

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 4 – WBS GN14N, GN14R, GN15P, GN15R
Relazione geotecnica**

GENERAL CONTRACTOR	DIRETTORE DEI LAVORI
Consorzio Cociv Ing. A. Pelliccia	

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

Progettazione :

Rev	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Progettista Integratore	Data	IL PROGETTISTA
A00	Emissione	Rocksoil 	26/02/2015	Rocksoil 	26/02/2015	A. Palomba 	27/02/2015	 Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R

n. Elab.:

File: IG5100ECVRBGN0000001A00

CUP: F81H92000000008

<p>GENERAL CONTRACTOR</p>  <p>Consorzio Collegamenti Integrati Veloci</p>	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  <p>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>
	<p>IG5103ECVRBGN0000001A00</p> <p>Foglio 3 di 117</p>

INDICE

INDICE.....	3
1 PREMESSA.....	5
2 DOCUMENTAZIONE, NORMATIVA E STRUMENTI TERRITORIALI DI RIFERIMENTO	8
2.1 Documentazione di riferimento.....	8
2.2 Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento	8
3 INQUADRAMENTO DELL'OPERA.....	10
3.1 Inquadramento geologico-geomorfologico	10
3.1.1 Unità metamorfiche della "zona Sestri-Voltaggio" l.s.	11
3.1.2 Unità del Bacino Terziario Piemontese	13
3.2 Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera	15
3.2.1 WBS GN14N	15
3.2.2 WBS GN14R	16
3.2.3 WBS GN15P.....	17
3.2.4 WBS GN15R	17
3.3 Inquadramento idrogeologico.....	18
4 ELEMENTI GEOLOGICI ESSENZIALI AI FINI DELLA CARATTERIZZAZIONE	
GEOMECCANICA	24
4.1 Note generali	24
4.2 Formazione di Molare	24
4.2.1 Note generali	24
4.2.2 Litofacies brecciosa (FMbc)	24
4.2.3 Litofacies ruditica poligenica parzialmente cementata (FMp)	24
4.2.4 Litofacies ruditica cementata a clasti calcarei dominanti (FMc).....	26
4.2.5 Litofacies siltoso-pelitica (FMs)	27
5 INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	27
5.1 Note generali	28
5.2 Sondaggi del Progetto Preliminare.....	28
5.3 Sondaggi del Progetto Definitivo	28
6 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA/GEOMECCANICA	30
6.1 Note generali	30
6.2 Materiali a grana medio-fine (sabbie localmente ghiaiose in matrice limosa).....	30
6.2.1 Introduzione.....	30
6.2.2 Determinazione della densità relativa Dr da prove SPT	31
6.2.3 Angolo di resistenza al taglio.....	33
6.2.4 Caratteristiche di deformabilità	33
6.3 Materiali a grana fine (limi e argille) saturi.....	36
6.3.1 Introduzione	36
6.3.2 Resistenza al taglio non drenata.....	37
6.3.3 Parametri di resistenza al taglio in termini di sforzi efficaci.....	37
6.3.4 Caratteristiche di deformabilità	37
6.4 Formazioni rocciose.....	39
6.4.1 Generalità	39
6.4.2 Valutazione del parametro RMR'89	40
6.4.3 Criteri di rottura.....	42
6.4.4 Caratteristiche di deformabilità	47

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG5103ECVRBGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 4 di 117</p>

7 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA – GEOMECCANICA DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI INTERAGENTI CON L'OPERA49

7.1	Formazione di Molare	49
7.1.1	Note introduttive	51
7.1.2	Litofacies conglomeratica (FMp - FMc)	51
7.1.3	Distinzione in gruppi geo-meccanici nell'ambito della Formazione del Molare.....	58
7.1.4	Litofacies arenacea localmente fossilifera (FMa).....	60
7.1.5	Quadro di sintesi caratterizzazione geomeccanica.....	62
7.2	Argilloscisti.....	62
7.2.1	Analisi completa campione risultati Indagini Pregresse	64
7.2.2	Analisi campione risultati correlata alle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso	88
7.2.3	Classificazione GSI dell'ammasso sul campione analizzato	96
7.2.4	Caratterizzazione Geo-meccanica degli argilloscisti.....	100
7.2.5	Considerazioni sul fenomeno di squeezing.....	108

8 BIBLIOGRAFIA116

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 5 di 117

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 prevalentemente 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 di entrambi i binari tra le progressive PK 16+280 e PK 20+988 circa, relativo alle WBS GN14R - GN14R (binario pari) e GN15P – GN15R (binario dispari). Tale tratta, descritta nel seguito come “Tratta 4”, è realizzata mediante scavo tradizionale impiegando due canne a singolo binario di sezione policentrica poste ad interasse pari a 35m. Si deve inoltre considerare il tratto in prossimità della Finestra Val Lemme denominata “di esodo rapido”, nel quale in affianco alle due canne di linea verrà realizzato un cunicolo, collegato alla canna centrale (avente sagoma allargata) mediante by-pass pedonali e carrabili.

L’opera in oggetto fa 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 prevalentemente 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 tracciato attraversa un insieme eterogeneo di unità geologico strutturali: si tratta infatti dell’area di contatto tra le estremità della catena alpina ad ovest e della catena appenninica settentrionale verso est. Tale zona, nota con il nome di Sestri-Voltaggio, è delimitata ad ovest dal Gruppo di Voltri e a est dalle unità liguri s.l. Queste macro unità tettoniche sono, infine, delimitate a nord dalle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Ligure-Piemontese e dai depositi della Pianura Padana, anch’essi interessati dalla linea in progetto.

L’assetto strutturale si presenta articolato e complesso in quanto le tre grandi unità geologico-strutturali (Gruppo di Voltri, Zona Sestri-Voltaggio, Unità Liguri s.l.) oltre a presentare una marcata deformazione a carattere duttile sono organizzate in un sistema a falde tramite elementi strutturali a carattere regionale (come la linea Sestri-Voltaggio). A questo quadro strutturale già articolato si aggiunge la presenza di una estesa deformazione a carattere fragile.

Nel dettaglio le formazioni geologiche attraversate dalla Galleria di Valico nella tratta considerata sono elencate di seguito ordinate in base allo sviluppo delle progressive:

- **Metabasalti:** metabasalti da massicci a scistosi, talora con struttura a pillow, e fratturazione generalmente intensa. Si presentano con colorazioni che vanno dal verde scuro al bruno-violaceo nei punti in cui sono maggiormente alterati. Localmente contengono corpi filoniani e sono comunemente interessati, in affioramento, da una fitta maglia di giunti. Si è supposto, in base ai dati a disposizione, che tale formazione potesse essere intercettata durante lo scavo unicamente per brevi tratti nella parte iniziale della Tratta 4.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 6 di 117

- **Argilloscisti filladici:** appartenenti alle Formazioni degli “Argilloscisti di Murta” (AGF) e degli “Argilloscisti di Costagiutta” (AGI); queste due formazioni rappresentano, nella nuova cartografia ufficiale, Foglio “Genova” n. 213-230 in scala 1:50.000, la ex Formazione delle “Argilliti a Palombini del Passo della Bocchetta”. ***Dal punto vista geomeccanico le due formazioni sono completamente equivalenti alla ex formazione delle “Argille a Palombini del Passo della Bocchetta”.*** Nel seguito si impiegherà tale denominazione in analogia ai documenti della precedente fase progettuale.
- **Brecce della Costa di Cravara:** brecce eterometriche, da monogeniche a poligeniche, a supporto di clasti organizzate in bancate plurimetriche mal definite. I clasti presentano dimensioni decimetrico-metriche, a scarsa matrice è di colore grigiastro o verdastro. La composizione dei clasti è strettamente connessa alla natura del substrato; nel settore d'interesse dovrebbero essere intercettate a quota galleria unicamente nella zona di contatto tra le Argilliti a Palombini e la Formazione di Molare.
- **Formazione di Molare,** costituita dalle seguenti litofacies:
 - rudite cementata a clasti calcarei dominanti (FMc): conglomerati poligenici e brecce a supporto di clasti, con clasti da centimetrici a metrici (1-2 m) costituiti da calcari, calcari dolomitizzati e subordinatamente da basalti, serpentiniti e metaofioliti. La scarsa matrice arenacea è di colore grigiastro. Localmente sono presenti livelli arenitici grossolani cementati.
 - rudite parzialmente cementata (FMp): conglomerati e brecce poligenici con tessitura a supporto di clasti e/o di matrice, in strati e gruppi di strati da decimetrici a plurimetrici con locali livelli arenitici grossolani, nel complesso cementati in modo eterogeneo . I clasti, da centimetrici a metrici (fino a 2-3 m), sono costituiti da metaofioliti ed in subordine da calcari, dolomie e basalti. Localmente contengono megablocchi di metabasiti (di dimensioni fino a 10 m circa).

Lungo il tracciato le coperture variano da un minimo di circa 150 m ad un massimo di circa 500 m, quest'ultimo raggiunto all'interno della Formazione delle Argilliti a Palombini (PK 16+800 circa). All'interno della formazione di Molare la copertura massima risulta invece inferiore a 400m.

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;
- il **capitolo 4**, delinea in maniera organica gli elementi geologici essenziali ai fini della caratterizzazione geomeccanica.
- il **capitolo 5** riporta un riepilogo delle indagini geotecniche disponibili effettuate in più fasi per la progettazione preliminare, definitiva e per l'attuale fase di progettazione esecutiva;
- il **capitolo 6** descrive i criteri di interpretazione delle indagini geotecniche,

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVRBGN0000001A00</p>	<p>Foglio 7 di 117</p>

- il **capitolo 7** riporta 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.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p>IG5103ECVRBGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 8 di 117</p>

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. Tec. n° 97/81.
- Circ. LL.PP. 24 settembre 1988 n. 30483 "Norme tecniche per terreni e fondazioni - Istruzioni applicative"

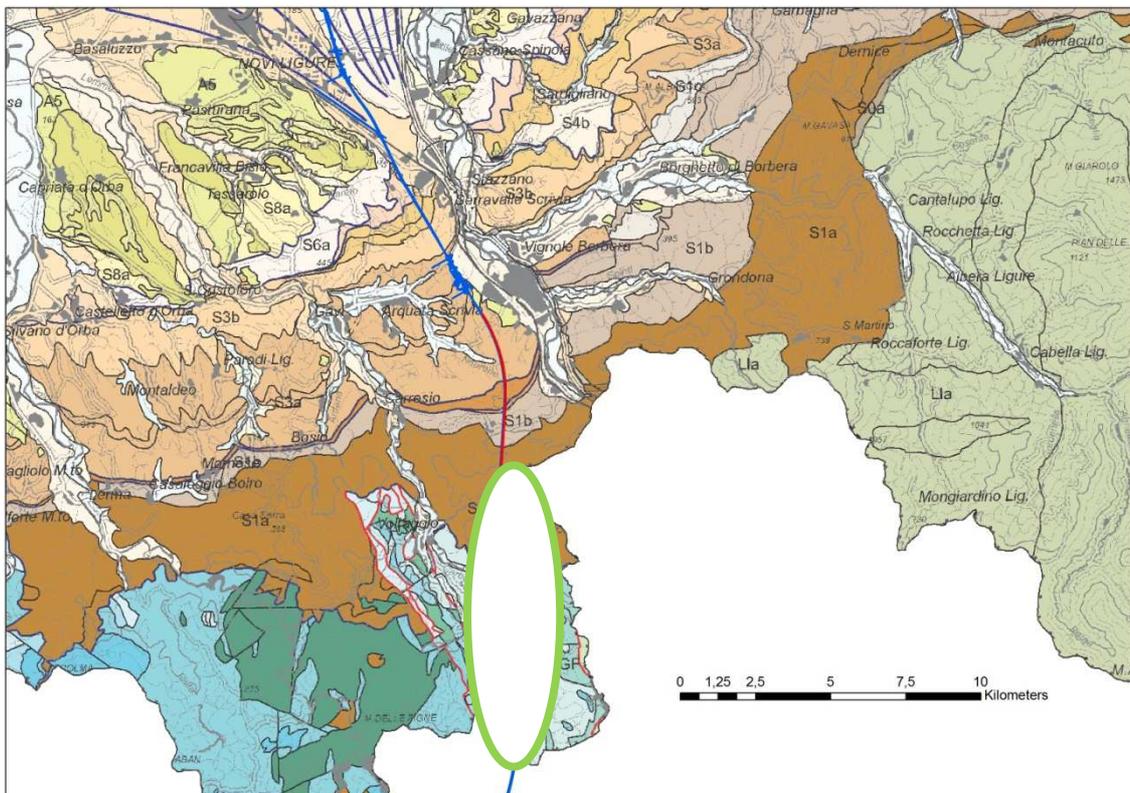
<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 	
	<p>IG5103ECVRBGN0000001A00</p>	<p>Foglio 9 di 117</p>

- 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 Inquadramento geologico-geomorfologico

La Galleria di Valico nella tratta in esame ("Tratta 4") ricade nelle unità metamorfiche del "Gruppo di Voltri" *auct.* (Unità tettonometamorfica Figogna, cfr. Foglio 213-230 "Genova" della Carta Geologica d'Italia) e all'interno delle unità sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese (Brecce della Costa di Cravara, cR e Formazione di Molare, FMp).



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-pelitiche ed arenacee serravalliano-tortoniane; **S3a** Successioni arenaceo-pelitiche e marnose burdigaliano-langhiane; **S2a** Successioni prevalentemente carbonatiche burdigaliane; **S1d** Depositi silicei aquitaniano-burdigaliani; **S1b** Successioni marnose rupeliano-aquitaniense; **S1c** Corpi lenticolari arenaceo-conglomeratici rupeliano-aquitaniense; **S1a** Successioni arenacee e arenaceo-pelitiche 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.?).

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 11 di 117

Figura 1. 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 oggetto del presente rapporto.

3.1.1 Unità metamorfiche della “zona Sestri-Voltaggio” l.s.

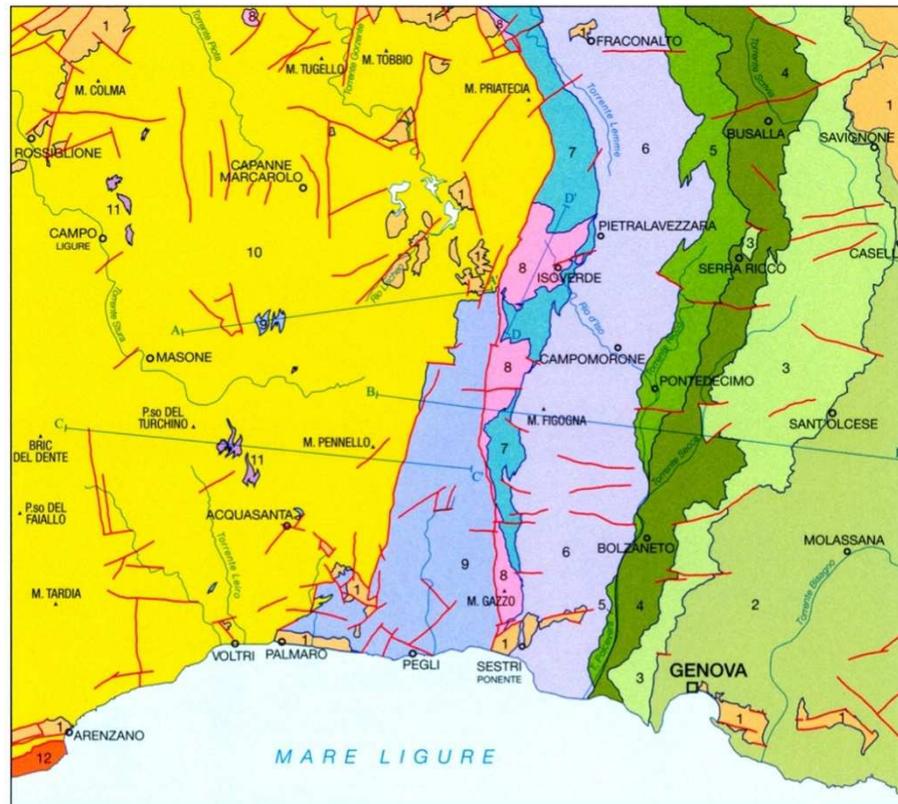
L'area di studio si colloca nella zona di giustapposizione tra i domini orogenici alpino e appenninico nota in letteratura come “nodo collisionale ligure” (Laubscher at. al., 1992); questo settore ad elevata complessità strutturale è stato recentemente oggetto di una revisione cartografica con la realizzazione del foglio CARG n° 213-230 “Genova” alla scala 1:50.000 (Capponi et al., 2009).

Nell'area del Foglio Genova è possibile distinguere, da W verso E, tre settori caratterizzati dall'associazione di unità di crosta oceanica e di mantello, unità di margine continentale e unità costituite da flysch (Figura 2):

- le **unità tettonometamorfiche Voltri e Palmaro-Caffarella** (“Gruppo di Voltri” *auct.*): sono costituite dalle associazioni pre-cenomaniane di ofioliti e metasedimenti carbonatici del dominio oceanico ligure-piemontese. I litotipi dell'Unità Voltri hanno registrato un picco metamorfico eclogitico mentre la riequilibratura metamorfica delle rocce dell'Unità Palmaro-Caffarella è limitata alla facies scisti-blu (Federico et al. 2004). La distinzione sicura tra i litotipi delle due unità è in genere possibile solo a scala microscopica, in base ai caratteri mineralogico-petrografici.
- la **Zona Sestri-Voltaggio** *auct.* (ZSV): è costituita da tre unità tettonometamorfiche, di cui due ofiolitiche (Cravasco-Voltaggio e Figogna) e una di margine continentale (Gazzo-Isoverde). Il livello del metamorfismo è progressivamente decrescente passando dalle unità Cravasco-Voltaggio e Gazzo-Isoverde (facies scisti blu) all'Unità Figogna (facies pumpellyite-actinolite).
- Il **dominio dei Flysch Appenninici**: è rappresentato dalle quattro unità tettoniche Mignanego, Montanesi, Ronco e Antola, sovrapposte con vergenza europea. Procedendo verso est, il grado metamorfico decresce da basso a bassissimo nelle prime tre unità fino ad arrivare a condizioni di diagenesi per l'Unità Antola.

A est, la Zona Sestri-Voltaggio è in contatto con le unità tettoniche di basso grado che compongono il dominio dei Flysch Appenninici. A ovest, essa è invece in contatto con le unità tettonometamorfiche Voltri e Palmaro-Caffarella, lungo una discontinuità regionale con direzione N-S, nota in bibliografia come *Linea Sestri-Voltaggio*; questo lineamento strutturale è classicamente ritenuto il limite fisico tra la catena alpina e quella appenninica, anche se le interpretazioni sulla sua natura sono spesso state tra loro discordanti: faglia trascorrente (Elter & Pertusati, 1973), sovrascorrimento (Cortesogno & Haccard, 1984) o faglia estensionale (Hoogerduijn Strating, 1994). Attualmente la ZSV è ritenuta un canale di concentrazione preferenziale della deformazione tettonica che, lungo di essa, si è ripetutamente scaricata in momenti diversi della storia evolutiva della catena e in regimi tettonici corrispondenti a livelli strutturali differenti (Capponi et al. 2009).

SCHEMA TETTONICO



- 1** DEPOSITI TARDO- E POST-OROGENICI
Successione del Bacino Terziario Piemontese, depositi pliocenici e quaternari
- 2** UNITÀ TETTONICA ANTOLA
Unità costituita da flysch, non metamorfica
- 3** UNITÀ TETTONICA RONCO
Unità costituita da flysch, a metamorfismo di anchizona
- 4** UNITÀ TETTONICA MONTANESI
Unità costituita da flysch, a metamorfismo di anchizona
- 5** UNITÀ TETTONICA MIGNANEGO
Unità costituita da flysch, a metamorfismo di anchizona
- 6** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA FIGOGNA
Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies pumpellyite-actinolite
- 7** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA CRAVASCO - VOLTAGGIO
Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies Scisti Blu (albite, clorite, Na-anfibolo, Na-piroseno, lawsonite, pumpellyite, epidoto), con retrocessione moderata
- 8** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA GAZZO - ISOVERDE
Unità di margine continentale, a sovrainfronta metamorfica di alta pressione
- 9** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA PALMARO - CAFFARELLA
Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies Scisti Blu (giadrite, Na-anfibolo, lawsonite), con retrocessione in facies Scisti Verdi più o meno pervasiva
- 10** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA VOLTRI
Unità di crosta oceanica e di mantello, a metamorfismo in facies Scisti Blu con eclogiti e riequilibratura in facies Scisti Verdi spesso pervasiva
- 11** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA ANGASSINO - TERMA
Unità di margine continentale, a sovrainfronta metamorfica di alta pressione
- 12** UNITÀ TETTONOMETAMORFICA ARENZANO
Costituita da un Complesso di margine continentale, monometamorfico, a sovrainfronta metamorfica alpina da alta pressione a Scisti Verdi e da un Complesso di margine continentale, polimetamorfico, a metamorfismo pre-alpino in facies Anfibolitica e sovrainfronta metamorfica alpina da alta pressione a Scisti Verdi
- Limite stratigrafico — Contatto tettonico — Faglia A—A' Traccia di sezione geologica

Figura 2. Schema tettonico dell'area interessata dal progetto (tratto dal foglio CARG "Genova").

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 13 di 117

Il tracciato della linea AC/AV Milano-Genova si sviluppa, in territorio ligure, a cavallo delle unità tettonometamorfiche Palmaro-Caffarella e Sestri-Voltaggio. A scala locale, il territorio in cui si colloca il sito di intervento e le zone limitrofe, è ubicato nell'areale di affioramento della ZSV e più precisamente entro la formazione dell'unità tettonometamorfica Figogna.

Le sigle delle unità descritte fanno riferimento alla legenda adottata nel Progetto Definitivo e successive modifiche in fase di Progetto Esecutivo, della linea Milano-Genova (2004); viene inoltre riportato (Tabella 1) il corrispondente nome e codice adottato nella Cartografia Geologica Nazionale- CARG (Capponi et al. 2009).

<i>definizione PD (2004) e PE (2013)</i>		<i>definizione CARG (2009)</i>	
argille a Palombini del Passo della Bocchetta	aP	argillocisti di Costagiutta	AGI
		argillocisti di Murta	AGF
metacalcari di Erzelli	cE	metacalcari di Erzelli	ERZ
metasedimenti silicei della Madonna della Guardia	dM	Metasedimenti silicei della Madonna della Guardia	MHF
metabasalti	B'	metabasalti del Monte Figogna	MBF
Serpentiniti e serpentinoscisti	Se'	serpentiniti di Bric dei Corvi	SPF
metaoficalciti di Pietralavezzara	of'	metaoficalciti di Pietralavezzara	PLV

Tabella 1 - Corrispondenza tra la terminologia geologica adottata per l'unità Figogna, nel Foglio 213 Genova (Capponi et al., 2009), e la terminologia adottata nell'ambito del Progetto Definitivo e Progetto Esecutivo (2004).

Per la descrizione di dettaglio delle singole formazioni si rimanda alle relazioni geologiche delle WBS oggetto del presente elaborato.

3.1.2 Unità del Bacino Terziario Piemontese

Con il termine di "Bacino Terziario Ligure-Piemontese" viene indicato il complesso di sedimenti molassici terziari che costituiscono i rilievi collinari del settore sud orientale del Piemonte. Il margine meridionale del BTLP è costituito da una potente successione di rocce sedimentarie terrigene oligo-mioceniche relativamente poco deformate che riposa in discordanza su unità intensamente tettonizzate (le tre sopracitate macro-unità tettoniche), di pertinenza sia alpina che appenninica, che ne rappresentano il substrato.

Le diverse unità del BTLP sono contraddistinte da formazioni conglomeratiche, arenacee e marnose che hanno mediamente giacitura monoclinale debolmente inclinata con immersione verso Nord /

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001 A00	Foglio 14 di 117

Nord-Ovest. Alcuni settori sono interessati da una tettonica di tipo fragile con faglie subverticali dal rigetto anche pluridecametrico.

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

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 Areaa.

La descrizione delle formazioni di seguito riportata è relativa agli 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.

Nella descrizione delle formazioni, per l’individuazione di unità gerarchicamente inferiori, è stato utilizzato il termine informale di “litofacies” piuttosto che quello di “membro”, per evitare un’eccessiva proliferazione terminologica. Per la descrizione di dettaglio si rimanda alle relazioni geologiche relative alle WBS afferenti alla tratta in oggetto.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 15 di 117

3.2 Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera

Si riporta l'inquadramento geologico organizzato per ciascuna WBS facente parte della tratta in esame

3.2.1 WBS GN14N

Nel tratto della Galleria di Valico compreso tra le PK 16+275,50 e 17+680,00 (WBS GN14N) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP) e dei metabasalti (B'). L'unico sondaggio presente (SR14) interessa l'unità tettonometamorfica di Figogna.

Il tratto compreso tra le **PK16+275,50 e 16+425 ca**, attraversa i metabasalti (B') dell'unità Figogna.

Il tratto compreso tra **la PK 16+425 e 17+680,00 ca**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP).

Nel tratto compreso tra le **PK 17+150 e 17+300 ca**. è stata indicata la possibile presenza di un ulteriore intervallo costituito da metabasalti (B').

Data l'originaria distribuzione disomogenea dei metabasalti all'interno delle Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP) e le ripetute fasi deformative cui essi sono stati soggetti non è possibile, soltanto dalle osservazioni superficiali, prevedere l'eventuale presenza degli stessi a quota galleria e la loro esatta posizione.

Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 16+500** l'opera intercetta una faglia ad alto angolo immergente verso N-NW come evidenziato dal sondaggio SR14.

Si riscontra la presenza di strutture tettoniche a basso angolo, con rigetto non valutabile. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando sviluppati all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') che hanno un comportamento reologico tipico di materiali più rigidi e che quindi presentano giunti a persistenza più elevata, che comunemente non si propagano all'interno delle Argille a Palombini.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 313"> <tr> <td>Foglio 16 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 16 di 117
Foglio 16 di 117		

3.2.2 WBS GN14R

Nel tratto della galleria di valico compreso tra le Pk 17+680,00 alla Pk 20+988,50 (WBS GN14R) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP), delle Breccie della Costa di Cravara (cR) e della Formazione di Molare (Fmbc e FMp).

Il tratto compreso tra le **PK17+680,00 e 19+575 ca.**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP)..

Il tratto compreso tra le **PK 19+575 ca. e 19+625 ca.** attraversa presumibilmente la formazione delle Breccie della Costa di Cravara (cR).

Il tratto compreso tra le **PK 19+625 ca. e 20+988,50 ca.** attraversa presumibilmente la litofacies ruditica poligenica (FMp) della Formazione di Molare caratterizzata da alternanze irregolari di livelli ruditici grossolani e livelli arenitici-microconglomeratici.

Si registra una presenza significativa di strutture disgiuntive (faglie normali, inverse e trascorrenti). Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 19+575** l'opera intercetta una faglia ad angolo medio-alto immergente verso S come evidenziato dal sondaggio SR15.

