane; **S3b** Successioni arenaceo-pelittiche ed arenacee serravalliano-tortoniane; **S3a** Successioni arenaceo-pelittiche e marnose burdigaliano-langhiane; **S2a** Successioni prevalentemente carbonatiche burdigaliane; **S1d** Depositi silicei aquitaniano-burdigaliani; **S1b** Successioni marnose rupeliano-aquitani; **S1c** Corpi lenticolari arenaceo-conglomeratici rupeliano-aquitani; **S1a** Successioni arenacee e arenaceo-pelittiche rupeliane.

**Dominio Ligure-Piemontese (unità non metamorfiche) - Flysch ad Helminthoides dell'Appennino**

**L1a** Formazione del M. Antola, Formazione di Bruggi-Selvapiana, Argilliti di Pagliaro (Campaniano-Maastrichtiano p.p.); **L1c** Flysch di Monte Cassio (Cretacico sup.-Eocene inf.?).

**Zona a scaglie tettoniche – Zona Sestri-Voltaggio**

**Unità Figogna:** AGI Argilloscisti di Costagiutta (Cretacico inf.); AGF Argilloscisti di Murta (Cretacico inf.?).

**Unità Cravasco-Voltaggio:** CVOo metabasalti e metagabbri (Giurassico medio? – sup.?).

**Figura 3-3. Estratto della nuova Carta Geologica del Piemonte in scala 1:250.000 (Piana et al., in prep.)**

**con l'ubicazione del tracciato della linea AV/AC (in blu) e delle tratte in esame**

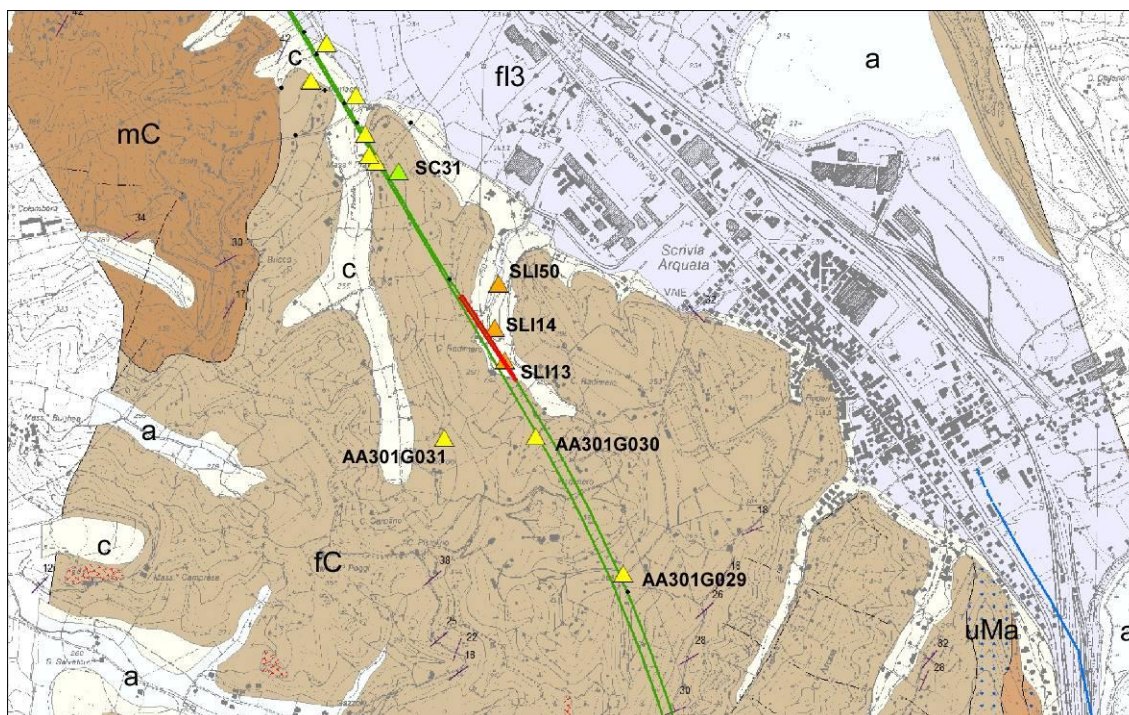
CARTA GEOLOGICA DEL PIEMONTE alla scala 1:250.000 (in prep).	CATALOGO delle FORMAZIONI ITALIANE e CARIMATI (cfr. Carta geologica d'Italia, scala 1:100.000 e PROGETTO CARG, scala 1:50.000)		Tratta AC/AV Milano-Genova "Terzo Valico dei Giovi" PROGETTO DEFINITIVO	Tratta AC/AV Milano-Genova "Terzo Valico dei Giovi" PROGETTO ESECUTIVO
Successioni terrigene messiniane, S6a	Gruppo della Gessoso-Solfifera	Formazione di Cassano Spinola, CSS	Conglomerati di Cassano Spinola, cC	Conglomerati di Cassano Spinola, cC
Evaporiti clastiche messiniane, S5a		Complesso Caotico della Valle Versa, CTV	Formazione Gessoso-Solfifera, gS	<u>Complesso Caotico della Valle Versa, gS</u>
Successioni marnose tortoniano-messiniane, S4a	Marne di S. Agata Fossili, SAF	Marne di S. Agata Fossili	marne e peliti, mA1	marne e peliti, mA1
Corpi arenaceo-conglomeratici tortoniano-messiniani, S4b			areniti fini, mA2	areniti fini, mA2
Successioni arenaceo-pelitiche ed arenacee serravalliano-tortoniane, S3b	Formazione di Serravalle, SEV		Arenarie di Serravalle, aS	Arenarie di Serravalle, aS
Successioni arenaceo-pelitiche e marnose burdigaliano-langhiane, S3a	Marne di Cessole, CES		Marne di Cessole, mC	Marne di Cessole, mC
	Formazione di Costa Areasa		Formazione di Costa Areasa, fC	Formazione di Costa Areasa, fC <u>Formazione di Costa Areasa, areniti medie e fini, fCa</u>
Successioni prevalentemente carbonatiche burdigaliane, S2a	Formazione di Rigoroso, RIO	Membro di Costa Montada	marne e areniti, uMc	<u>alternanze di marne e areniti, uMc</u>
Depositi silicei aquitaniano-burdigaliani, S1d			arenarie medie, uMb	<u>areniti medio-grossolane, uMb</u>
			Marne, uMa	<u>marne e marne silicizzate, uMa</u>
Successioni marnose rupeliano-aquitaniiane, S1b	Marne di Rigoroso	Formazione di Rigoroso	areniti e marne, fR	<u>marne con livelli arenacei, fR</u>
			marne grigie, mR	<u>marne siltose, mR</u>
Successioni arenacee e arenaceo-pelitiche rupeliane, S1a	Formazione di Molare	Formazione di Molare	Membro arenaceo, FMa	<u>Litofacies arenacea, FMa</u>
			Membro conglomeratico cementato, FMc	<u>Litofacies siltoso-pelitica, FMc</u>
			Conglomerati poligenici, FMp	<u>Litofacies rudistica calcarea, FMc</u>
			Brecce della Costa di Cravara, FMbc	<u>Litofacies rudistica poligenica, FMp</u> <u>Litofacies brecciosa, FMbc</u>
-	Brecce della Costa di Cravara, CRA		Brecce della Costa di Cravara	<u>Brecce della Costa di Cravara</u>

**Tabella 3-1. Nomenclatura riassuntiva delle unità stratigrafiche del Bacino Terziario Piemontese presenti in letteratura messi a confronto con i termini e le sigle di progetto nelle fasi Definitiva ed Esecutiva. In corsivo sottolineato sono evidenziati i termini oggetto di revisione (come terminologia, gerarchia e/o come descrizione) in fase di Progetto Esecutivo.**



Carta Geologica d'Italia Foglio 70 "Alessandria" 1:100.000	Carta Geologica del Piemonte 1:250.000 (in prep.)		Tratta AC/AV Milano-Genova "Terzo Valico dei Giovi"	
			PROGETTO DEFINITIVO	PROGETTO ESECUTIVO
A3 – Alluvioni attuali	DEPOSITI FLUVIALI DEL BACINO ALESSANDRINO	A1 - Depositi fluviali del Pleistocene sup. - Olocene	a - Fluviale attuale	a - Depositi fluviali attuali
A <sup>2-1</sup> – Alluvioni post-glaciali		A2 – Depositi fluviali della parte terminale del Pleistocene sup.		
A <sup>1</sup> /F <sup>3</sup> – Fluviale recente		A3 – Depositi fluviali del Pleistocene sup.	f <sub>3</sub> - Fluviale recente	f <sub>3</sub> - Depositi fluviali recenti, Pleistocene sup.? - Olocene
F <sup>2</sup> – Fluviale medio		A4 – Depositi fluviali del Pleistocene medio - sup.	f <sub>2</sub> - Fluviale medio	f <sub>2</sub> - Depositi fluviali medi, Pleistocene medio - sup.
F <sup>1</sup> – Fluviale antico I <sup>2</sup> – Villafranchiano auct.		A5 – Depositi fluviali del Pleistocene medio	f <sub>1</sub> - Fluviale antico	f <sub>1</sub> - Depositi fluviali antichi, Pleistocene medio?
	A6 – Depositi fluviali del Pleistocene inf. - medio			
P <sup>3-2</sup> - Sabbie di Asti	S9b – Sintema di Maranzana	vL – Villafranchiano auct. e Sabbie d'Asti, Pleistocene inf.		
P - Argille di Lugagnano, Pliocene	SUCCESIONI POST-MESSINIANE	S8b – Successioni siltose e sabbioso-ghiaiose piacentiane	aL – Argille di Lugagnano (Formazione delle Argille Azzurre), Zancleano	
	S8a – Formazione delle Argille Azzurre dello Zancleano			

**Tabella 3-2 - Nomenclatura riassuntiva delle unità post-messiniane e quaternarie descritte in letteratura, messe a confronto con la terminologia e le sigle adottate nelle fasi di progettazione Definitiva ed Esecutiva.**



**Figura 3-4. Carta geologica interpretativa del settore interessato dalla WBS in esame, con ubicazione dei sondaggi ad oggi eseguiti (giallo: sondaggi PP; arancione: sondaggi PE).**

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 14 di 73</span>

### 3.2.1 Caratteristiche stratigrafico-sedimentologiche delle unità del Bacino Terziario Piemontese interessate dall'opera in progetto

Il tratto di linea oggetto del presente rapporto attraversa le successioni rupeliano-langhiane del Bacino Terziario Piemontese; in particolare, dal basso verso l'alto stratigrafico si trovano:

- la formazione di Molare,
- la formazione di Rigoroso,
- la formazione di Costa Montada,
- la formazione di Costa Areasa.

La WBS in progetto attraversa la formazione di Costa Areasa, la cui descrizione, di seguito riportata, è il risultato degli studi di dettaglio condotti in fase di Progetto Esecutivo, nelle aree oggetto d'intervento, implementati con informazioni provenienti dal Progetto Definitivo nonché dai dati presenti in letteratura.

### 3.2.2 Formazione di Costa Areasa

La formazione di Costa Areasa (fC) è costituita da alternanze di strati arenaceo-pelitici, torbiditici e livelli di emipelagiti. Il rapporto arenaria/pelite è  $< 1$ . Le arenarie sono da medie a fini. Gli strati arenacei decimetrici sono interamente laminati con lamine parallele e subordinatamente lamine oblique a piccola scala. Gli strati metrici mostrano gradazione normale alla base e lamine parallele, lamine convolute e/o lamine oblique a piccola scala al tetto; alla base degli strati arenacei sono spesso presenti strutture da carico e gallerie di bioturbazione.

La facies marnoso-calcareo, in livelli spessi da pochi cm a qualche decina di cm, si trova intercalata agli strati pelitico-arenacei sopra descritti. Si tratta di marne calcaree debolmente siltose, compatte, omogenee e con frattura concoide.

La parte superiore della formazione (circa 200 m) è invece essenzialmente costituita da marne e peliti siltose con rare e sottili intercalazioni di arenarie.

La formazione è stata deposta in un ambiente di piana sottomarina, mentre la parte superiore, essenzialmente pelitica, potrebbe rappresentare un ambiente di scarpata non attiva (Ghibaudo et al., 1985).

La formazione, nel complesso raggiunge una potenza di oltre 1000 m e, verso l'alto, diventa sempre più marnosa, passando transizionalmente alle Marne di Cessole. Rispetto alle osservazioni fatte in fase di Progetto Definitivo, nel corso degli approfondimenti condotti in fase esecutiva, all'interno della formazione di Costa Areasa, nella parte basale, è stata ulteriormente distinta un'unità arenitica (fCa).

In base ai dati strutturali raccolti sul terreno in corrispondenza di rari affioramenti, la stratificazione immerge verso NNW di circa  $25^{\circ}$ - $45^{\circ}$ . Il substrato è caratterizzato da un grado di fatturazione piuttosto ridotto, come testimoniato dalle stratigrafie di diversi sondaggi a carotaggio eseguiti lungo il tracciato di linea nell'ambito del Progetto Preliminare.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 15 di 73</span>

### Areniti medie e fini (fCa)

Si tratta di arenarie da medie a fini, di colore giallastro, da mediamente a ben cementate, in strati decimetrico-metrici interamente laminati con lamine parallele e lamine oblique a piccola scala. Gli strati metrici mostrano debole gradazione normale alla base e lamine parallele al tetto; alla base degli strati arenacei sono localmente presenti strutture da carico e gallerie di bioturbazione.

Lo spessore dell'unità è di circa 50 m lungo il tracciato dell'opera ed ha una continuità laterale di alcuni chilometri.

#### 3.2.3 Depositi quaternari

Alla base del versante modellato nella formazione di Costa Areasa sub affiorante, si trovano accumuli di depositi misti detritico-alluvionali, cui si possono localmente associare, lungo l'asse del fondovalle minore su cui si colloca il pozzo fresa di cascina Radimero, dei depositi alluvionali sottili, riferibili al fluviale recente e non distinguibili cartograficamente con precisione.

Si tratta di terreni sciolti a granulometria prevalentemente argilloso-limosa  $\pm$  sabbiosa, formanti accumuli di spessore variabile, generalmente dell'ordine di pochi metri; la potenza massima al piede del versante nell'area considerata è di circa 4-5 m, mentre verso monte lungo il pendio, dove subaffiora il substrato marnoso, arriva a circa 0.5-1 m.

La porzione superficiale del substrato è alterata e parzialmente pedogenizzata a costituire un livello di alterazione di spessore variabile da 1 a 2 m ca. Al di sopra dei depositi quaternari e del substrato subaffiorante è infine presente uno strato di terreno vegetale e agricolo di potenza mediamente inferiore a 0,5 m.

### 3.3 Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera

In coerenza con quanto riportato nel profilo geomeccanico, l'intero tratto di scavo della WBS oggetto del presente rapporto attraversa presumibilmente la formazione di Costa Areasa (fC).

Dal punto di vista geologico la criticità principale è rappresentata dalla bassa copertura al di sopra della calotta del tunnel, inoltre dalla possibilità che nella tratta a minore copertura in marne, possa eventualmente essere intercettato il limite di appoggio basale dei depositi detritico-colluviali superficiali, con conseguenti problemi legati alla stabilità della volta e a possibili subsidenze in superficie.

Nel settore di indagine, a causa della diffusa coltre detritico-colluviale, della densa copertura vegetale e delle rielaborazioni agricole, non vi è evidenza diretta della presenza di faglie, anche per l'assenza di marker stratigrafici che permettano di evidenziare eventuali incongruenze geometriche all'interno della formazione. Non si può escludere del tutto la presenza di alcune faglie minori di spessore centimetrico-decimetrico, la cui densità e posizione non è tuttavia definibile.

Il grado di fratturazione può variare da medio a basso, con sviluppo di fratture più nette all'interno dei livelli cementati (arenarie e marne carbonatiche) e di clivaggi di fratturazione pervasivi nei livelli marnosi meno cementati.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 16 di 73</p>

### 3.3.1 Note sulle problematiche superficiali legate alla geomorfologia del Quaternario

Dal punto di vista geomorfologico, l'area di studio si colloca al raccordo tra la piana alluvionale terrazzata del T. Scrivia e il versante collinare impostato nel substrato marnoso sub-affiorante del fianco sinistro della Valle Scrivia.

Il raccordo tra il versante e il terrazzo alluvionale principale è caratterizzato dalla presenza di numerosi piccoli conoidi detritico-alluvionali alimentati dal reticolato idrografico secondario, poggianti sulla superficie sub pianeggiante del terrazzo.

La dinamica di versante è legata prevalentemente all'innescò di piccole frane per colamento dei terreni della coltre detritica superficiale, derivante da un substrato marnoso e caratterizzata quindi da granulometria fine, bassa permeabilità, limitata capacità di drenaggio delle acque di infiltrazione e suscettibilità al dissesto relativamente alta. Sui versanti possono innescarsi limitati fenomeni di soliflusso, colamento lento o, al limite, piccole frane di scivolamento a carico della coltre, innescate da precipitazioni intense e prolungate.

Alla luce delle caratteristiche sopra descritte e data la posizione dell'opera prevista, che si colloca interamente nel sottosuolo, sul lato settentrionale della piccola valle laterale di Cascina Radimero, l'influenza di fenomeni geomorfologici superficiali è da ritenersi di scarsa rilevanza. Il settore considerato è caratterizzato da una morfologia dolce e poco acclive e dall'assenza di fenomeni di instabilità gravitativa profonda che possano andare a interessare la quota del tunnel.

L'area adiacente allo scavo della galleria sarà interamente cantierizzata per la realizzazione del pozzo di C. Radimero, per l'imbocco della fresa; pertanto, l'attuale assetto geomorfologico verrà comunque completamente modificato in fase di esecuzione, su un'area piuttosto ampia; a tutela delle zone di cantiere inerenti la WBS in oggetto, si dovranno quindi adottare soluzioni integrate con quelle prescritte a livello progettuale per l'area del pozzo fresa.

## 3.4 Inquadramento idrogeologico

### 3.4.1 Considerazioni generali

La zona interessata dallo sviluppo della linea MI-GE è stata suddivisa su base litologica in diversi complessi idrogeologici a permeabilità differente, distinguendo lungo l'asse delle gallerie settori con comportamento idrogeologico omogeneo. I sistemi di flusso idrico sotterraneo possono svilupparsi all'interno di un solo complesso idrogeologico, quando questo è limitato lateralmente da complessi meno permeabili, oppure possono attraversare più complessi permeabili adiacenti.

In generale sono stati distinti complessi permeabili per porosità e complessi permeabili per fratturazione. I primi sono essenzialmente i complessi costituiti da depositi sciolti superficiali (depositi quaternari) dove, essendo assenti fenomeni di cementazione o di metamorfismo, è presente una porosità primaria significativa. I secondi sono i complessi sviluppati in litotipi del substrato prequaternario che, essendo caratterizzati da fenomeni di cementazione (Bacino Terziario Piemontese) o di metamorfismo (substrato metamorfico alpino), possiedono una permeabilità primaria per porosità non significativa o, comunque, di diversi ordini di grandezza inferiore rispetto alla permeabilità per fratturazione.



La permeabilità delle unità di basamento prequaternario nell'area di interesse è molto spesso anisotropa e il flusso avviene preferenzialmente lungo discontinuità più o meno diffuse al loro interno.

Nell'ambito degli studi idrogeologici eseguiti, e di conseguenza in relazione, in luogo del termine "permeabilità", ove si fa riferimento a valori fisici numericamente definiti, è stato di solito più correttamente impiegato il termine di "conducibilità idraulica" (K, espressa in m/s), dal momento che i valori fisici a cui si fa riferimento tengono conto delle proprietà del mezzo acquoso (densità unitaria, temperatura di 20°C ecc.), mentre la "permeabilità" (k, espressa in m<sup>2</sup>) sarebbe in realtà una proprietà intrinseca dell'acquifero, indipendentemente dal fluido che lo permea. Si continuerà invece ad utilizzare il termine "permeabilità" o "grado di permeabilità" per indicare genericamente e a livello concettuale le proprietà idrogeologiche dei diversi ammassi, senza specifici riferimenti a valori fisici numericamente definiti.

Classe	Conducibilità idraulica in m/s	Descrizione
K1	> 10 <sup>-4</sup>	molto alta
K2	10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-4</sup>	alta
K3	10 <sup>-6</sup> a 10 <sup>-5</sup>	medio-alta
K4	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-6</sup>	media
K5	10 <sup>-8</sup> a 10 <sup>-7</sup>	bassa
K6	< 10 <sup>-8</sup>	molto bassa

**Tabella 3-3. Descrizione delle classi di conducibilità idraulica utilizzate (N.B.: la classificazione non è valida per le rocce carsiche, per le quali è necessaria una valutazione specifica).**

Un'ulteriore premessa a carattere più generale è che, con riferimento alla permeabilità nel substrato cristallino, indipendentemente dagli aspetti legati alla litologia, si possono distinguere due diversi contesti:

1. ammasso roccioso in normali condizioni di fratturazione;
2. zone di faglia.

Il contesto di tipo 1 è quello largamente dominante; la permeabilità è indotta dalla presenza di un reticolo di fratture poco persistenti lateralmente (metri-decametri), o al più da faglie discrete con zona di tettonizzazione cataclastica di spessore modesto (dell'ordine del metro) e persistenza anch'essa modesta (metri-decametri). Ciò significa che a scala decimetrica, o metrica, talora, si possono avere permeabilità anche piuttosto elevate, determinate dalla presenza di singole fratture aperte o faglie discrete, ma a scala decametrico-ettometrica la permeabilità media risulta per lo più bassa, poiché le fratture hanno un grado d'interconnessione reciproca non molto elevato.

Il contesto di tipo 2 è subordinato e correlato alla presenza di zone di faglia cataclastiche principali di spessore plurimetrico fino a decametrico, in cui oltre a una densità di fratturazione molto elevata, possono essere presenti anche livelli di brecce tettoniche (materiale pseudo-poroso). In questo contesto la permeabilità è generalmente piuttosto alta, poiché il grado di interconnessione tra le fratture è elevato e sovente le fratture presentano riempimenti granulari poco coesivi (brecce e microbrecce). Si deve comunque tenere conto del fatto che nelle zone di faglia le rocce

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 18 di 73</span>

cataclastiche più permeabili costituiscono due salbande dette “zone di danneggiamento” poste sui due lati di una fascia maggiormente deformata detta “zona di nucleo”. In questa fascia può essere presente una maggior quantità di materiale a grana fine (gouge) poco permeabile. La zona di nucleo può pertanto costituire un setto poco permeabile più o meno potente, interno alla fascia permeabile.

Per quanto riguarda più strettamente l’opera in progetto, questa è interamente realizzata all’interno del substrato prequaternario, che rappresenta un acquifero dalla produttività e dalla connettività idraulica estremamente limitate.

L’acquifero residente nei depositi quaternari superficiali è confinato, alla base, all’orizzonte superiore del substrato prequaternario più alterato e detensionato, che ha una permeabilità più elevata del substrato indisturbato.

Le differenze a livello litologico tra i depositi fluviali recenti e/o attuali, i terreni della coltre detritica e le marne del substrato permettono di individuare due tipologie di acquiferi:

- acquifero superficiale
- acquifero profondo

L’alimentazione degli acquiferi superficiali e, indirettamente, dell’acquifero del substrato, avviene principalmente per il contributo delle precipitazioni dirette e in minor misura per i flussi idrici orientati da SE a NW all’interno dei terrazzi alluvionali più antichi. Le formazioni del substrato subaffioranti lungo i versanti collinari non possono contribuire se non in minima parte all’alimentazione di questi acquiferi ospitati nei depositi alluvionali, poiché come già sottolineato si tratta di terreni essenzialmente impermeabili.

Le misure piezometriche eseguite nei sondaggi realizzati per il Progetto Esecutivo danno un’idea dell’entità delle oscillazioni piezometriche su scala stagionale: per quanto riguarda il foro SLI13, si va da una soggiacenza di -4/-5 m dal p.c. nell’autunno 2012, a -2 m ca. nell’inverno 2012/2013, con un’escursione di 2-3 m.

All’assenza totale di falda nel sondaggio SLI14 nell’autunno, fa riscontro una falda prossima al p.c. nel periodo invernale.

Si rimanda alla specifica relazione idrogeologica per approfondimenti sulle tipologie di acquiferi menzionate.

### 3.4.2 *Complessi idrogeologici*

#### Complesso 2 (c, d, aF)

Il complesso include depositi detritici di smantellamento ed alterazione del substrato. La natura di questi depositi può variare da zona a zona; tuttavia, poiché nella maggior parte dei casi essi derivano da formazioni ricche in minerali fillosilicatici o comunque in materiale a granulometria fine, si osservano accumuli da matrix- a clast-supported ove la matrice presenta un’abbondante componente sabbioso-limosa.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 19 di 73</span>

La permeabilità è dunque prevalentemente legata alla porosità primaria dei depositi, ma le conducibilità idrauliche raramente raggiungono valori molto elevati. Più frequentemente si attendono valori da bassi a medio-alti.

La coltre e i depositi detritici di versante hanno spessore variabile, compreso tra 1 e 5 metri, a seconda della posizione rispetto al versante e del substrato da cui deriva. Essi non determinano quindi mai acquiferi di grande importanza, bensì acquiferi sottili, locali e discontinui.

In profondità i depositi detritici e colluviali fanno transizione a un substrato disarticolato e alterato. Lo spessore dello strato d'alterazione del substrato può essere di ordine pluri-metrico fino a decametrico. Questo livello di alterazione del substrato può ancora essere considerato come parte del deposito detritico o colluviale, sebbene con l'aumentare della profondità si passi da un contesto a permeabilità quasi esclusivamente per porosità, ad un contesto misto di permeabilità per fratturazione e porosità, a seconda del grado di allentamento dell'ammasso roccioso.

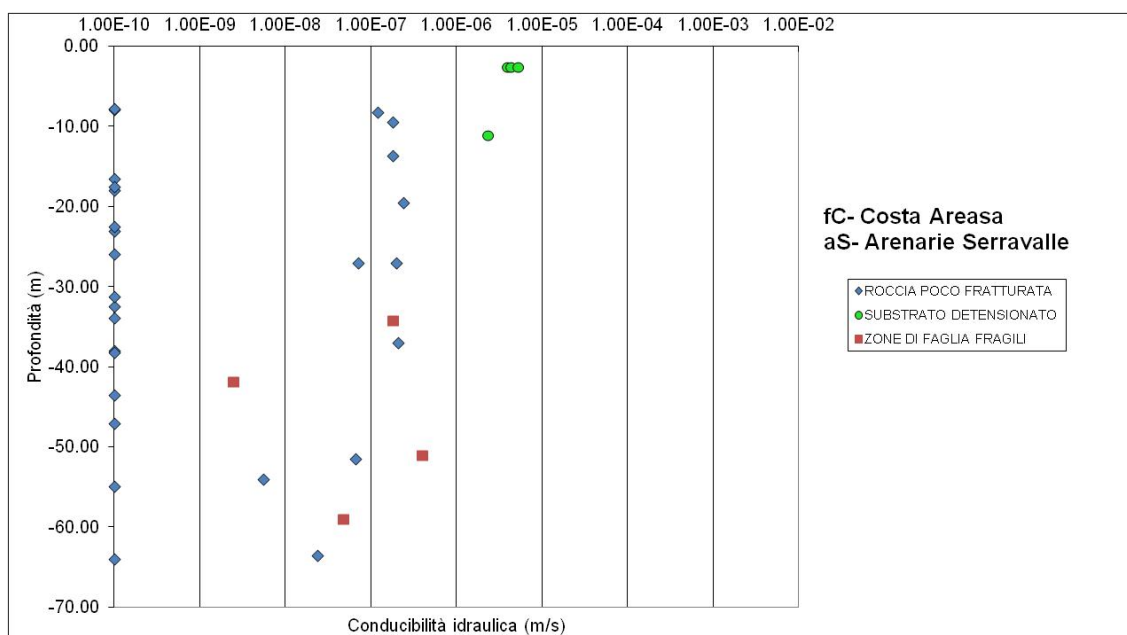
Non sono disponibili prove di tipo idraulico per i depositi colluviali e detritici, ma sembra comunque ragionevole presupporre una conducibilità stimata compresa tra  $1 \times 10^{-6}$  e  $1 \times 10^{-8}$  m/s con locali incrementi fino a  $1 \times 10^{-5}$  m/s là ove la natura del substrato consente lo sviluppo di depositi a minor contenuto di matrice fine.

### Complesso 10 (aS, fC, fCa, uMb, fR)

I litotipi facenti parte di questo complesso sono arenarie da medio-fini a medio-grossolane con alternanze di marne siltose, siltiti e marne

Dai dati di terreno e dall'esame delle carote dei sondaggi disponibili emerge che il complesso è caratterizzato da litotipi con un grado di cementazione abbastanza elevato; perciò si presuppone che la permeabilità sia prevalentemente legata a fenomeni di fratturazione, mentre la permeabilità per porosità può essere considerata irrilevante.

Il grafico riportato raccoglie i dati delle prove idrauliche eseguite direttamente all'interno del complesso che indicano per l'ammasso roccioso, al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche comprese tra  $10^{-7}$  e  $10^{-9}$  m/s. Numerosi dati, sulla cui attendibilità esistono tuttavia alcuni dubbi, indicano conducibilità idrauliche inferiori a  $1 \times 10^{-9}$  m/s. Questi ultimi sono probabilmente legati alla presenza di livelli a composizione marnoso-siltosa. È stata altresì inserita nel grafico una serie di dati che rappresentano la permeabilità dell'ammasso roccioso detensionato nei primi metri al di sotto della superficie (indicativamente da 2 fino a 10 m); tali dati mostrano conducibilità molto più elevate, comprese tra  $1 \times 10^{-5}$  e  $1 \times 10^{-6}$  m/s, legate ad un contesto misto di permeabilità per fratturazione e porosità.



**Figura 3-5. Grafico delle conducibilità idrauliche per la Formazione di Costa Aresaa (fC) e per le Arenarie di Serravalle (aS)**

Dall'analisi dei sondaggi e dal confronto con i dati di terreno sono state individuate delle zone di faglia ove sono state eseguite delle prove di tipo idraulico, che mostrano una conducibilità tra  $10^{-6}$  e  $10^{-8}$  m/s. Dalle osservazioni di terreno si può ipotizzare che lungo le faglie le permeabilità maggiori siano relative alle zone di danneggiamento, soprattutto se queste sono costituite da litotipi con una bassa percentuale di materiale limoso, mentre le zone di nucleo possono talvolta presentare un effetto di compartimentazione per lo sviluppo di rocce di faglia a granulometria fine e con componente limosa generalmente impermeabile. In ogni caso l'effetto compartimentante delle zone di faglia non dovrebbe essere particolarmente accentuato in questo complesso, dal momento che i livelli a granulometria fine costituiscono solo delle intercalazioni tra livelli arenacei maggiormente competenti.

### 3.5 Condizioni idrogeologiche attese in corrispondenza dell'opera

Data la permeabilità ridotta delle marne della formazione di Costa Aresaa, non si dovrebbero avere criticità particolari legate a venute d'acqua direttamente provenienti dal substrato prequaternario, in cui si prevedono condizioni di assenza di acqua o, al limite, di umidità.

Tuttavia, un aspetto potenzialmente critico è rappresentato dalla bassa copertura topografica al di sopra della galleria, in particolare tra l'inizio della WBS e la pk 27+610; in questo tratto, la copertura in marne sopra alla calotta è compresa tra 1 e 10 m; le marne sono in contatto con uno strato superficiale di depositi misti detritico-colluviali-alluvionali, che, pur non ospitando una falda di elevato spessore ed estesa arealmente, sono verosimilmente saturi per buona parte dell'anno.

La creazione, al contorno della galleria, di una zona di detensionamento dell'ammasso marnoso, legata allo scavo, potrebbe determinare un incremento sia dello stato di fratturazione, sia dell'apertura delle discontinuità preesistenti (stratificazione o giunti) e la conseguente creazione di

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00
	Foglio 21 di 73

un collegamento idraulico tra le marne e i depositi superficiali parzialmente saturi, in particolare nel tratto dove lo spessore in marne sopra alla volta è più ridotto.

Inoltre, la possibilità che la calotta del tunnel intercetti il limite coltre/substrato e che, quindi, la galleria entri parzialmente nei depositi superficiali, per variazioni della morfologia della loro superficie di appoggio basale, costituisce un ulteriore fattore di criticità dal punto di vista sia geologico, sia idrogeologico.

Manifestazioni idriche costituite da stillicidi diffusi e intensi e/o da venute concentrate, potenzialmente associate ad afflusso in galleria di materiale detritico sciolto, potrebbero quindi verificarsi, in assenza di interventi appropriati, soprattutto in corrispondenza del settore a minore copertura e dove i depositi detritici hanno spessore maggiore.

Nella restante parte della tratta considerata, con il progressivo aumento della copertura in marne sopra alla calotta, le manifestazioni idriche andranno progressivamente attenuandosi, dato il basso grado di conducibilità testimoniato dalle prove eseguite in sondaggio.

Il carico idraulico per la tratta in questione, sulla base delle misure eseguite nei piezometri installati nei sondaggi appare legato essenzialmente alla circolazione all'interno dei depositi detritico-colluviali superficiali, che colmano il fondo della piccola valle laterale di Cascina Radimero, attraversata dall'asse di linea.

In base ai dati di sondaggio si stima che il carico idraulico riferito alla quota dell'arco rovescio possa arrivare a 20 m ca. (10 m ca. dalla calotta). All'interno della formazione marnosa il carico idraulico è virtualmente assente, data la sua permeabilità molto bassa; in presenza di discontinuità idraulicamente conduttive che mettano in connessione la galleria con i depositi quaternari, il carico può essere stimato nell'ordine di 20-25 m.

In dettaglio, i carichi idraulici attesi sono:

- da 0 a 10 m, tra la pk 27+579.51 (inizio WBS) e la pk 27+610;
- da 10 a 30 m, , tra la pk 27+610 e la pk 27+668.60 (termine WBS)

Per quanto riguarda gli afflussi attesi in galleria, le portate massime transitorie stimate sono ipotizzate inferiori a 0.16 l/s/10 m, con un possibile aumento fino a 0.4 l/s/10 m in presenza di livelli meno cementati e/o fratturati.

Data la presenza di una copertura topografica molto bassa, si ipotizza la possibilità di afflussi elevati in presenza di eventuali settori detensionati generati dalla zona di plasticizzazione al contorno dello scavo. Non si escludono quindi portate localmente fino a 2 l/s/10 m, nel caso che si instauri una connessione idraulica significativa tra galleria e alluvioni quaternarie lungo la zona plastica al contorno del cavo, o nel caso in cui dovesse venire intercettata dallo scavo la superficie di appoggio basale dei depositi alluvionali.

Per quanto riguarda le interferenze con le risorse idriche, dalla relazione idrogeologica si evince che, data la distanza e la posizione dei pozzi censiti rispetto all'opera, è poco probabile un'interferenza significativa tra questa e le captazioni domestiche esistenti, a meno che non si

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 22 di 73</p>

instauri una comunicazione idraulica diffusa tra depositi quaternari e zona detensionata al contorno della galleria. Si ritiene peraltro di poter escludere la presenza nel substrato di una circolazione idrogeologica profonda.

### 3.6 Sintesi delle problematiche di scavo

Le problematiche di scavo saranno legate essenzialmente alle condizioni di stabilità a breve termine nei tratti a minore copertura e al potenziale innesco di fenomeni di subsidenza della superficie, con possibile ingresso di acqua in galleria proveniente dai depositi quaternari che colmano la vallecchia di Cascina Radimero.

I problemi di stabilità in calotta potrebbero ulteriormente aggravarsi qualora dovesse essere intercettata l'interfaccia tra substrato e depositi detritico-colluviali saturi.

I potenziali problemi di stabilità si accompagnano ad analoghe criticità dal punto di vista idrogeologico, determinate dagli stessi fenomeni sopra citati.

Per la fase costruttiva è quindi opportuno prevedere la presenza di una falda idrica all'interno dei depositi superficiali, che dovrebbe avere come base l'interfaccia con il substrato marnoso, o al limite con la base dello strato di alterazione delle marne stesse.

Gli scavi dovranno quindi essere drenati e/o impermeabilizzati per tutta la parte impostata nei terreni alluvionali e detritici e per i primi metri del substrato prequaternario più alterato. È da prevedere inoltre che nel periodo invernale la falda possa portarsi fino in prossimità della superficie topografica.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 23 di 73</p>

## 4 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA/GEOMECCANICA

### 4.1 Note generali

A livello generale, dal punto di vista dei criteri di caratterizzazione geotecnica, si distinguono tre tipologie di materiale:

- materiali a grana medio-fine);
- materiali a grana fine;
- rocce metamorfiche.

L'individuazione del tipo di materiale, e quindi la scelta del metodo di interpretazione, è fatta principalmente sulla base:

- della descrizione stratigrafica dei sondaggi;
- delle prove di laboratorio sui campioni di terreno e sulle carote di roccia.

Nei paragrafi che seguono sono pertanto illustrati nell'ordine :

- i criteri per la caratterizzazione dei materiali a grana medio-fine
- i criteri per la caratterizzazione dei materiali a grana fine
- i criteri per la caratterizzazione delle rocce metamorfiche

### 4.2 Materiali a grana medio-fine (sabbie localmente ghiaiose in matrice limosa)

In questa sede si intendono a grana medio-fine quei materiali caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori a  $\cong 40\%$ .

In conseguenza del fatto che in tali materiali risulta difficile 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 in sito e di classificazione di laboratorio è finalizzata a determinare principalmente le seguenti quantità:

- parametri di resistenza al taglio;
- parametri di deformabilità;
- coefficienti di permeabilità.



GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 24 di 73</span>

Si rileva che le correlazioni empiriche riportate nei paragrafi seguenti sono rigorosamente applicabili ove è ragionevole ritenere che le prove interpretate 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 sotto falda purché caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori a  $\cong$  35÷40%.

#### 4.2.1 Determinazione della densità relativa $D_r$ da prove SPT

##### In sabbia

In accordo a quanto indicato in Skempton (1986) la densità relativa  $D_r$  può essere correlata al valore NSPT con la seguente legge:

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

essendo:

- A, B = costanti empiriche  
 $\sigma_{vo}'$  = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova SPT (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $N_{SPT}$  = numero di colpi per 30 cm di infissione  
 $(K_o)_{nc}$  = 0,5 = coefficiente di spinta a riposo per terreni normalmente consolidati  
 $(k_o)_{sc}$  =  $0,5 \cdot (GSC)^{0.5}$  = coefficiente di spinta a riposo per terreni sovraconsolidati  
 GSC = grado di sovraconsolidazione  
 $D_r$  = densità relativa

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

**Tabella 4-1. Costanti empiriche A e B (Skempton, 1986)**

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



GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 25 di 73</span>

O ancora secondo la seguente correlazione:

- **$D_r(\%) = 21 \text{rad}q(N_{spt}/(s+0.7))$**  - Formula di Gibbs e Holtz, valida per terreni prevalentemente sabbiosi.

### **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.

Causa la presenza della ghiaia spesso vengono raggiunte condizioni di rifiuto che non necessariamente sono indice di elevati gradi di addensamento.

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.