Si riscontra la presenza di alcune strutture tettoniche a basso angolo, con rigetto non valutabile, sia all'interno della formazione di Molare sia nella formazione di Rigoroso. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando sviluppati all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Le zone di taglio osservate hanno andamento subparallelo alla stratificazione. Il grado di fratturazione della roccia all'interno della zona di taglio è estremamente elevato e qualora una di tali zone dovesse essere intercettata dallo scavo potrebbe causare un notevole decadimento della qualità geotecnica dell'ammasso roccioso.

Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') .

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 313"> <tr> <td>Foglio 17 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 17 di 117
Foglio 17 di 117		

3.2.3 WBS GN15P

Nel tratto della galleria di valico compreso tra le PK 16+285,53 e 17+690,03 (WBS GN15P) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP) e dei metabasalti (B'). L'unico sondaggio (SR14) esistente nel settore di interesse, svolto nella fase Preliminare del Progetto, interessa esclusivamente i termini dell'unità tettonometamorfica Figogna.

Il tratto compreso tra le **PK16+285,53 e 16+450 ca**, attraversa i metabasalti (B') dell'unità Figogna. presenza di ematite.

Il tratto compreso tra **la PK 16+450 e 17+690,03 ca**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP).

Nel tratto compreso tra le **PK 17+175 e 17+275 ca.** è stata indicata la possibile presenza di un ulteriore intervallo costituito da metabasalti (B').

Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 16+525** l'opera intercetta una faglia ad alto angolo immergente verso N-NW come evidenziato dal sondaggio SR14.

Sono state inoltre osservate e caratterizzate strutture a basso angolo. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando sviluppati all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') che hanno un comportamento reologico tipico di materiali più rigidi e che quindi presentano giunti a persistenza più elevata, che comunemente non si propagano all'interno delle Argille a Palombini.

3.2.4 WBS GN15R

Nel tratto della galleria di valico compreso tra le PK 17+690,03 e 20+998,53 (WBS GN15R) è previsto l'attraversamento delle Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP), delle Breccie della Costa di Cravara (cR) e della Formazione di Molare (Fmbc e FMp).

Il tratto compreso tra le **PK17+690,03 e 19+575 ca.**, attraversa le Argille a Palombini del passo della Bocchetta (aP).

Il tratto compreso tra le **PK 19+575 ca. e 19+675 ca.** attraversa presumibilmente la formazione delle Breccie della Costa di Cravara (cR).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 313"> <tr> <td>Foglio 18 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 18 di 117
Foglio 18 di 117		

Il tratto compreso tra le **PK 19+675 ca. e 19+775 ca.** attraversa presumibilmente la litofacies ruditica poligenica (FMP) della Formazione di Molare caratterizzata da alternanze irregolari di livelli ruditici grossolani e livelli arenitici-microconglomeratici.

Si registra una significativa presenza di strutture disgiuntive (faglie normali, inverse e trascorrenti), Le evidenze morfologiche di un sistema di faglie ben sviluppato con direzione circa est-ovest sono state verificate e confermate dai nuovi rilievi di terreno che hanno messo in luce l'esistenza di faglie di tipo trascorrente e di sistemi coniugati, sia all'interno delle successioni sedimentarie del Bacino Terziario Piemontese, sia nelle successioni metamorfiche.

In prossimità della **pk 19+575** l'opera intercetta una faglia ad angolo medio-alto immergente verso S come evidenziato dal sondaggio SR15.

Sono state inoltre osservate e caratterizzate strutture tettoniche a basso angolo. I piani a basso angolo sono maggiormente sviluppati, e presentano una maggiore persistenza laterale, soprattutto quando presenti all'interno della successione sedimentaria del Bacino Terziario Piemontese mentre all'interno delle unità metamorfiche la deformazione indotta da queste strutture è dispersa dalla scistosità principale.

Le zone di taglio osservate hanno andamento subparallelo alla stratificazione ed una potenza minima apparente di 70-80 m. All'interno della zona di taglio le superfici di stratificazione sono completamente obliterate; si osserva una ripetizione di superfici di movimento, principali e associate.

Il grado di fratturazione della roccia all'interno della zona di taglio è estremamente elevato e qualora una di tali zone dovesse essere intercettata dallo scavo potrebbe causare un notevole decadimento della qualità geotecnica dell'ammasso roccioso. Il grado di fratturazione è generalmente medio per le Argille a Palombini (aP) e medio-alto per i metabasalti (B') che hanno un comportamento reologico tipico di materiali più rigidi e che quindi presentano giunti a persistenza più elevata, che comunemente non si propagano all'interno delle Argille a Palombini.

3.3 Inquadramento idrogeologico

L'area di studio è stata suddivisa su base litologica in diversi complessi idrogeologici a permeabilità differente, distinguendo lungo l'asse delle gallerie settori con comportamento idrogeologico omogeneo. Si possono distinguere due diversi contesti:

1. Ammasso roccioso in normale stato 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.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <div style="float: right;">Foglio 19 di 117</div>

Il contesto di tipo 2 è subordinato e correlato alla presenza di zone di faglia cataclastiche principali di spessore pluri-metrico 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.

Si procede alla descrizione di depositi inerenti all'opera oggetto della presente relazione. Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione geologica (cfr.....).

Dall'esame delle carote dei sondaggi disponibili emerge che a profondità maggiori di 10-20m generalmente i litotipi che costituiscono le formazioni di molare (FMp, FMbc, Fma, cR) presentano un grado di cementazione molto elevato. Pertanto il tipo di permeabilità dominante è quella per fratturazione, mentre la permeabilità per porosità può essere considerata irrilevante. I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto all'interno di questo complesso indicano per l'ammasso roccioso al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche prevalenti variabili tra 1×10^{-7} e 1×10^{-8} m/s. Si riscontrano conducibilità maggiori (indicativamente fino a 1×10^{-6} m/s) o minori (indicativamente fino a 1×10^{-9} m/s). Per questi elementi tettonici, che generalmente costituiscono anche i principali elementi idrogeologici dell'ammasso roccioso, sono state stimate delle conducibilità idrauliche piuttosto ridotte, dell'ordine dei $1 \times 10^{-6}/1 \times 10^{-8}$ m/s.

I litotipi relativi le argille a palombini (aP, dM, d'', f, Mn, Se'') fanno parte di unità metamorfiche ove la permeabilità è sostanzialmente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, a sua volta dipendente dalla reologia del tipo di roccia considerato. I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto indicano per l'ammasso roccioso al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche prevalenti variabili tra 1×10^{-7} e 1×10^{-8} m/s, meno frequentemente tendenti 1×10^{-6} m/s. Si riscontrano valori per la conducibilità fino a 1×10^{-10} m/s. Dall'osservazione dei sondaggi si riscontrano una serie di dati che rappresentano la permeabilità dell'ammasso roccioso detensionato nei primi metri al di sotto della superficie (indicativamente da 5 fino a 20 m); tali dati mostrano conducibilità molto più elevate, comprese tra 1×10^{-5} e 1×10^{-7} m/s. Si riscontra nelle zone di faglia una certa dispersione dei valori, anche se si può osservare che la conducibilità nelle faglie è distribuita in un intervallo tra 10^{-6} e 10^{-7} m/s nelle prove eseguite a profondità più basse (fino a 100 m), mentre l'intervallo si sposta tra 10^{-7} e 10^{-9} m/s man mano che la profondità aumenta.

I litotipi del complesso dei basalti (B', B'') presentano un comportamento reologico generalmente più fragile rispetto a quello dei litotipi della maggior parte degli altri complessi. I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto indicano per l'ammasso roccioso al di fuori delle zone di faglia, conducibilità idrauliche prevalenti variabili tra 1×10^{-6} e 1×10^{-7} m/s. Localmente si sono riscontrate anche conducibilità minori (fino a 1×10^{-8} m/s), valori che possono essere correlati a un basso stato di fratturazione o a una scarsa apertura delle fratture legata alla elevata copertura topografica. Nelle zone di faglia non sono stati eseguiti test idraulici. Per questi elementi tettonici sono comunque state stimate delle conducibilità idrauliche dell'ordine dei $1 \times 10^{-4}/1 \times 10^{-7}$ m/s.

Sorgenti e sistemi di flusso

Per quanto riguarda le WBS GN 14N e GN 15 P si sono individuate 21 sorgenti di cui 12 non captate, 6 captate e 3 di cui non si conosce l'utilizzo. Si registrano temperature medie tra 6 e 10°C,

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 20 di 117

un valore medio di conducibilità pari a 280 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e una portata medio nell'ordine di 0,2 l/s. Relativamente le WBS GN 14 R e GN 15 R si sono individuate 77 sorgenti di cui 34 non captate, 39 captate e 4 di cui non si conosce l'utilizzo. Si registreno temperature medie nell'ordine di 6 e 10°C e una portata media nell'ordine di 1 l/s.

Per maggiori informazioni sulle interferenze in superficie si rimanda alla relazione geologica-idrogeologica relativa alla Tratta in esame.

Afflussi in galleria

La stima degli afflussi in fase di scavo è stata effettuata sulla base di diversi parametri quali la conducibilità idraulica dei vari complessi idrogeologici precedentemente descritti, il carico idraulico, la presenza di zone di faglia e fratturazione, la presenza di zone carsificate o con fenomeni di dissoluzione del carbonato.

E' bene precisare che nella descrizione che segue le portate descritte sono quelle transitorie, ovverosia quelle che si verificano nelle prime ore/giorni dallo scavo. Poiché le portate di una galleria variano in funzione della sezione drenante considerata, ovverosia della tratta considerata, nell'ambito del presente studio si è scelto di riferirsi alle portate drenate su 10m di galleria. I valori delle portate sono stati inoltre stimati assumendo che la galleria drena liberamente, in assenza di rivestimenti impermeabilizzanti o operazioni di riduzione della permeabilità (es. iniezioni di malte cementizie o resine).

Anche per i carichi idraulici è bene precisare che quelli descritti nel seguito sono dei carichi idraulici stimati per le condizioni idrogeologiche imperturbate, ovverosia prima dell'inizio degli scavi. A seguito degli scavi, i carichi tenderanno poi a diminuire in maniera consistente. Se la galleria viene lasciata libera di drenare senza operazioni di riduzione della permeabilità al contorno, i valori di carico idraulico a costruzione terminata e rivestimenti ultimati, potranno indicativamente attestarsi su valori compresi tra lo 0% e il 30% del valore iniziale imperturbato. E' bene precisare che già in corso di scavo, via via che il fronte avanza tenderà ad incontrare condizioni di carico idraulico già parzialmente differenti da quella naturale, a causa del drenaggio innescato dalla tratta già eseguita retrostante il fronte. Va altresì rimarcato che i valori di carico idraulico qui riferiti sono quelli da tenere in conto qualora si intendesse procedere alla realizzazione di un rivestimento non drenante, poiché verosimilmente, in assenza di drenaggio, in tempi più o meno prolungati a seconda della permeabilità e della ricarica dalla superficie (mesi/anni) il carico idraulico naturale tenderebbe in linea di massima a ripristinarsi.

WBS GN 14N

La tratta di scavo identificata con le pk 16+275/16+437 si sviluppa all'interno di rocce basaltiche. L'ammasso roccioso presenta una permeabilità per fratturazione di grado medio, con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato in un intervallo di 350-450 m. Sono state ipotizzate portate in galleria comprese tra 0.4 e 2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le pk 16+480/16+521 è prevista l'intersezione con una zona di faglia all'interno degli argilloscisti, rilevata nel sondaggio SR14 e con spessore incerto. Si ipotizza un

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 21 di 117

grado di connettività abbastanza basso, un carico idraulico imperturbato pari a circa 350 m e portate nell'ordine di 0.4-2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le pk 16+437/16+480 e pk 16+521/17+680 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso. I carichi idraulici imperturbati stimati sono variabili in questa zona, tra 450 e 200 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m, con eventuale presenza di portate inferiori

WBS GN 14 R

Nei settori tra le progressive pk 17+768/17+901, pk 17+945/18+629, pk 18+670/18+929, pk 18+970/19+054, pk 19+098/19+308, pk 19+353/19+547 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso. I carichi idraulici imperturbati stimati sono variabili nell'intervallo tra 100 e 250 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'intervalli di valori 0.16-0.4 l/s*10 m.

Nelle tratte comprese tra le progressive pk 17+901/17+945, pk 18+629/18+670, pk 18+929/18+970, pk 19+054/19+098, pk 19+308/19+353, pk 19+547/19+569 è prevista l'intersezione con alcune delle numerose zone di faglia presenti all'interno degli argilloscisti. Si ipotizza che il grado di connettività sia abbastanza basso. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 100 e 250 m, non sono disponibili dati da sondaggio sul livello d'acqua. Sono state ipotizzate portate riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le progressive pk 19+569/19+575 è prevista l'intersezione con una zona di faglia dedotta dai dati di terreno e dal sondaggio SR15. È stata stimata una permeabilità molto bassa ($K < 10^{-8}$ m/s). La connettività in questi contesti viene supposta molto bassa. Il carico idraulico stimato è compreso tra 150 e 250 m considerando lo stato imperturbato. Si ipotizzano portate riferibili all'intervallo 0-0.16 l/s*10 m in fase di scavo.

La tratta compresa tra le pk 19+575/19+591 è stata distinta perché situata nella zona di danneggiamento della faglia individuata dal sondaggio SR15. Il litotipo predominante sono le brecce di Costa Cravara, in questo caso brecce monogeniche a elementi di basalto. La permeabilità per fratturazione di questo tipo di roccia è elevata e con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 150 e 250 m. Si ipotizzano portate massime superiori a 2 l/s*10 m in fase di scavo.

La tratta di scavo compresa tra le progressive pk 19+591/19+677 si sviluppa all'interno delle Brecce di Costa Cravara. Si evidenzia una permeabilità per fratturazione abbastanza elevata con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato tra i 150 e i 250 m. Si ipotizzano durante lo scavo portate riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m con locali passaggi all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m dipendenti dal grado di fratturazione presente nell'ammasso roccioso.

Le tratte relative alle progressive pk 19+684/20+301, pk 20+343/20+794, pk 20+835/20+988 si trovano all'interno della Formazione di Molare. Ad entrambe è stato attribuito un grado di permeabilità basso ed una conseguente modesta connettività delle fratture. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo compreso tra 0.16-0.4 l/s*10 m.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 22 di 117

Nelle tratte di scavo comprese tra le progressive pk 19+591/19+684, pk 20+301/20+343, pk 20+794/20+835 è ipotizzata l'intersezione con due zone di faglia all'interno della Formazione di Molare (litofacies ruditica parzialmente cementata-FMp). Si può supporre una permeabilità moderata e una connettività delle fratture limitata. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo 0.4-0.2 l/s*10 m con possibili riduzioni locali.

WBS GN 15 P

La tratta di scavo che si estende tra le progressive pk 16+286/16+430 si sviluppa all'interno di rocce basaltiche che presentano quindi una permeabilità piuttosto elevata anche al di fuori delle zone di faglia. L'ammasso roccioso presenta una permeabilità per fratturazione di grado medio, con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato piuttosto elevato, compreso in un intervallo di 350-450 m, ipotizzando un livello d'acqua prossimo alla superficie all'interno degli argilloscisti soprastanti i basalti. Sono state ipotizzate portate comprese tra 0.4 e 2 l/s*10 m in fase di scavo.

Nella tratta compresa tra le progressive pk 16+481/16+521 è prevista l'intersezione con una zona di faglia all'interno degli argilloscisti, rilevata nel sondaggio SR14 e con spessore incerto. Cautelativamente si può ipotizzare che all'interno della zona di faglia si possano incontrare sporadiche zone ad elevata permeabilità intervallate da frequenti zone a permeabilità moderata. Sembra ragionevole ipotizzare che il grado di connettività sia abbastanza basso. Il carico idraulico imperturbato stimato è piuttosto elevato, pari a circa 350 m. Sono state ipotizzate portate riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m in fase di scavo con eventuale riscontro di valori inferiori dovuti alla presenza di probabili zone meno permeabili legate alla presenza di rocce di faglia a granulometria fine.

Nel settore compreso tra le progressive pk 16+430/16+481 e pk 16+521/21+000 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso con corrispondente connettività ridotta, fatta eccezione per la presenza di lenti di basalti di estensione e posizione incerta che potrebbero portare a locali aumenti del grado di permeabilità (medio-alta). I carichi idraulici stimati imperturbati sono variabili in questa zona, tra 450 e 200 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'insieme 0.16-0.4 l/s*10 m in fase di scavo.

WBS GN 15 R

Nei settori compresi tra le progressive pk 17+790/17+906, pk 17+949/18+615, pk 18+658/18+918, pk 18+964/19+055, pk 19+095/19+285, pk 19+330/19+535 non è prevista l'intersezione con discontinuità importanti. Il grado di permeabilità atteso è perciò da basso a molto basso con corrispondente connettività ridotta, fatta eccezione per la presenza di lenti di basalti. I carichi idraulici imperturbati stimati sono variabili nell'intervallo tra 100 e 250 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferibili all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00

Foglio
23 di
117

Nelle tratte relative alle progressive pk 17+906/17+949, pk 18+615/18+658, pk 18+918/18+694, pk 19+055/19+095, pk 19+285/19+330, pk 19+535/19+558 è prevista l'intersezione con alcune delle numerose zone di faglia presenti all'interno degli argilloscisti. Cautelativamente si può stimare che all'interno delle zone di faglia si possano incontrare sporadiche zone ad elevata permeabilità intervallate da frequenti zone a permeabilità moderata. Sembra ragionevole ipotizzare che il grado di connettività sia abbastanza basso, anche nei settori dove la permeabilità è maggiore. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 100 e 250 m, non sono disponibili dati da sondaggio sul livello d'acqua. Sono state ipotizzate portate in fase transitoria riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m con riduzioni locali riscontrabili alla presenza di probabili

Nella tratta relative le progressive pk 19+558/19+570 è prevista l'intersezione con una zona di faglia dedotta dai dati di terreno e dal sondaggio SR15. È stata stimata una permeabilità molto bassa ($K < 10^{-8}$ m/s), data la presenza di materiale a granulometria molto fine interpretato come roccia di faglia. La connettività in questi contesti viene supposta molto bassa. Il carico idraulico imperturbabile stimato è compreso tra 150 e 250 m. Si sono state ipotizzate portate riferibili a valori compresi nell'intervallo 0-0.16 l/s*10 m durante lo scavo.

La tratta compresa tra le progressive pk 19+570/19+591 è stata distinta perché situata nella zona di danneggiamento della faglia individuata dal sondaggio SR15. Il litotipo predominante sono le brecce di Costa Cravara, in questo caso brecce monogeniche a elementi di basalto. La permeabilità per fratturazione di questo tipo di roccia è elevata e con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato stimato è compreso tra 150 e 250 m. Si sono ipotizzate portate superiori a 2 l/s*10 m durante lo scavo.

La tratta di scavo compresa tra le progressive pk 19+591/19+677 si sviluppa all'interno delle Brecce di Costa Cravara che, in questa zona, si presentano come brecce monogeniche a elementi di basalto. Esse sono quindi caratterizzate da una permeabilità per fratturazione abbastanza elevata anche al di fuori delle zone di faglia, analoga a quella dei basalti, con un discreto grado di connettività idraulica. Il carico idraulico imperturbato è stato stimato tra i 150 e i 250 m. Sono state ipotizzate portate massime transitorie riferibili all'intervallo 0.4-2 l/s*10 m con valori locali relativi all'intervallo 0.16-0.4 l/s*10 m, dipendenti dal grado di fratturazione presente nell'ammasso roccioso.

Le tratte relative le progressive pk 19+677/20+279, pk 20+324/20+799, pk 20+844/21+000 si trovano all'interno della Formazione di Molare, in particolare nelle litofacies brecciosa (FMbc) e ruditica parzialmente cementata (FMp). Ad entrambe è stato attribuito un grado di permeabilità basso. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo di valori compreso tra 0.16-0.4 l/s*10 m.

Nelle tratte di scavo comprese tra le progressive pk 20+279/20+324, pk 20+799/20+844 è ipotizzata l'intersezione con due zone di faglia all'interno della Formazione di Molare (litofacies ruditica parzialmente cementata-FMp). Si può supporre una permeabilità moderata e una connettività delle fratture limitata. Il carico idraulico imperturbato è stimato piuttosto elevato, compreso tra i 200 e i 300 m. Le portate massime transitorie stimate sono riferite all'intervallo 0.4-0.2 l/s*10 m in fase di scavo.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda alla relazione geologica-idrogeologica relativa alla Tratta 4.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001 A00 Foglio 24 di 117

4 ELEMENTI GEOLOGICI ESSENZIALI AI FINI DELLA CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

4.1 Note generali

Si riporta nei paragrafi che seguono la descrizione delle formazioni interessate dallo scavo della "Tratta 4" della Galleria di Valico. 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.

4.2 Formazione di Molare

4.2.1 Note generali

All'interno della formazione di Molare sono state distinte cinque litofacies, caratterizzate da rapporti geometrici reciproci di sovrapposizione e/o di eteropia di facies:

- litofacies brecciosa (fm_{bc}),
- litofacies ruditica poligenica parzialmente cementata (fm_p),
- litofacies ruditica cementata a clasti calcarei dominanti (fm_c),
- litofacies siltoso-pelitica (fm_s),
- litofacies arenacea (fm_a).

Allo stato attuale delle conoscenze le litofacies individuate sono cinque, tuttavia non è da escludere che, in seguito ad ulteriori approfondimenti, possano esserne individuate altre.

4.2.2 Litofacies brecciosa (FM_{bc})

La litofacies è costituita da una breccia monogenica, a supporto di clasti, ad elementi di serpentiniti e subordinate metaperidotiti, con locale presenza di blocchi di dimensioni metriche. Nel complesso si tratta di una litofacies ben cementata, osservata a vari livelli stratigrafici, all'interno e nella parte alta della litofacies FM_p (vedi in seguito). Lo spessore massimo osservato per questa unità è inferiore a 50 m.

La quasi totalità dei clasti è costituita da rocce serpentinitiche, tuttavia sul terreno è stata rilevata una presenza piuttosto scarsa di asbesti, concentrati in rare, sottili patine in frattura all'interno di alcuni clasti serpentinitici, anche se non si esclude che localmente possano essere presenti delle concentrazioni maggiori.

4.2.3 Litofacies ruditica poligenica parzialmente cementata (FM_p)

L'unità è costituita da conglomerati e subordinati livelli arenacei. I conglomerati da *clast- a matrix-supported* con matrice arenacea, si presentano in strati metrici, localmente gradati e con gli elementi

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 25 di 117

di dimensioni inferiori embricati. I ciottoli presentano un grado di arrotondamento variabile (da subangolosi a ben arrotondati) e consistono di metabasiti, serpentiniti, eclogiti, calcescisti, marmi e micascisti, con localmente presenza di dolomie e calcari. I clasti serpentinitici talora contengono asbesti in modeste quantità concentrati in fratture, anche se non si esclude che localmente possano essere presenti delle concentrazioni maggiori.



Figura 4-1 - Dettaglio della litofacies brecciosa monogenica ad elementi di serpentiniti (FMbc).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 26 di 117



Figura 4-2- Litofacies ruditica poligenica (FMp): evidenti le alternanze di areniti grossolane e ruditi a scarsa matrice e clasti pluricentimetrici.

I clasti hanno dimensioni medie tra 10 e 20 cm, ma eccezionalmente si possono trovare blocchi fino ad oltre 1 m di diametro. Localmente (es. Carrosio) la successione risulta maggiormente organizzata, con strati gradati di potenza metrica a base erosionale. Gli strati arenacei, di potenza centimetrico-decimetrica, sono costituiti da litareniti con lamine oblique a piccola scala e piano-parallele.

L'unità ha una potenza minima osservata di 400 metri circa.

4.2.4 Litofacies ruditica cementata a clasti calcarei dominanti (FMc)

La litofacies è composta da conglomerati e brecce poligenici prevalentemente *clast-supported*, a matrice arenacea grigiastra fortemente cementata. I clasti, da centimetrici a metrici, sono costituiti soprattutto da litotipi calcarei e dolomitici, e subordinatamente da basalti e metaofioliti.

La netta dominanza di clasti a composizione carbonatica è la principale causa della forte cementazione che caratterizza la litofacies. Gli elementi di maggiori dimensioni (max. 1-2 m) si trovano spesso concentrati ed allineati secondo la stratificazione principale, presentano una struttura *clast-supported* e sono probabilmente il risultato di un periodo più o meno prolungato di assenza di sedimentazione in cui la matrice più fine è stata allontanata per effetto dell'azione delle acque.

In tutta la litofacies sono presenti livelli metrici di areniti grossolane microconglomeratiche, con laminazione piano-parallela (nei sedimenti più fini) e livelli di brecce calcaree ad elementi centimetrici.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVRBGN0000001A00	Foglio 27 di 117

L'unità ha una potenza minima osservata di 400 metri circa ed è riferibile al Rupeliano per inquadramento con le altre unità.

4.2.5 *Litofacies siltoso-pelitica (FM_s)*

L'unità è costituita da marne argillose, marne siltose e areniti molto fini, micacee, di colore grigiastro, con frustoli e frammenti vegetali carbonificati. In affioramento presentano spesso una coltre di alterazione argillosa di colore giallastro-ocra con spessori di 1-2 metri.

L'unità è arealmente poco diffusa, è stata osservata nel settore compreso tra le località di sottovalle e Borlasca, dove raggiunge una potenza di 45-50 m circa. Nello specifico, essa non è interessata dallo scavo della Galleria di Valico.

Litofacies arenacea localmente fossilifera (FM_a)

Tale unità è costituita da arenarie da grossolane a fini localmente fossilifere, in strati decimetrico-metrici gradati e caratterizzati da fenomeni di cementazione differenziale. Sono presenti, soprattutto nella parte inferiore della litofacies, intercalazioni centimetrico-decimetriche di conglomerati e microconglomerati ad elementi caratterizzati da un buon grado di arrotondamento e sfericità.

L'unità ha una potenza non superiore a 50 metri circa.



Figura 4-3 - Torrente Lemme, in prossimità dell'abitato di Carrosio. Passaggio tra la litofacies arenacea FM_a della formazione di Molare (in basso) alla soprastante formazione di Rigoroso.

5 INDAGINI GEOGNOSTICHE

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 313"> <tr> <td>Foglio 28 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 28 di 117
Foglio 28 di 117		

5.1 Note generali

I sondaggi al momento disponibili nel settore attraversato dalla Galleria di Valico – Tratta 4 sono i seguenti, elencati in base allo sviluppo delle PK lungo il tracciato:

- SR14
- SR15
- AA301G115 / BH18PZ

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

5.2 Sondaggi del Progetto Preliminare

AA301G115 / BH18

Località: Voltaggio – Valle Barca (AL)

Data realizzazione dal 11/02/2002 al 28/03/2002.