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 tratto di 15 cm o nel 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.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 26 di 73</span>

#### 4.2.2 Angolo di resistenza al taglio

L'angolo di resistenza al taglio di picco  $\varphi'$  verrà determinato facendo riferimento ai seguenti approcci alternativi:

- correlazione di Schmertmann e Gibbs & Holts, 1957
- correlazione Peck Hansen et al., 1974

#### 4.2.3 Caratteristiche di deformabilità

##### **Moduli elastici iniziali**

I moduli iniziali di taglio ( $G_{o1}$ ) e di Young ( $E_{o1}$ ), corrispondenti alle pressioni efficaci geostatiche medie  $p_o'$ , possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_{o1} = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

$$E_{o1} = G_{o1} \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

$\gamma_t$  = peso di volume naturale del terreno in  $\text{kN/m}_3$

$\nu'$  = rapporto di Poisson del terreno =  $0,15 \div 0,20$

$V_s$  = velocità di propagazione delle onde di taglio in  $\text{m/sec}$ .

La velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  può essere ricavata direttamente da prove geofisiche "down hole" e "cross hole" o indirettamente, interpretando i risultati delle prove SPT.

I moduli iniziali di taglio ( $G_o$ ) e di Young ( $E_o$ ) iniziali, corrispondenti alle pressioni efficaci medie generiche  $p'$ , possono essere ricavati dalle seguenti espressioni:

$$G_o = G_{o1} \cdot \left( \frac{p'}{p_o'} \right)^{0.5} \quad (\text{kPa})$$

$$E_o = G_o \cdot 2 \cdot (1 + \nu') \quad (\text{kPa})$$

### **Go 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:

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

essendo:

$$C = 67,3$$

$z$  = profondità dal p.c. in metri

$f_A$  = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito

$f_G$  = coefficiente funzione della composizione granulometrica

$f_A$	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

**Tabella 4-2. 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

**Tabella 4-3. Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente  $f_G$  (funzione della composizione granulometrica del deposito)**

### **Moduli elastici "operativi"**

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
- 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  $\gamma$  indotto, tratte

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 28 di 73</span>

da Lo Presti (1989). In alternativa alle curve di degrado possono essere adottate le seguenti espressioni (Fahey, 1992 e Fahey & Carter, 1993):

$$\frac{E'}{E'_0} = \frac{1}{1 + 0.8 \cdot \left(\frac{\gamma}{\lambda_r}\right)}$$

$$\frac{E'}{E'_0} = 1 - 0.8 \cdot \frac{\tau}{\tau_{\max}}$$

o meglio (Byrne et al, 1990):

$$\frac{E'}{E'_0} = 1 - 0.8 \cdot \frac{\Delta\tau}{\Delta\tau_{\max}}$$

essendo:

$\gamma$  = deformazione di taglio corrente

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

$\tau_{\max}$  = tensione di taglio limite

$\tau$  = tensione di taglio corrente

$G_0$  = modulo di taglio iniziale

$\Delta\tau$  = variazione della tensione di taglio

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

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 fronti di scavo sostenuti con opere di sostegno tipo paratie (tirantate e non) i moduli di Young "operativi"  $E_{op}$  sono pari a circa  $(1/3 \div 1/5) \cdot E_0$ ; il problema è infatti complessivamente di scarico; inoltre i coefficienti di sicurezza nei confronti della stabilità imposti dalla normativa vigente sono tali per cui normalmente le deformazioni indotte risultano relativamente contenute, dell'ordine di  $1 \times 10^{-3} \div 5 \times 10^{-3}$ .
- 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:
  - in base alla normativa vigente tale tipo di opere è caratterizzato infatti da coefficienti di sicurezza nei confronti della rottura per capacità portante superiori a  $2.5 \div 3$ ;

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 29 di 73</span>

- gli spostamenti totali e differenziali ammissibili per l'opera sono molto contenuti (i cedimenti ammissibili sono infatti generalmente inferiori a  $0.01 \cdot B$ , essendo  $B$  la dimensione minore della fondazione).
- 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; 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) valgono le seguenti espressioni:

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

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

essendo:

$E_{25}$  = modulo di Young secante cui corrisponde un grado di mobilitazione della resistenza ultima pari al 25%;

$D_r$  = 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  $E_{25}$ .

### **4.3 Materiali a grana fine (limi e argille) saturi**

La caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana fine (percentuale di fine maggiore del 50%) è affidata sia all'interpretazione delle prove di laboratorio sia all'interpretazione delle prove in sito in accordo ai criteri descritti nei paragrafi successivi.

La classificazione dei terreni a grana fine verrà effettuata facendo riferimento ai risultati delle prove di laboratorio in termini di :

- fusi granulometrici;
- limiti di Atterberg (limite liquido e limite plastico);
- pesi di volume naturale e secco;
- grado di saturazione;
- contenuti d'acqua naturale;
- indice dei vuoti iniziale.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 30 di 73</span>

#### 4.3.1 Resistenza al taglio non drenata

La resistenza al taglio non drenata  $c_u$  di materiali saturi sotto falda verrà valutata facendo riferimento sia ai risultati delle prove di laboratorio sia all'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

Come noto la resistenza al taglio non drenata è funzione delle tensioni efficaci di consolidazione e del percorso di carico; in questa sede si farà riferimento a prove di laboratorio e a correlazioni empiriche per l'interpretazione delle prove SPT che forniscono valori di  $c_u$  corrispondenti a tensioni efficaci di consolidazione pari a quelle geostatiche.

#### Valutazione di $c_u$ da prove SPT

La resistenza al taglio non drenata di materiali saturi sotto falda, associabile a quella di prove triassiali di compressione e carico, consolidate alle tensioni efficaci geostatiche, verrà stimata adottando la correlazione empirica proposta da Stroud (1974) (vedi anche Clayton, 1995). In base a tale correlazione risulta quanto segue:

$$c_u \cong (5,0 \div 5,5) \cdot N_{SPT} \quad (\text{kPa})$$

#### 4.3.2 Parametri di resistenza al taglio in termini di sforzi efficaci

I parametri di resistenza di picco in termini di sforzi efficaci verranno determinati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio di taglio diretto (TD).

#### 4.3.3 Caratteristiche di deformabilità

##### Moduli elastici iniziali

I moduli iniziali di taglio ( $G_{o1}$ ) e di Young ( $E_{o1}$ ) iniziali, corrispondenti alle pressioni efficaci geostatiche medie  $p_o'$ , possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_{o1} = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

$$E_{o1} = G_{o1} \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

$\gamma_t$  = peso di volume naturale del terreno in kN/m<sup>3</sup>

$\nu'$  = rapporto di Poisson del terreno = 0,15 ÷ 0,20

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

La velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  può essere ricavata direttamente dalle prove geofisiche "down hole" e "cross hole".

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 31 di 73</span>

In alternativa i moduli di taglio iniziali  $G_{01}$  possono essere stimati pari a 1000 volte la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  (vedi ad esempio Simpson et al., 1979).

I moduli iniziali di taglio ( $G_o$ ) e di Young ( $E_o$ ) iniziali, corrispondenti alle pressioni efficaci medie generiche  $p'$ , possono essere ricavati dalle seguenti espressioni:

$$G_o = G_{o1} \cdot \left( \frac{p'}{p_o} \right)^{0.5} \quad (\text{kPa})$$

$$E_o = G_o \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

### Moduli elastici “operativi” in condizioni drenate

Il comportamento dei terreni a grana fine risulta non lineare; i moduli elastici risultano infatti funzione sia della pressione efficace media corrente 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.

In generale saranno seguite le seguenti regole:

1 - Caso di opere di sostegno e di fondazione su terreni sovraconsolidati meccanicamente con percorsi di sollecitazione indotti dalla costruzione dell'opera collocati all'interno della superficie di plasticizzazione primaria del materiale.

In tali situazioni le deformazioni plastiche indotte dalle variazioni tensionali sono relativamente contenute e l'utilizzo di modelli costitutivi elastici o elastici non lineari può essere ritenuto accettabile.

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

- I moduli elastici iniziali
- Curve di degrado del modulo in funzione del livello di deformazione o di spostamento indotto. Tipiche curve di degrado del modulo di taglio  $G$  in funzione del livello di deformazione di taglio  $\gamma$  indotto, proposte da Vucetic & Dobry (1991). In alternativa alle curve di degrado possono essere adottate le espressioni (leggi iperboliche) riportate nel caso dei materiali a grana grossa.

Va tuttavia rilevato che la procedura suddetta, associata all'utilizzo delle curve di degrado, risulta rigorosamente applicabile in problemi di scarico e/o di scarico e ricarica tensionale; nel caso di problemi di “primo carico”, caratterizzati da incrementi di tensione rispetto alla condizione geostatica potrebbe condurre ad una sottostima degli spostamenti.

Nel caso in cui la progettazione faccia ricorso a metodi di calcolo elastico-lineari o elastico-lineari-plastici, e ove non diversamente specificato, i moduli di Young “operativi”  $E_{op}$  saranno convenzionalmente assunti pari a:

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 32 di 73</p>

- $1/5 \cdot E_o$  o  $(400 \div 500) \cdot c_u$  nel caso di problemi di scarico e/o di scarico-ricarico (esempio: fronti di scavo sostenuti con opere di sostegno tipo paratie tirantate e non);
- $(150 \div 200) \cdot c_u$  o quanto desumibile dai risultati delle prove edometriche nel caso di problemi di “primo carico” (esempio fondazioni dirette, profonde e rilevati).

2 - Caso di opere di fondazione con percorsi di sollecitazione indotti dalla costruzione dell’opera collocati all’esterno della superficie di plasticizzazione del terreno.

Nelle analisi si farà necessariamente riferimento a modelli costitutivi elasto-plastici ed ai risultati delle prove edometriche ad incremento di carico (ED-IL) in termini di coefficienti di compressione (Cc e Cr).

#### 4.4 Formazioni rocciose

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

In particolare:

- 1 Il parametro **RMR** “Rock Mass Rating” sarà stimato sulla base di quanto descritto nel §4.4.1; il parametro **GSI** (Geological Strength Index) verrà valutato con la seguente espressione (vedi Sjoberg, 1997):

$$GSI = RMR_{89} - 5$$

- 2 L’involuppo delle resistenze dell’ammasso roccioso in condizioni “undisturbed” o “disturbed” verrà valutato sulla base di quanto riportato in Brown & Hoek (1988), Hoek & Brown (1988), Hoek, Kaiser & Bawden (1995), Hoek et al (2002) (vedi il § 4.4.2)
- 3 Le caratteristiche di deformabilità dell’ammasso roccioso verranno stimate sulla base di quanto riportato nel §.4.4.3.



#### 4.4.1 Valutazione del parametro RMR'89

Per ogni litotipo il parametro RMR'89 viene stimato in accordo a quanto proposto in Bieniawski (1989), ovvero come somma dei seguenti 8 indici (I1→I8):

- Resistenza alla compressione semplice della roccia intatta (I1)

Resistenza alla compressione semplice $\sigma_c$ (MPa)	I1
> 250	15
100÷250	12
50÷100	7
25÷50	4
5÷25	2
1÷5	1
< 1	0

- Qualità della roccia RQD (I2)

RQD (%)	I2
90÷100	20
75÷90	17
50÷75	13
25÷50	8
< 25	3

- Spaziatura delle discontinuità (I3)

S	I3
> 2 m	20
0.6 m÷2 m	15
200 mm÷600 mm	10
60 mm÷200 mm	8
< 60 mm	4

- Lunghezza delle discontinuità (I4)

L	I4
< 1 m	6
1 m÷3 m	4
3 m÷10 m	2
10 m÷20 m	1
> 20 m	0

- Apertura delle discontinuità (I5)

H	I5
0 mm	6
> 0.1 mm	5
0.1 mm÷1 mm	4
1 mm÷5 mm	1
> 5 mm	0

- Condizioni delle superfici di discontinuità in termini di scabrezza (I6)

Descrizione	I6
Molto rugose	6
Rugose	5
Poco rugose	3
Ondulate	1
Lisce	0

- Caratteristiche del riempimento delle discontinuità (I7)

Descrizione – spessore	I7
Assente	6
Compatto – < 5 mm	4
Compatto – > 5 mm	2
Tenero – < 5 mm	2
Tenero – > 5 mm	0

- Condizioni delle superfici di discontinuità in termini di alterazione (I8)

Descrizione	I8
Non alterate	6
Poco alterate	4
Alterate	2
Molto alterate	2
Decomposte	0

Tendenzialmente nella valutazione di RMR'89:

- Non si terrà conto dell'indice che descrive qualitativamente l'orientamento più o meno favorevole delle discontinuità (incluse quelle dovute alla stratificazione) rispetto alle opere da realizzare; ove rilevante/possibile tale aspetto verrà messo in conto nella definizione del modello geometrico da utilizzare nelle analisi di progetto.
- L'indice legato alla presenza dell'acqua verrà assunto pari a quello associabili a condizioni "dry". Gli effetti della presenza dell'acqua verranno messi in conto nella definizione del modello geotecnico da utilizzare nelle analisi di progetto.

#### 4.4.2 Criteri di rottura

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

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

essendo:

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}}$$

D = 0 per "undisturbed rock masses"

D = 0.3 per "disturbed rock masses" – situazione associata alla condizione residua dell'ammasso.

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

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 36 di 73</span>

GSI = RMR'89 –5

RMR'89 = vedi il paragrafo §4.4.1

$m_i$  = coefficiente relativo alla roccia intatta

$\sigma_1'$  = tensione principale efficace maggiore

$\sigma_3'$  = tensione principale efficace minore

$\sigma_c$  = resistenza alla compressione semplice della roccia intatta.

Nell'applicazione del criterio di rottura sopra riportato valgono le seguenti precisazioni:

- 1 In generale, per ogni litotipo il coefficiente  $m_i$  verrà valutato sulla base dei risultati di prove triassiali su provini di roccia intatta e di un criterio di rottura analogo a quello dell'ammasso roccioso, con GSI = 100. In mancanza di dati sperimentali si farà riferimento a quanto riportato ad una serie di valori di letteratura come riferimento (Tabella 4-4).
- 2 L'applicazione di criteri di rottura analoghi per la roccia intatta e per l'ammasso roccioso, ove l'unica differenza è rappresentata dai valori di GSI, implica che, per  $m_i = 10$ , il rapporto tra la resistenza a trazione e la resistenza a compressione semplice della roccia intatta, è pari a  $\cong 1/m_i$ .
- 3 In presenza di ammassi rocciosi caratterizzati da marcata eterogeneità, ovvero da alternanza di strati competenti e di strati con caratteristiche geotecniche più scadenti, il valore di GSI valutato sulla base di RMR'89 verrà messo a confronto anche con quello stimabile sulla base della carta proposta da Hoek et al. (1998) e da Marinou & Hoek (2000) per formazioni flyshoidi (prospetto 8.5) Alla resistenza alla compressione semplice  $\sigma_c$  ed al coefficiente  $m_i$  della roccia intatta verranno inoltre assegnati valori "pesati" in base a quanto riportato nella tab.8.6.
- 4 In accordo a Sjöberg (1997), ai termini "undisturbed" e "disturbed" verrà attribuito un significato legato anche alle modalità di utilizzo dei parametri di resistenza nelle analisi ingegneristiche; in particolare:
  - Il criterio di rottura relativo alle "undisturbed rock masses" rappresenta la resistenza di picco dell'ammasso roccioso quando esso si trova in condizioni di pre-rottura.
  - Il criterio di rottura relativo alle "disturbed rock masses" rappresenta la resistenza media disponibile lungo superfici di scivolamento critiche in condizioni di incipiente rottura; ricorrendo a terminologie proprie della meccanica dei terreni tale resistenza può essere denominata "softened".

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 37 di 73</p>

Sotto tali presupposti, nei casi rappresentati da situazioni non caratterizzate da dissesti progressi o in atto, si opererà come segue:

- In analisi di stabilità o di interazione terreno-struttura eseguite con metodi ove non è possibile riprodurre il comportamento “strain softening” si farà riferimento ai parametri dell’ammasso relativi alle condizioni “disturbed”;
- In analisi di stabilità o di interazione terreno-struttura condotte con metodi in grado di riprodurre la caduta di resistenza tra condizioni di picco e condizioni “softened” verranno presi come riferimento sia il criterio di rottura relativo alle condizioni “undisturbed” che quello relativo alle condizioni “disturbed”. Verranno inoltre ipotizzate diverse leggi di degrado dei parametri di resistenza, fra cui quella che contempla una repentina caduta di resistenza dalle condizioni di picco a quelle “softened”.

5 I criteri di rottura espressi in termini di tensioni efficaci principali  $\sigma_1'$  e  $\sigma_3'$  possono essere trasformati in termini di tensioni di taglio  $\tau$  e di tensioni efficaci normali alla superficie di rottura  $\sigma_n'$ . A tale proposito valgono le seguenti equazioni:

$$\frac{\delta\sigma_1'}{\delta\sigma_3'} = 1 + a \cdot m_b \cdot \left( \frac{m_b \cdot \sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^{a-1}$$

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

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

6 L’involuppo di rottura in termini di tensioni di taglio  $\tau$  e di tensioni efficaci normali alla superficie di rottura  $\sigma_n'$  verrà interrotto per valori di  $\sigma_n'$  negativi (trazione) inferiori a 0 kPa; in corrispondenza di valori di  $\sigma_n'$  negativi (trazione) le resistenze al taglio saranno assunte pari a 0 kPa (“tension cut off”).



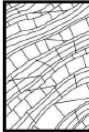

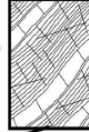
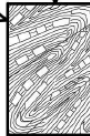
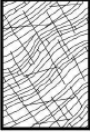

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
SEDIMENTARY	Clastic		Conglomerates* (21 ± 3)	Sandstones 17 ± 4	Siltstones 7 ± 2	Claystones 4 ± 2
			Breccias (19 ± 5)		Greywackes (18 ± 3)	Shales (6 ± 2) Marls (7 ± 2)
	Non-Clastic	Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestones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

\* Conglomerates and breccias may present a wide range of  $m_i$  values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation, so they may range from values similar to sandstone to values used for fine grained sediments.

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

Tabella 4-4 Valori di riferimento della costante  $m_i$  della roccia intatta in base al tipo di roccia (i valori indicati tra parentesi sono stimati) (Hoek, Kaiser e Bawden, 1995)



GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos.P and Hoek. E, 2000)		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)				
From a description of the lithology, structure and surface conditions (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. Locate the position in the box that corresponds to the condition of the discontinuities and estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than giving GSI = 35. Note that the Hoek-Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.		VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD - Rough, slightly weathered surfaces	FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
COMPOSITION AND STRUCTURE						
	<b>A. Thick bedded, very blocky sandstone</b> The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.	70 60	A			
	<b>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</b>		50 40	B	C	D
	<b>C. Sandstone and siltstone in similar amounts</b>					
	<b>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</b>					
	<b>E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers</b>					
C,D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.						
	<b>F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</b>			30	F	
	<b>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</b>					
	<b>H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.</b>					10

→ : Means deformation after tectonic disturbance

Flysch type see Table 4.	Proportions of values for each rock type to be included in rock mass property determination
A and B	Use values for sandstone beds
C	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
D	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
E	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
F	Reduce sandstone values by 60% and use full values for siltstone
G	Use values for siltstone or shale
H	Use values for siltstone or shale



**Tabella 4-5 Prospetto per la Classificazione Geomeccanica (GSI) degli ammassi rocciosi eterogenei (Flysch) secondo Marinos-Hoek (2000).**

Tipo di ammasso	Criterio di valutazione di $\sigma_c$ e di $m_i$
A e B	Valori relativi al litotipo più competente
C	Valori del litotipo più competente ridotti del 20% e pieni valori del litotipo di caratteristiche più scadenti
D e E	Valori del litotipo più competente ridotti del 40% e pieni valori del litotipo di caratteristiche più scadenti
F	Valori del litotipo più competente ridotti del 60% e pieni valori del litotipo di caratteristiche più scadenti
G	Valori del litotipo di caratteristiche più scadenti
H	Valori del litotipo di caratteristiche più scadenti

**Tabella 4-6: Ammassi rocciosi eterogenei – Criteri di valutazione di  $\sigma_c$  e di  $m_i$  (Hoek et al.,1998; Marinos & Hoek, 2000)**

#### 4.4.3 Caratteristiche di deformabilità

##### Moduli iniziali

I moduli iniziali di taglio ( $G_{o1}$ ) e di Young ( $E_{o1}$ ) iniziali, corrispondenti alle pressioni efficaci geostatiche medie  $p_o'$ , possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  utilizzando le seguenti equazioni:

$$G_{o1} = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

$$E_{o1} = G_{o1} \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

$\gamma_t$  = peso di volume naturale del terreno in kN/m<sup>3</sup>

$\nu'$  = rapporto di Poisson del terreno = 0,15 ÷ 0,20

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

La velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  può essere ricavata direttamente dalle prove geofisiche down hole.

I moduli iniziali di taglio ( $G_o$ ) e di Young ( $E_o$ ) iniziali, corrispondenti alle pressioni efficaci medie generiche  $p'$ , possono essere ricavati dalle seguenti espressioni:

$$G_o = G_{o1} \cdot \left( \frac{p'}{p_o'} \right)^{0.3} \quad (\text{kPa})$$

$$E_o = G_o \cdot 2 \cdot (1 + \nu') \quad (\text{kPa})$$



### Moduli "operativi"

I moduli di Young "operativi"  $E_{op}$  dell'ammasso roccioso, utilizzabili in analisi con modelli costitutivi elastico-lineari o elastico-lineari-plastici, possono essere stimati sulla base delle seguente espressioni (Hoek et Diederichs, 2006) in MPa:

$$E_{op} = 100000 \cdot \left(1 - \frac{D}{2}\right) \frac{1}{1 + e^{(75+25D-GSI)/11}}$$

con  $D$  = coefficiente di disturbo, variabile tra 0 e 1.

Oppure

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

dove  $E_i$  è il modulo di deformazione della roccia intatta pari al prodotto tra il valore di MR e la resistenza a compressione monoassiale.

Il modulo elastico d'ammasso in condizioni residue è determinato secondo l'espressione di cui sopra, assumendo per il fattore di disturbo  $D$  il valore 0.3. I moduli valutati con le espressioni sopra indicate si intenderanno riferiti alle tensioni efficaci geostatiche; quelli relativi alle tensioni efficaci correnti verranno scalati utilizzando le stesse espressioni indicate per i moduli iniziali.

Per quanto riguarda i parametri operativi ricavabili dalle onde sismiche, in base a quanto indicato nel grafico sotto riportato, considerando una deformazione  $\gamma_s = 1\%$  tipico per le gallerie, si ottiene un fattore riduttivo compreso tra 1/10-1/5.

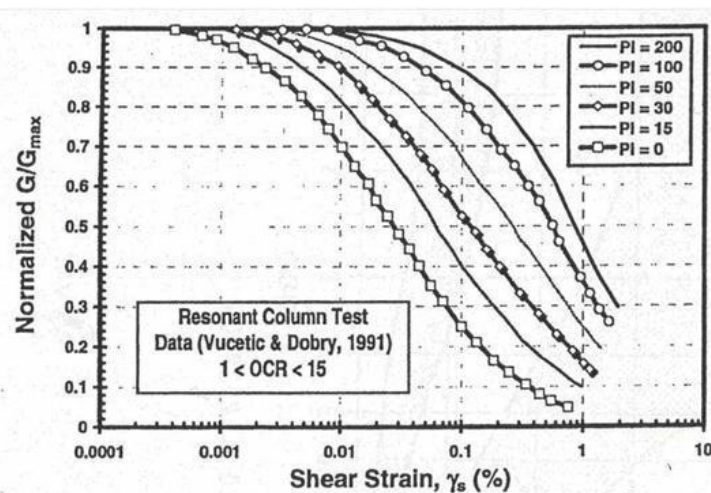


Figura 4-1 Curve di decadimento secondo Vucetic e Dobry, 1991

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 42 di 73</p>

## 5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA – GEOMECCANICA DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI INTERAGENTI CON L'OPERA

### 5.1 Note generali

Oggetto del presente capitolo è la caratterizzazione geotecnica-geomeccanica delle principali formazioni interagenti con l'opera in esame.

Per la descrizione geotecnica dei terreni interagenti con le opere in esame lungo il tracciato si sono presi a riferimento tutti i dati della campagna di indagine geognostica riportati in Tabella 5-1. In particolare sono stati presi in esame i risultati delle indagini riguardanti tutti i dati in possesso sulle formazioni in esame, per poi particolarizzare la caratterizzazione focalizzandosi sui sondaggi eseguiti nella sola area di progetto. Si riportano di seguito il profilo stratigrafico della zona di interesse e la pianta con l'ubicazione delle indagini, mentre al §5.2 sono descritti i sondaggi più vicini all'area in oggetto.

Come descritto in precedenza, il sottosuolo nella zona di progetto è composto da un substrato marnoso (Formazione di Costa Areasa), ricoperto da un deposito detritico-colluviale lungo il pendio.

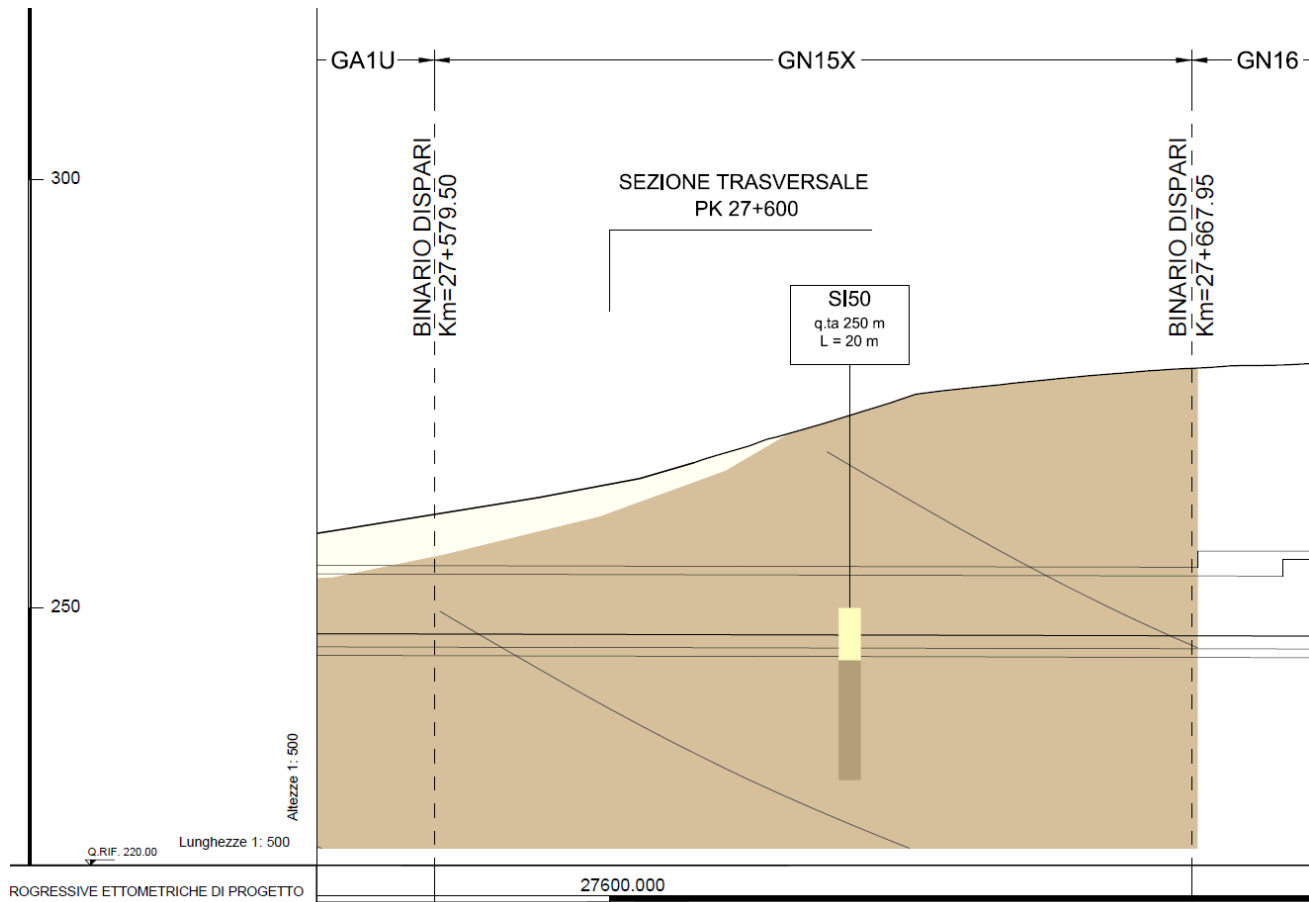
Nella zona di interesse lo spessore dei depositi, presente sul substrato roccioso e visibile nei sondaggi SI50, SLI13 e SLI14 presenta uno spessore variabile fino a circa 8 m, ed è principalmente formata da terreno torboso di ricoprimento e limo, generalmente sabbioso/argilloso.


Il substrato è composto dalle Marne di Costa Areasa e presenta una prima fascia alterata, con caratteristiche meccaniche più scadenti, per poi diventare più compatto e strutturato. In particolare, si può considerare un miglioramento delle caratteristiche della roccia dai 15÷20 m di profondità da piano campagna.


La determinazione della posizione e della potenza degli strati lungo la tratta è stata valutata correlando i sondaggi stratigrafici con i risultati delle prove geofisiche, per le quali si rimanda al §5.2.2.

Le unità geotecniche interessate dall'opera in esame sono pertanto distinte in:


- Unità L/S (deposito detritico-colluviale): deposito in prevalenza sabbioso/limoso; unità geotecnica di tipo incoerente.
- Unità FC (Formazione di Costa Areasa): substrato marnoso, inizialmente alterato.

**LEGENDA****DEPOSITI QUATERNARI**

 Coltre detritico-colluviale (c).

 Depositi alluvionali attuali e recenti indifferenziati (fi), localmente interdigitati, al piede dei versanti, con depositi detritico-alluvionali.  
*Limi sabbiosi e sabbioso-argillosi con ciottoli.*


**BASAMENTO PREQUATERNARIO****Bacino Terzlarlo Piemontese**

 Formazione di Costa Areea (fC) (Burdigaliano-Langhiano).  
*Alternanze regolari di strati torbiditici pelitico-arenacei con prevalenza della frazione pelitica (spessore medio 1,5 m) e di marne calcaree, debolmente siltose, in strati di spessore centimetrico-decimetrico (probabili depositi di piana sottomarina).*

**Altri simboli**

 Limiti litostratigrafici.

 Traccia della stratificazione.  
*(nota: la sezione ha un rapporto di scala verticale/orizzontale 2/1; la giacitura della stratificazione appare quindi più inclinata del valore reale)*

 Fascia di alterazione/fratturazione superficiale, all'interfaccia substrato-copertura.

**Figura 5-1 – Stralcio del profilo stratigrafico**

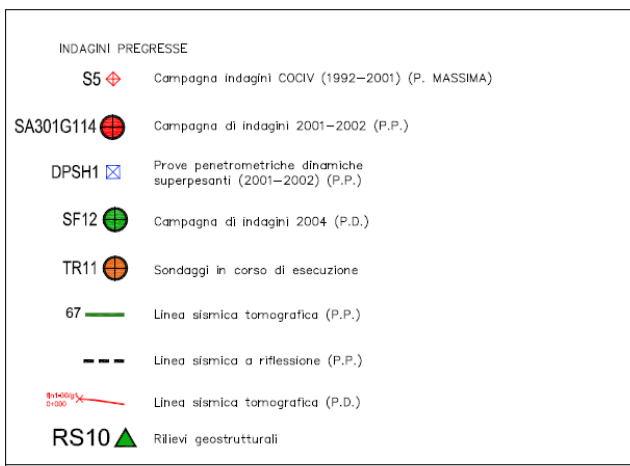
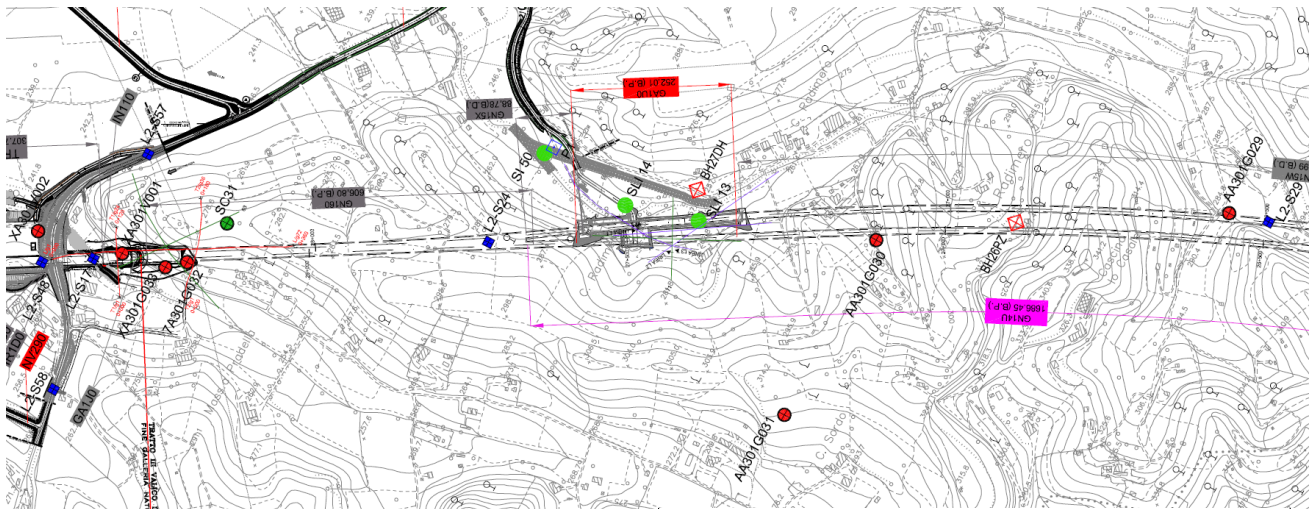


Figura 5-2 – Stralcio planimetria indagini

FASE	SONDAGGI	PROVE DI LABORATORIO		PROVE DI LABORATORIO ROCCE		PROVE IN SITO		
		TERRE	ROCCE	Prop. fisiche	Compress. monoassiale	NSPT	DILATOM.	PERMEABILITA'
PP	XA301V001			X	X			X
PP	XA301V002			X	X			X
PP	7A301G032			X	X			
PP	AA301G029			X	X			
PP	AA301G030			X	X			
PP	AA301G031			X	X			
PP	SA301G028			X	X			
PP	XA301G033			X	X			
PD	SC31					X	X	X
PE	SLI13			X	X	X	X	X
PE	SLI14			X	X		X	X
PE	SI50			X	X			

Tabella 5-1 – Indagini eseguite nelle diverse fasi progettuali sulle marne di Costa Aresia

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00
	Foglio 45 di 73

## 5.2 Indagini geognostiche

I sondaggi al momento disponibili nel settore di studio e più vicini alla WBS in esame sono rappresentati dai fori eseguiti nelle campagne di indagini del Progetto Preliminare ed Esecutivo:

- AA301G031 / BH27bisPZ (PP)
- AA301G030 / BH26bisPZ (PP)
- AA301G029 / BH25bisPZ (PP)
- SA301G028 / BH25 (PP)
- SLI13 (PE)
- SLI14 (PE)
- SI50 (PE)

Nell'ambito della campagna di indagini del Progetto Definitivo è stato inoltre realizzato il sondaggio SC31, ubicato più a NE, presso il binario dispari ma non esattamente in asse, intorno alla pk 28+140.

Oltre ai dati dei sondaggi, sono inoltre disponibili alcune linee sismiche realizzate per il PE (TreEsse, 2012), che interessano la WBS in oggetto e la zona del Pozzo Fresa Radimero (GA1U).

Si propone nei paragrafi che seguono una breve descrizione delle attività geognostiche condotte unitamente alla presentazione sintetica dei profili litostratigrafici rinvenuti.

### 5.2.1 Descrizione dei sondaggi

#### AA301G031 / BH27bisPZ - PP

Località: C. Sordo, 295 m a WSW dell'asse di linea (zona pozzo Radimero), pk<sub>dispari</sub> 27+260 ca. (perpendicolarmente al tracciato).

Anno: 2002; lunghezza: 55 m, interamente carotato.

Unità attraversata: formazione di Costa Areasa.

- da 0 a 7.3 m: terreno vegetale limoso-sabbioso, quindi limi sabbiosi e argille limose ad elementi lapidei marnosi e arenacei.
- Da 7.3 m a 55 m (fondo foro): marne ± arenacee grigie, compatte e poco fratturate, senza tracce di circolazione d'acqua in frattura.

Le tre prove Lugeon eseguite negli intervalli 16÷20 m, 21÷25 m e 30÷35 m (Tabella 5-2) sono state interrotte per il mancato assorbimento di acqua da parte della roccia; l'ammasso marnoso risulta quindi caratterizzato da bassissima permeabilità.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00
	Foglio 46 di 73

### AA301G030 / BH26bisPZ - PP

Località: C. Radimero, 28 m a SW dell'asse di linea, pk<sub>dispari</sub> 27+120 ca.

Anno: 2002; lunghezza: 70 m, interamente carotato.

Unità attraversata: formazione di Costa Areaa.

- da 0 a 3.7 m: terreno vegetale limoso-sabbioso, quindi limi sabbiosi marroni (tracce di circolazione d'acqua).
- Da 3.7 a 9 m: argilla limosa grigia con limo sabbioso, inglobante organici; seguono argille marnose grigie molto alterate (cappellaccio)
- Da 9 a 70 m (fondo foro): marne ± arenacee grigie, compatte e poco fratturate, senza tracce di circolazione d'acqua in frattura.

Sono state eseguite tre prove Lugeon negli intervalli 41÷46 m, 51.5÷56.5 m e 61÷66 m (Tabella 5-2). La prova n° 1 (41÷46 m) è stata interrotta per mancato assorbimento d'acqua. Dall'interpretazione dei risultati delle prove n° 2 (51.5÷56.5 m) e n° 3 (61÷66 m) risultano valori di permeabilità di 5,5E-9 e 2,4E-8 m/s rispettivamente. Il grado di permeabilità determinato dalla prove Lugeon in questo sondaggio varia quindi da basso a molto basso.

### AA301G029 / BH25bisPZ - PP

Località: C. Lo Casale, 26 m a ENE dell'asse di linea, pk<sub>dispari</sub> 26+570 ca.

Anno: 2002; lunghezza: 50 m, interamente carotato.

Unità attraversata: formazione di Costa Areaa.

- da 0 a 9.5 m: terreno vegetale limoso-sabbioso, quindi limi sabbiosi e argillosi marroni e argille limose marroni e grigie (tracce di circolazione d'acqua).
- Da 9.5 a 50 m (fondo foro): marne ± arenacee grigie, compatte e poco fratturate, senza tracce di circolazione d'acqua in frattura.

Sono state eseguite tre prove Lugeon negli intervalli 9.5÷12.6 m, 14÷19 m e 31.7÷36 m (Tabella 5-2). Le prove n° 2 e 3 sono state interrotte per mancanza di assorbimento. L'interpretazione dei risultati della prova n° 1 (9.5÷12.6 m), eseguita al probabile passaggio tra il substrato alterato e quello sano, indica un valore di permeabilità pari a 2,3E-6 m/s (grado medio).

### SA301G028 / BH25 - PP

Località: Pratolungo, 230 m a WSW dell'asse di linea, pk<sub>dispari</sub> 25+800 ca.