Unità attraversate:

- da 0 a 33 m: non recuperato (distruzione di nucleo);
- da 33 a 230m: Formazione di Molare, litofacies ruditica poligenica (FMp). “Roccia a tessitura granulare clastica a struttura omogenea, raramente laminata, a stratificazione per lo più indistinta; roccia da debole a mediamente resistente, non ossidata, con discontinuità a spaziatura da molto stretta a moderata, colore prevalente grigio verde. Conglomerati poligenici con clasti da subangolari a subarrotondati (\varnothing da <0.5 cm a 4-6 cm), con ciottoli e blocchi sparsi (\varnothing max 20 cm); sono presenti intercalazioni da decimetriche a metriche (1-3 m) di arenarie da fini a grossolane e più rare siltiti.”

5.3 Sondaggi del Progetto Definitivo

SR14

Località: Fraconalto (AL)

Quota: 687,801 m/slm. Coordinate: E 52676,82 N 166270,26

perforazione: a rotazione a carotaggio continuo;

data realizzazione dal 31/03/2004 al 08/07/2004.

Unità attraversate:

- da 0 a 5,5 m: depositi detritici (d);

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00	Foglio 29 di 117

- da 5,5 a 384m: Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP), caratterizzate localmente da livelli metrici e plurimetrici di siltiti calcaree;
- da 384 a 391m: metabasalti (B');
- da 391 a 461m: Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP);
- da 461 a 580m (fondo foro): metabasalti (B').
- Lungo l'intero sondaggio sono presenti numerosi intervalli decimetrico-metrici costituiti da gouge poiché il sondaggio è stato eseguito in prossimità di una faglia.

SR15

Località: Rive di Mezzo – Voltaggio (AL)

Quota: 513,306 m/slm. Coordinate: E 52267,33 N 169388,91

Tipo di sondaggio: carotaggio continuo

Data di realizzazione: 28/04/04 - 11/08/04

Unità attraversate:

- da 0 a 23 m: Formazione di Molare, litofacies ruditica poligenica (FMp);
- da 23 a 61m: Formazione di Molare, litofacies brecciosa (FMbc);
- da 61 a 98m: Breccie della Costa di Cravara (cR);
- da 98 a 194m: metabasalti (B'), l'intervallo in prossimità dei 129 m circa intercetta una struttura, probabilmente a basso angolo connessa allo sviluppo di un gouge con clasti e matrice alterati di colore violaceo-rossastro.
- da 194 a 214m: Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP);
- da 214 a 244m: gouge a spese di Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP) e probabilmente di Breccie della Costa di Cravara (cR);
- da 244 a 292m: metabasalti (B');
- da 292m a fondoforo: Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 30 di 117

6 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA/GEOMECCANICA

6.1 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 (sabbie localmente ghiaiose in matrice limosa);
- materiali a grana fine (limi e argille in matrice sabbiosa);
- rocce metamorfiche (argilloscisti filladici, argille a palombini, serpentiniti, argilliti).

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(sabbie localmente ghiaiose in matrice limosa);
- i criteri per la caratterizzazione dei materiali a grana fine (limi e argille in matrice sabbiosa)
- i criteri per la caratterizzazione delle rocce metamorfiche (argilloscisti filladici, argille a palombini, serpentiniti, argilliti).

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

6.2.1 Introduzione

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;

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 31 di 117

- coefficienti di permeabilità.

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 $\cong 35\div 40\%$.

6.2.2 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
- σ_{vo}' = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova SPT (kg/cm²)
- 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	$27,5 \div 43,3$	$(21,7 \div 27,5) \cdot \frac{1 + 2 \cdot (k_o)_{sc}}{1 + 2 \cdot (k_o)_{nc}}$

Tabella 6-1 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  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 32 di 117

O ancora secondo la seguente correlazione:

- $D_r(\%) = 21 \text{radq}(N_{\text{spt}}/(s+0.7))$ - 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:

- $N_{\text{SPT}} = 100$ - se le condizioni di rifiuto sono raggiunte nel primo tratto di 15 cm o nel secondo tratto di 15 cm
- $N_{\text{SPT}} = N_2 + \frac{50}{a} \cdot 15 \leq 100$ 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
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 33 di 117

6.2.3 Angolo di resistenza al taglio

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

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

6.2.4 Caratteristiche di deformabilità

Moduli elastici iniziali

I moduli iniziali di taglio (G_{01}) e di Young (E_{01}), 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:

$$G_{01} = \frac{\gamma_t}{9,81} \cdot (V_s)^2 \quad (\text{kPa})$$

$$E_{01} = G_{01} \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

γ_t = peso di volume naturale del terreno in kN/m_3

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

V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/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:

$$G_o = G_{01} \cdot \left(\frac{p'}{p_o'} \right)^{0.5} \quad (\text{kPa})$$

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

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 34 di 117

G₀ 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 6-2: 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 6-3 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 γ indotto, tratte da Lo Presti (1989). In alternativa alle curve di degrado possono essere adottate le seguenti espressioni (Fahey, 1992 e Fahey & Carter, 1993):

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p style="text-align: center;">IG5103ECVRBGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 35 di 117</p>

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

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

o meglio (Byrne et al, 1990):

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

essendo:

γ = deformazione di taglio corrente

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

τ_{max} = tensione di taglio limite

τ = tensione di taglio corrente

G_o = 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 $(1/3 \div 1/5) \cdot E_o$; 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 $1/5 \cdot E_o$, 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
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 36 di 117

- 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}' .

6.3 Materiali a grana fine (limi e argille) saturi

6.3.1 Introduzione

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  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 37 di 117

6.3.2 Resistenza al taglio non drenata

Premesse di carattere generale

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:

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

6.3.3 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).

6.3.4 Caratteristiche di deformabilità

Moduli elastici iniziali

Generalità

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:

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 38 di 117

γ_t = peso di volume naturale del terreno in kN/m³

ν' = 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”.

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:

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

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

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 γ 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.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 39 di 117

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:

- $1/5 \cdot E_o$ 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 (C_c e C_r).

6.4 Formazioni rocciose

6.4.1 Generalità

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 **paragrafo 6.4.2**; il parametro **GSI** (Geological Strength Index) verrà valutato con la seguente espressione (vedi Sjoberg, 1997):

$$GSI = RMR_{199} - 5$$

- 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 **paragrafo 6.4.3**).
- 3 Le caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso verranno stimate sulla base di quanto riportato nel paragrafo 6.4.4.

6.4.2 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 σ_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

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 42 di 117

- 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.

6.4.3 Criteri di rottura

In accordo a quanto riportato in Brown & Hoek (1988), Hoek & Brown (1988) e Hoek, Kaiser & Bawden (1995) (vedi anche 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:

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

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

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 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 313"> <tr> <td>Foglio 43 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 43 di 117
Foglio 43 di 117		

GSI = RMR'89 –5

RMR'89 = vedi il paragrafo 6.4.2

m_i = coefficiente relativo alla roccia intatta

σ_1' = tensione principale efficace maggiore

σ_3' = tensione principale efficace minore

σ_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 **8.4**).
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 RMR₈₉ 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 σ_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;

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 44 di 117

ricorrendo a terminologie proprie della meccanica dei terreni tale resistenza può essere denominata “softened”.

Sotto tali presupposti, nei casi rappresentati da situazioni non caratterizzate da dissesti pregressi 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 σ_1' e σ_3' possono essere trasformati in termini di tensioni di taglio τ e di tensioni efficaci normali alla superficie di rottura σ_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 τ e di tensioni efficaci normali alla superficie di rottura σ_n' verrà interrotto per valori di σ_n' negativi (trazione) inferiori a 0 kPa; in corrispondenza di valori di σ_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	
			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 6-4 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)	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							
	A. Thick bedded, very blocky sandstone 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. Sandstone with thin inter-layers of siltstone						
	D. Siltstone or silty shale with sandstone layers						
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.							
	G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers						
<p>→ : Means deformation after tectonic disturbance</p>							

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 6-5 Prospetto per la Classificazione Geomeccanica (GSI) degli ammassi rocciosi eterogenei (Flysch) secondo Marinos-Hoek (2000).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 47 di 117

Tipo di ammasso	Criterio di valutazione di σ_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 6-6: Ammassi rocciosi eterogenei – Criteri di valutazione di σ_c e di m_i (Hoek et al., 1998; Marinos & Hoek, 2000)

6.4.4 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:

γ_t = peso di volume naturale del terreno in kN/m³

ν' = 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 seguenti 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.

In presenza di formazioni flyshoidi (prospetto **8.5**, Marinos & Hoek - 2000) il modulo elastico della roccia intatta verrà determinato pesando i singoli moduli elastici della matrice rocciosa afferenti alle due componenti litologiche dell'ammasso, utilizzando i "pesi" indicati in **tab.8.6**.

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.

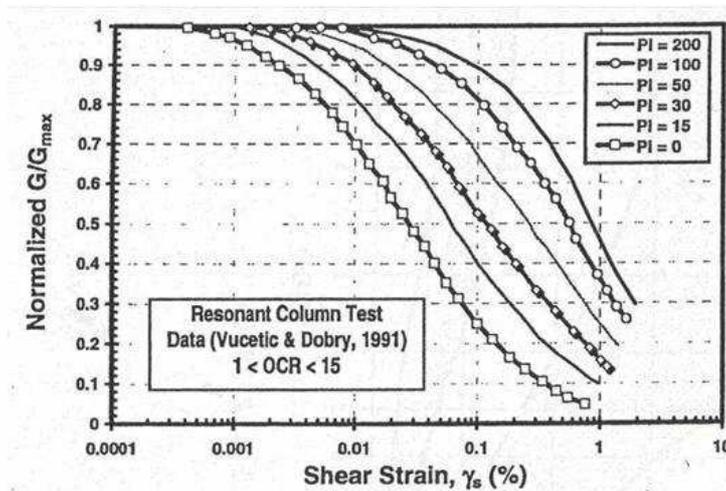


Figura 6-1 Curve di decadimento secondo Vucetic e Dobry, 1991

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 49 di 117

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

Oggetto del presente capitolo è la caratterizzazione geotecnica-geomeccanica delle principali formazioni interagenti con lo scavo della Galleria di Valico – Tratta 4, ovvero la Formazione di Molare e le Argilliti a Palombini.

Preliminarmente all'attività di analisi ed elaborazione dei risultati emersi dalla campagna di indagini, si è proceduto all'individuazione, nell'ambito delle unità geologiche classificate al precedente capitolo 3, delle formazioni aventi simili caratteristiche geomeccaniche.

E' stata quindi condotta, per ogni gruppo geomeccanico così individuato, l'attività di studio finalizzata alla caratterizzazione delle unità geologiche interagenti con il tratto della Galleria di Valico oggetto del presente elaborato. Per ciascuna formazione analizzata verrà proposto lo schema logico/operativo sviluppato ad hoc per giungere allo scopo preposto.

7.1 Formazione di Molare

Oggetto del seguente paragrafo è la caratterizzazione geomeccanica della Formazione di Molare.

Si propone nel seguito la schema logico/operativo dell'attività di studio condotta al fine di pervenire alla caratterizzazione finale dell'ammasso:

1. **FASE:** qualificazione geo-meccanica dell'unità geologica. Laddove richiesto, ovvero per formazioni caratterizzate dall'alternanza sufficientemente regolare di litologie ben differenziate, si è proceduto all'attribuzione dell'appropriata tipologia composizionale/strutturale secondo il quadro di Classificazione Geomeccanica di Marinis-Hoek per ammassi rocciosi eterogenei – Flysch (2000), sulla base dei rapporti relativi fra le due litologie distinte costituenti l'ammasso stesso.
2. **FASE:** analisi completa del campione di risultati raccolti nell'ambito delle campagne di indagini geognostiche eseguite fino al momento della stesura del presente studio, con particolare attenzione alle seguenti proprietà della matrice rocciosa riferita alla singola o molteplici componenti litologiche costituenti le singole formazioni analizzate:
 - **Caratteristiche fisiche** (peso di volume naturale/secco, coefficiente di Poisson);
 - **Caratteristiche di resistenza** (compressione mono-assiale da prove di carico non confinato ed elaborazione dei Point Load Strength Tests, trazione indiretta, parametro di resistenza *mi* di Hoek-Brown);

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 50 di 117

Ai fini dell'interpretazione dei risultati dei Point Load Strength Tests, in assenza di informazioni specifiche per le formazioni rocciose in disamina, è suggerita l'adozione di fattori k_{50} variabili con la resistenza della matrice rocciosa. L'intero campione di dati Point Load Strength Index è stato dunque analizzato con riferimento a fattori di correlazione k_{50} , al variare del dato I_{s50} trattato, d'accordo con le indicazioni di letteratura (Palmstrom – 1994).

σ_c (MPa)	I_{s50} (MPa)	k_{50}
25 [*]) - 50	1.8 - 3.5	14
50 - 100	3.5 - 6	16
100 - 200	6 - 10	20
> 200	> 10	25

Tabella 7-1 Valori k_{50} suggeriti, al variare della resistenza a compressione (Palmstrom – 1994)

- **Caratteristiche di deformabilità** (moduli elastici da prove in laboratorio di compressione mono-assiale a controllo di deformazione, moduli elastici da prove dilatometriche in foro di sondaggio, moduli elastici ottenuti secondo la correlazione empirica di Deere-Palmstrom-Sigh – $E_i = MR \cdot UCS$).

3. **FASE:** definizione delle caratteristiche fisiche, di resistenza e deformabilità delle singole litologie costituenti le formazioni.

Per ammassi rocciosi costituiti da un Flyschoidi, secondo l'approccio indicato da Marinos-Hoek (2000): si è adottata nello specifico la formulazione della media-ponderata, selezionando i pesi relativi da attribuire alle due componenti litologiche, con la quale sono stati desunti i seguenti parametri fisico-meccanici:

- Peso di volume naturale/secco,
- Coefficiente di Poisson
- Resistenza a compressione mono-assiale (UCS)
- Resistenza a trazione indiretta
- Parametro di resistenza m di Hoek-Brown;

L'approccio basato sulla ponderazione dei singoli contributi delle unità litologiche che compongono le Formazioni a carattere Flyschoidi è stato applicato anche nella determinazione dei seguenti parametri di deformabilità della matrice rocciosa "composta":

- Modulo elastico tangente ottenuti dalle prove in laboratorio di compressione mono-assiale a controllo di deformazione

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 51 di 117

- Modulo elastico da prove dilatometriche in foro di sondaggio,
 - Modulo elastico ottenuto secondo la correlazione empirica di Deere-Palmstrom-Sigh – $E_i = MR \cdot UCS$)
4. **FASE:** classificazione dell'ammasso roccioso, tramite attribuzione del parametro GSI, in particolare per ammassi rocciosi Flyschoidi, secondo l'approccio indicato da Marinos-Hoek (2000). Il valore di GSI è stato altresì derivato dal BRMR di Bieniawski ottenuto dall'esame degli eventuali Rilievi Geostrutturali condotti sulle formazioni in disamina.
5. **FASE:** **determinazione dei moduli elastici d'ammasso, tramite la relazione di Hoek - Diederichs, 2006**, in condizioni di ammasso indisturbato e disturbato ($D=0.3$).

7.1.1 Note introduttive

La caratterizzazione geomeccanica della formazione in disamina è stata condotta sulla scorta dei dati forniti dalle verticali di indagine AA301G115, XA301G055, SR 16 e SR15.

Alla luce delle litostratigrafie riscontrate, le verticali interessano parzialmente o totalmente la facies conglomeratica parzialmente cementata della Formazione del Molare (Fmp), con attraversamento di zone di faglia limitatamente ai sondaggi SR16 e XA301G055.

Si evidenzia inoltre che solamente la verticale di indagine SR16 ha riscontrato l'attraversamento di banchi di arenaria più o meno grossolana interposti a strati puramente conglomeratici. La potenza dei banchi arenacei si attesta mediamente nell'ordine dei metri, pertanto si assume in questa sede che, alla scala dello scavo (raggio equivalente medio della galleria pari a circa 5.3 m), la formazione del Molare possa essere ingegneristicamente classificabile come un ammasso conglomeratico, riconducendo l'eventuale presenza di banchi metrici di natura arenacea nell'ambito di un contesto geo-meccanico *a fronte parzializzato*. Si anticipa, peraltro, che l'elaborazione dei dati ricavati dalle prove di laboratorio geo-meccanico ha comunque evidenziato delle proprietà fisico-meccaniche della litologia arenacea, inclusa entro la Formazione del Molare, mediamente uguali o superiori a quelle dei conglomerati poligenici debolmente/mediamente cementati. Tale constatazione, in attesa di un più completo quadro conoscitivo del contesto geo-meccanico, subordinato nello specifico all'esecuzione delle indagini geognostiche ricadenti nel Lotto 2, ha direzionato la caratterizzazione dell'ammasso del Molare verso la sola litologia prevalente, ovvero quella conglomeratica.

7.1.2 Litofacies conglomeratica (FMp - FMc)

Non si ha, al momento, disponibilità di indagini condotte alle profondità di interesse tecnico, ovvero a quota galleria, per la tratta da realizzarsi con scavo meccanizzato. I parametri geo-meccanici desunti dalle prove di laboratorio nonché la qualità dell'ammasso rilevata dall'osservazione delle carote di sondaggio si riferiscono pertanto alla condizione fisica propria dei conglomerati poligenici sottoposti ad uno stato tensionale ben inferiore a quello atteso in corrispondenza delle elevate coperture alle quali è previsto lo scavo. Si evidenzia a proposito che il sondaggio SR 16, con i 130

m indagati, costituisce l'indagine più profonda realizzata, a fronte di coperture di roccia massime nella tratta.

In considerazione di quanto sopra esposto, si rileva pertanto che i parametri fisico-meccanici della matrice rocciosa evidenziati dalle prove di laboratorio possono essere assunti, in linea generale, quale *rappresentazione conservativa* delle condizioni della matrice alle elevate profondità, demandando alle risultanze delle indagini geognostiche successive la definizione più specifica della stessa.

I suddetti parametri meccanici, riferibili alla facies meno cementata della Formazione in esame, sono stati peraltro estesi (con approccio conservativo) anche alla Facies FmC a clasti calcarei prevalenti, caratterizzata da una matrice maggiormente cementata (non disponendo del dato diretto sulla facies medesima).

Nell'attribuzione del peso di volume e delle caratteristiche di resistenza (resistenza a compressione mono-assiale e resistenza a trazione indiretta) delle componenti litologiche prevalenti (arenacea e conglomeratica) si è elaborata la serie di determinazioni sperimentali disponibili, le cui distribuzioni con la profondità rispetto al p.c. sono riportate in via grafica, nei diagrammi che seguono.

Per completezza di trattazione, sono proposti tutti i valori sperimentali disponibili per le litologie presenti nell'ambito delle litofacies comprese nella Formazione di Molare.

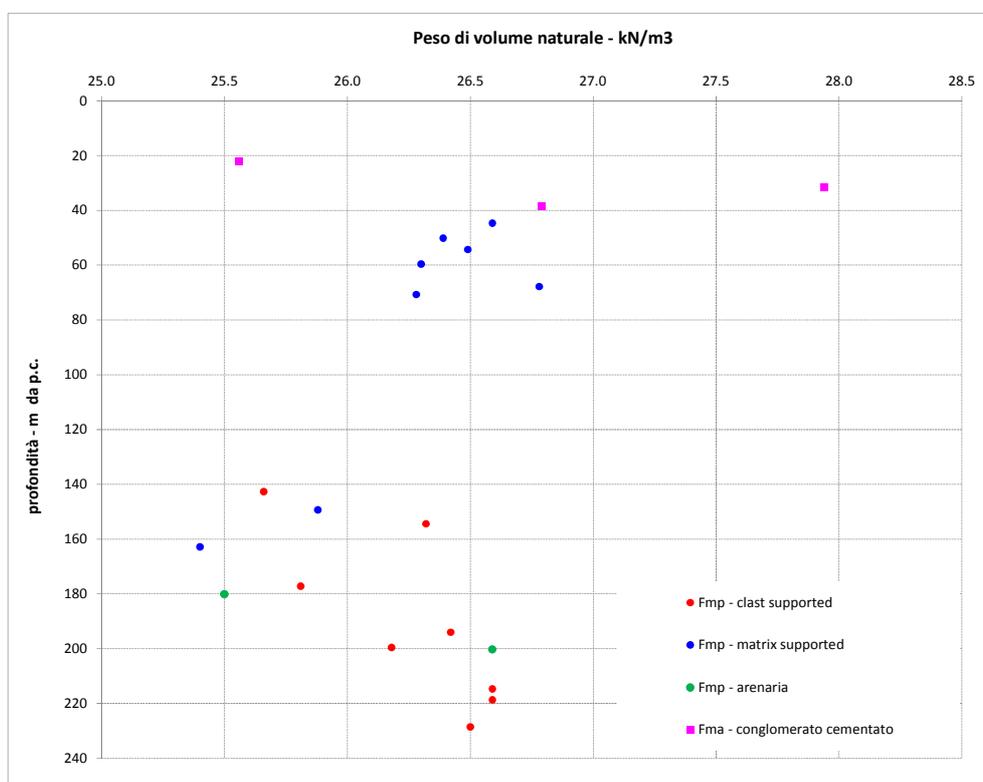


Figura 7-1 Distribuzione dei valori di Peso di volume naturale con la profondità

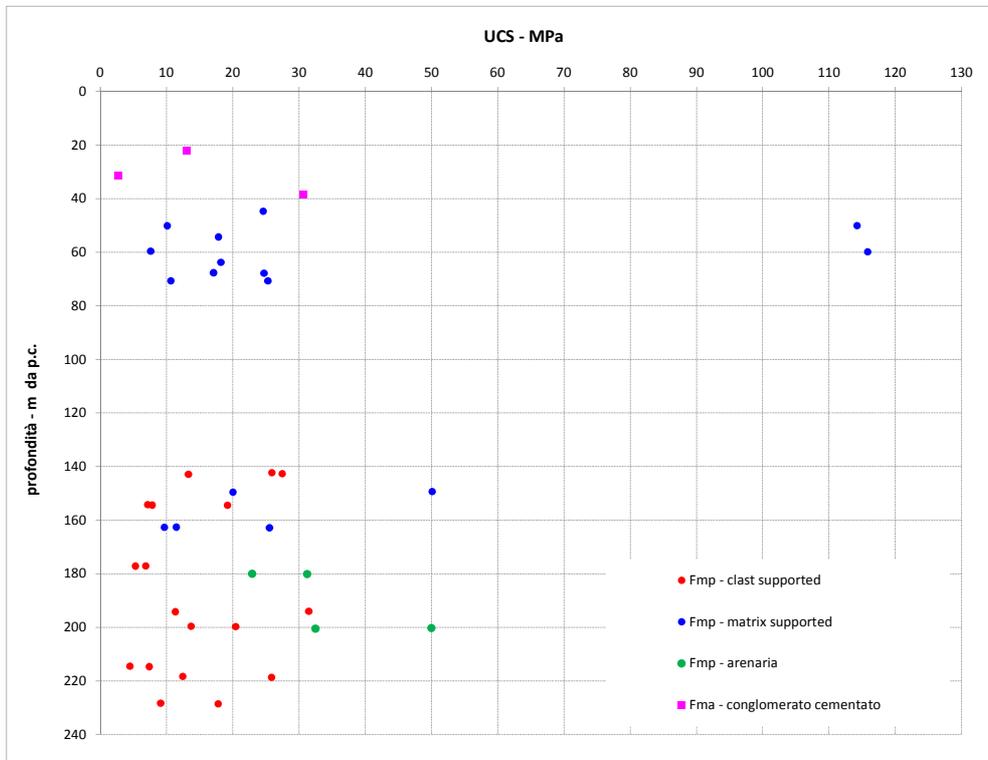


Figura 7-2 Distribuzione dei valori di UCS (laboratorio, correlazione con Point Load Strength Tests) con la profondità – Rappresentazione range 0-130 MPa.

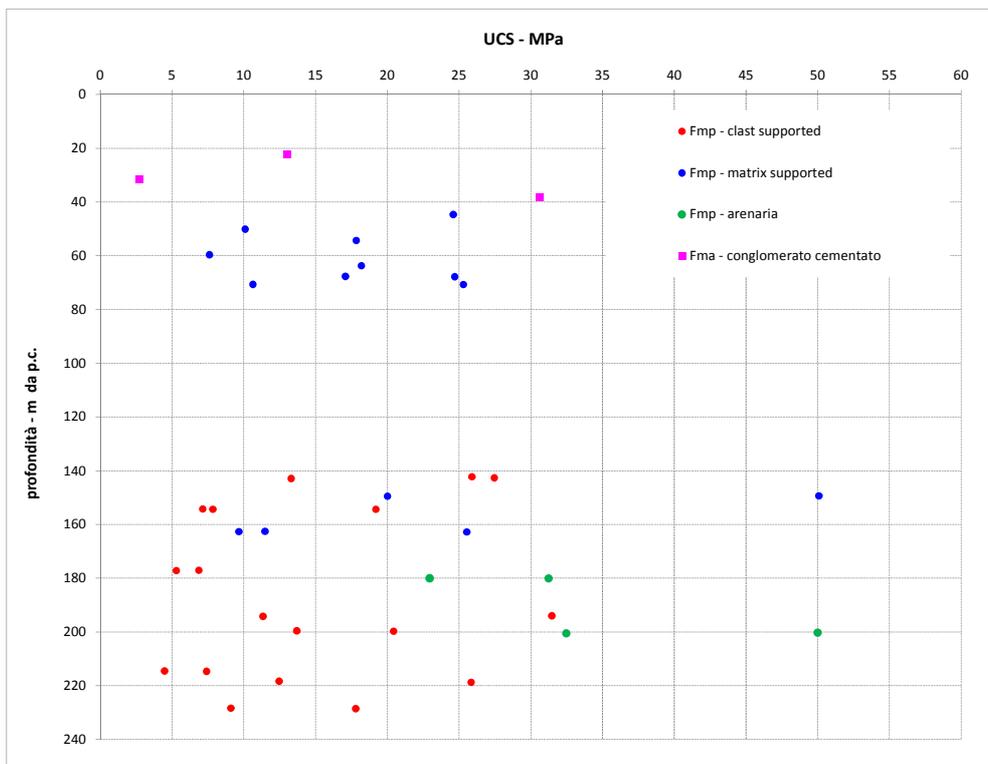


Figura 7-3 Distribuzione dei valori di UCS (laboratorio, correlazione con Point Load Strenght Tests) con la profondità – Rappresentazione range 0-130 MPa (in alto), 0-60 MPa (in basso)

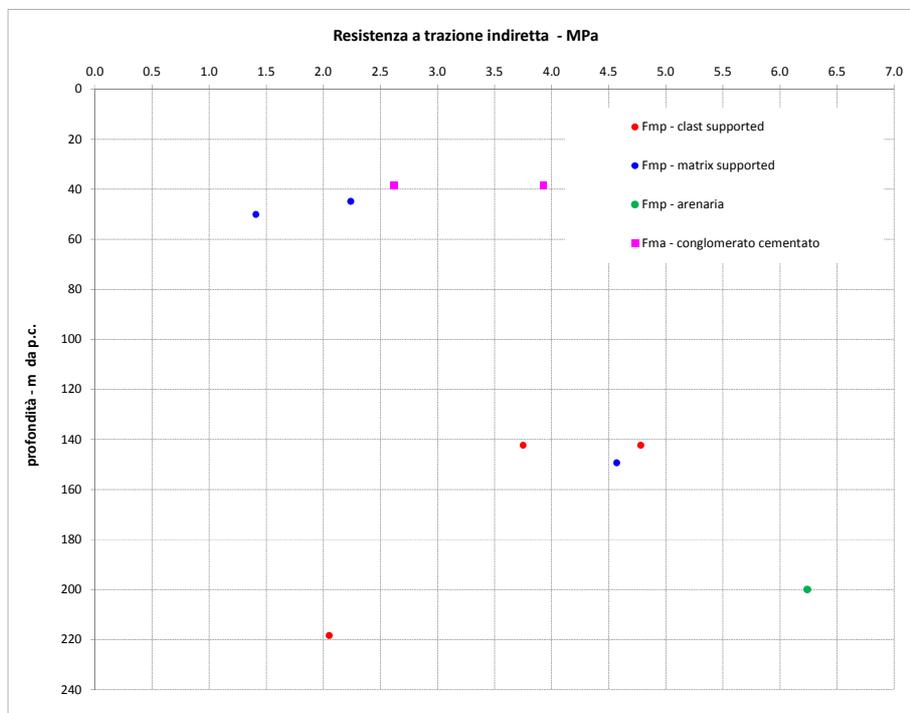


Figura 7-4 Distribuzione della resistenza a trazione indiretta con la profondità

Si è pertanto analizzato, con approccio statistico, l'intero campione di dati ottenuto dalle prove in situ e in laboratorio riferito alla litologia conglomeratica (campioni da carote sondaggi AA301G115, XA301G055, SR 16 e SR15), definendo in particolare una specifica distribuzione di probabilità normale per il parametro Resistenza a compressione mono-assiale della matrice rocciosa (si veda grafico seguente).