Anno: 2001; lunghezza: 70 m, interamente carotato.

Unità attraversata: formazione di Costa Areaa.

- da 0 a 1.2 m: substrato marnoso alterato e fratturato, con tracce di ossidazione e circolazione d'acqua.
- Da 1.2 a 8 m: marne ± arenacee grigie, fratturate, senza tracce di circolazione d'acqua.



- Da 8 a 70 m (fondo foro): marne  $\pm$  arenacee grigie, compatte e poco fratturate, senza tracce di circolazione d'acqua in frattura.

Le quattro prove Lugeon eseguite negli intervalli 36÷40 m, 45÷49 m, 53÷56.85 m e 62÷66 m (Tabella 5-2) sono state interrotte per il mancato assorbimento di acqua da parte della roccia; l'ammasso marnoso risulta quindi caratterizzato da bassissima permeabilità.

### SC31 - PD

Dal punto di vista stratigrafico, il sondaggio SC31 ha attraversato terreni di tipo granulare limoso-argilloso-sabbiosi, localmente con frammenti litoidi, riferibili alla coltre detritica e/o allo strato superficiale di basamento alterato, fino a 8.70 m dal p.c., quindi i litotipi marnosi della formazione di Costa Areasa fino a fondo foro.

La falda misurata nell'SC31 durante la perforazione (fine agosto 2004) si è attestata intorno a 5,5 m a metà perforazione e a 15,2 m a termine perforazione, a riprova della poca quantità di acqua presente nel foro e della scarsa o nulla alimentazione proveniente dai depositi superficiali.

Sondaggio	Unità	Test di permeabilità Lugeon con valore di K da interpretazione				
		<i>n.a.: nessun assorbimento</i>				
		1	2	3	4	5
AA301G031	Costa Areasa	16÷20	21÷25	30÷35	-	-
		n.a.	n.a.	n.a.	-	-
AA301G030	Costa Areasa	41÷46	51.5÷56.5	61÷66	-	-
		n.a.	5,5E-09	2,4E-08	-	-
AA301G029	Costa Areasa	9.5÷12.6	14÷19	31.7÷36	-	-
		2,3E-06	n.a.	n.a.	-	-
SA301G028	Costa Areasa	36÷40	45÷49	53÷56.85	62÷66	-
		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	-

**Tabella 5-2 – Riepilogo dei test di permeabilità Lugeon eseguiti nei fori di sondaggio del Progetto Preliminare (2001-2002).**

### SLI13 - PE

Località: C. Radimero, in asse al binario dispari, pk 27+398.

Anno: 2012; lunghezza: 40 m, interamente carotato.

Unità attraversata: formazione di Costa Areasa.

- da 0 a 6 m: depositi detritico-colluviali costituiti da limi argillosi
- da 6 a 8 m: substrato marnoso alterato
- da 8 a 40 m: formazione di Costa Areasa, costituita da marne e siltiti a consistenza litoide, dure e compatte, poco fratturate (RQD > 80%) tranne che nei primi 4,5 m.

La profondità della falda misurata in corso di perforazione nell'SLI13 oscilla tra -4 e -5 m. Dati piezometrici successivi indicano la presenza di una falda a 2 m circa di profondità dal piano

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 48 di 73</span>

campagna. Le prove Lugeon effettuate in sondaggio forniscono una conducibilità idraulica dell'ordine di  $10^{-8}$  m/s (Tabella 5-3).

SLI13	Costa Areama	12.5÷15.5	-	-	-	-
		<b>5.6E-08</b>	-	-	-	-
SLI14	Costa Areama	12.3÷17.2	28,4-33,4	-	-	-
		<b>1,02E-07</b>	<b>2,34E-07</b>	-	-	-
SC31	Costa Areama	24÷30	34÷40	-	-	-
		<b>2.0E-07</b>	<b>2.1E-07</b>	-	-	-

**Tabella 5-3 – Riepilogo dei test di permeabilità Lugeon eseguiti nei fori di sondaggio del Progetto Definitivo ed Esecutivo (2012).**

### SLI14 - PE

Località: C. Radimero, 40 m ca. a NE dall'asse del binario dispari,  $pk_{\text{dispari}}$  27+512.

Anno: 2012; lunghezza: 40 m, interamente carotato.

Unità attraversata: formazione di Costa Areama.

- da 0 a 6,8 m: depositi detritico-colluviali costituiti da limi sabbioso-argillosi
- da 6,8 a 9 m: substrato marnoso alterato
- da 9 a 40 m formazione di Costa Areama, costituita da marne e siltiti a consistenza litoide, compatte e poco fratturate, con RQD sempre superiore a 70% a partire dalla profondità di 10 m.

La falda nell'SLI14 risulta assente alla data della perforazione, dato che appare in contrasto con l'indicazione del foro SLI13, poco distante, dove, sempre in fase di realizzazione, è stata misurata una falda a -5 m dal p.c.

A questi dati, si aggiungono le informazioni delle ultime letture eseguite nei piezometri SLI13 e SLI14 in data 13/12/2012 e 15/01/2013, riportate in Tabella 5-4. Non sono disponibili ulteriori letture piezometriche per il sondaggio SC31.

Le prove Lugeon effettuate in sondaggio forniscono per le marne dell'SLI14 una conducibilità idraulica dell'ordine di  $10^{-8}$  m/s (Tabella 5-3).

	13/12/2012	15/01/2013
SLI13	-2,2	-2,24
SLI14	P.C.	P.C.

**Tabella 5-4 – Letture recenti effettuate nei piezometri SLI13 e SLI14.**

### SI50 - PE

Località: C. Radimero, 130 m ca. a NE dall'asse del binario dispari,  $pk_{\text{dispari}}$  27+634.



GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00 <span style="float: right;">Foglio 49 di 73</span>

Anno: 2012; lunghezza: 20 m, interamente carotato. Nel foro è stato installato un piezometro Ø 2" a tubo aperto.

Unità attraversata: formazione di Costa Areasa.

- da 0 a 1.2 m: coltre detritico-colluviale + terreno vegetale
- da 1.2 a 4.0 m: limo argilloso da ocre a marrone chiaro e scuro (depositi detritico-alluvionali), con inclusi millimetrici (1-2 mm) di colore bianco, verdastro e rossastro (noduli carbonatici); la marcata colorazione bruna indica una certa alterazione per ossidazione legata alla presenza, sporadica o costante, di umidità;
- da 4,0 a 6,25 m: limo argilloso e/o argilla debolmente marnosa da grigio chiaro a marrone, debolmente umida, molto consistente; tracce di ossidazione sporadiche, indicano una circolazione d'acqua più limitata e localizzata, dovuta anche alla bassa permeabilità del sedimento;
- da 6.2 a 20 m: formazione di Costa Areasa, costituita da marne di colore grigio-biancastro e grigio, con alterazione debole o assente e basso grado di fratturazione (RDQ mai inferiore a 30-40%, localmente anche molto buono). Localmente è visibile una sottile stratificazione. Sono pressoché assenti tracce di ossidazione riferibili ad alterazione per circolazione di acqua, il che conferma la sostanziale impermeabilità del substrato marnoso.

### 5.2.2 Indagini geofisiche e ipotesi di stratigrafia

Nell'ambito delle indagini per il PE, sono state realizzate da TreEsse (2012) tre sezioni sismiche a rifrazione in corrispondenza del Pozzo Fresa di Cascina Radimero (GA1U) e della WBS in esame (Figura 5-3) le sezioni hanno messo in evidenza la presenza di una coltre superficiale di natura detritico-colluviale caratterizzata da basse velocità delle onde P ( $V_P < 1200$  m/s), per uno spessore di alcuni metri dalla superficie (Figura 5-4).

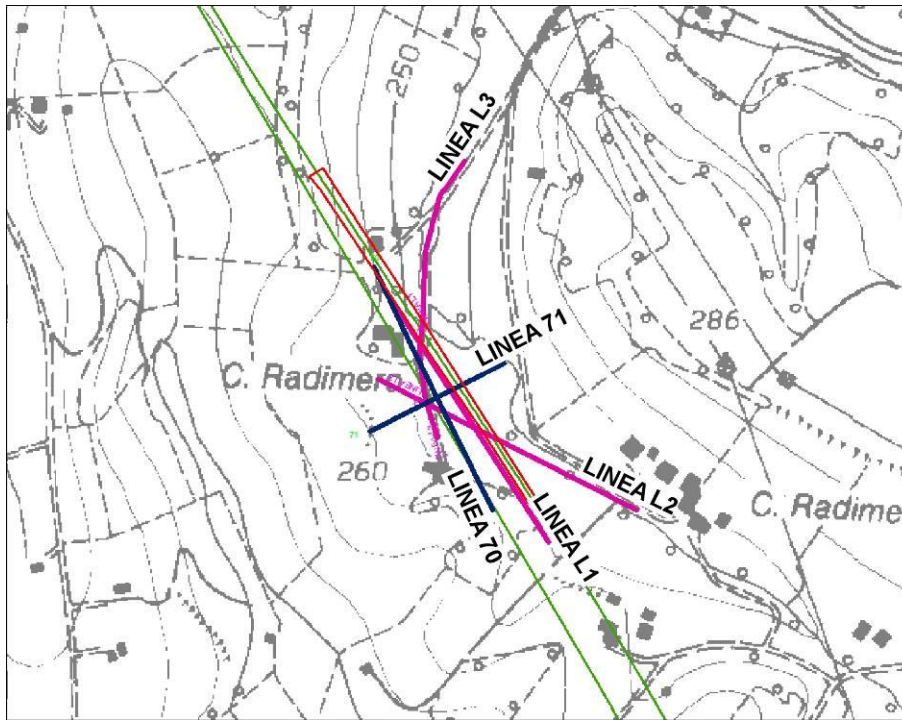
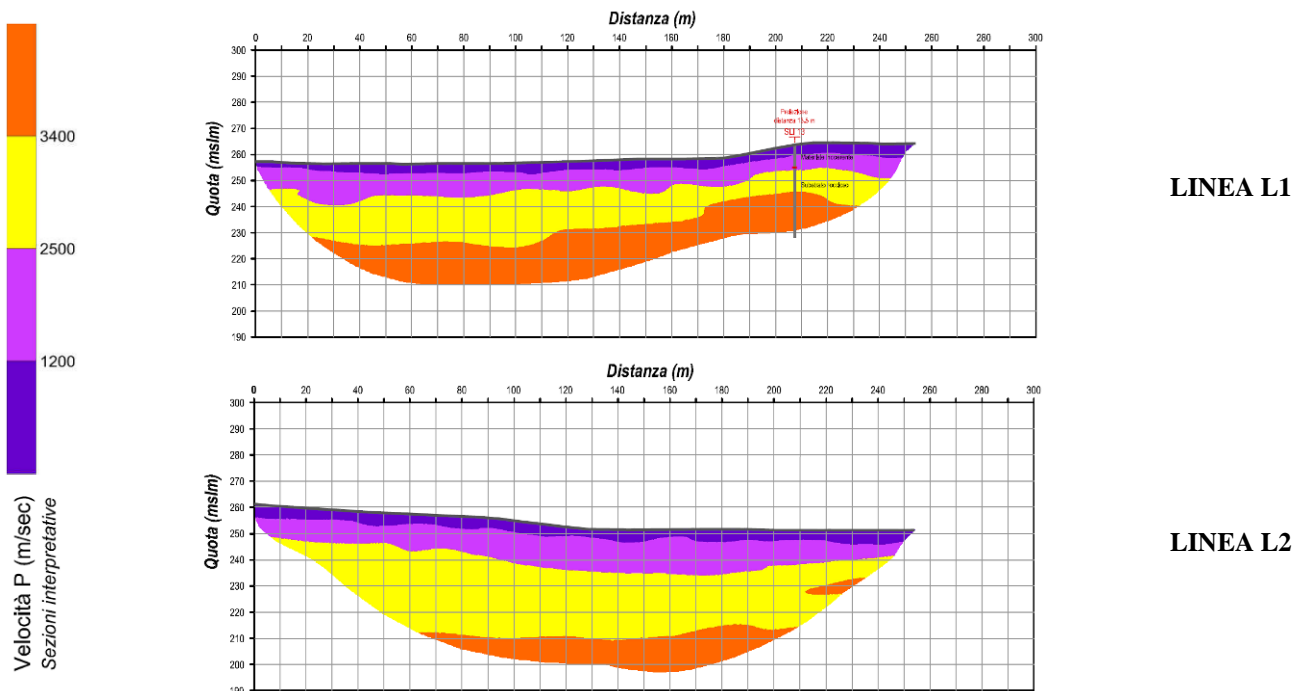
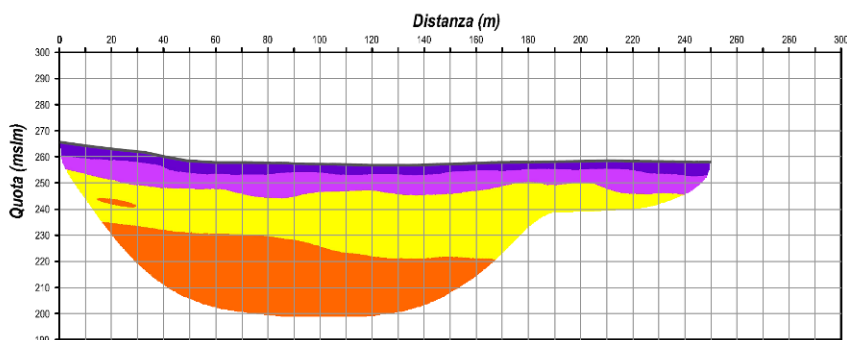


Figura 5-3. Ubicazione delle linee sismiche L1/L3 (PE) e 70-71 (PP) realizzate nella zona del Pozzo Fresca Radimero (GA1U), in relazione alla posizione della WBS in esame (in rosso).

Il tetto del substrato marnoso non alterato ( $V_p = 2.5$  k/s) è interpretato a circa 10 m di profondità le sezioni evidenziano anche un orizzonte inferiore, potente da 20 a 40 m, di “materiale a vario stato di fratturazione ed alterazione”, soprastante il basamento roccioso più consistente ( $V_p > 3400$  m/s).





**LINEA L3**

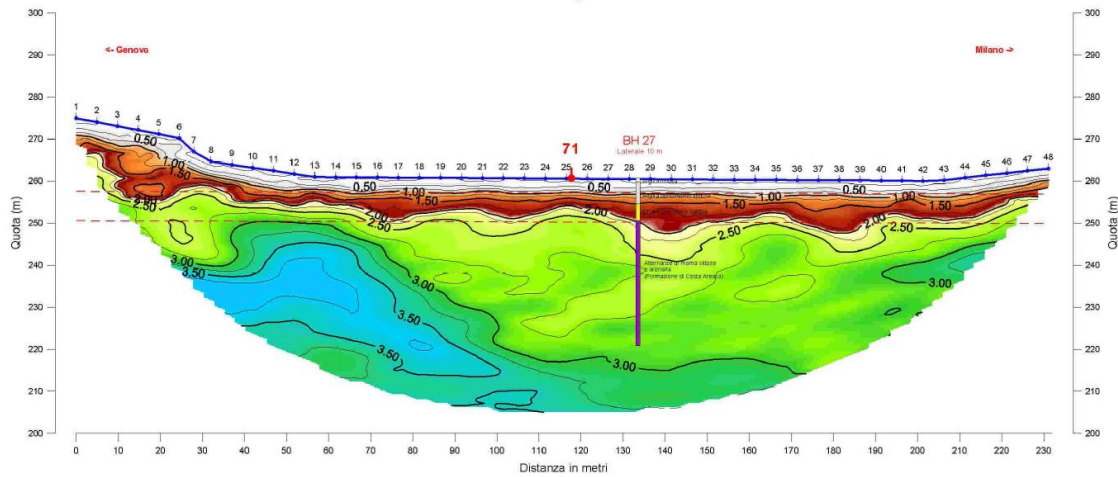
**Figura 5-4. Linee sismiche realizzate nella zona del Pozzo Fresa Radimero (GA1U), comprendente la parte terminale della WBS in esame (linea verde tratteggiata)**

UNITÀ	Velocità P (m/s)	Descrizione delle unità
1	$V_p < 1200$	Materiale di copertura.
2	$1200 < V_p < 2500$	Materiale caratterizzato da stato di fratturazione ed alterazione significativo.
3	$2500 < V_p < 3400$	Materiale a vario stato di fratturazione ed alterazione.
4	$V_p > 3400$	Materiale roccioso maggiormente consistente.

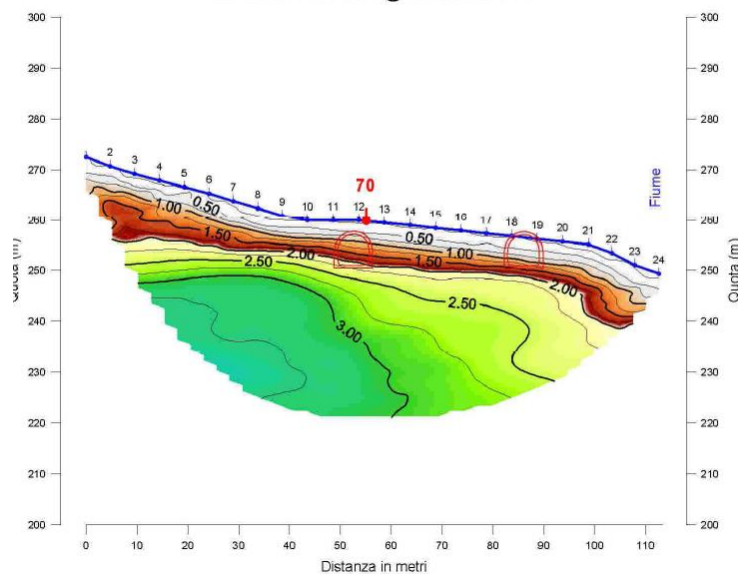
**Tabella 5-5 – Interpretazione del possibile significato geologico dei diversi orizzonti di velocità sismica individuati nelle sezioni a rifrazione L1-L3 (da rapporto TreEsse del 10/06/2013).**

Risultati sostanzialmente analoghi sono forniti dalle linee sismiche tomografiche 70 (longitudinale) e 71 (trasversale), realizzate nel corso della campagna di indagini del Progetto Preliminare (Figura 5-5). Le sezioni individuano del materiale detritico di copertura da argilloso-limoso ( $V_p < 1000-1250$  m/s) a prevalentemente ghiaioso-sabbioso ( $V_p$  1500-2000 m/s) di spessore massimo pari a 10-15 m, quindi un substrato marnoso che viene interpretato come “alterato e allentato” ( $V_p$  compresa tra 2000 e 3000 m/s) per ulteriori 15 m di profondità circa, cui seguono infine marne più compatte, con valori di  $V_p$  compresi tra 3000 e 3750 m/s, oltre i 10÷30 m di profondità. Il tetto della Formazione di Costa Areasa non alterata è assunto in corrispondenza di  $V_p = 2500$  m/s.

## Linea tomografica 70



## Linea tomografica 71



**Figura 5-5 – Sezioni sismiche tomografiche realizzate per il Progetto Preliminare nella zona del Pozzo Fresa Radimero (GA1U).**

È da notare che, mediamente, nei sondaggi carotati non vi è traccia del “substrato alterato e allentato” che viene sempre indicato nelle relazioni di accompagnamento alle indagini geofisiche e che sarebbe da mettere in relazione a velocità delle onde intermedie tra quelle della coltre quaternaria e quelle del substrato cosiddetto “inalterato”.