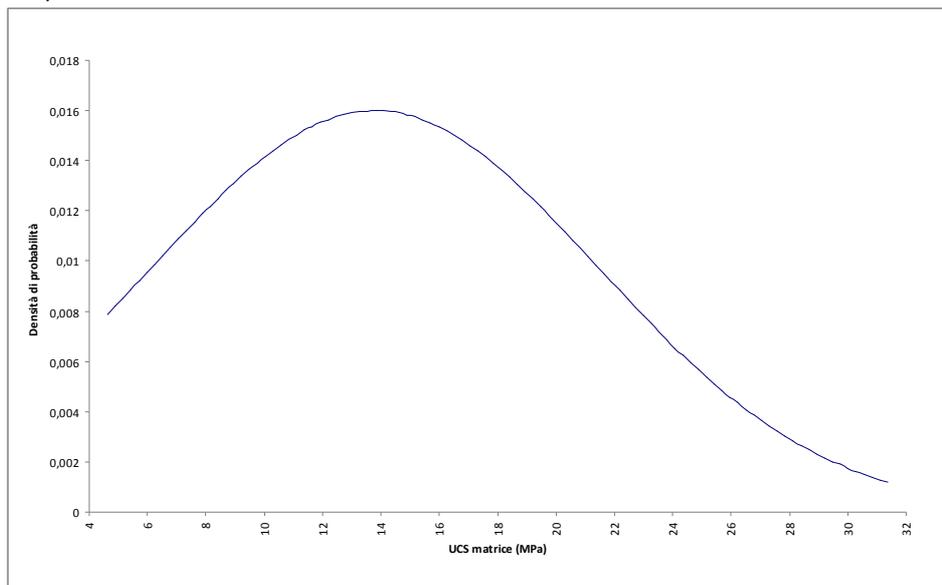


Figura 7-5 Distribuzione statistica UCS – Formazione di Molare

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 230 1532 313"> <tr> <td>Foglio 55 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 55 di 117
Foglio 55 di 117		

All'intero campione di dati è associabile una media pari a 15.24 MPa ed una concentrazione delle resistenze campionate attorno ai valori inferiori del range globale ricavato sia da prove di compressione mono-assiale in laboratorio, sia dall'elaborazione dei Point Load Tests. La distribuzione statistica derivante è pertanto rappresentata da una curva di densità di probabilità tipo gaussiana con cut-off asimmetrico, come mostrato nella figura seguente.

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 forniti in letteratura ($m_i = 21$).

Il modulo Elastico della matrice rocciosa intatta E_i è stato derivato secondo la formulazione di Deere, adottando il coefficiente $MR = 400$, compreso nel range indicato in letteratura e comprovato dal confronto diretto con le risultanze delle prove di compressione semplice in laboratorio, dalle quali è stato estrapolato il rapporto fra UCS e modulo elastico tangente misurato al 50% della resistenza a compressione ultima ($E_{t,50}$).

Ai fini dell'attribuzione dell'indice GSI all'ammasso conglomeratico si è selezionato un range di variabilità entro il quale siano comprese tutte le condizioni geo-meccaniche attese nell'attraversamento della Formazione di Molare, in particolare:

- **GSI minimo = 35:** tale valore è considerato rappresentativo della condizione d'ammasso in corrispondenza delle faglie di tipo trascorrente sinistro e dei sistemi coniugati riportate nel profilo geo-meccanico della linea. Si evidenzia che, alla luce degli elementi conoscitivi attualmente disponibili, è ragionevole presupporre per le faglie ed i piani di taglio a basso angolo (si veda quanto più dettagliatamente riportato al cap. 3) l'insorgenza di fenomeni di cementazione intervenuti successivamente alla formazione delle strutture medesime. Quest'ultime costituiscono pertanto delle fasce milonitizzate, laddove, in definitiva, si attende per l'ammasso una qualità distintamente superiore rispetto ad una condizione di destrutturazione (fascia cataclastica).
- **GSI massimo = 55:** l'adozione di tale valore massimale del range è mutuata dall'approccio di classificazione geo-meccanica proposto da Hoek-Marinos per formazioni di origine sedimentaria tettonicamente indisturbate, ma caratterizzate da variabilità litologica (Characterisation and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses - 2005). Nello specifico, gli autori suggeriscono per formazioni quali molasse in condizioni di confinamento significativo - come nel caso di gallerie profonde - e poste al di fuori delle zone di faglia, l'impiego di valori di Indici GSI compresi nell'intervallo 55 – 85. A questo proposito si rileva che, la maggior parte delle carote estratte dalle verticali di sondaggio interessanti la Formazione di Molare hanno

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 56 di 117

restituito valori di RQD nell'ordine dell'80-100% e condizioni di giunto mediamente caratterizzate da chiusura, assenza di riempimento ed alterazione. Rammentando che la porzione di formazione direttamente investigata ricade nell'ambito della facies meno cementata (se non direttamente entro fasce milonitizzate), appare quindi ragionevole, nonché conservativo, assumere un valore di GSI pari a 55 per quantificare le proprietà meccaniche dell'ammasso caratterizzato da indici di qualità più elevati, corrispondente ragionevolmente alla situazione attesa ad elevate profondità, al di fuori delle faglie trascorrenti.

Si è altresì definita una distribuzione di probabilità per il parametro GSI che riflettesse le soprastante considerazioni circa la limitatezza della profondità investigata e l'attraversamento delle porzioni di ammasso a più debole cementazione in associazione tuttavia ai buoni indici di qualità dell'ammasso (RQD carote) evidenziati dai sondaggi condotti in tali condizioni geo-meccaniche. La curva di densità di probabilità assunta è pertanto quella propria della distribuzione beta caratterizzata da parametri di forma $\alpha_1 = 3$ e $\alpha_2 = 1.5$ (Law, 1991).

Come si evince dalla curva sotto riportata, è stata considerata una distribuzione di GSI a maggior concentrazione nella settore "superiore" del range individuato 35-55 e valor medio 48, la quale riflette una condizione geo-meccanica attesa mediamente buona, con eventuale possibile decadimento della qualità dell'ammasso in zona di faglia debolmente/marginalmente interessata dal processo di ri-cementazione (milonitizzazione).

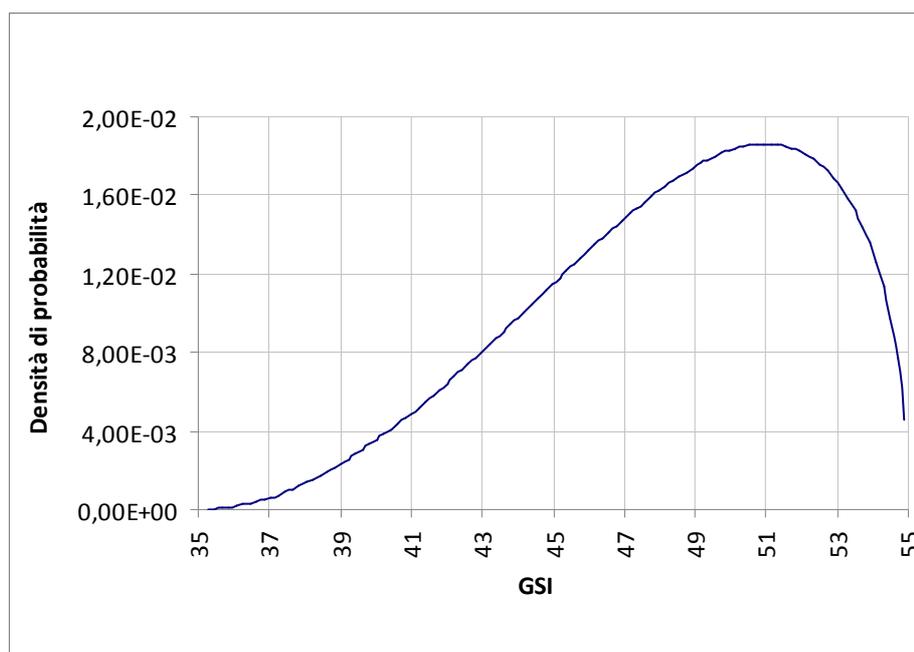


Figura 7-6 Distribuzione statistica GSI – Formazione di Molare

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 57 di 117

Il Modulo Elastico d'ammasso è stato infine derivato secondo la Formulazione di Hoek-Diederichs (2006), adottando le distribuzioni di valori di E_i e GSI (con disturbance factor $D=0$) descritte, definendo alcune combinazioni UCS-GSI rappresentative della totalità delle possibili combinazioni di valori, presi valutando le distribuzioni statistiche prima definite.

Si è pervenuti quindi alla seguente curva di densità di probabilità del Modulo Elastico d'ammasso. La totalità dei valori calcolati è compresa entro il range minimo-massimo individuato dagli estremi 234 – 4990 MPa, con valor medio intorno ai 1726 MPa.

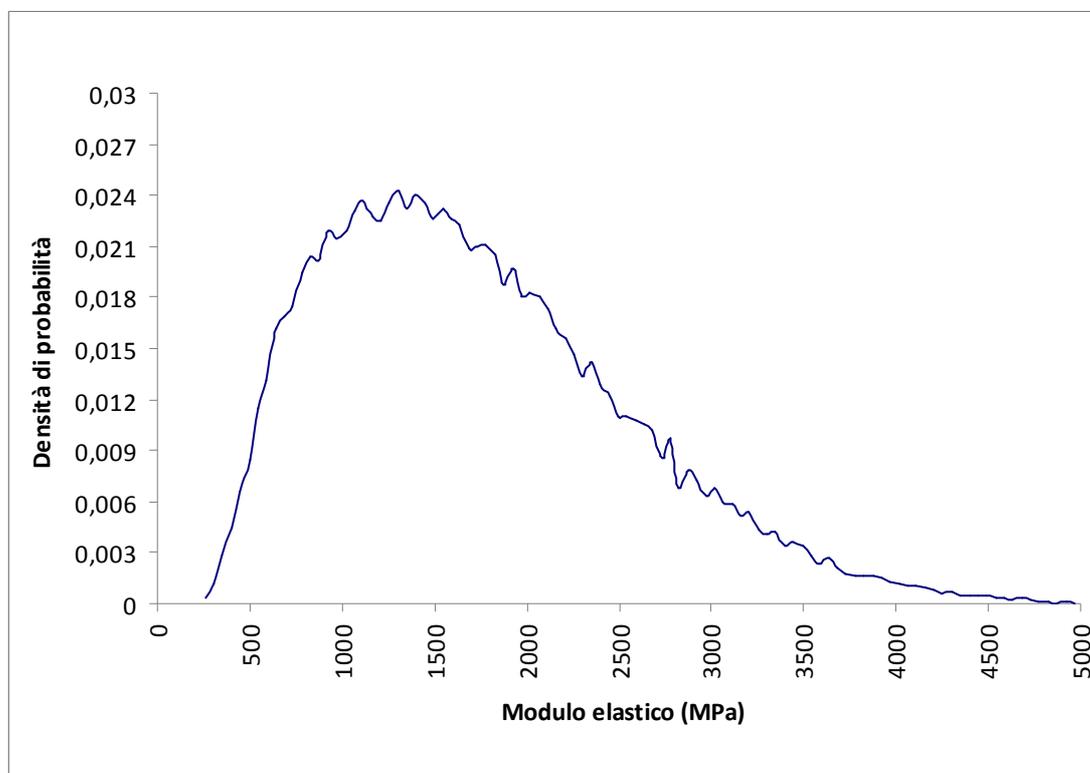


Figura 7-7 Distribuzione statistica Erm – Formazione di Molare

La distribuzione dei valori di modulo così derivata è stata infine validata anche rapportandola con i moduli di deformazione ottenuti dalle prove dilatometriche in foro di sondaggio, opportunamente ridotti a livello di modulo operativi.

A tal proposito, i dati riferiti alla deformabilità derivate sperimentalmente (Modulo elastico tangente e Modulo di deformazione) è rappresentata nel diagramma proposto qui di seguito.

Per completezza di trattazione, sono proposti tutti i valori sperimentali disponibili per le litologie presente nell'ambito delle litofacies comprese nella Formazione di Molare.

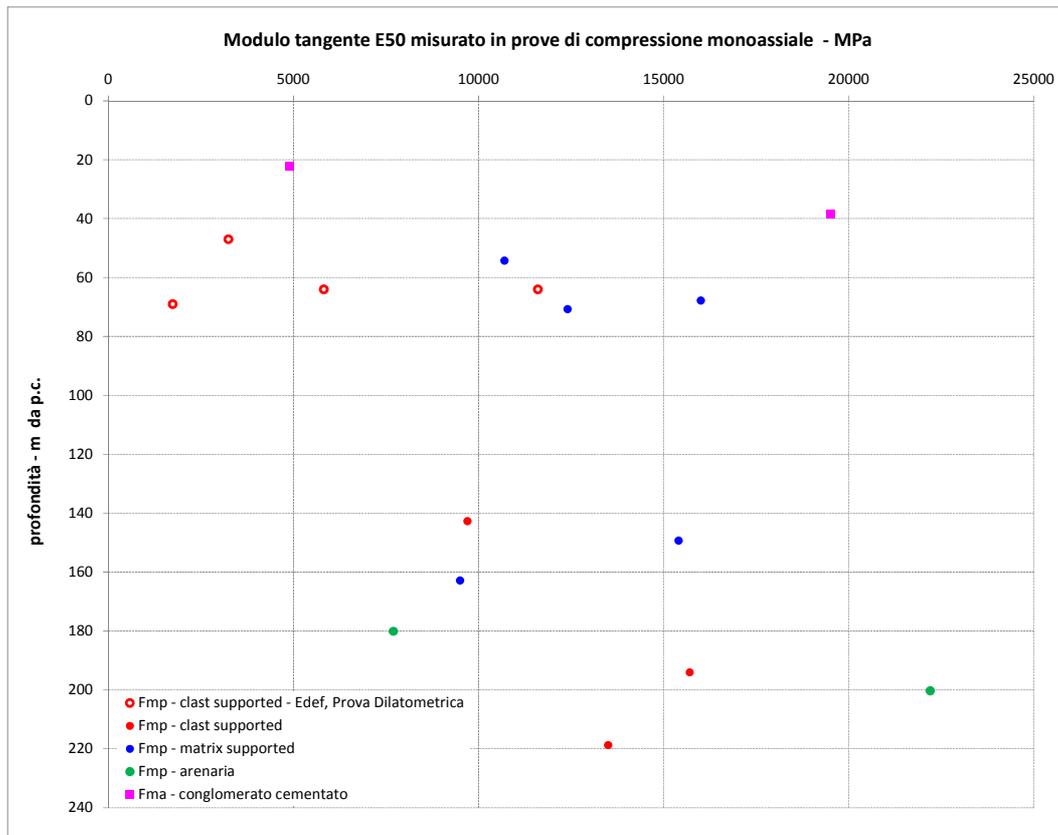


Figura 7-8 Distribuzione dei parametri di deformabilità con la profondità

Analogamente a quanto svolto per il Modulo elastico d'ammasso è stata calcolata la distribuzione per la resistenza a compressione "globale" dell'ammasso roccioso secondo la formulazione presentata al paragrafo 6.4

7.1.3 Distinzione in gruppi geo-meccanici nell'ambito della Formazione del Molare

Nell'ambito della valutazione del comportamento dell'ammasso all'apertura del cavo (fase di diagnosi) e della seguente definizione degli interventi di stabilizzazione e rinforzo della galleria (fase di terapia), si è operata la suddivisione dell'intero spettro di condizioni geomeccaniche individuate per la formazione di Molare in gruppi rappresentativi di specifiche condizioni dell'ammasso.

Tale suddivisione è stata realizzata attingendo alle distribuzioni statistiche dei parametri meccanici già esposte (UCS – GSI ed Erm, in particolare), operando specifiche valutazioni di natura ingegneristica che rispettassero comunque il quadro emerso dall'elaborazione statistica dei campioni di dati resi disponibili dalle prove in situ / laboratorio (UCS) od estrapolati dal quadro geologico di riferimento (GSI).

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 59 di 117

La partizione è consistita pertanto nel riconoscimento delle seguenti condizioni litologiche e/o geo-meccaniche:

- Conglomerati a cementazione elevata
- Conglomerati a cementazione moderata/scarsa
- Zone di Faglia / Piani di taglio a basso angolo

I parametri fisico-meccanici attribuiti (con variabilità) alle classi di cui sopra sono riportati nella seguente tabella:

Formazione	γ	ν	UCS	σ_t	m_i	GSI	E_{RM}
	[kN/m ³]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
Molare cementazione elevata	26	0.30	20÷30 (25)	1.60	18÷24 (21)	50÷55 (52)	2600÷5000 (3800)
Molare cementazione modesta/scarsa			7÷20 (13.5)			40÷50 (47)	900÷2600 (1750)
<u>Zona di Faglia/ Piani di Taglio</u>			5÷7 (6)			35÷40 (37)	240÷900 (570)

Si evidenzia che la scelta di associare all'ammasso caratterizzato dai GSI inferiori (faglia) i minimi valori di UCS esibiti dalle prove di compressione mono-assiale in laboratorio e/o ricavati dai Point Load Tests (e viceversa per il gruppo con GSI superiori), vuole essere una semplificazione del modello geotecnico di riferimento per l'implementazione delle analisi di diagnosi e terapia.

Tale semplificazione si colloca chiaramente dal lato della sicurezza, non essendo al momento riscontrata l'ipotesi che, all'ammasso meno cementato e/o interessato da faglie trascorrenti o piani di taglio, corrispondano valori della resistenza a compressione della matrice inferiori.

A conferma di ciò, si ricorda che la totalità delle prove di compressione mono-assiale svolte (includenti i valori massimali di UCS) sono infatti state condotte su provini riferiti all'ammasso conglomeratico debolmente cementato (F_{mp}), posto relativamente in superficie, e localmente attribuibili alle fasce milonitizzate associate alle faglie stesse.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 60 di 117

7.1.4 Litofacies arenacea localmente fossilifera (FMa)

Si è operata la classificazione geomeccanica della litofacies arenacea della Formazione di Molare, pur non essendo la stessa interessata dallo scavo delle gallerie, dal momento che essa costituisce l'unica facies arenacea indagata nel settore delle Galleria di Valico – Nord e che le risultanze di tale caratterizzazione possono essere estese, in assenza di indagini specifiche, alle altre formazioni arenacee incluse nella tratta in disamina. In particolare tale estensione verrà applicata con riferimento alle seguenti formazioni o facies:

- Formazione di Costa Montada - facies umB
- Formazione di Costa Areasa – facies fCa

Al fine di caratterizzare la facies FMa si sono utilizzati i risultati delle prove in situ e laboratorio associate all'esecuzione del sondaggio di progetto preliminare AA301G115.

L'elaborazione statistica della serie congiunta di dati derivanti dalle prove di compressione mono-assile in laboratorio e delle prove di Point load tests ha condotto alla distribuzione di densità di probabilità seguente:

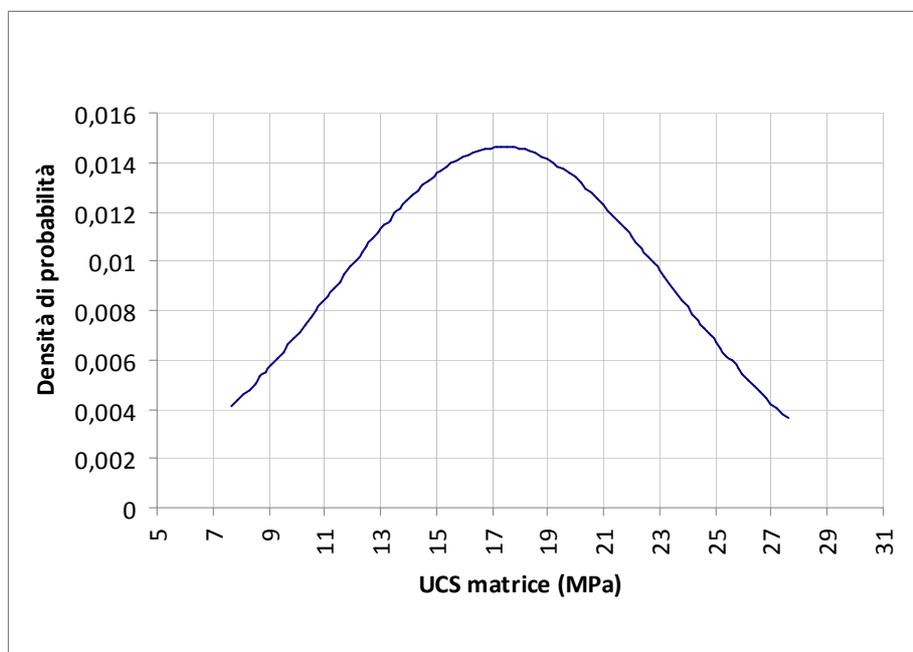


Figura 7-9 Distribuzione statistica UCS – Formazione di Molare-Fma

Il valore medio dell'UCS si attesta si 22 MPa, mentre il range di variazione è compreso fra 9.7 e 32.5 MPa. La distribuzione si rivela dunque lievemente asimmetrica con maggior densità di valori nella metà superiore dell'intervallo min-max individuato.

Dall'esame delle carote estratte nell'ambito del sondaggio SR16, comprendenti in modo significativo dei banchi di natura arenacea, è emerso come i livelli di arenaria siano in generale caratterizzati da indici RQD molto elevati (-->100% ca). Anche alla luce delle considerazioni già citate, contenute in Marinos – Hoek (2005), si ritiene opportuno assegnare a questa facies un range GSI rappresentativo di un ammasso in buone condizioni, assegnando cioè valori compresi fra 40 e 50 ed attribuendo alla potenziale variabilità dell'indice GSI nel suddetto range, una curva densità di probabilità di tipo beta ($a_1 = 5, a_2=1.5$) che rifletta la tendenziale qualità geomeccanica elevata dell'ammasso, pur contemplando valori di GSI minimi sufficientemente rappresentati.

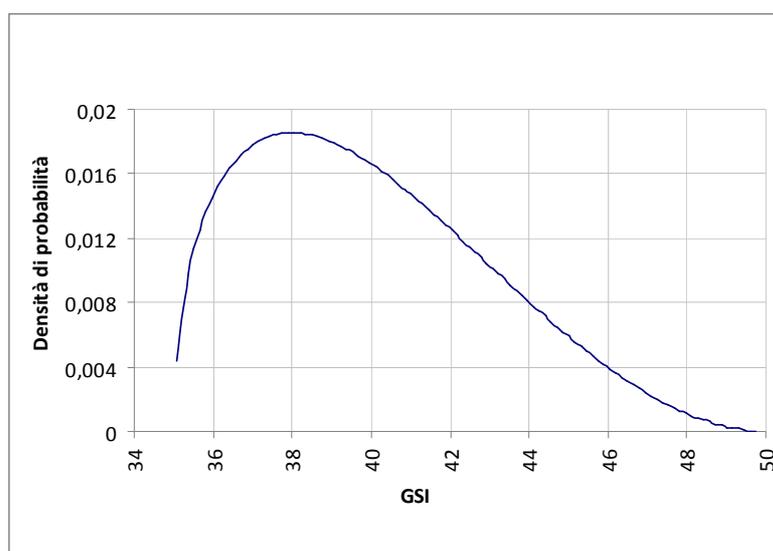


Figura 7-10 Distribuzione statistica GSI – Formazione di Molare-Fma

Analogamente a quanto condotto per la facies conglomeratica (alla cui trattazione si rimanda), sono state dedotte le curve di densità di probabilità per il Modulo Elastico d'Ammasso e la resistenza a compressione globale (σ_{cm}) dello stesso. Le curve sono riportate qui di seguito.

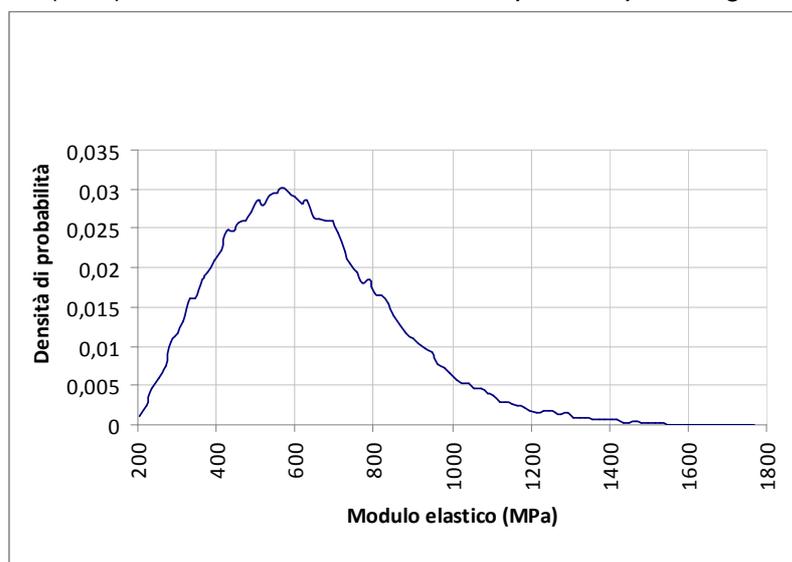


Figura 7-11 Distribuzione statistica Erm – Formazione di Molare-Fma

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001 A00 Foglio 62 di 117

Si rileva che il modulo elastico d'ammesso è compreso nel range 460 – 2720 MPa, con distribuzione quasi simmetrica attorno al valor medio 1486 MPa.