In realtà, i sondaggi mettono in luce quasi sempre una transizione brusca dalla coltre quaternaria al substrato marnoso compatto, molto poco alterato, privo di tracce di circolazione d’acqua in profondità e quasi privo di fratture. L’indicazione di “substrato alterato e allentato” in senso “geofisico” non sembra quindi avere una rispondenza con un reale stato di degradazione dei litotipi marnosi. Le minori velocità di propagazione rilevate potrebbero, quindi, essere semplicemente il risultato di un orizzonte superficiale soggetto a un carico litostatico significativamente più basso



rispetto ai livelli più profondi, senza che ciò costituisca un reale limite fisico, legato a meccanismi di degradazione.



Figura 5-6. Materiale di deposito SLI13



Figura 5-7 – Passaggio di versante depositi-substrato alterato – SLI13



Figura 5-8 – Substrato marnoso – SLI13



Figura 5-9 – Materiale colluviale su marne – SLI14





Figura 5-10 – Strato marnoso– SLI14



Figura 5-11 – Strato marnoso– SLI14

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00
	Foglio 56 di 73



Figura 5-12 – Strato marnoso– SLI14

### 5.3 Caratterizzazione geotecnica

#### 5.3.1 Depositi colluviali – Unità L/S

Per la coltre colluviale presente sul versante non si dispone di prove, pertanto, considerando anche l'esiguo spessore del deposito, si prendono in considerazione i parametri di caratterizzazione in terreni simili nella zona di Serravalle.

Le stratigrafie (SI43, AA301G034, 7A301G035, SI42) e le prove penetrometriche PP8S e PP9S mostrano come i terreni che formano il deposito colluviale ai piedi dei versanti sono per lo più sabbie fini limose poco addensate e limi sabbiosi, inorganici e di media compressibilità e plasticità.

I parametri di resistenza e di deformabilità per questa unità sono stati ricavati dalle correlazioni con i risultati delle prove penetrometriche, mostrando una variabilità minima negli strati superficiali e un aumento discreto a profondità maggiori, dove il materiale inizia ad essere maggiormente addensato.

Per i terreni caratterizzanti l'area in esame non si considerano validi i risultati di prove a profondità maggiori di 5 m.

#### 5.3.2 Marne alterate – Unità FC\_alt

L'evidenza delle cassette stratigrafiche, comprovata dalle velocità più basse nei primi metri di substrato misurate con le indagini geofisiche, mostra la presenza di uno strato alterato della formazione di Costa Areea. Nel passaggio tra deposito e substrato roccioso sono anche disponibili alcuni valori di numero di colpi, che mostrano come si passi da valori relativamente bassi a valori di



GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00	Foglio 57 di 73

rifiuto, il che porta a definire la presenza di uno strato di materiale certamente consistente ma che si presenta in generale molto alterato. Non si ritiene però affidabile la caratterizzazione di questo strato attraverso le correlazioni con le prove penetrometriche, oltretutto non proprio in prossimità dell'opera in esame e certamente non in numero consistente; si ritiene più corretto prendere, come valori di progetto per lo strato più alterato del substrato roccioso, i valori minimi negli intervalli riportati nella successiva caratterizzazione delle marne.

### 5.3.3 *Formazione di Costa Areama*

La formazione di Costa Areama è costituita in prevalenza da argilliti e marne; per la suddivisione tra la parte più profonda, compatta e litoide, e gli strati superficiali, mediamente e molto alterati, si è fatto riferimento non solo ai sondaggi e alla visione delle cassette, ma anche all'interpretazione degli stendimenti geofisici. Dalle immagini precedentemente riportate si notano velocità delle onde di compressione che caratterizzano substrati rocciosi ( $V_P > 2000 \text{ m/s}$ ) solamente dopo 15-20 m di profondità dal piano campagna, mentre le velocità degli strati più superficiali, che i sondaggi indicano come già substrato marnoso, si attestano tra i 1000 e i 1500 m/s, indicando un'alterazione dell'ammasso che peraltro era da attendersi. Tutto ciò trova riscontro dalle prove di laboratorio, dai log stratigrafici e dalle parametrizzazioni riportate nelle relazioni di Progetto Definitivo.

Sulla base dei sondaggi stratigrafici, della visione delle cassette catalogatrici e dei risultati di laboratorio, si riconoscono per il substrato in esame tre differenti livelli con caratteristiche geotecniche differenti:

- sotto-unità FC1: substrato compatto (fC)
- sotto-unità FC2: substrato moderatamente alterato
- sotto-unità FC3: substrato significativamente alterato

Le marne della Formazione di Costa Areama hanno un peso specifico nell'intervallo  $22 \div 24 \text{ kN/m}^3$  (Figura 5-14); i valori di tensione di compressione limite, ricavati da prove di laboratorio (Figura 5-13), evidenziano il distacco tra la prima zona alterata, con valori inferiori a 10 kPa, e un aumento successivo con la profondità.

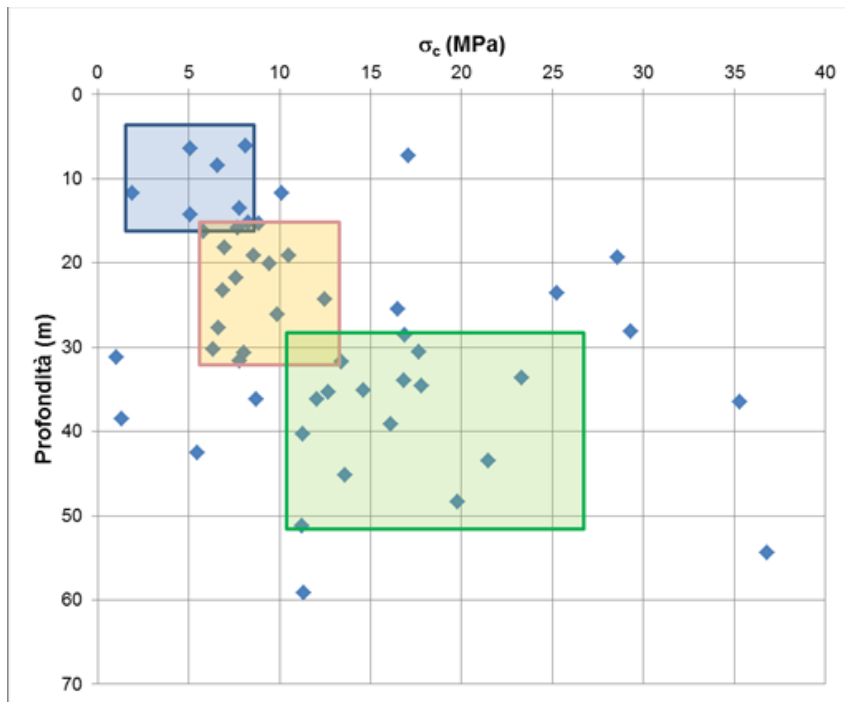


Figura 5-13 – Formazione di Costa Areesa: tensione di compressione da prove di laboratorio

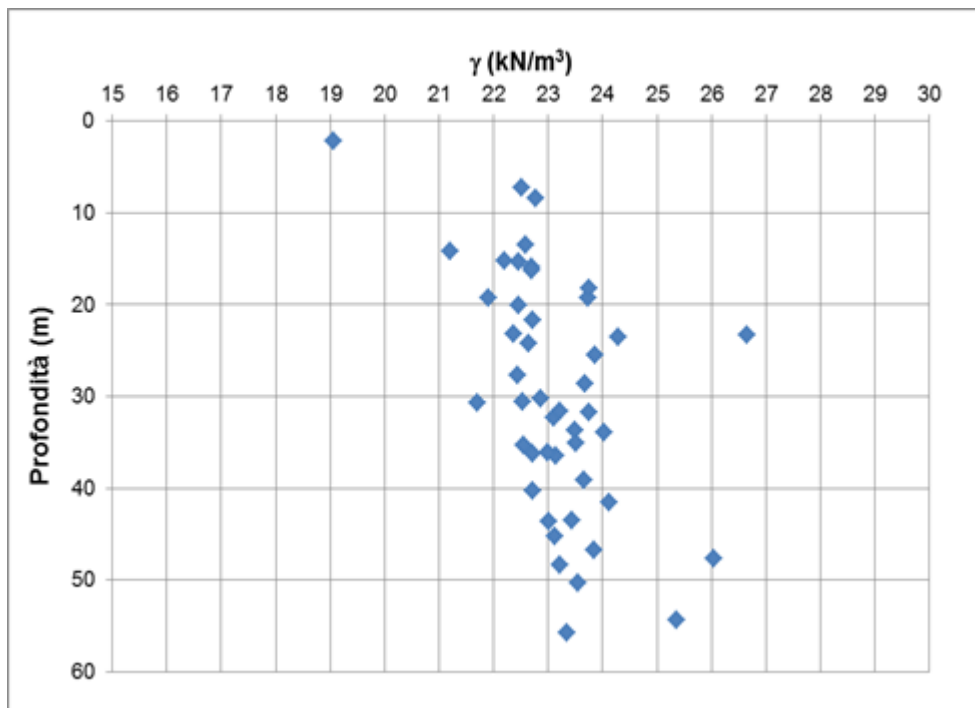


Figura 5-14 – Formazione di Costa Areesa: peso specifico

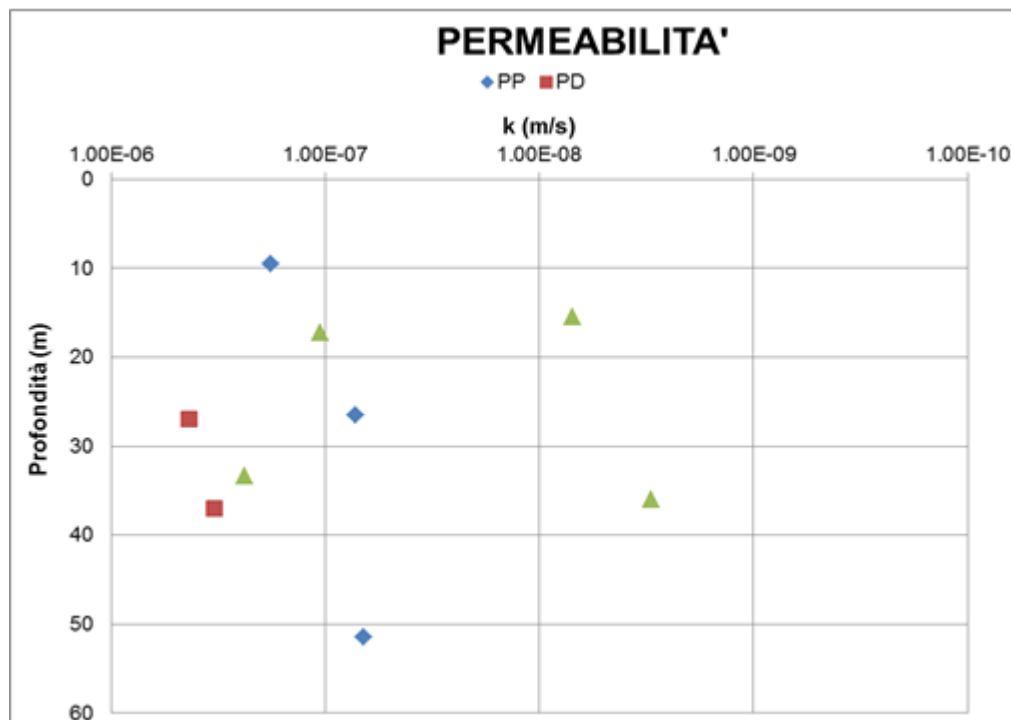


Figura 5-15 – Formazione di Costa Areama: valori di permeabilità

### Sotto unità FC1 (fC)

La Formazione di Costa Areama compatta – sotto unità FC1 (fC), pur qualificata geologicamente come ammasso flyschoidale composto in generale da alternanze di strati arenaceo-pelitici, è essenzialmente caratterizzata nel range di profondità di interesse progettuale, ovvero nei primi 200 m, da una netta prevalenza delle *marne e peliti siltose con rare intercalazione di arenarie*.

Tale formazione è stata dunque caratterizzata secondo il litotipo prevalente marnoso.

Le caratteristiche essenziali ai fini della qualifica del comportamento geomeccanico dell'ammasso sono riassunte nella tabella che segue.

Formazione	Grado cementazione	Litologia Clasti	Dimensione massima clasti	Componenti litologiche	Spessore	Composizione e struttura		
						GSI for Heterogeneous Rock Masses such as Flysch Marinos - Hoek, 2000	Peso	
							Conglomerato	Arenaria
Fc				Marne	-	-	1	0

Tabella 5-6 – Caratteristiche geo-meccaniche di natura strutturale e compositiva dell'ammasso

Nella tabella seguente si riportano le caratteristiche fisiche e di resistenza assunte per la litofacies in disamina. Per ogni proprietà fisica/meccanica considerata, si propone il valore o il range di valori (min – max) della singola componente litologica costituente l'ammasso.

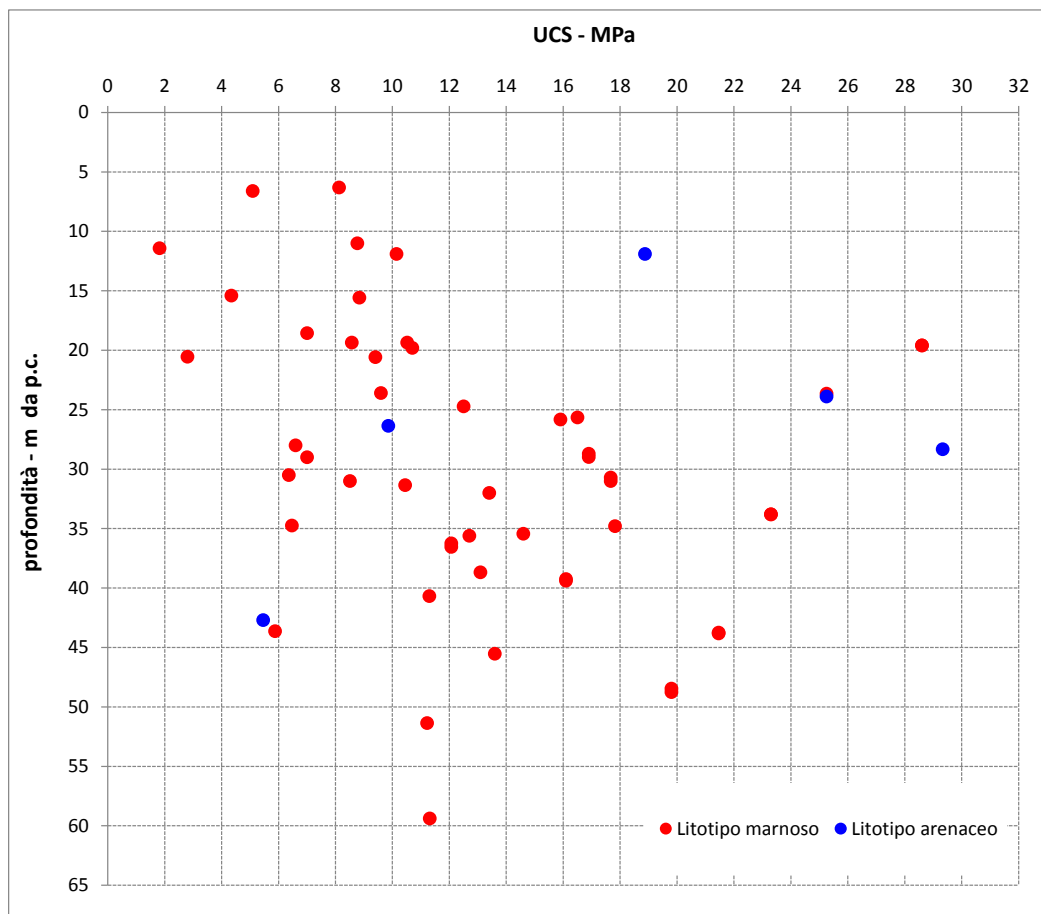
Formazione	Componenti litologiche	$\gamma$		$\nu$			UCS						resistenza a trazione indiretta		$m_i$					
		[kN/m <sup>3</sup> ]		[-]			[MPa]						[MPa]		[-]					
		med	med	range	med	med	min	max	med	min	max	med	med	med	med	min	max	med	min	max
Fc	Marne	23	23.0	0.30-0.33	0.315	0.32	12	16	14	12	16	14	1.5	1.5	5	9	7	5	9	7

**Tabella 5-7 – Caratteristiche fisiche e di resistenza dell’ammasso**

Ai fini della determinazione dei valori del coefficiente di Poisson e del parametro  $m_i$  di Hoek-Brown, per i quali non si dispone allo stato attuale di determinazioni sperimentali dirette, si sono assunti i valori da letteratura.

Nell’attribuzione del peso di volume si è assunto quanto esposto al § 5.3.3.

In merito alla determinazione delle caratteristiche di resistenza (resistenza a compressione monoassiale) si è elaborata la serie di determinazioni sperimentali disponibili, le cui distribuzioni con la profondità rispetto al p.c. sono riportate in via grafica, nel diagramma che seguono.



**Figura 5-16 Distribuzione dei valori di UCS (laboratorio, correlazione con Point Load Strength Tests) con la profondità**

Il range GSI considerato ai fini progettuali deriva dalla comparazione del GSI derivato dal BRMR desunto dai rilievi geostrutturali effettuati sulla litofacies in esame (qualora disponibili) con il GSI ricavato secondo Marinos-Hoek (2000).

Dai rilievi geostrutturali disponibili (RS 38-RS 44) si ricava un GSI in media fra 45-50. Hoek e Marinos, suggeriscono per le marne l'utilizzo della classificazione GSI sviluppata per ammassi rocciosi (e non Flysch), a patto che le marne stesse queste presentino una struttura con presenza di discontinuità (come è evidente da tutti i rilievi effettuati in zona), suggerendo nello specifico il range di GSI 40-60. Il GSI stimato è quindi 45-55 (media 50).

La classificazione geomeccanica, tramite attribuzione del GSI è esplicitata nella tabella seguente.

Formazione	Componenti litologiche	$\gamma$		$\nu$			Rilievi geostrutturali + GSI	GSI		GSI - considerato			
		[kN/m <sup>3</sup> ]		[-]				Marinos-Hoek		[-]			
		med	med	range	med	med							
Fc	Marne	23	<b>23.0</b>	0.30-0.33	0.315	<b>0.32</b>			45	55	45	55	50

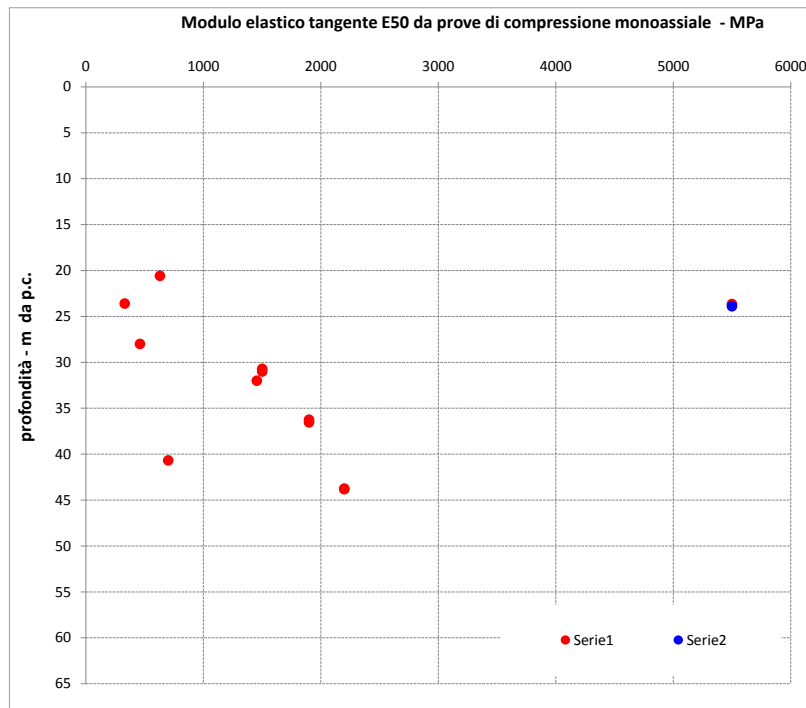
**Tabella 5-8 – Caratteristiche fisiche e classificazione geomeccanica dell'ammasso (GSI)**

La definizione dei parametri di deformabilità della matrice rocciosa del litotipo costituente la litofacies è discesa dalla valutazione comparata dei seguenti parametri:

- **Modulo elastico della matrice  $E_i$**  ottenuto secondo la formulazione di Deere, Palmstrom, Sigh assumendo i valori di MR indicati in letteratura.
- **Modulo elastico tangente  $E_t$**  misurato in corrispondenza del 50% della resistenza a compressione uniassiale nell'ambito delle relative prove condotte in laboratorio.