7.1.5 Quadro di sintesi caratterizzazione geomeccanica

Si riepilogano nel prospetto che segue i parametri fisico meccanici e di deformabilità dell'ammasso roccioso, per ogni litofacies compresa nella Formazione oggetto di caratterizzazione.

Formazione	γ	ν	UCS	σ_t	m_i	GSI	E_{RM}
	[kN/m ³]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
Molare cementazione elevata	26	0.30	20÷30 (25)	1.60	18÷24 (21)	50÷55 (52)	2600÷5000 (3800)
Molare cementazione modesta/scarsa			7÷20 (13.5)			40÷50 (47)	900÷2600 (1750)
<u>Zona di Faglia/ Piani di Taglio</u>			5÷7 (6)			35÷40 (37)	240÷900 (570)

Tabella 7-2 – Caratterizzazione geo-meccanica Formazione di Molare

7.2 Argillocisti

Oggetto del presente capitolo è la caratterizzazione geotecnica-geomeccanica della formazione costituita da Argillocisti filladici, appartenenti alle Formazioni degli “Argillocisti di Murta” (AGF) e degli “Argillocisti di Costagiutta” (AGI). Tali formazioni rappresentano, nella nuova cartografia ufficiale, Foglio “Genova” n. 213-230 in scala 1:50.000, la ex Formazione delle “Argilliti a Palombini del Passo della Bocchetta”. Dal punto vista geomeccanico le due formazioni sono completamente equivalenti alla ex formazione delle “Argille a Palombini del Passo della Bocchetta. Nel seguito il documento continuerà a riportare la terminologia “Argilliti a Palombini”.

Si propone nel seguito la schema logico/operativo dell'attività di studio condotta al fine di pervenire alla caratterizzazione finale dell'ammasso:

- 1. FASE:** analisi completa del campione di risultati raccolti nell'ambito delle campagne di indagini geognostiche eseguite fino al momento della stesura del presente studio (PP-PD-PE 1°lotto), con particolare attenzione alle seguenti proprietà della matrice rocciosa:

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001 A00 Foglio 63 di 117

- **Caratteristiche petrografiche;**
- **Caratteristiche fisiche** (peso di volume naturale/secco, conducibilità idraulica);
- **Caratteristiche di resistenza** (compressione mono-assiale, trazione indiretta);
- **Caratteristiche di deformabilità** (moduli elastici da prove in laboratorio di compressione mono-assiale a controllo di deformazione, moduli elastici da prove dilatometriche in foro di sondaggio)
- **Stato tensionale in sito**

L'elaborazione dati è confluita nell'analisi della distribuzione delle suddette proprietà fisico-meccaniche, desunte dai campioni provenienti dai sondaggi a carotaggio continuo, in relazione alla collocazione geografica delle corrispondenti verticali di indagine e alla profondità dal piano campagna dei campioni stessi. Si è valutata altresì la distribuzione di frequenza del campione oggetto di analisi, con particolare riferimento alla resistenza a compressione mono-assiale della matrice rocciosa (caratterizzata dalla maggior numerosità del campione).

2. **FASE:** analisi del campione di risultati emersi dalle campagne di indagini geognostiche pregresse correlata alle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso, ovvero all'indice RQD, considerato quale primo elemento rappresentativo delle condizioni geo-meccaniche dell'ammasso.
3. **FASE:** classificazione dell'ammasso roccioso, tramite attribuzione del parametro GSI, condotta sia sui campioni estratti dalle verticali di indagine e testati in laboratorio sia sulle carote associate ai punti di esecuzione delle prove in foro di sondaggio (prove dilatometriche, prove di permeabilità LUGEON). Obiettivo della presente fase di studio è la determinazione dei gruppi geomeccanici associati alla formazione delle Argilliti a Palombini. Si evidenzia sin d'ora che, nell'attività di classificazione dell'ammasso, si è adottata, quale criterio guida, la ripartizione in gruppi geo-meccanici emersa dalla campagna di indagine condotta nell'ambito dello scavo delle tratte dei cunicoli esplorativi Vallemme e Castagnola.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRGBN0000001 A00 Foglio 64 di 117

- 4. FASE:** caratterizzazione geotecnica-geomeccanica delle Argilliti a Palombini, con definizione dei parametri fisico-meccanici rappresentativi di ogni gruppo geomeccanico individuato nella fase precedente. L'esito finale di tale attività è disceso dall'analisi comparata delle risultanze emerse dall'elaborazione condotta sui dati derivati dalle campagne geognostiche del PP-PD-PE e del completo quadro conoscitivo emerso dallo scavo dei cunicoli esplorativi.

7.2.1 *Analisi completa campione risultati Indagini Pregresse*

Caratteristiche petrografiche

Oggetto del presente paragrafo è la sintesi delle analisi mineralogiche petrografiche condotte sulla formazione degli Argilloscisti Filladici. L'attività di studio in merito è stata condotta in maniera più organica in sede di redazione del Progetto Definitivo, nell'ambito delle prove di laboratorio condotte presso la Sezione di Torino dell'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG-CNR) nel periodo aprile 2004-marzo 2005.

Sono state eseguite una serie di analisi su campioni rappresentativi prelevati dalle carote pervenute in laboratorio, allo scopo di :

- individuare gli ambienti di formazione delle rocce di studio e le fasi mineralogiche presenti;
- individuare la presenza di minerali ascrivibili alla classe degli asbesti e definire la relativa pericolosità secondo il D.M. 14/05/1996, attraverso la determinazione dell'indice di rilascio da prova di automacinazione, o tramite indice di rilascio stimato in presenza di campioni con peso non sufficiente alla quantificazione della polvere rilasciata per automacinazione ;
- individuare la presenza di minerali argillosi rigonfianti, potenzialmente pericolosi per la statica delle opere sotterranee, attraverso tecniche di diffrazione a raggi X,.

I campioni oggetto di analisi sono elencati nelle tabelle che seguono (rispettivamente 1° e 2° serie di carote pervenute ai laboratori).

Sond.	Località	Campione	da m	a m	Lunghezza	Form. Geologica	Litotipo presunto
SR 11	Pietralavezzara	CR 2	198,40	198,90	0,50	Argille a Palombini	Argilliti
SR 11	Pietralavezzara	CR 3	310,50	10,90	0,40	Argille a Palombini	Serpentinoscisti
SR 11	Pietralavezzara	CR 5	379,30	379,70	0,40	Argille a Palombini	Anidriti
SR 12	Pietralavezzara	R1	85,25	85,80	0,55	Argille a Palombini	Argilliti
SR 12	Pietralavezzara	R2	121,20	121,60	0,40	Argille a Palombini	Serpentinoscisti
SR 13	Pietralavezzara	R1	142,30	142,90	0,60	Argille a Palombini	Argilliti

Campione	Sond.	Profondità (m)	Litotipo presunto
C.84	SR 11	414.50	Serpentinoscisti
C.90	SR 12	446.00	Argilloscisti/Anidriti
C.75	SR 14	319.60	Argilloscisti
C.78	SR 14	331.20	Argilloscisti
C.86	SR 14	371.60	Breccia di faglia in argilloscisti
C.87	SR 14	376.00	Breccia di faglia in argilloscisti
C.87	SR 14	379.00	Breccia di faglia in argilloscisti
C.88	SR 14	381.60	Breccia di faglia in argilloscisti
C.88A	SR 14	384.40	Breccia di faglia in argilloscisti
C.91	SR 14	396.00	Breccia di faglia in argilloscisti
C.117	SR 14	529.60	Breccia serpentinitica
C.119	SR 14	538.60	Breccia serpentinitica
C.121	SR 14	545.50	Breccia serpentinitica
C.35	SR 15	168.00	Breccia basaltico serpentinitica
C.22	SR 15	-	-

Tabella 6.1: Campioni e sondaggi di riferimento per la caratterizzazione minero-petrografiche di PD (prima e seconda serie).

Tali campioni sono stati sottoposti a caratterizzazione dal punto di vista minero-petrografico mediante tecniche di diffrazione a raggi X, cui è ha fatto seguito la predisposizione di analisi di approfondimento in relazione alla presenza di minerali asbestosi o rigonfianti, finalizzata rispettivamente alla verifica della possibilità di rilascio di minerali in forma fibrosa (con riferimento alle disposizioni di normativa vigente – DM 178 del 14/05/1996 – determinazione Indice di Rilascio) ed alla valutazione della potenzialità di rigonfiamento (saturazione con glicole etilenico delle frazioni granulometriche inferiori ai 16 micron).

Tutti i campioni relativi alla prima serie, rappresentativi della formazione degli argilloscisti e parte dei campioni di seconda serie, sono caratterizzati, mediamente, dalle seguenti specie mineralogiche, elencate in ordine di composizione percentuale crescente:

- Calcite
- Quarzo – Talco – Magnesite
- Clorite (tipo Clinocloro)
- Mica (tipo Muscovite o Illite)

I grafici che seguono forniscono la composizione mineralogica media della matrice degli Argilloscisti Filladici, come da Relazione Geomeccanica Generale del Progetto Definitivo.

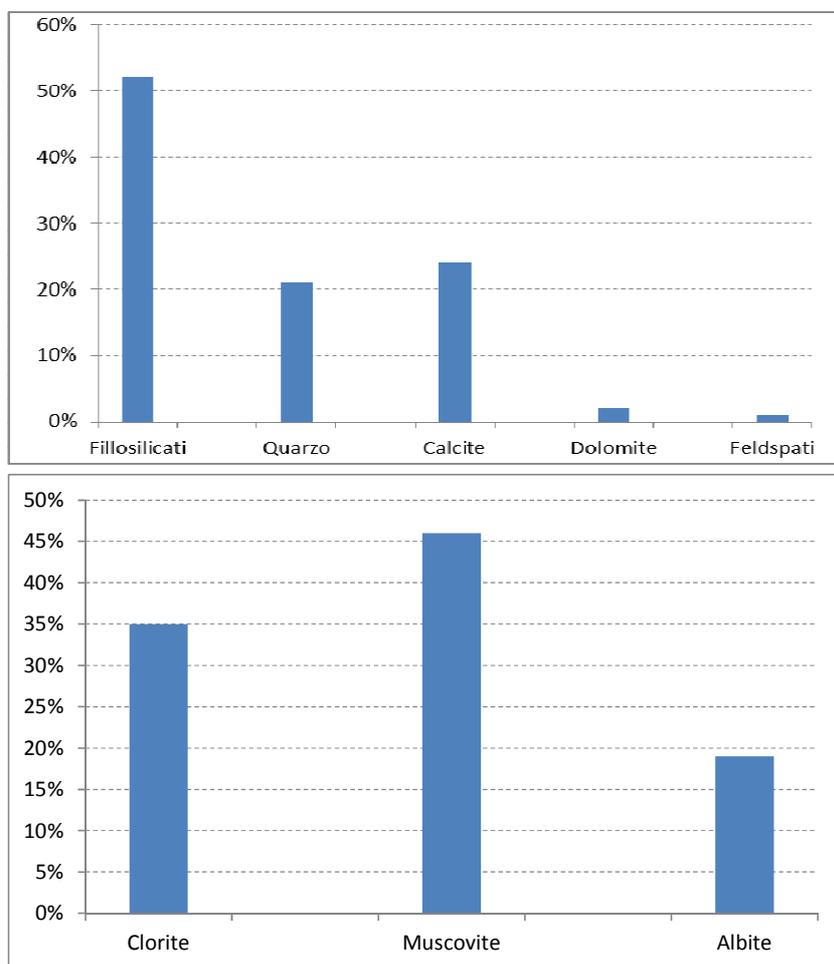


Figura 7-12 Composizione mineralogica media della matrice degli Argilloscisti Filladici (da PD)

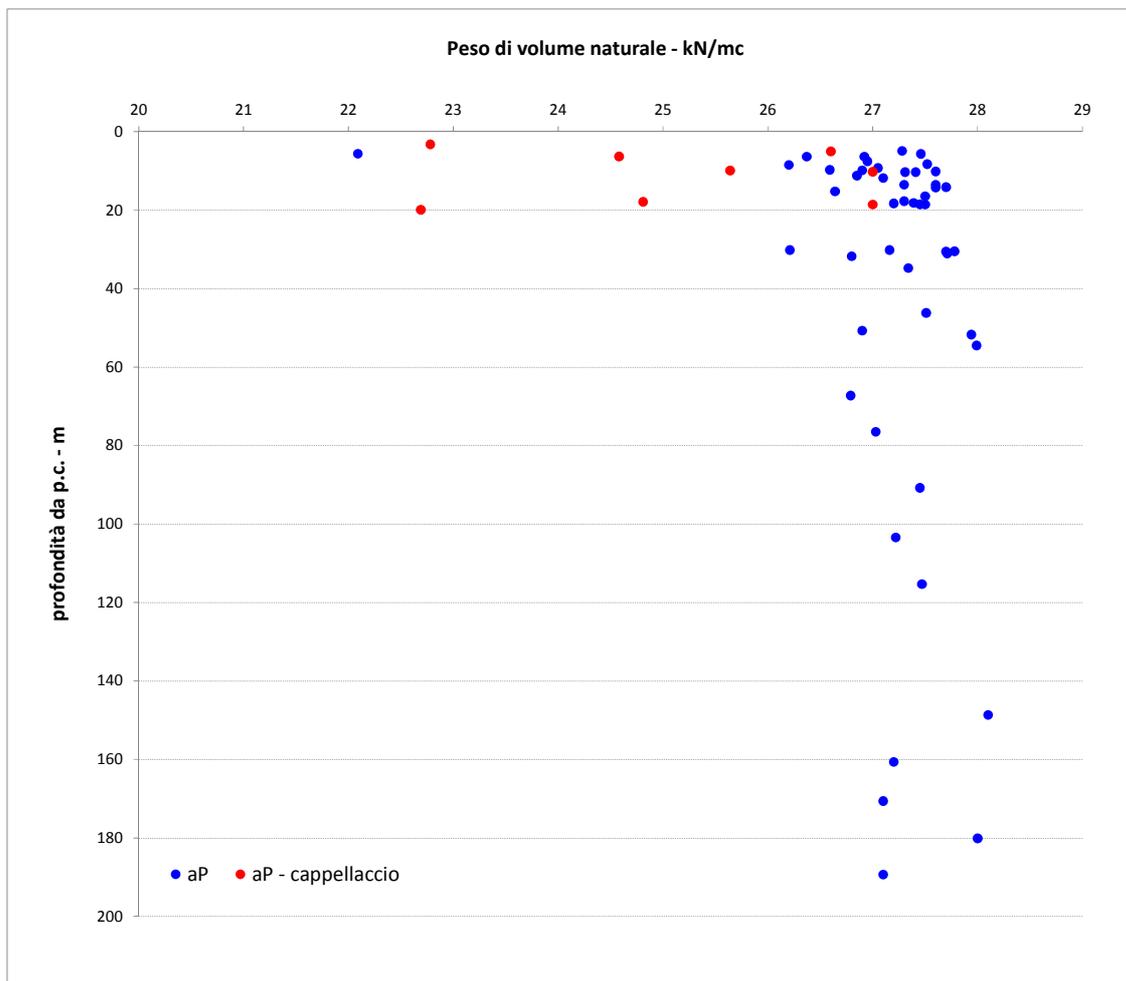
Limitatamente ai campioni con litotipo proprio degli argilloscisti, si evidenzia che gli elementi codificati con CR3 e R2 hanno evidenziato la presenza di materiali asbestosi, cui tuttavia si associa una non-pericolosità nei riguardi del rilascio di fibre. Le risultanze delle analisi dei campioni non hanno evidenziato la presenza di minerali argillosi rigonfianti.

Caratteristiche fisiche

Si propongono nel seguito, in forma grafica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni estratti dai fori di sondaggio eseguiti nelle campagne di indagine di PD e PE lotto 1.

Sono forniti i valori puntuali di peso di volume naturale e peso di volume del secco associati alla profondità dal p.c. del rispettivo campione di determinazione. Le serie di valori rappresentati si riferiscono in modo distinto alla formazione delle argilliti a Palombini e all'alterazione superficiale delle stesse (cappellaccio).

A corredo dei grafici sono esplicitati in forma tabellare i parametri essenziali della distribuzione di dati, al fine di favorire l'interpretazione critica del campione analizzato.

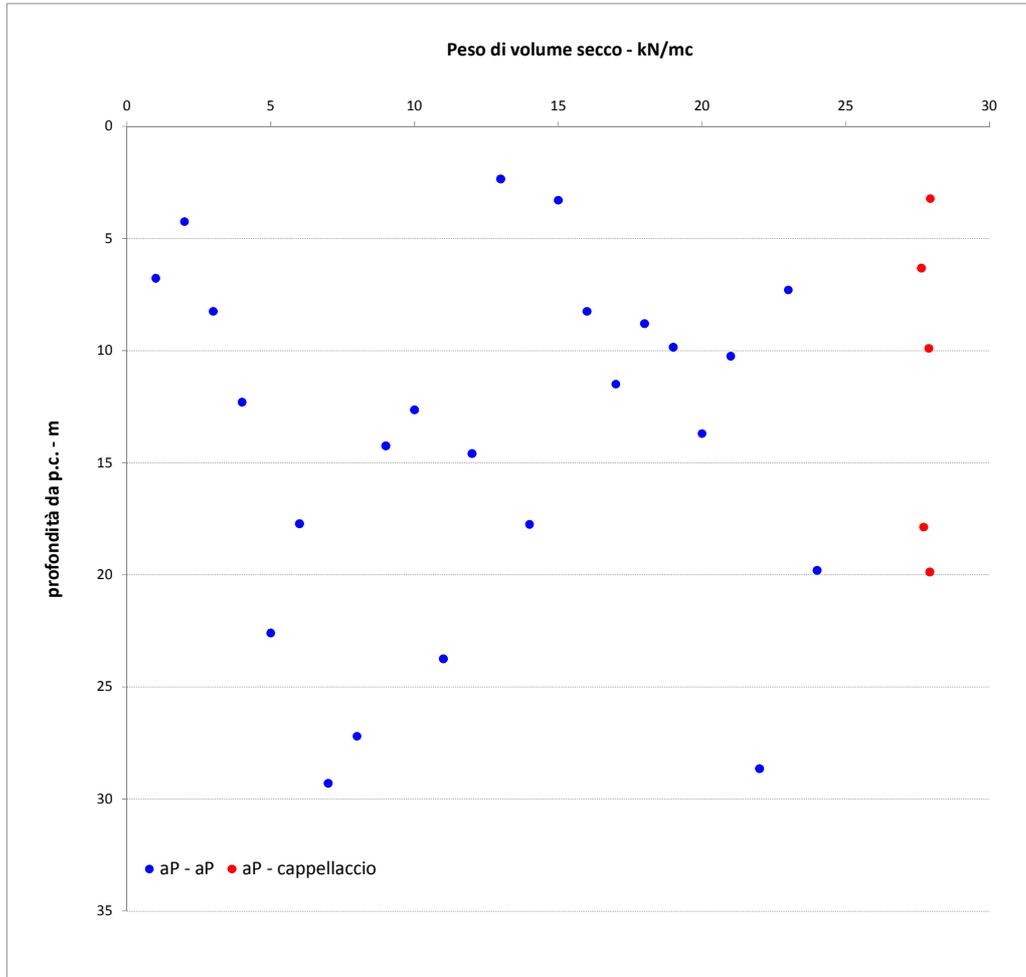


Formazione	aP	aP - cappellaccio
numerosità campione	48	8
Yn max – kN/m3	28	27
Yn Min – kN/m3	22	23
Yn Med – kN/m3	27	25
Yn Sqm – kN/m3	1	2
sqm/med	5%	7%

Figura 7-13 Risultati delle prove di laboratorio per la determinazione del peso di volume naturale

Dall'osservazione della distribuzione dei valori di peso naturale con la profondità, non appare evidente una correlazione con quest'ultima. La distribuzione dei valori è significativamente uniforme, concentrata attorno al valore medio di 27 kN/m³ per la formazione aP, e di 25 kN/m³ per la fascia alterata. Si evidenzia, specie in relazione alla cospicua numerosità del campione riferito alle argilliti a Palombini, la modesta incidenza della deviazione standard rispetto al valor medio.

Il dato sul peso di volume secco, riportato a seguire per completezza di esposizione, non è caratterizzato da particolare significatività ai fini progettuali. Si evidenzia peraltro la numerosità del campione inferiore rispetto alla determinazione del peso di volume naturale.



formazione	aP	aP - cappellaccio
numerosità campione	28	5
Ys max – kN/m3	28	28
Ys Min – kN/m3	22	28
Ys Med – kN/m3	27	28
Ys Sqm – kN/m3	2	0
sqm/med	6%	1%

Figura 7-14 Risultati delle prove di laboratorio per la determinazione del peso di volume secco

Si propongono a seguire i risultati delle prove di permeabilità LUGEON condotte in foro di sondaggio. Il campione di dati proposto è suddiviso per campagna di indagine di esecuzione. L'analisi statistica del campione globale fornisce un valor medio della conducibilità idraulica pari a $1.5 \cdot 10^{-6}$ m/s, con buona concentrazione della distribuzione attorno al valore medio.

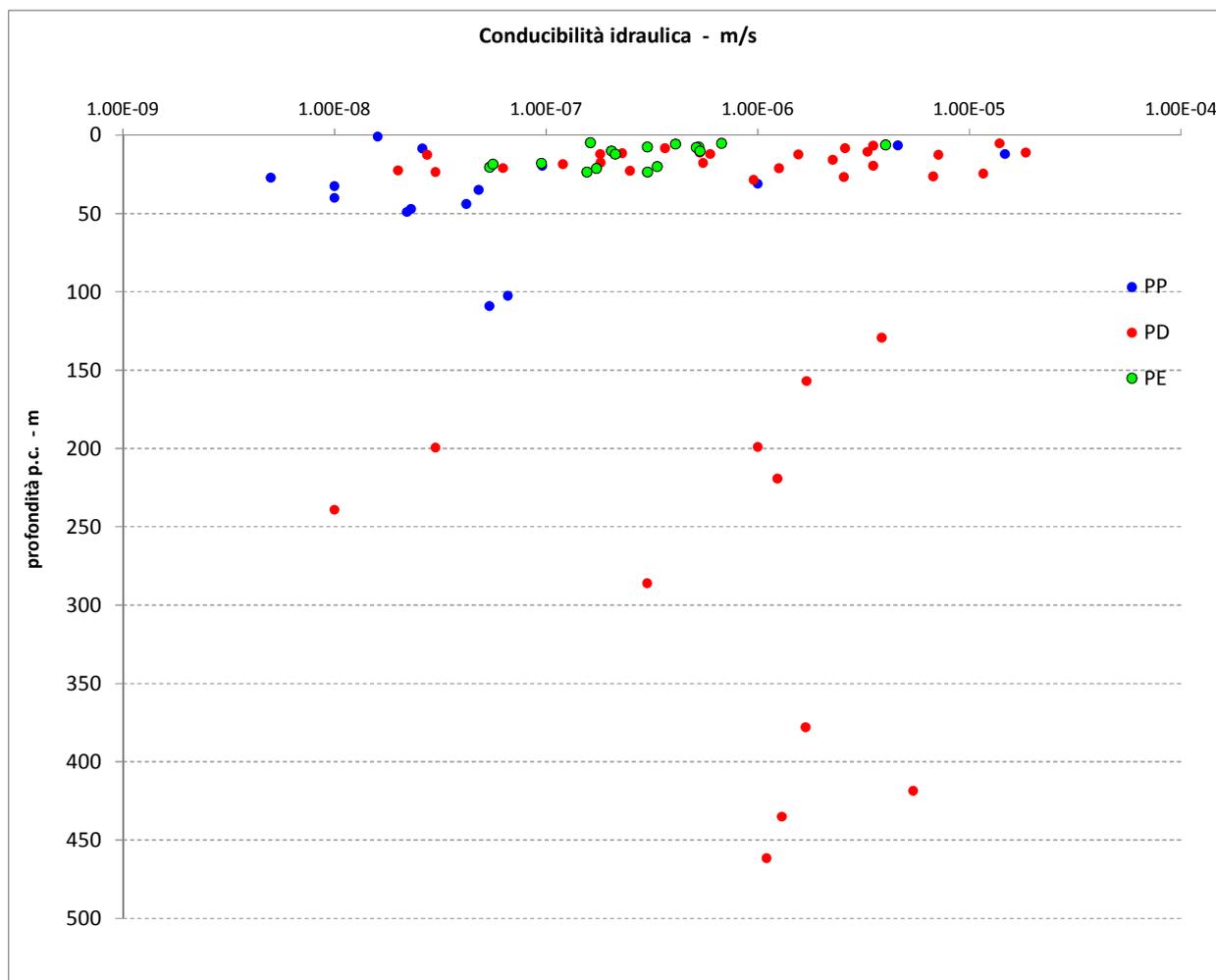


Figura 7-15 Risultati delle prove di permeabilità Lugeon in foro di sondaggio

Caratteristiche di resistenza

L'analisi del dato sulla resistenza a compressione monoassiale - UCS - degli argilloscisti è discesa dai risultati delle prove di compressione mono-assiale condotte in laboratorio nelle differenti campagne di PP, PD, PE 1° lotto e dall'interpretazione dell'esito delle prove di Point-Load Test eseguite sulle carote estratte dai sondaggi geognostici.

In letteratura vi è ampio riscontro (Hoek-Brown, 1980) circa l'interpretazione delle prove di Point Load Test per la ragionevole stima fornita del valore di UCS. E' tuttavia data indicazione (Greminger, 1982; Seshangiri Rao, 1987) della notevole dispersione del fattore di correlazione K50

fra la resistenza a compressione mono-assiale e il valore di I_s (Point Load Strenght Index) associato a campioni di 50 mm di spessore, in presenza di una struttura della matrice rocciosa chiaramente anisotropa. Ai fini dell'interpretazione dei Point Load Strenght Index, si evidenzia dunque quest'ultimo aspetto quale elemento di criticità nel caso degli argilloscisti oggetto di analisi, caratterizzati da una foliazione con presenza di struttura a pieghe fino alla microscala.

In relazione alla notevole numerosità del campione di I_{50} (ottenuto aggregando i dati delle campagne PP-PD-PE) rispetto alle prove di compressione monoassiale, si è pertanto verificata con attenzione la calibratura del fattore di correlazione k_{50} (con $UCS = K_{50} \cdot I_{s50}$), alla luce dei dati sperimentali disponibili e della letteratura tecnica (Palmström A.: RMI – a rock mass characterization system for rock engineering purposes, 1994).

Il grafico che segue raccoglie le coppie di determinazioni congiunte I_{s50} – UCS (laboratorio), sul medesimo campione di matrice rocciosa (profondità di sondaggio), desunte dalla campagna di indagine del progetto preliminare.

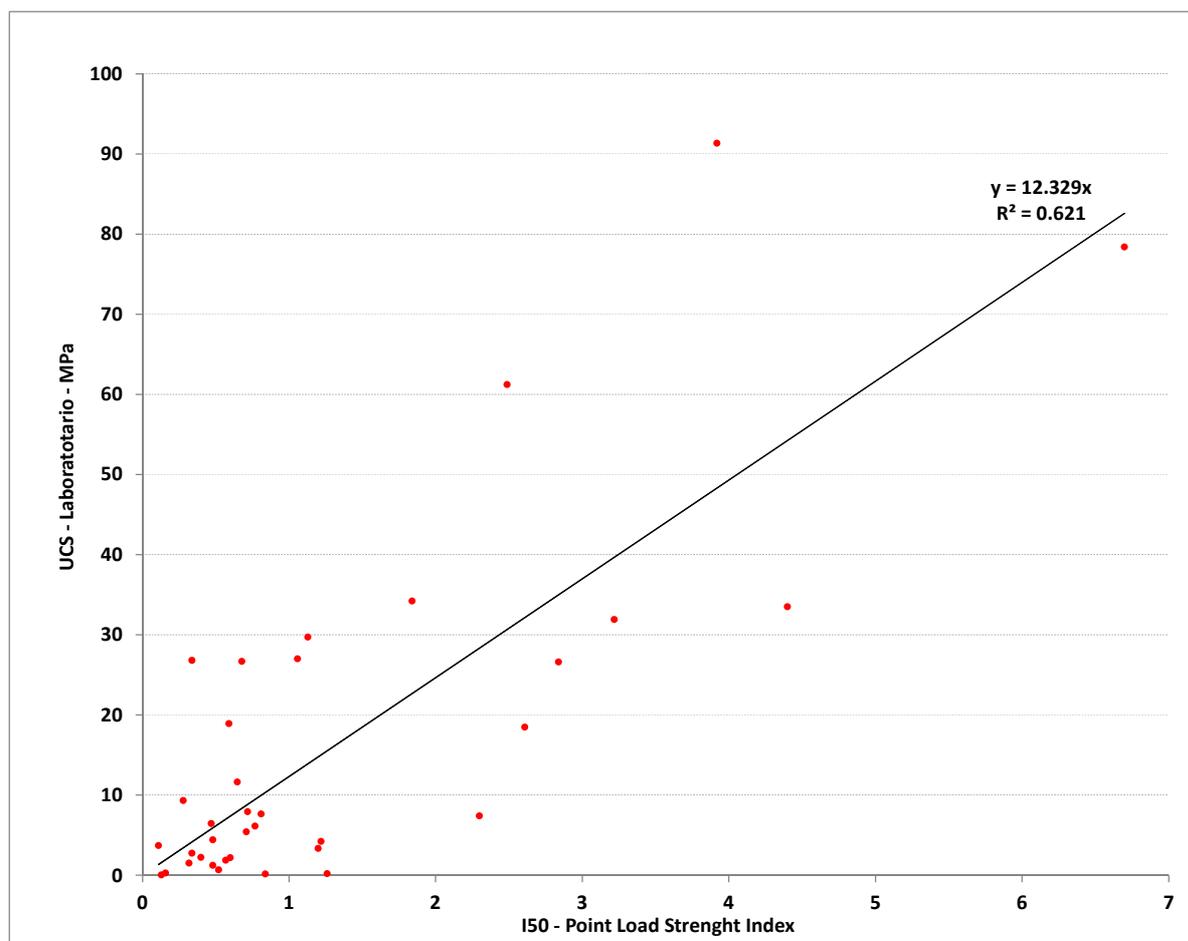


Figura 7-16 Correlazione UCS – I50 Point Load Strenght Index (elaborazione risultati campagna PP)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 71 di 117

A conferma di quanto sopra esposto in merito alle formazioni caratterizzate da marcata anisotropia, alla retta interpolante i punti sperimentali (con pendenza pari all'indice $K_{50} = 12.3$), è associato un valore del fattore di correlazione al quadrato pari a 0.62. Il fattore K_{50} così determinato è tuttavia in linea con le indicazioni di letteratura mostrate nella tabella che segue.

σ_c (MPa)	$I_{s\ 50}$ (MPa)	k_{50}
25 ^{*)} - 50	1.8 - 3.5	14
50 - 100	3.5 - 6	16
100 - 200	6 - 10	20
> 200	> 10	25

Tabella 6.2 Valori k_{50} suggeriti, al variare della resistenza a compressione (Palmsrom – 1994)

In assenza di informazioni specifiche per la formazione in disamina, è suggerita l'adozione di fattori k_{50} varianti con la resistenza della matrice rocciosa. Si evince, nello specifico che il valore di k_{50} determinato dall'analisi incrociata dei dati su I_{50} e UCS (ottenuti dalle indagini di PP) si colloca in corrispondenza del range di UCS compreso fra 25-50 MPa, rappresentativo degli argilloscisti oggetto della presente attività di caratterizzazione.

L'intero campione di dati Point Load Strenght Index (PP+PD+PE) è stato dunque analizzato con riferimento a fattori di correlazione k_{50} compresi fra 14-16, al variare del dato I_{50} trattato, d'accordo con le indicazioni di letteratura.

La serie completa delle elaborazioni è fornita in allegato alla presente relazione. I grafici che seguono presentano il campione di dati desunto dalle prove UCS, laddove disponibili, e dall'interpretazione dei risultati delle prove di Point Load Strenght.

I valori di resistenza sono mostrati dapprima accorpando i dati delle singole campagne d'indagine, quindi per comune formazione geologica (aP o ma – meta-argilliti, formazione già assimilata nelle fasi progettuali pregresse agli argilloscisti, per affinità di comportamento geomeccanico).

Tutti i dati sono graficati in funzione della profondità dal piano campagna del campione oggetto di prova, quindi rispetto alla posizione planimetrica del sondaggio riferita alla progressiva chilometrica della linea.

I valori di UCS sono disponibili sino ad una profondità massima di 450 m ca. Dall'esame delle distribuzioni così ottenute, non si evidenzia alcuna forma di correlazione fra la resistenza a compressione della matrice e la profondità o la collocazione planimetrica della verticale di indagine.

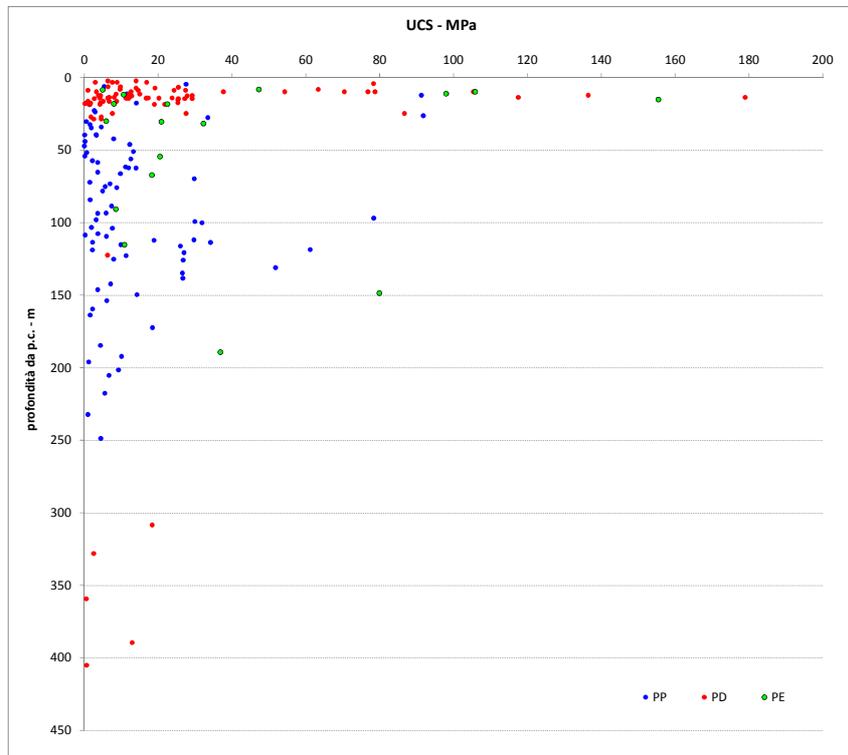


Figura 7-17 Rappresentazione grafica UCS – profondità di campionamento

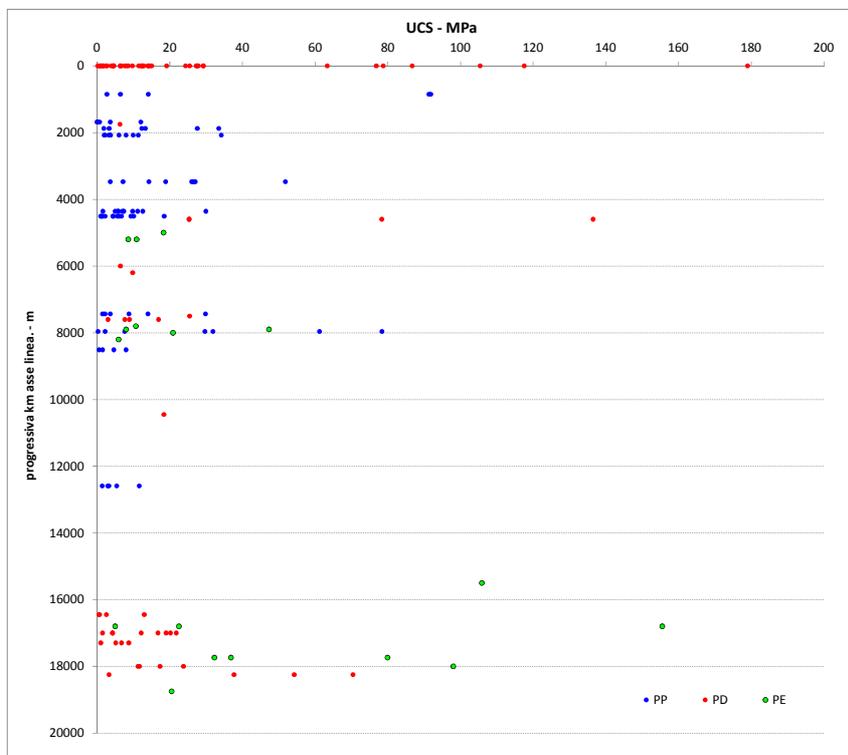


Figura 7-18 Rappresentazione grafica UCS – posizione planimetrica sondaggio di riferimento (pk linea)

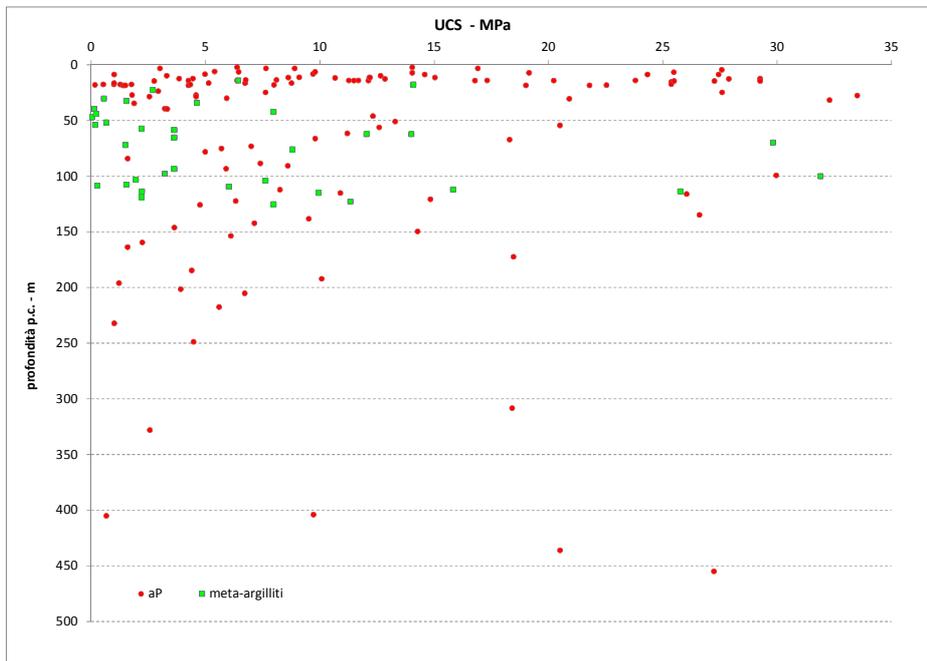


Figura 7-19 Correlazione UCS – I50 Point Load Strength Index (elaborazione risultati campagna PP)

Si forniscono inoltre i seguenti diagrammi che danno immediata evidenza della distribuzione dei risultati. La frequenza dei dati è presentata come numerosità del campione rappresentativo di ciascun range di resistenze.

E' mostrata rispettivamente mostra la distribuzione di frequenza nell'ambito delle singole campagne di indagine e con riferimento alla totalità dei risultati derivanti dall'aggregazione delle campagne stesse.

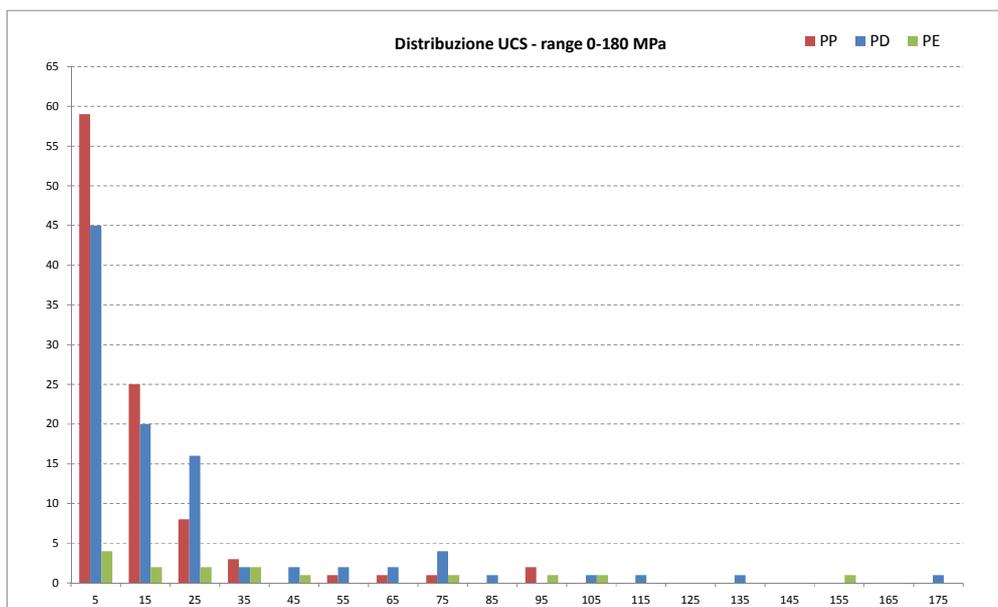


Figura 7-20 Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 10 MPa (per campagne di indagine)

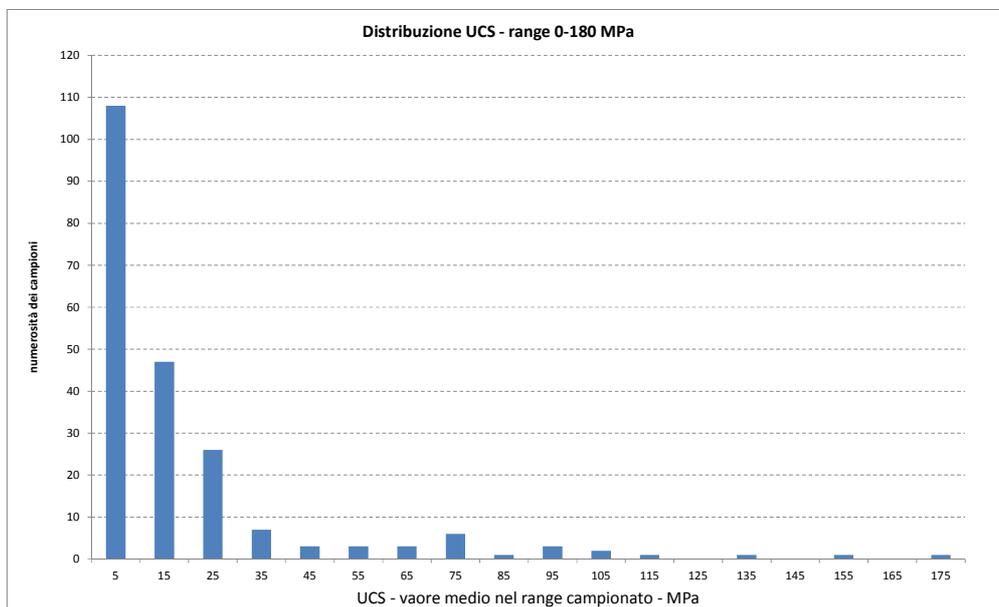


Figura 7-21 Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 10 MPa (campione aggregato)

Da una prima visione d'insieme della distribuzione dei punti sperimentali, emerge la decisa concentrazione di valori nel range 5-25 MPa, con presenza più rarefatta di resistenze a compressione oltre i 40 MPa. Si rileva infatti che, su un campione complessivo di oltre 180 dati, circa 20 elementi (pari al 10%) si collocano su valori superiori ai 35-40 MPa.

A tal proposito, è opportuno notare che solamente 12 di questi ultimi derivano da prove di compressione in laboratorio e pertanto possono essere considerati maggiormente attendibili. Nello specifico, tali prove di compressione mono-assiale hanno fornito valori di resistenza compresi fra 65 – 150 MPa, con valore medio intorno ai 100 MPa, su campioni prelevati anche superficialmente (10-100 m).

Dall'esame delle prove a compressione eseguite in sede di progettazione esecutiva, è possibile associare tali valori di resistenza ad una matrice calcarea moto compatta caratterizzante il provino testato, chiaramente attribuibile all'incluso costituito dal palombino. E' ragionevole dunque ricondurre la gran parte di valori di resistenza superiori alla soglia dei 35 MPa, derivati dall'elaborazione dei dati raccolti nelle campagne di PP e PD, proprio agli inclusi calcarei caratterizzanti la formazione degli argilloscisti a palombini.

Nell'ottica di focalizzare l'analisi esclusivamente sul dato rappresentativo della matrice argillitica, si propongono, nei grafici seguenti, le distribuzioni di frequenza (come numerosità del dato nei singoli range di resistenza e come frequenza % rispetto al totale delle determinazioni disponibili fra le varie campagne di indagini geognostiche), relative al campione di UCS decurtato dei valori superiori al suddetto limite dei 35-40 MPa.

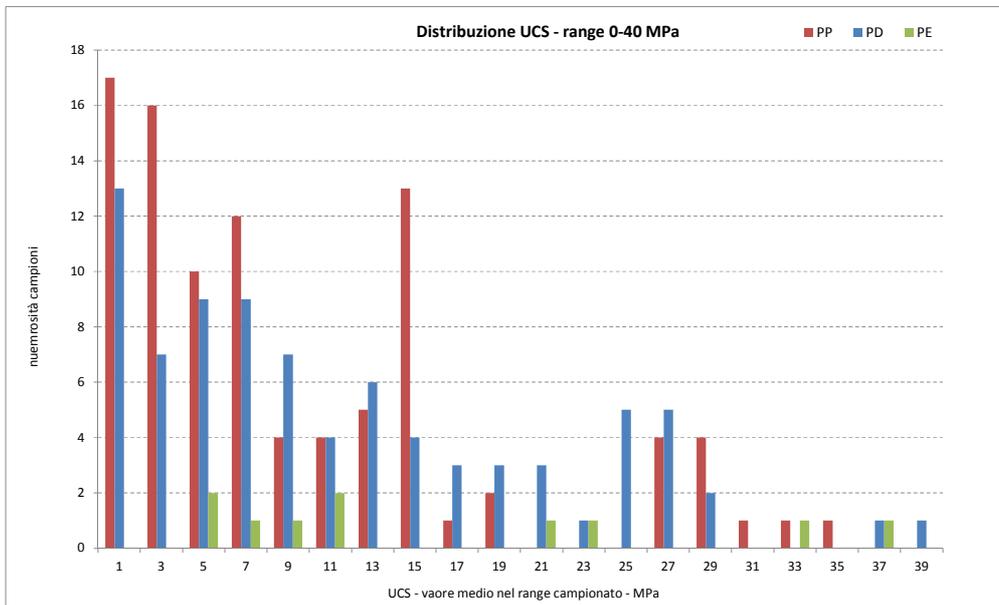


Figura 7-22 Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 2 MPa (per campagne di indagine)

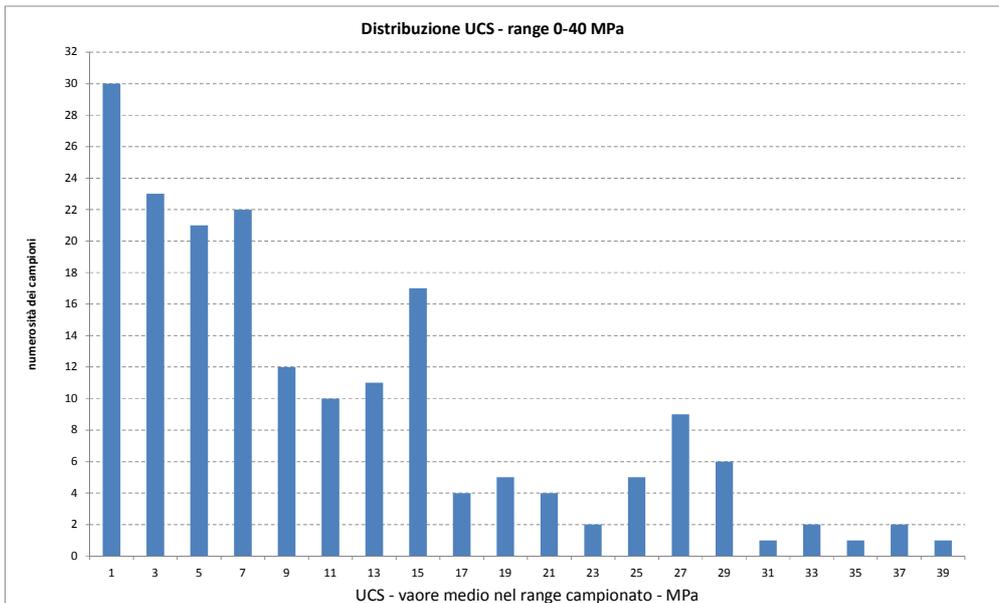


Figura 7-23 Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 2 MPa (campione aggregato)

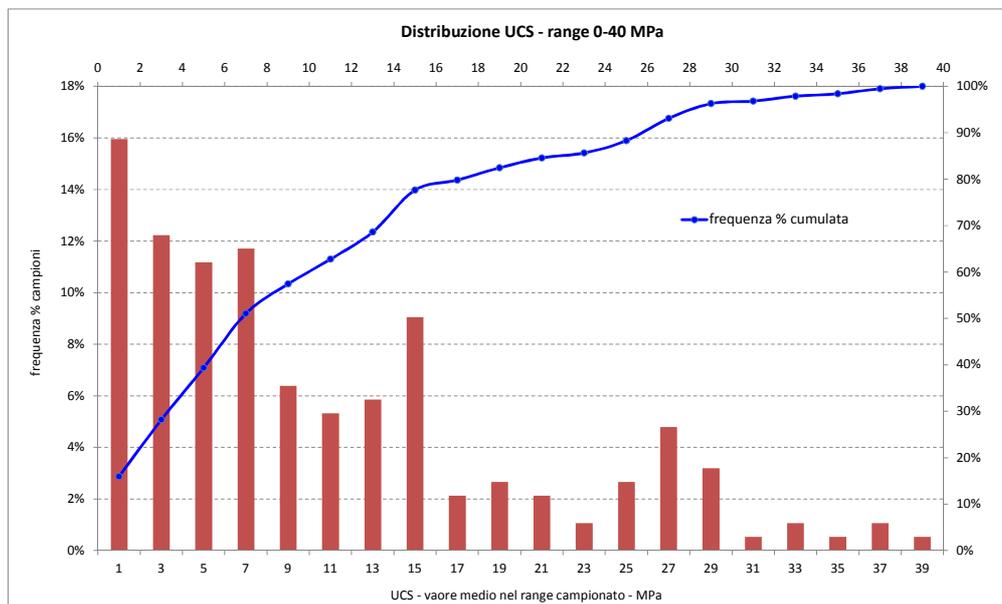


Figura 7-24 Frequenza % campione UCS in relazione a intervalli di 2 MPa (campione aggregato) con rappresentazione della curva di frequenza cumulata

L'analisi statistica della distribuzione di UCS decurtata dei valori superiori al limite suddetto dei 35-40 MPa, come detto considerato rappresentativo degli inclusi *palombinici* (ca 160 risultati sperimentali), conduce ad un valor medio intorno ai 10-11 MPa. Come risulta evidente dalla curva di frequenza cumulata, tale determinazione è significativamente condizionata dalla numerosità di dati associati a valori di resistenza compresi nel range 5-10 MPa.

Questo risultato è ascrivibile alla natura marcatamente anisotropa della matrice rocciosa, caratterizzata dalla foliazione intensa propria degli argilloscisti, con seguente riduzione della resistenza a compressione in condizioni di sollecitazione sub-parallela alla direzione prevalente della foliazione stessa.

A conferma di ciò è significativo il dato emerso dall'elaborazione delle resistenze a compressione mono-assiale ottenute in laboratorio, nell'ambito della campagna di indagine del PD (2004), in presenza di condizioni di prova omogenee caratterizzate dall'applicazione del carico in direzione parallela ai piani di scistosità.

Emerge infatti che, indipendentemente dai valori di RQD rilevati alle quote di prelievo dei campioni testati, la resistenza media a compressione si colloca sul medesimo valore dei 10 MPa evidenziato dalla distribuzione globale dei risultati prima esposta.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 77 di 117

La tabella di sintesi, proposta nel seguito, fornisce i parametri statistici rappresentativi delle distribuzioni di UCS derivate dall'elaborazione congiunta delle prove di laboratorio e dei Point Load tests.

Range di resistenza a compressione considerato	0-180 MPa	0-35 MPa	0-35 MPa (cut off 5 MPa)
numerosità campione	182	160	101
Max - MPa	179	37	37
Min - MPa	0	0	5
med- MPa	20	10.8	15.6
Sqm - MPa	29	9	9
sqm/med	144%	87%	55%

Tabella 6.3: Parametri statistici rappresentativi delle distribuzioni di UCS derivate dall'elaborazione congiunta delle prove di laboratorio e dei Point Load tests.