Si è definito a valle di tale processo di confronto il valore più opportuno per il parametro MR di Deere- Palmstrom – Sigh, compreso nell'intervallo suggerito dagli autori medesimi.

Ai fini della valutazione dei moduli  $E_t$ , si è elaborata la serie di determinazioni sperimentali disponibili per la litologia in oggetto (si veda anche grafico seguente).



**Figura 5-17 Distribuzione dei valori di E50 (prove di laboratorio UCS) con la profondità**

Con riferimento ai moduli  $E_i$  e  $E_t$ , si propongono il valore o il range di valori (min – max) del litotipo costituente la litofacies.

L' $E_i$  considerato ai fini progettuali deriva dall'analisi ragionata delle suddette determinazioni.

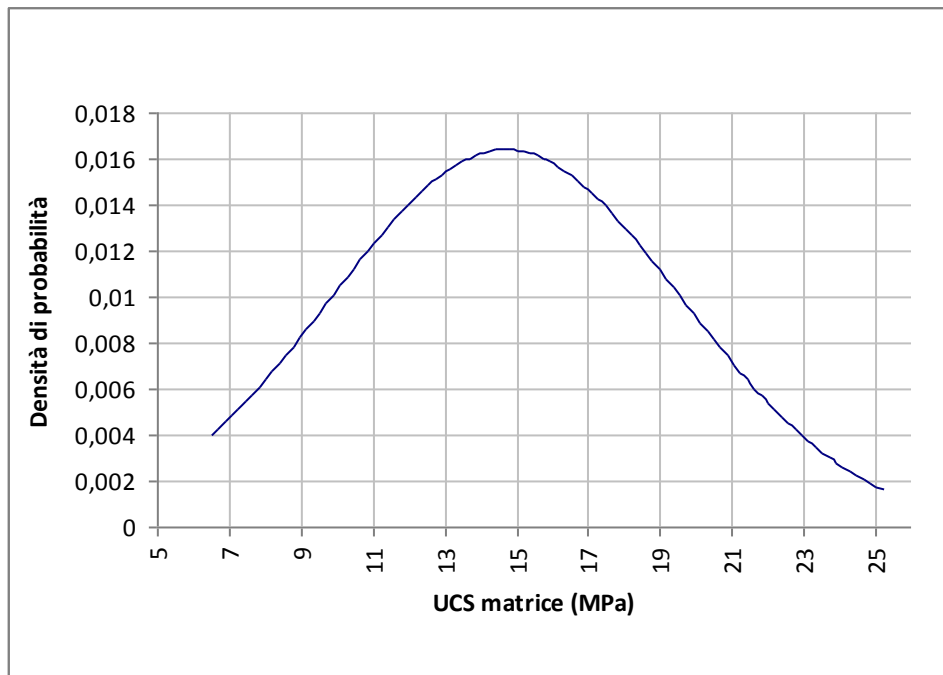
L'Erm, ovvero il Modulo Elastico dell'ammasso roccioso è stato dunque derivato secondo la formulazione di Hoek - Diederichs (2006), assumendo un fattore  $D$  pari a 0 (ammasso indisturbato) ed associando i valori minimi e massimi nell'intervallo di  $E_i$  stabilito rispettivamente ai limiti inferiore e superiore del range di GSI.

Il modulo elastico d'ammasso così ottenuto è stato infine confrontato con il **Modulo di deformazione  $E_d$**  derivante dalle prove dilatometriche in foro di sondaggio (ottenuto come media delle misurazioni su tre cicli di carico/scarico), opportunamente ridotto secondo le leggi di decadimento esposte al § 4, in relazione al percentuale di deformazione dell'ammasso interagente con le opere.

Si è analizzato altresì, il campione di dati geomeccanici da prove in situ ed in laboratorio in senso statistico, analogamente alle altre formazioni geologiche trattate, pervenendo alle seguenti distribuzioni di densità di probabilità

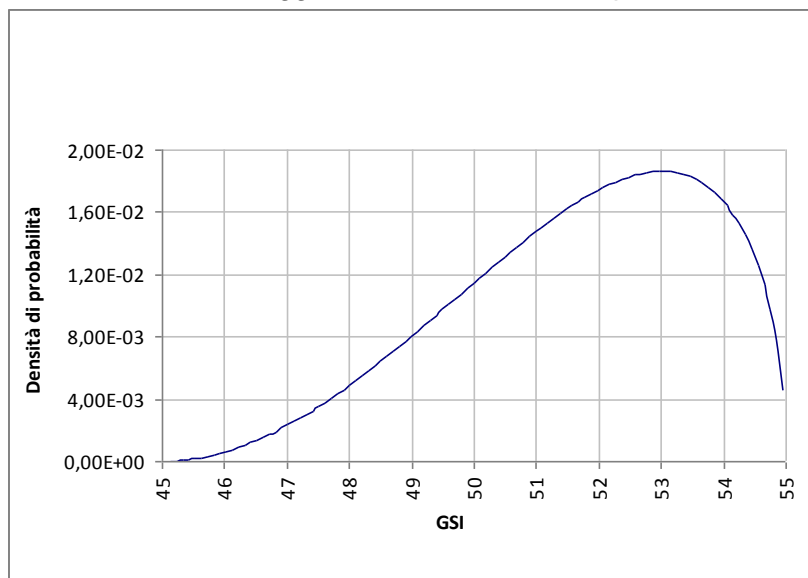
- UCS, curva gaussiana troncata asimmetricamente - valor medio della resistenza UCS 14.7 MPa, intervallo di variazione 6.4-25.3 MPa.





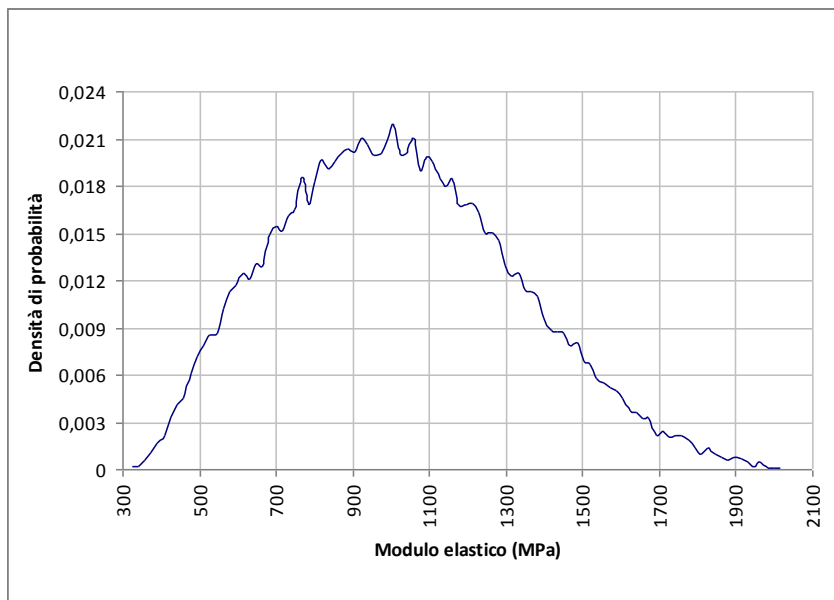
**Figura 5-18 Distribuzione statistica UCS – Formazione di Costa Areasa - fC**

- GSI: si è introdotta per la facies marnosa in disamina, sulla base delle medesime considerazioni avanzate per la caratterizzazione della facies marnosa della formazione di Rigoroso, alle quali si rimanda per maggior dettaglio, la distribuzione di densità di probabilità di tipo beta ( $a_1 = 3$ ,  $a_2 = 1.5$ ), relativamente all'intervallo di variabilità atteso per il GSI 45-55, con preponderanza del dato riferito ai valori più elevati dell'indice, da cui il valor medio 51. Tale scelta riflette:
  - l'assenza di zone interessate da faglie di scorrimento o piani di taglio (da cui la definizione del limite inferiore di GSI pari a 45)
  - la distribuzione di GSI suggerita da Hoek\_Marinos per le formazioni Marnose.



**Figura 5-19 Distribuzione statistica GSI – Formazione di Costa Areasa - fC**

Ne deriva, secondo la formulazione di Diederichs, la seguente distribuzione statistica del modulo elastico d'ammasso:



**Figura 5-20 Distribuzione statistica Erm – Formazione di Costa Areasa - fC**

### Sotto unità FC2-FC3

Con riferimento alle caratteristiche fisico-meccaniche, la serie di dati sperimentali elaborata è la medesima presentata al § 5.3.3.

Relativamente ai parametri di deformabilità, le prove dilatometriche in foro (Figura 5-26) hanno investigato per la maggior parte le zone meno alterate del substrato, andando a validare i valori del modulo di deformabilità adottati per le formazioni 1 e 2, ricavati da correlazioni empiriche secondo Hoek-Brown.

Come detto in precedenza, gli stendimenti tomografici hanno dato risultati utili per quanto riguarda la determinazione degli strati, ma non sono disponibili prove dirette (Down hole e Cross Hole) necessarie per una corretta caratterizzazione dei parametri di deformabilità a piccole deformazioni e i correlabili moduli elastici operativi.

Si riportano per completezza i risultati della correlazione tra le velocità delle onde di compressione ricavate dalle prove di laboratorio e i parametri di deformabilità, considerando un rapporto tra le velocità di compressione e di taglio pari a 0.33÷0.40 ricavato dai range riportati in letteratura.

L'intervallo di valori del Modulo Elastico operativo va dai 500 MPa ai 1200 MPa e risulta in buon accordo con i valori adottati, ovviamente comparabile con i valori degli strati meno alterati. Considerando invece la formulazione di Hoek-Brown, sulla base dei già citati valori di letteratura di MR e di  $\sigma_c$ , sono stati ricavati i moduli di deformazione della roccia intatta  $E_i$  e i rispettivi moduli operativi, nel rispetto della divisione in strati, secondo la seguente formula:

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

I moduli elastici della roccia intatta (Figura 5-27) hanno valori comparabili con quelli dinamici nelle zone meno alterate a comportamento più litoide (FC<sub>1</sub>), dove i valori sono nel range di 2500÷5000 MPa; i moduli operativi (Figura 5-28) ricavati nei due modi sono anche comparabili e variabili nell'intervallo 500÷1200 MPa.

In Figura 5-29 si riporta lo zoom dell'intervallo di variabilità dei moduli elastici operativi per gli strati più alterati ricavati con Hoek-Brown.

I moduli relativi alle prove di compressione monoassiale risultano invece bassi rispetto ai parametri intatti: questo dato va tenuto in conto.

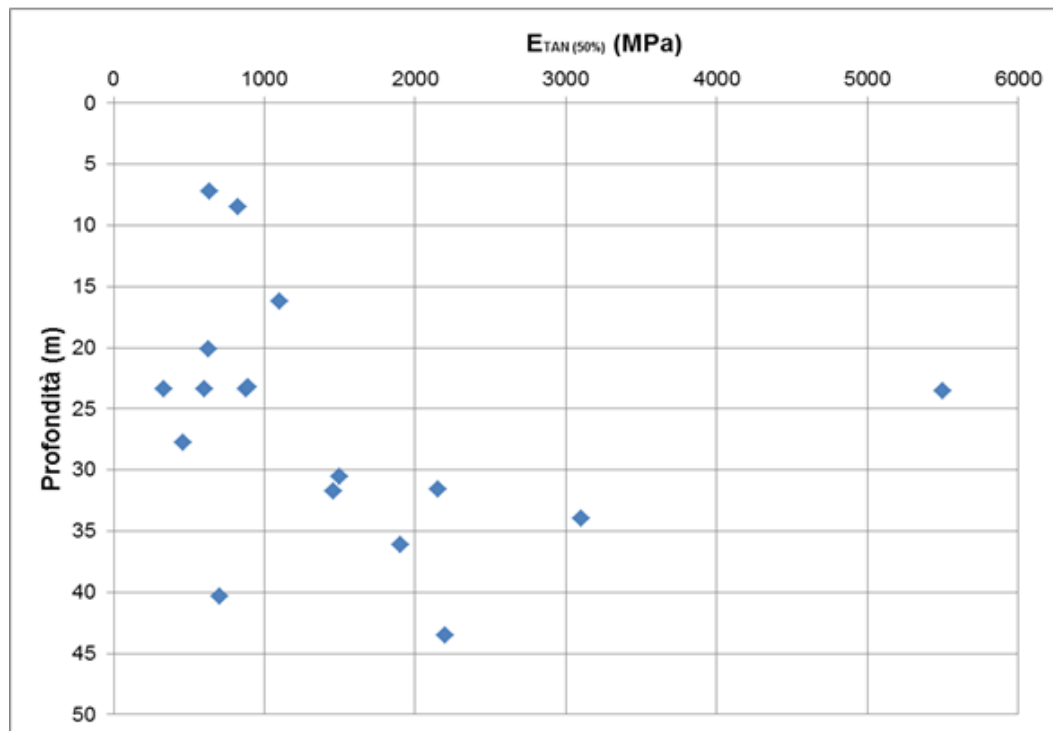


Figura 5-21 – Formazione di Costa Areasa: Moduli elastici da prova di compressione monoassiale

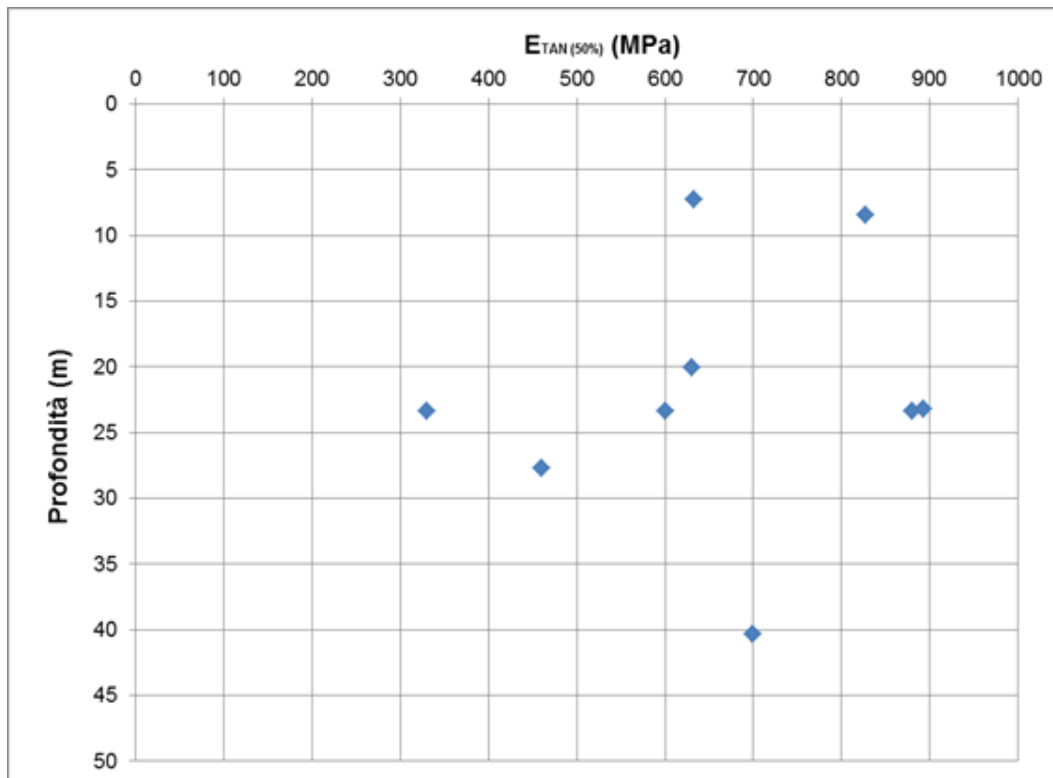


Figura 5-22 – Formazione di Costa Areasa: Moduli elastici da prova di compressione monoassiale (zoom)

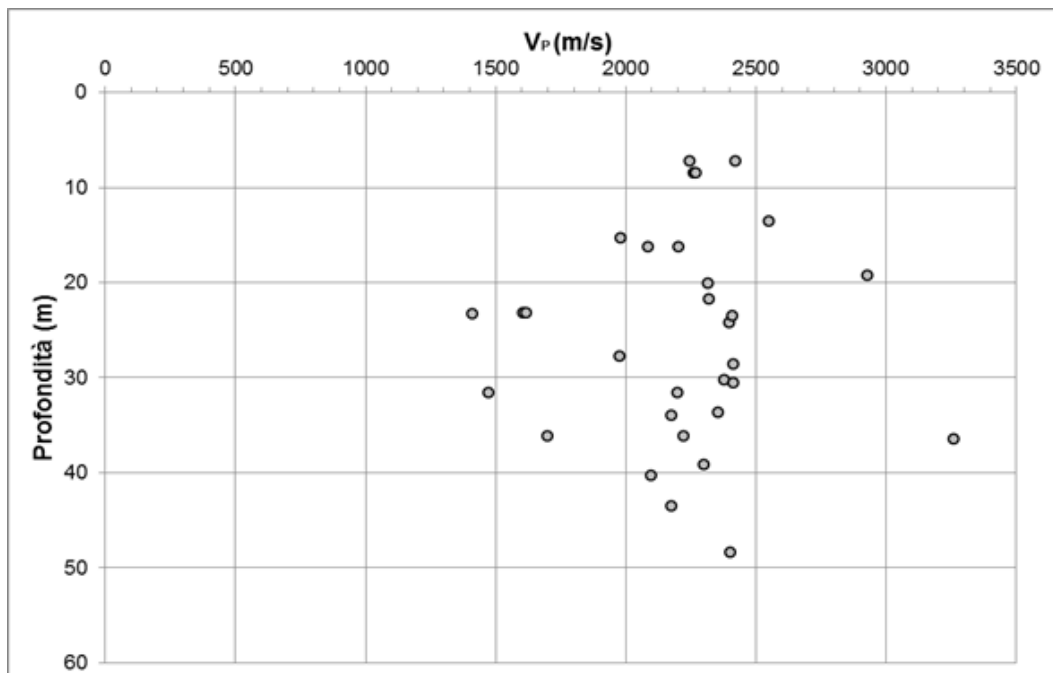


Figura 5-23 – Formazione di Costa Areasa: velocità delle onde di compressione da prove di laboratorio

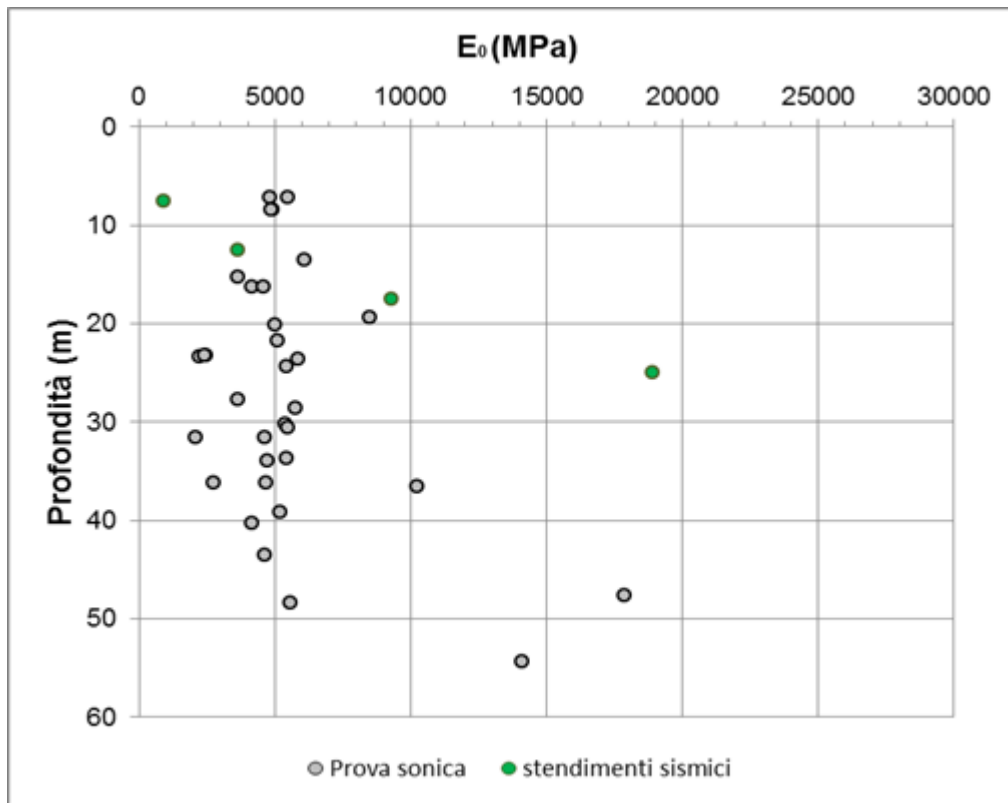


Figura 5-24 – Formazione di Costa Areasa: Moduli elastici iniziali

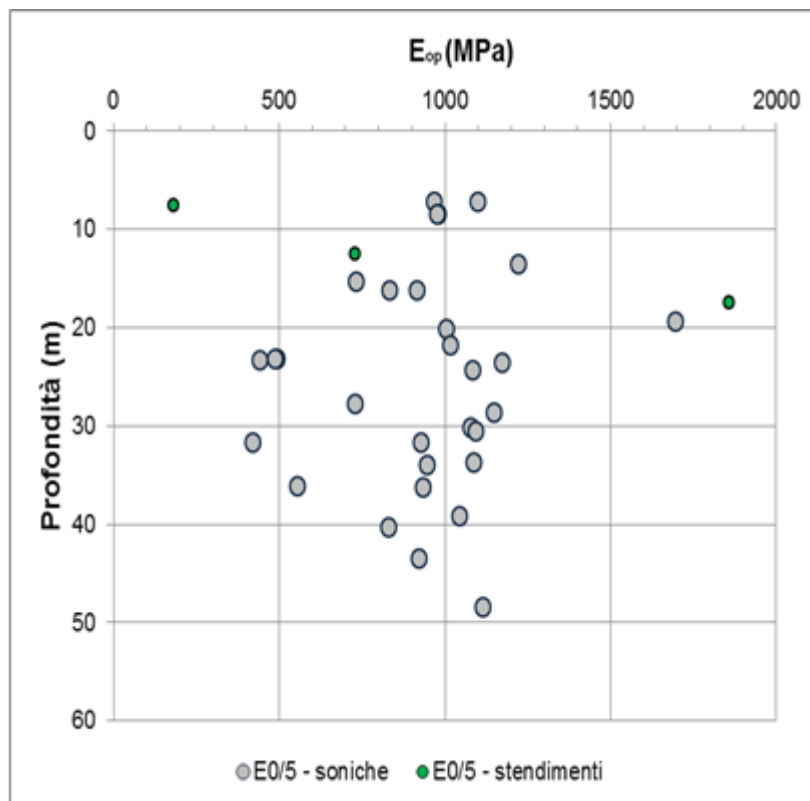


Figura 5-25 – Formazione di Costa Areasa: Moduli elastici operativi

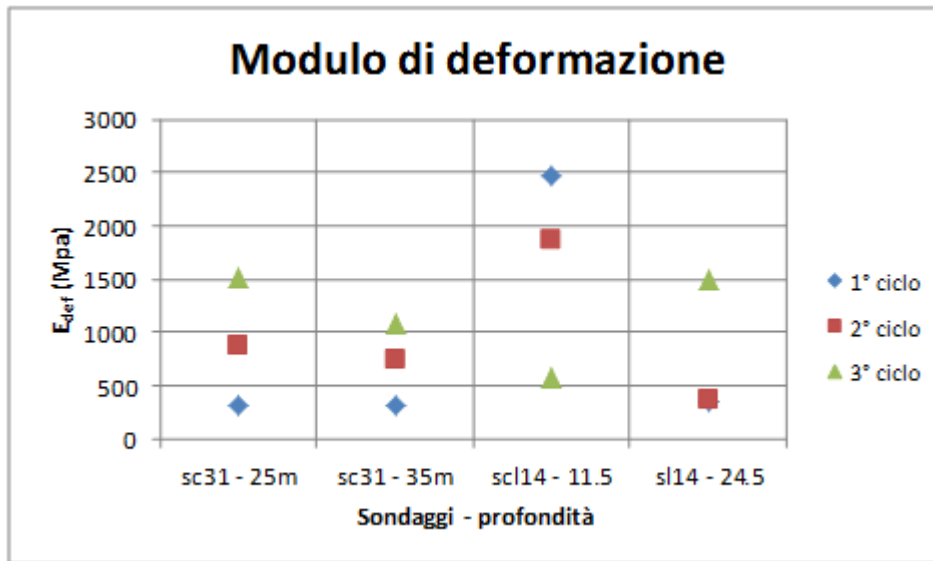


Figura 5-26 – Formazione di Costa Areasa: risultati prove dilatometriche in foro

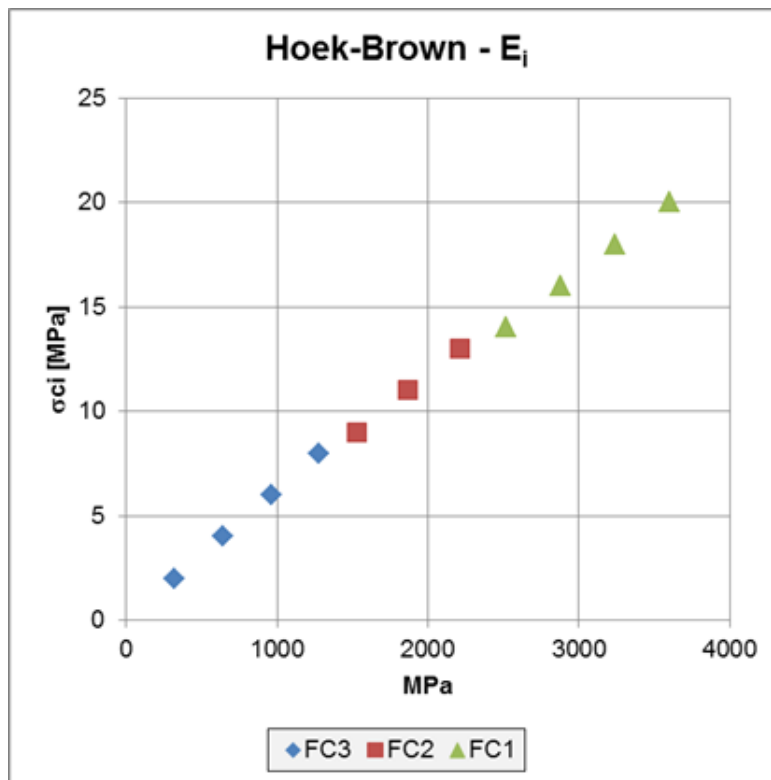


Figura 5-27 – Formazione di Costa Areasa: Moduli di deformazione della roccia intatta (Hoek-Brown)



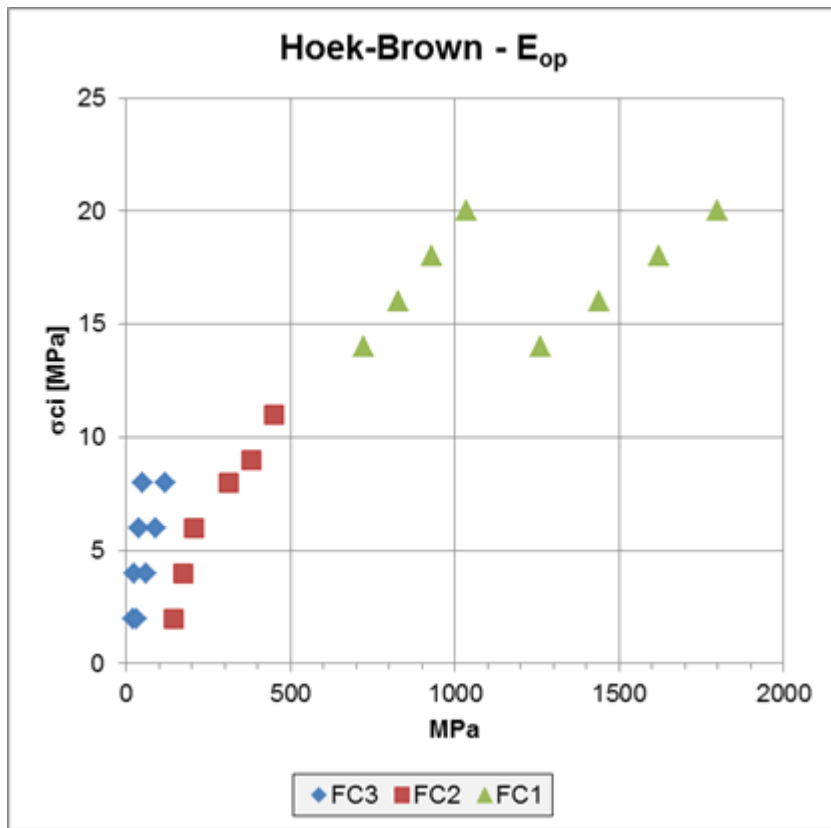


Figura 5-28 – Formazione di Costa Areea: Moduli elastici operativi (Hoek-Brown)

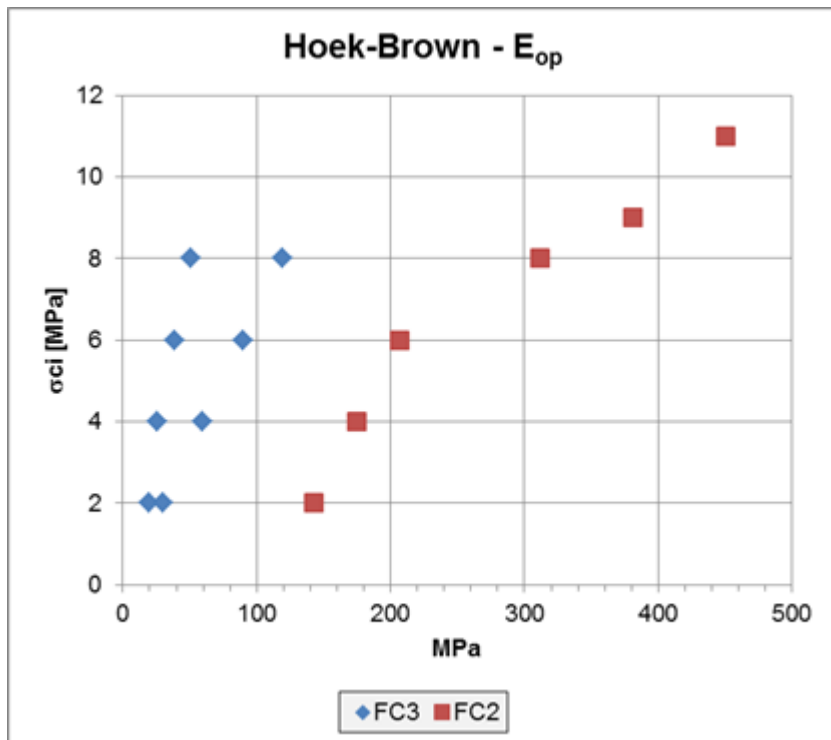


Figura 5-29 – Formazione di Costa Areea: Moduli elastici operativi (Hoek-Brown)

Si riportano i parametri adottati per la caratterizzazione geomeccanica delle Marne di Costa Areasa a medio-alto grado di alterazione, determinati secondo le ipotesi e le procedure specificate qui di seguito:

- il parametro  $m_i$ , in mancanza di dati di prove triassiali diffuse, è ricavato da letteratura;
- i valori di GSI sono stati ricavati dai log stratigrafici e dai rilievi geostrutturali (cfr. Relazione Geomeccanica Generale); in particolare per il calcolo di  $RMR_{89}$  l'indice I1 è stato definito sulla base dei valori locali di RQD indicati nelle colonnine dei sondaggi; l'indice I2 è stato cautelativamente definito sulla base dei risultati delle prove di compressione monoassiale; gli indici I3→I8 sono stati stabiliti sulla base di valori medi cautelativi derivati dalla descrizione dei materiali e dalle foto delle cassette. Sono inoltre stati presi in considerazioni i rilievi geostrutturali dal RS38 – RS44.
- il modulo di deformabilità della roccia intatta è adottato da letteratura, in funzione del *Modulus Ratio* e del valore di  $\sigma_c$ , ed in linea con i valori più cautelativi del Modulo della roccia intatta ricavato dalle prove di laboratorio.

FORMAZIONE		$\sigma_c$	GSI	$m_i$	D	MR	E	K
		[MPa]					[MPa]	[m/s]
FC <sub>3</sub>	min	2	25	5÷7	0÷0.3	160	40-130	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-8</sup>
			35					
	max	8	25					
			35					
FC <sub>2</sub>	min	8	35	5÷9	0÷0.3	170	150÷450	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-8</sup>
			45					
	max	12	35					
			45					

**Tabella 5-9 – Parametri della Formazione di Costa Areasa - sotto-unità FC3-FC2 secondo il modello di Hoek-Brown**

### 5.3.4 Quadro di sintesi caratterizzazione geomeccanica

Si riepilogano nel prospetto che segue le unità di riferimento ai fini della definizione dei parametri fisico meccanici e di deformabilità dell'ammasso roccioso, per ogni litofacies compresa nella Formazione oggetto di caratterizzazione.

Formazione	$\gamma$	$\nu$	UCS	$\sigma_t$	$m_i$	GSI	$E_{RM}$
	[kN/m <sup>3</sup> ]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
fC (FC1)	23.50	0.30	7÷25 (14.50)	1.5	5÷9 (7)	45÷55 (51)	310÷2000 (1020)
FC2	22-24	0.31	8 - 12	1	5÷9 (7)	35÷45 (50)	150÷450
FC3	22-24	0.31	2 - 8	0.5	5÷7 (6)	25÷35 (50)	40-130

**Tabella 5-10 – Caratterizzazione geo-meccanica Formazione di Costa Aresaa**

#### Linearizzazione Mohr-Coulomb

Il criterio empirico di Hoek – Brown è basato sostanzialmente sulle tensioni principali da rottura, partendo dal concetto che la rottura in un ammasso roccioso sia controllata dallo spostamento e dalla rotazione di singoli blocchi di roccia, separati da numerose fratture, aventi assetto caotico e quindi senza orientamento preferenziale di scorrimento; in questo modo l'ammasso può essere considerato come isotropo. Il criterio può essere rappresentato in un grafico  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ . Una volta definiti i parametri per poter caratterizzare la roccia secondo il modello di Hoek - Brown, è possibile “linearizzare” la curva trovata e ricondursi al modello di Mohr-Coulomb, determinando l'equivalente angolo di attrito e coesione efficace.

In particolare, in funzione delle profondità e delle opere in oggetto, le linearizzazioni per i parametri di resistenza secondo il modello di Mohr-Coulomb sono state effettuate considerando gli intervalli di tensione riportati in Tabella 5-10.

Si riportano in Tabella 5-11 i risultati delle linearizzazioni per le sottounità che interessano lo scavo, in cui gli intervalli sono da ritenere validi in quanto rappresentativi del comportamento “disturbed” (valori minimi) e “undisturbed” (valori massimi).

FORMAZIONE	$\gamma$	$\phi$	c (KPa)	E (MPa)
FC <sub>3</sub>	22÷24	21÷27	30÷60	40÷130
FC <sub>2</sub>	22÷24	28÷30	70÷200	150÷450

**Tabella 5-11 – Parametri della Formazione di Costa Aresaa secondo il modello di Mohr-Coulomb**

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 72 di 73</p>

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Allasinaz A., Gelati R., Gnaccolini M., Martinis B., Orombelli G., Pasquarè G. & Rossi P.M. (1971) – Note illustrative e Carta Geologica d'Italia, scala 1:100.000, foglio 82, Genova. Nuova tecnica Grafica, roma, pp134.
- Barla (1995) – “Tunnelling under squeezing rock conditions”, International Society for rock mechanics, ISRM
- Boni A. & Casnedi R. (1970) – Note illustrative e Carta Geologica d'Italia, scala 1:100.000, fogli 69, Asti e 70, Alessandria. Poligrafica & Cartevalori, Ercolano (Na), pp. 64.
- Capponi, G., Cortesogno, L., Crispini, L., Gaggero, L., Bonci, M.C., Perilli, N., Piazza, M., Vannucci, G., Firpo, M., Piccazzo, M., Pacciani, G. & Ramella, A. (2007) - Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 213-230 “Genova”. S.EL.CA. Firenze.
- Capponi, G., Crispini, L., Cortesogno, L., Gaggero, L., Firpo, M., Piccazzo, M., Cabella, R., Nosengo, S., Bonci, M.C., Vannucci, G., Piazza, M., Ramella, A., Perilli, N., et alii (2009) - Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 213-230 – Genova.
- Cortesogno L. & Haccard D. (1984) – Carta Geologica della zona Sestri – Voltaggio. – Mem. Soc. Geol. It.
- Cortesogno L. & Haccard D. (1984) – Note illustrative alla carta Geologica della zona Sestri – Voltaggio. – Mem. Soc. Geol. It., Geol. It., 1984 (28).
- Hoek – Marinos (2005)- Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses - 2005
- Italferr (2001) – Progetto Preliminare. Tratta A.C. Milano-Genova, III Valico.
- Italferr (2005) – Progetto Definitivo. Tratta A.C. Milano-Genova, III Valico.
- Marini M. (1997) – Carta Geologica della Val Polcevera e zone limitrofe (Appennino Settentrionale) alla scala 1:25000.
- Marini M. (1998) – Carta Geologica della Val Polcevera e zone limitrofe (Appennino Settentrionale) alla scala 1:25000. Note illustrative. – Atti Tic. Sc. Terra, vol.40.
- Ministero dell’Ambiente, Servizio Valutazione Impatto Ambientale – Richiesta integrazione A.C. Genova-Milano. Protocollo N°10784/VIA/A.O/13.G,Roma, 5 Settembre 2000.
- Piana, F., Falletti, P., Fioraso, G., Irace, A., Mosca, P., et alii (in prep.) – Carta geologica del Piemonte in scala 1:250.000. Consiglio Nazionale delle Ricerche, IGG Torino; Università degli Studi di Torino, DST; Politecnico di Torino, DIATI.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-001-A00</p>	<p>Foglio 73 di 73</p>

- Provincia di Genova (1998) – Area 06: Difesa del suolo, Opere Ambientali e Piano di Bacino – Torrente Chiaravagna e Torrente Polcevera. Piano di bacino stralcio per la difesa idrogeologica, geomorfologica, per la salvaguardia della rete idrografica e per la compatibilità delle attività estrattive. Consultabile su: <http://cartogis.provincia.genova.it/cartogis/pdb/>.
- Soc. Geol.It. (1991) – Alpi Liguri. Collana Guide Geologiche Regionali vol.2 – BE.MA.