Sono stati analizzati i seguenti tre campioni di dati:

- UCS fra 0 e 180 MPa (rappresentativo del dato globale di tutte le prove condotte)
- UCS fra 0 e 35 MPa (rappresentativo del dato decurtato delle resistenze a compressione ascrivibili agli inclusi calcarei - palombini)
- UCS fra 0 e 35 MPa, con cut-off inferiore posto sul valore dei 5 MPa, considerato come limite minimo rappresentativo, da un punto di vista ingegneristico, delle resistenze a compressione misurate in direzione sub-parallela alla foliazione.

Come si evince dal rapporto fra deviazione standard e media aritmetica, le distribuzioni sono significativamente asimmetriche, con tendenza comunque verso una distribuzione normale di probabilità, per campioni decurtati dei valori esterni ai limiti superiore ed inferiore (rispettivamente 35-40 MPa e 5 MPa).

Caratteristiche di deformabilità

Come descritto al paragrafo 5.3.4, i moduli di Young "operativi" E_{op} dell'ammasso roccioso, utilizzabili in analisi con modelli costitutivi elastico-lineari o elastico-lineari-plastici, discendono dalle espressioni (Hoek et Diederichs, 2006), noti i moduli elastici E_i della matrice rocciosa (o roccia intatta), l'indice GSI di classificazione dell'ammasso ed il coefficiente di disturbo.

Oggetto del presente paragrafo è dunque l'elaborazione delle risultanze emerse dalle campagne di indagini geognostiche pregresse, con riferimento alle caratteristiche di deformabilità di derivazione

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00	Foglio 78 di 117

diretta dalle prove in situ ed in laboratorio. Non sarà pertanto analizzato in questa sede il tema delle caratteristiche di deformabilità d'ammasso derivate secondo le citate relazioni di Hoek et Diederichs.

Nello specifico saranno analizzate le seguenti determinazioni dirette del parametro di deformabilità:

- Modulo di deformazione da prove dilatometriche in foro di sondaggio;
- Modulo di scarico (unloading) da prove dilatometriche in foro di sondaggio;
- Modulo elastico da prove di carotaggio sonico;
- Modulo elastico secante da prove di compressione mono-assiale;
- Modulo elastico tangente da prove di compressione mono-assiale.

Congiuntamente alla determinazione diretta sopracitata, sarà altresì derivato il modulo elastico della matrice rocciosa per mezzo del rapporto di modulo MR (modulus ratio), secondo la formulazione di Deere, Palmstrom e Singh.

Ai fini della selezione del valore di MR, si è elaborata la serie congiunta di dati costituita da resistenza a compressione mono-assiale e relativi moduli elastici secanti/tangenti misurati a controllo di deformazione durante lo svolgimento delle prove di laboratorio. I grafici che seguono riportano le UCS (misurate in laboratorio) ed i corrispondenti valori di MR determinato come rapporto fra E_{tang} (misurato al 50% UCS) ed UCS (si è conservativamente assunto il valor medio fra E_{tang} - E_{sec} in presenza di valori di E_{tan} significativamente superiori a E_{sec}).

Si presentano dapprima i valori di MR desunti dai risultati delle prove di resistenza a compressione mono-assiale compresi nel range 0-35 MPa (identificativo della matrice rocciosa argillitica), quindi, per completezza, i risultati associati ai valori di UCS ricadenti nel range 35-180 MPa (rappresentativo degli inclusi calcarei). Si evidenzia comunque che la determinazione diretta di MR, in funzione della successiva definizione del modulo elastico della matrice rocciosa, per mezzo della relazione di Deere-Palmstrom-Singh, assume significatività nel range 0-35 MPa (proprio, come detto, della matrice rocciosa).

Dall'esame dei dati risulta evidente la distribuzione dei valori di MR attorno al valore medio di circa 700, con riferimento al range UCS 0-35 MPa. Tale risultanza è avvallata peraltro dai valori indicati in letteratura per il modulus ratio (MR) attribuito agli scisti, compreso nel range 250-1100, con valor medio pari a 675. I valori di MR derivati dal range UCS 35-180 MPa si attestano, con dispersione maggiore, attorno al valor medio 500.

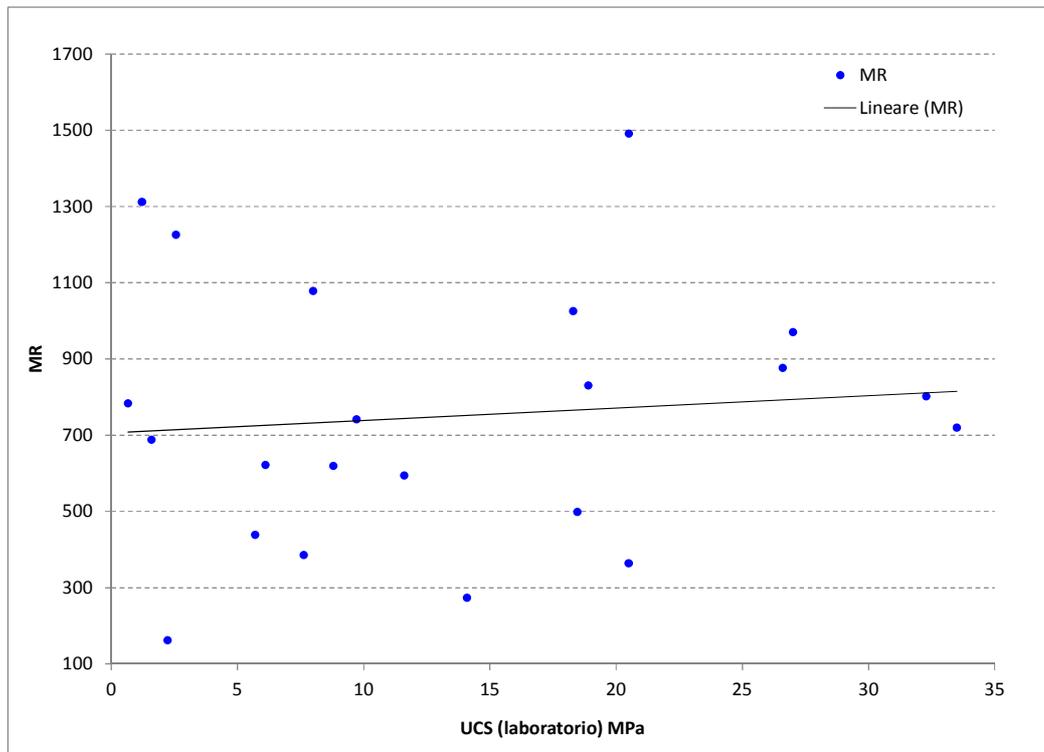


Figura 7-25 Modulus Ratio (MR) associato alle determinazioni in laboratorio UCS (range 0-35 MPa)

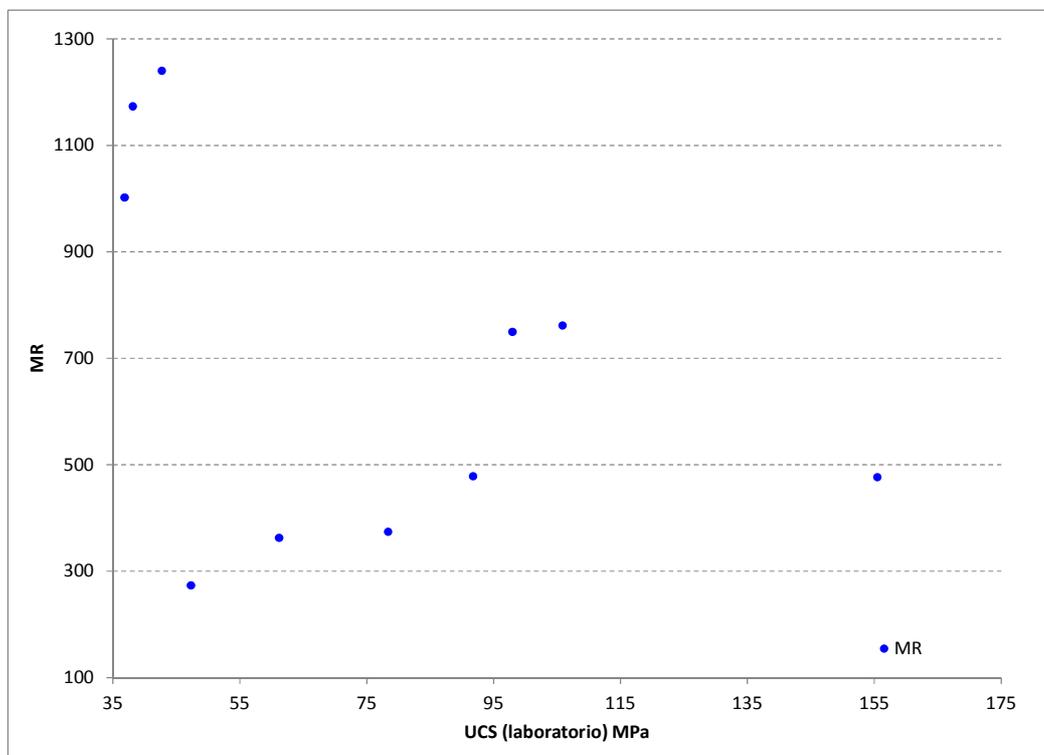


Figura 7-26 Modulus Ratio (MR) associato alle determinazioni in laboratorio UCS (range 35-180 MPa)

Il valore di MR 700, determinato dai dati sperimentali, è stato pertanto utilizzato per la determinazione dei moduli elastici della matrice rocciosa (Deere-Palmstrom-Singh), data la serie di

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 80 di 117

UCS ottenute per via diretta dalle prove di compressione mono-assiale e derivate dai Point Load Strenght Index, come esposto al paragrafo precedente.

Nei grafici che seguono sono proposti nell'ordine, in relazione alla profondità dal p.c. del campione cui è associata la determinazione, i seguenti parametri di deformabilità (da campagne PP, PD, PE):

- **Modulo di deformazione da prova dilatometrica** (determinato come media dei moduli di deformazione associati ad ogni ciclo di carico, o alternativamente misurato come rapporto fra la tensione massima di prova raggiunta al ciclo superiore e la deformazione totale corrispondente);
- **Modulo di scarico – unloading – da prova dilatometrica** (determinato come media dei moduli unloading associati ad ogni ciclo di scarico) e **modulo elastico da carotaggio sonico**.

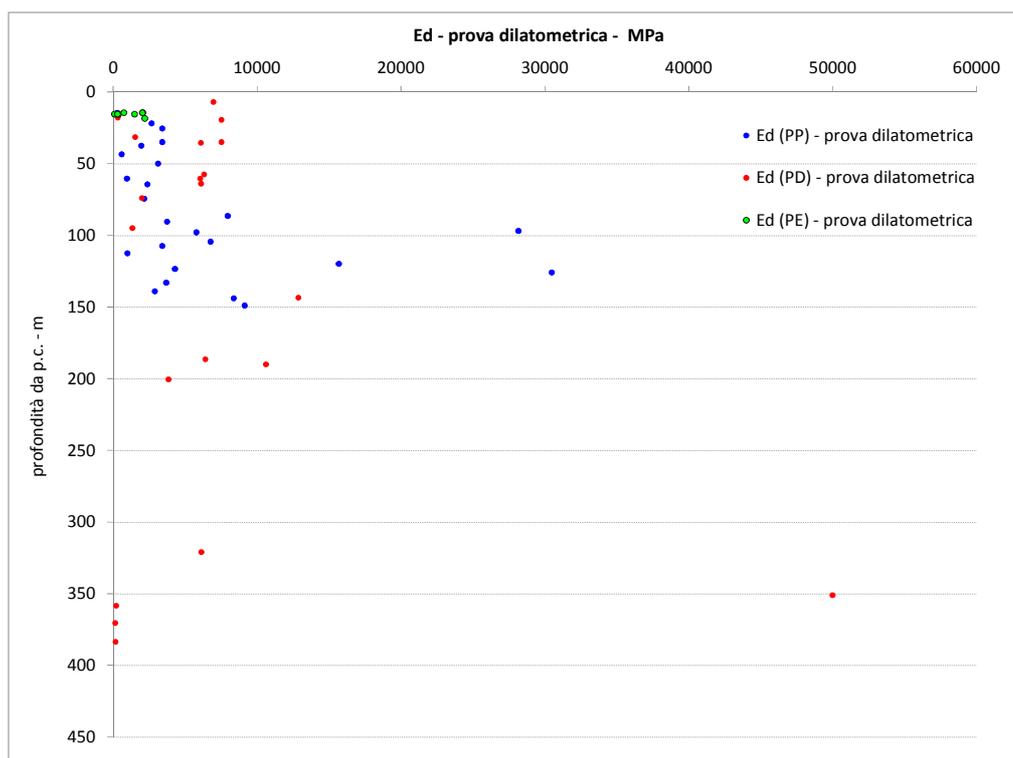


Figura 7-27 Moduli di deformazione da prova dilatometrica in foro di sondaggio, rappresentati in funzione della profondità di misurazione da p.c.

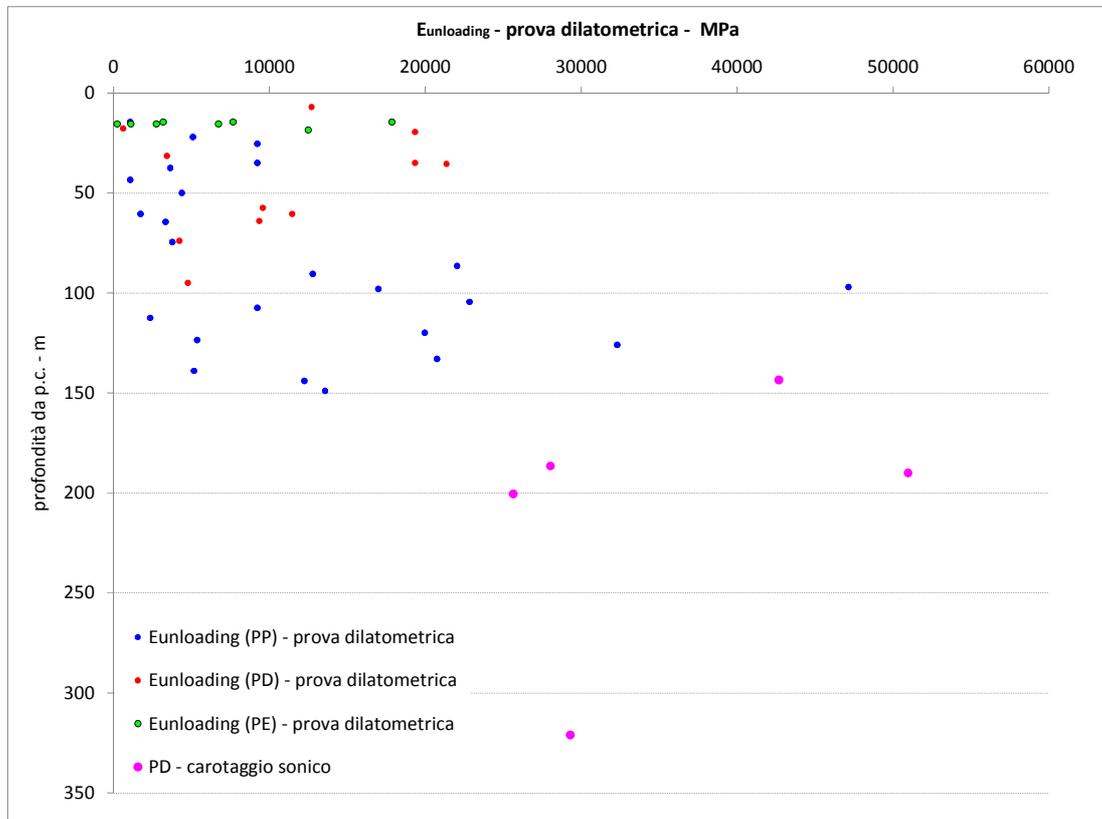


Figura 7-28 Moduli di scarico – unloading - da prova dilatometrica in foro di sondaggio, rappresentati in funzione della profondità di misurazione da p.c.

Nel grafico seguente, la serie di determinazioni desunte dalle prove in foro di sondaggio (dilatometro e carotaggio sonico) è associata ai valori di E_i (modulo elastico della matrice) derivato per via indiretta tramite il fattore MR 700.

Si propongono rispettivamente il campione dati completo e lo stesso circostanziato nel range di profondità di interesse progettuale 50-450 m, con inquadramento dell'area a maggior concentrazione di valori (0-25000 MPa).

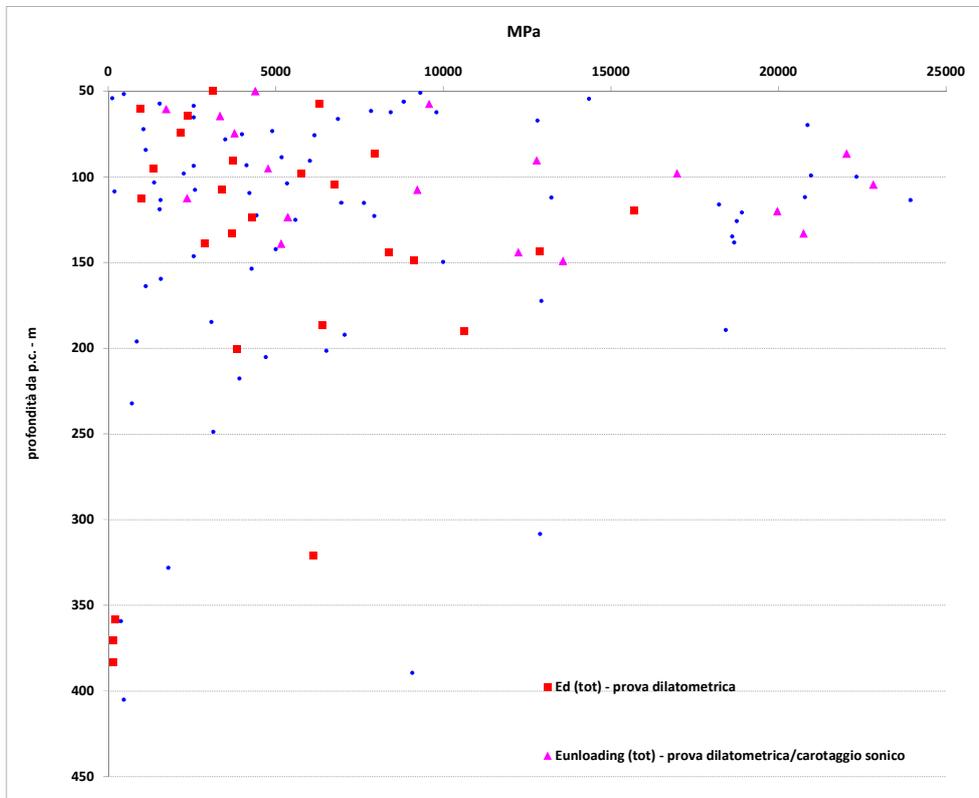
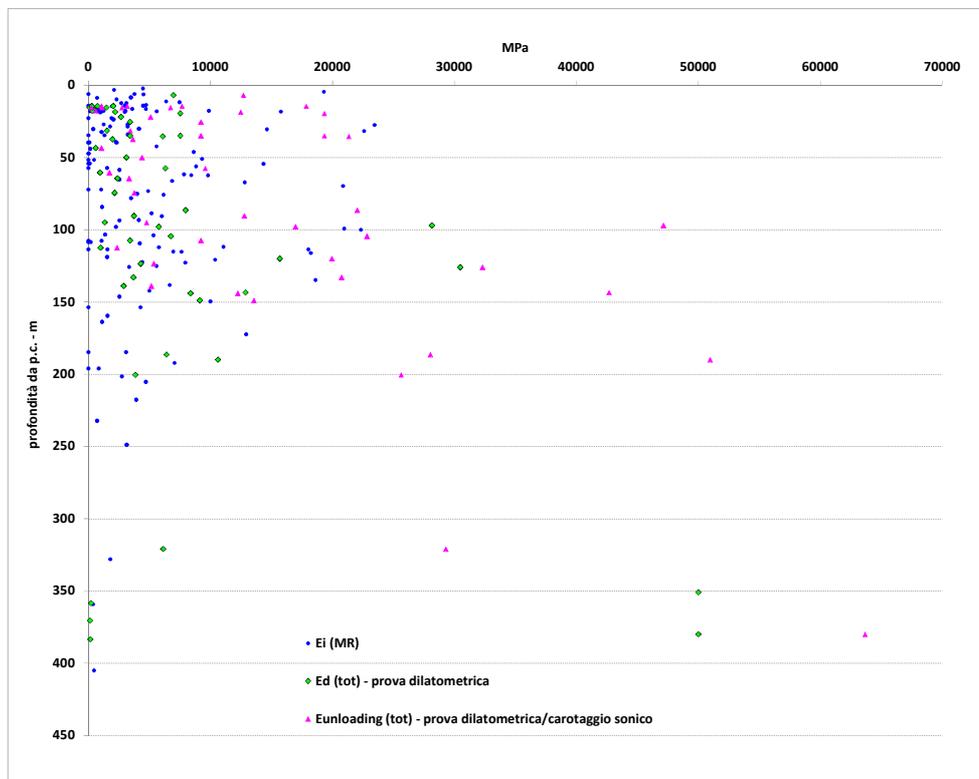


Figura 7-29 Moduli di deformazione e scarico da prova dilatometrica e moduli Ei ottenuti tramite correlazione MR-UCS, rappresentati in funzione della profondità dal p.c. della determinazione (prova in foro/campione-carota testati)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 83 di 117

Dall'esame del campione di dati risulta quanto segue:

- non si riscontra in generale una marcata dipendenza dei parametri di deformabilità con la profondità, pur presentando i valori dei moduli di unloading ottenuti da prova dilatometrica e dei moduli elastici da carotaggio sonico una sensibile correlazione con la quota s.l.m. del punto di rilevazione.
- Nel range "operativo" limitato al valore di 25000 MPa e compreso fra le profondità di 50-200 m (intervallo con maggior frequenza di dati sperimentali), si riscontra una consistente uniformità dei parametri di deformabilità derivati da prove in situ o interpretati da prove UCS; è evidente tuttavia la notevole estensione del range di variazione del modulo, crescente con continuità da 2000 a 10000 MPa, con concentrazioni attorno ai valori di 13000 MPa e 18000-22000 MPa.

Tale variabilità è riconducibile, analogamente a quanto emerso dall'analisi della distribuzione statistica degli UCS, alla anisotropia della matrice rocciosa caratterizzante gli argilloscisti, nonché alla presenza locale di inclusi calcarei cui attribuire i valori massimali di modulo raggiunti.

La tabella di sintesi proposta nel seguito fornisce i parametri statistici rappresentativi delle distribuzioni del parametro di deformabilità derivato secondo Deere-Palmstrom e dalle prove in foro di sondaggio.

Sono analizzati i seguenti campioni di dati:

- **E_i** derivato dal campione di **UCS fra 0 e 35 MPa** (rappresentativo del dato decurtato delle resistenze a compressione ascrivibili agli inclusi calcarei - palombini);
- **E_i** derivato dal campione di **UCS fra 0 e 35 MPa**, con cut-off inferiore posto sul valore dei 5 MPa, considerato come limite minimo rappresentativo, da un punto di vista ingegneristico, delle resistenze a compressione misurate in direzione sub-parallela alla foliazione;
- **moduli di deformazione e di unloading** ottenuti dalle prove dilatometriche.

	E _i (MR 700)		E (dilatometro)	
	0-35 MPa	0-35 MPa (cut off)	Es	Etang
# campione	158	100	24	24
max	23940	23940	30488	47146
min	34	3597	277	1070
med	7449	10806	6346	11889
sqm	6473	5899	7859	11234
sqm/med	87%	55%	124%	94%

Tabella 6.4: Parametri statistici rappresentativi delle distribuzioni del parametro di deformabilità derivato secondo Deere-Palmstrom e dalle prove in foro di sondaggio

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 84 di 117

Pur considerando la notevole dispersione delle singole distribuzioni, i valori medi si attestano, con una certa uniformità, nel range 6400-12000 MPa.

Stato tensionale in situ

Nell'ambito dello scavo dei cunicoli esplorativi Vallemme e Castagnola, l'esecuzione di prove di fratturazione idraulica (3*3 prove fino a coperture massime di 140 m) ha condotto ad un rapporto fra tensione principale orizzontale e tensione verticale varia in media tra 1.5 e 2.0.

Con maggior dettaglio, si riporta sinteticamente nel seguito l'esito delle singole prove condotte.

Cunicolo Vallemme – sezione L1

tensione principale verticale (direzione imposta)	3.0 MPa
tensione orizzontale maggiore	5.4 MPa
tensione orizzontale minore	2.3 MPa

Direzione degli sforzi: circa parallela all'asse del cunicolo.

k0 massimo pari a: k0=1.8

Cunicolo Vallemme – sezione L2

tensione principale verticale (direzione imposta)	1.70 MPa
tensione orizzontale maggiore	4.21 MPa
tensione orizzontale minore	1.75 MPa

Direzione degli sforzi: circa parallela all'asse del cunicolo..

k0 massimo pari a: k0=2.5

Cunicolo Vallemme – sezione nicchia

tensione principale verticale (direzione imposta)	2.00 MPa
tensione orizzontale maggiore	5.00 MPa
tensione orizzontale minore	nd

Direzione degli sforzi: circa parallela all'asse del cunicolo.

k0 massimo pari a: k0=2.5

Cunicolo Castagnola – sezione C1

tensione principale verticale (direzione imposta)	2.40 MPa
tensione orizzontale maggiore	5.00 MPa
tensione orizzontale minore	3.10 MPa

Direzione degli sforzi: leggermente inclinata (30° circa) rispetto all'asse del cunicolo.

k0 massimo pari a: k0=2.1

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00
	Foglio 85 di 117

In merito alle determinazioni sopra esposte è opportuno precisare quanto segue:

- dalle prove eseguite non è stato possibile ottenere indicazioni riguardanti un suo possibile cambiamento con la profondità, pertanto, alle profondità maggiori non ancora investigate tramite l'indagine in sito, tale rapporto è da ritenersi tuttora incognito ed esso andrà ricercato attraverso prove dirette alla ripresa dei lavori;
- l'esame relativo all'andamento delle singole prove ha messo in luce il possibile condizionamento dei risultati delle prove dal disturbo arrecato dallo scavo stesso evidenziato dalla riduzione del valore di "shut in" nelle prove più prossime alla parete dello scavo, determinando in tal modo che i valori dei k_0 valutati possano in realtà risultare diversi da quelli strettamente deducibili dallo stato tensionale registrato;
- la tensione principale verticale in corrispondenza della sezione L2 del cunicolo Vallemme è notevolmente inferiore a quella derivabile dall'azione della gravità ($27 \cdot 135 = 3.65$ MPa). Tale differenza è da considerarsi anomala nel contesto della totalità delle prove eseguite e può attribuirsi all'effetto sull'ammasso del forte disturbo tettonico registrato nella zona delle prove cui si associa la deviazione dei flussi tensionali con concentrazione sulle zone più rigide dell'ammasso.

Emerge in definitiva dalle prove in cunicolo, un quadro tensionale caratterizzato dalla predominanza della tensione orizzontale principale sulla tensione verticale, coerentemente con un rapporto k_0 compreso mediamente fra 2 e 2.5.

In sede di Progettazione Esecutiva – 1° lotto (2012-2013), i risultati ottenuti dalle prove di fratturazione idraulica eseguite nel sondaggio SLI2, rispettivamente alla profondità di m 138.2 e m 145.5 dal piano campagna, hanno rilevato:

- una direzione Est-Ovest di massima compressione ($\Psi_{max} = (94-274)^\circ \pm 26^\circ$).
- indipendenza dalla copertura delle direzioni principali di tensione
- variazione lineare con la copertura delle tensioni principali
- variazione del rapporto k_0 , indipendentemente dalla copertura, in funzione della direzione, nell'intervallo:

$$K_{0MAX} = SH/SV = 2.32$$

$$K_{0MIN} = Sh/SV = 1.18$$

Si riportano nel seguito i plottaggi delle componenti di tensione con la profondità, come discende dall'interpretazione delle prove di fratturazione idraulica e gli stereogrammi raffiguranti il tensore degli sforzi corrispondente alla profondità di 150 m.

In conclusione, pur considerando gli ampi limiti di confidenza dello stato tensionale in situ, connessi all'esiguo numero di prove condotte nelle Campagne di Indagine ad oggi condotte, è ragionevole ipotizzare uno stato tensionale caratterizzato da tensioni orizzontali uguali o maggiori della tensione verticale, cui associare, allo stato attuale della conoscenza, un rapporto k_0 variabile nel range 1.0-2.0 definito anche alla luce dei fattori di incertezza connessi alla rilevazione strumentale (si vedano le considerazioni in merito alle prove di fratturazione idraulica in cunicolo).

— maximum horizontal stress SH
— minimum horizontal stress Sh
— vertical stress Sv
■ range of the test Ps values
● Test HF

STRESS FIELD PLOT N. 2

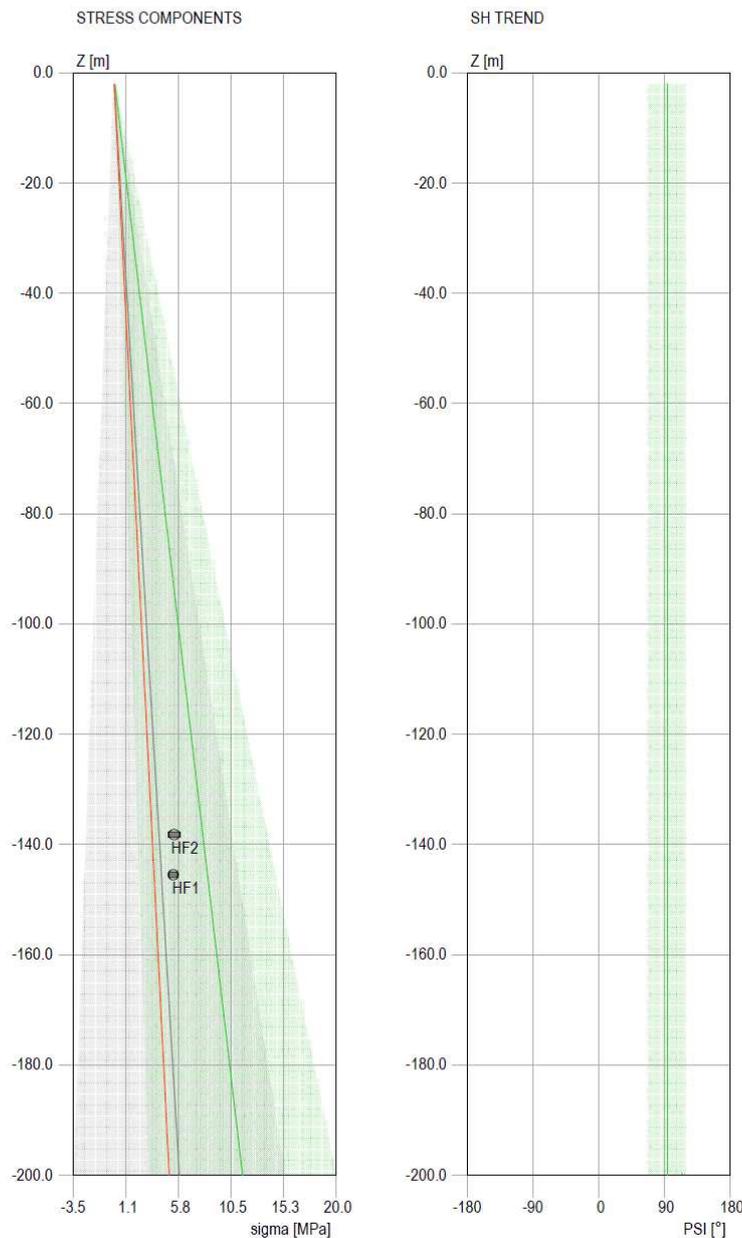


Figura 6.3 – Interpretazione prove di fratturazione idraulica

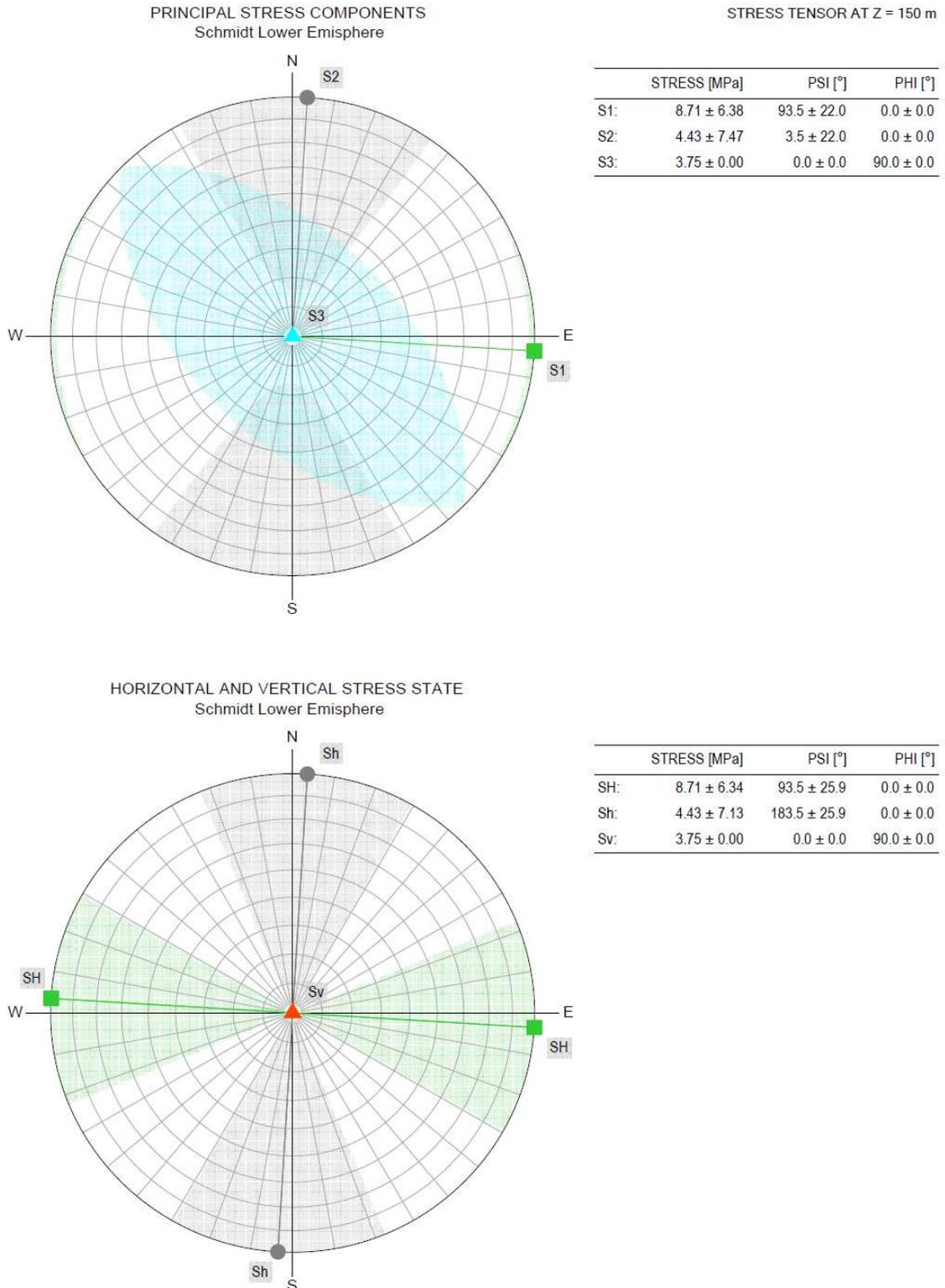


Figura 6.4 – Interpretazione prove di fratturazione idraulica

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 88 di 117

7.2.2 Analisi campione risultati correlata alle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso

Note generali

Scopo della Fase di analisi in oggetto è la valutazione della distribuzione dei parametri fisico-meccanici, il cui campione globale è stato esaminato alla fase precedente, in relazione alle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso, esplicitate dal parametro RQD.

Si sono pertanto associati i valori di RQD misurati in corrispondenza delle profondità di esecuzione delle prove in situ e del prelievo di campioni per le prove di laboratorio, alle rispettive determinazioni sperimentali.

In considerazione dell'elevato numero dei sondaggi a disposizione (campagne di PP, PD, PE), tale operazione è stata limitata alle verticali di indagine più vicine all'asse di tracciamento della linea.

Le tabelle complete contenenti tutte le determinazioni sono contenute in allegato.

Caratteristiche fisiche

Si riportano nel seguito i grafici del peso di volume naturale e della conducibilità idraulica rappresentati in funzione dei valori di RQD.

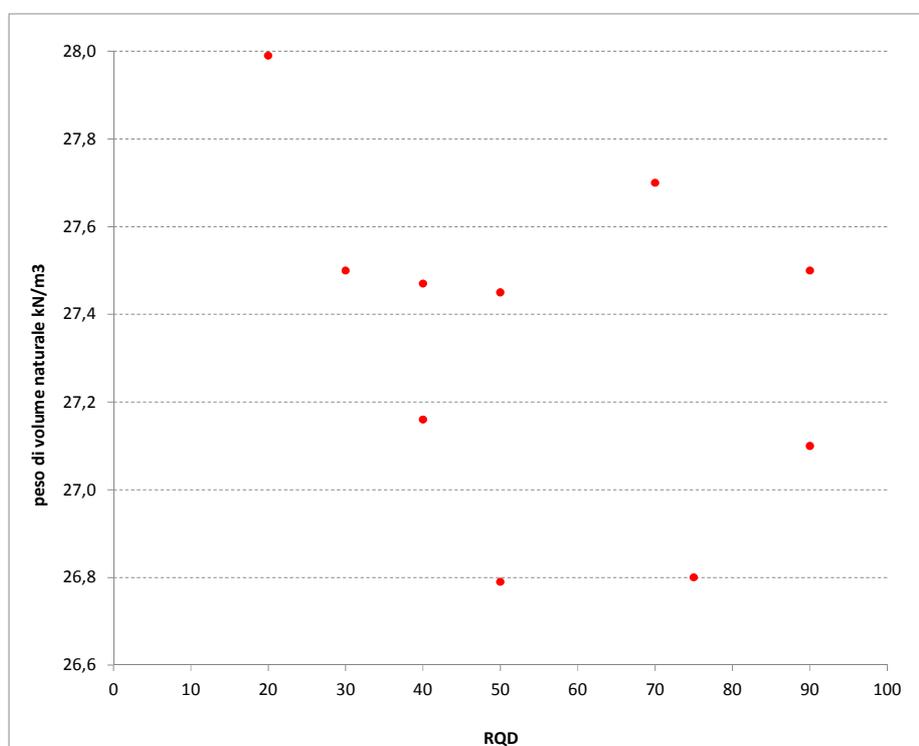


Figura 7-30 Peso di volume naturale in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

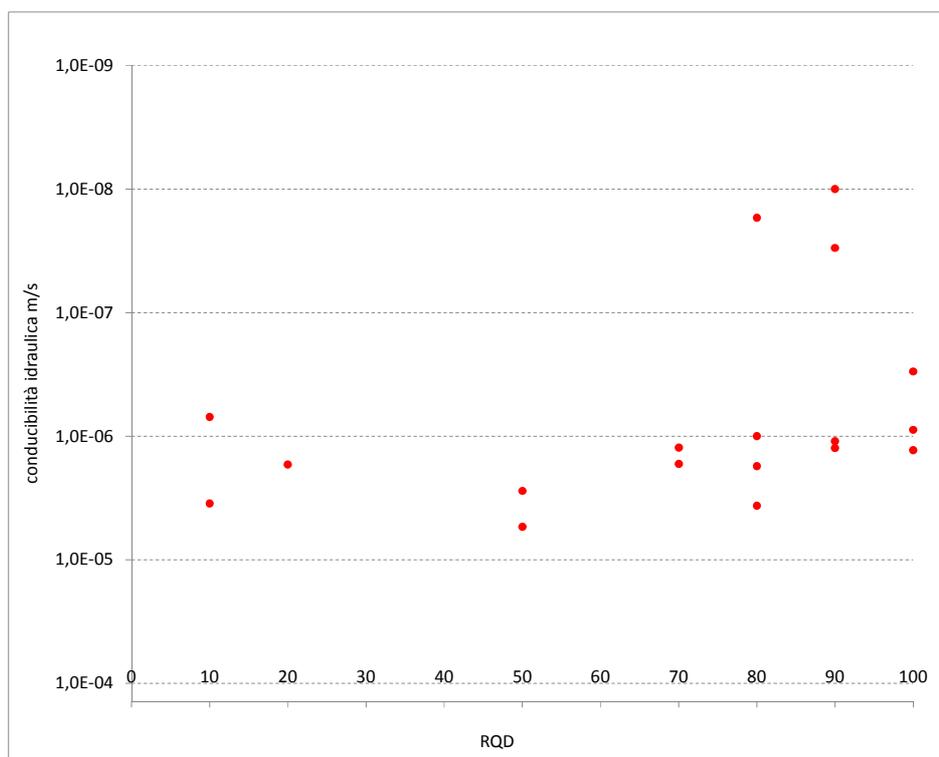


Figura 7-31 Conducibilità idraulica in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

A fronte di una distribuzione uniforme del peso di volume naturale in relazione all'RQD, si evidenzia un legame di proporzionalità inversa fra conducibilità idraulica e RQD. La tabella che segue fornisce i parametri rappresentativi delle distribuzioni dei valori di conducibilità idraulica associate alle tre concentrazioni di punti sperimentali individuabili (pur nella esiguità del campione complessivamente analizzato).

RQD	70-100	≅ 50	< 20
numerosità campione	16	4	9
max – m/s	8.56E-06	6.40E-06	1.16E-05
Min – m/s	1.00E-08	1.58E-06	2.00E-08
Med – m/s	1.96E-06	4.05E-06	3.74E-06
Sqm – m/s	2.72E-06	2.24E-06	3.69E-06
sqm/med	139%	55%	99%

Tabella 6.5: Parametri rappresentativi delle distribuzioni dei valori di conducibilità idraulica associate alle tre concentrazioni di indici RQD emerse dalla rappresentazione grafica

Caratteristiche di resistenza

Si riportano nel seguito, in funzione dei valori di RQD, i seguenti parametri di resistenza:

- **Compressione mono-assiale - UCS;**
- **Resistenza a trazione indiretta** da prova brasiliana;
- **Parametro m_i** di Hoek-Brown.

Tale parametro è stato calcolato interpolando le coppie di valori di tensioni principali a rottura ($\sigma_1 - \sigma_3$) desunte dalle prove di compressione triassiale condotte nell'ambito della campagna di indagini propedeutica alla progettazione definitiva. Stante il limitato numero di prove di compressione triassiale condotte, si riportano nel grafico anche i punti sperimentali relativi alla formazione classificata come fascia milonitica di isoverde, assimilabile, da un punto di vista geo-meccanico, alla formazione degli argilloscisti.

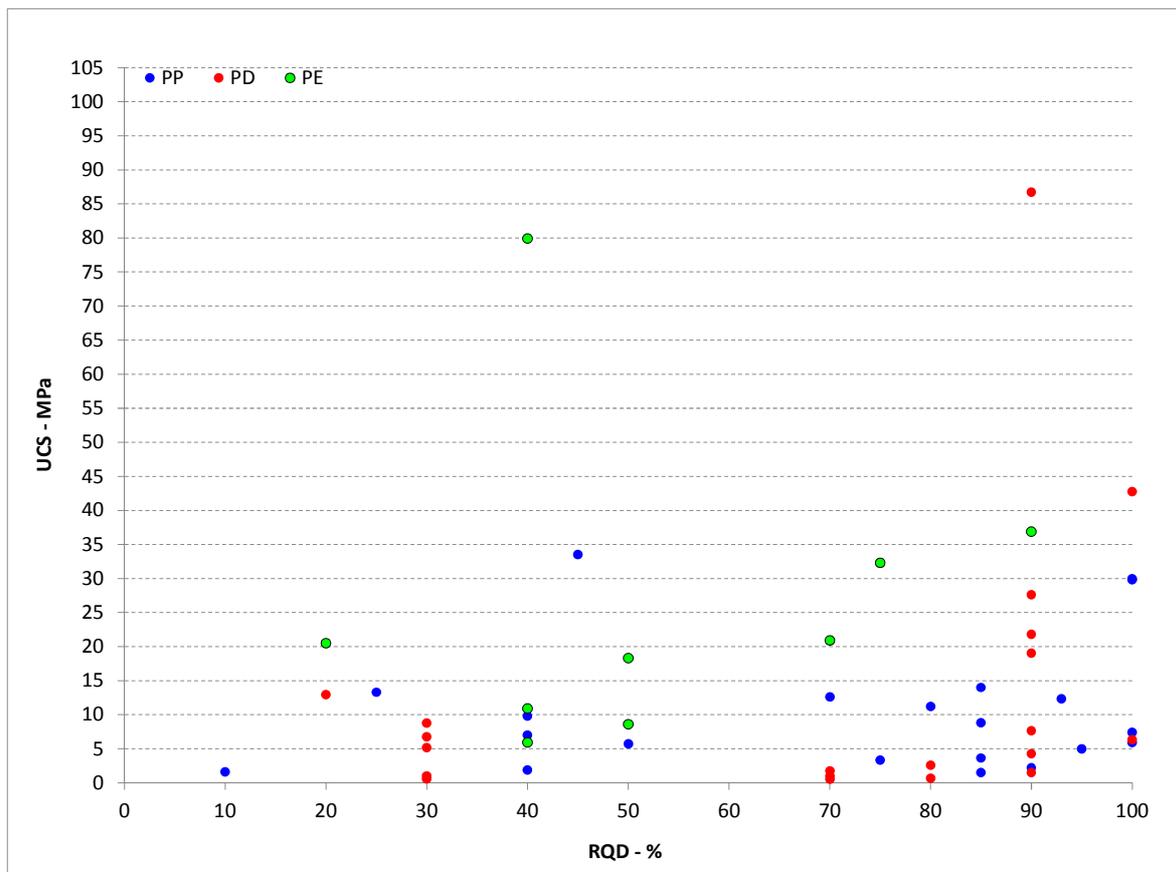


Figura 7-32 UCS in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

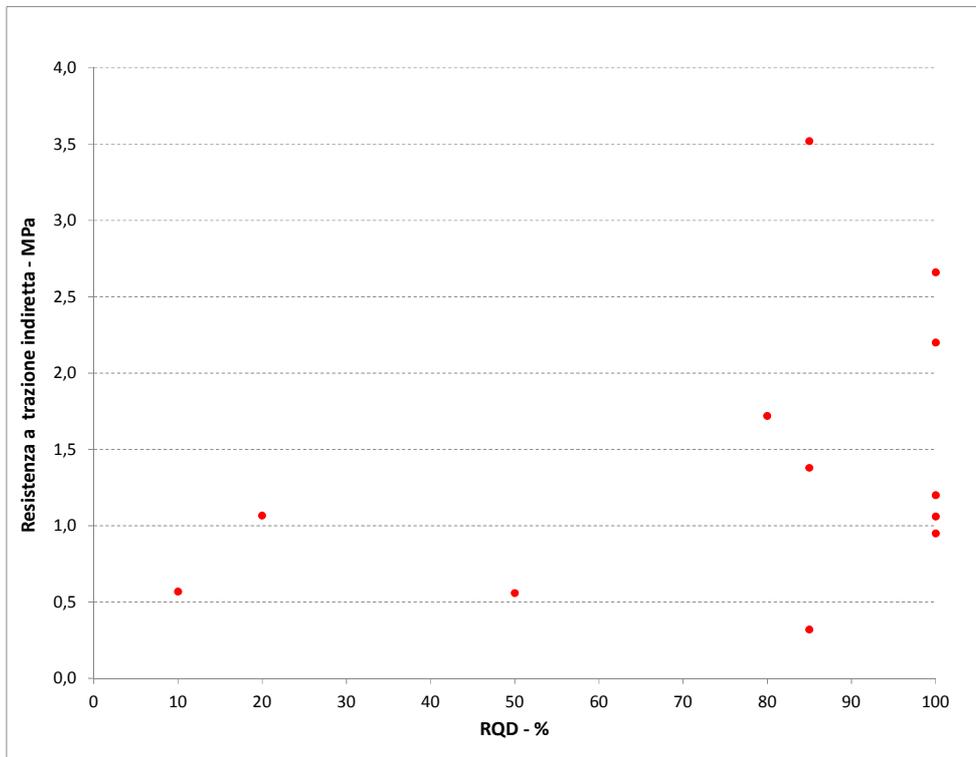


Figura 7-33 Resistenza a trazione indiretta in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

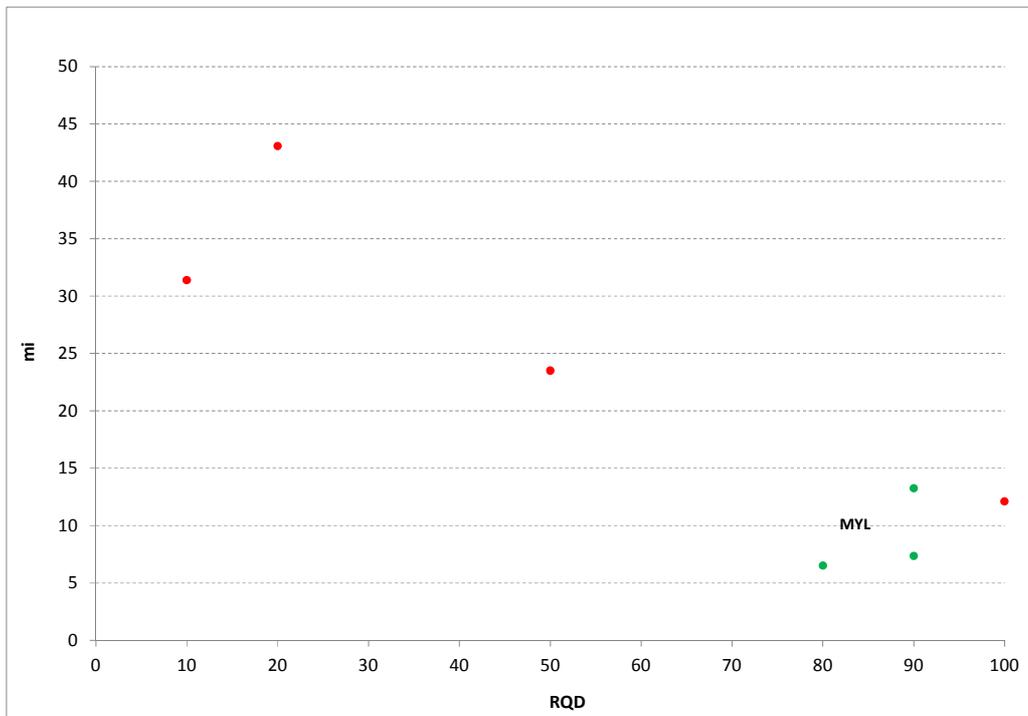


Figura 7-34 Parametri mi Hoek-Brown in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 92 di 117

Dall'esame della distribuzione delle determinazioni congiunte parametri di resistenza – RQD, è possibile rilevare quanto segue:

- sia la resistenza a compressione UCS (campione a buona numerosità) che la resistenza a trazione indiretta mostrano una relazione di proporzionalità diretta con l'indice RQD;
- il valore del parametro m_i di Hoek Brown, pur considerando la modesta rappresentatività del risultato, in relazione all'esiguità di risultati sperimentali a disposizione, evidenzia una proporzionalità inversa con l'indice RQD.

Analogamente a quanto evidenziato per le caratteristiche fisiche al paragrafo precedente, si riportano, nelle tabelle che seguono, i parametri rappresentativi delle distribuzioni delle caratteristiche di resistenza associate alle tre concentrazioni di punti sperimentali similmente individuabili (pur nella esiguità del campione complessivamente analizzato, specie con riferimento ai valori di trazione indiretta e m_i).

Si precisa che l'analisi statistica della distribuzione di valori relativa agli UCS è stata condotta escludendo dal campione i due punti sperimentali associati a valori di resistenza compresi fra 80-90 MPa, considerando gli stessi rappresentativi degli inclusi calcarei (palombini) e non della matrice rocciosa degli argilloscisti. Si evidenzia inoltre la scarsa rappresentatività dell'unico dato riferito al range UCS < 20-25 MPa, pur considerando la collocazione dello stesso nell'ambito della tendenza globale di proporzionalità UCS –RQD, risultante dall'analisi del campione nella sua totalità.

Le tabelle che seguono, si riferiscono rispettivamente alla distribuzione UCS-RQD limitata al range 0-35/40 MPa ed alla medesima con cut-off inferiore posto sul valore dei 5 MPa, considerato come limite minimo rappresentativo, da un punto di vista ingegneristico, delle resistenze a compressione misurate in direzione sub-parallela alla foliazione.

RQD	70-100	$\cong 50$	< 20-25
numerosità campione	28	15	1
σ_c max - MPa	32,3	33,5	-
σ_c min - MPa	0,5	0,5	-
σ_c med - MPa	10,6	9,1	3-5
Sqm - MPa	10,1	8,2	-
sqm/med	95%	90%	-

Tabella 6.6: Parametri rappresentativi delle distribuzioni dei valori di UCS associate alle tre concentrazioni di indici RQD emerse dalla rappresentazione grafica – campione 0-35/40 MPa

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001 A00 Foglio 93 di 117

RQD	70-100	≅ 50	< 20-25
numerosità campione	21	14	1
σc max - MPa	42,8	33,5	-
σc min - MPa	3,3	5,1	-
σc med - MPa	17,1	11,9	3-5
Sqm - MPa	11,9	7,8	-
sqm/med	70%	65%	-

Tabella 6.7: Parametri rappresentativi delle distribuzioni dei valori di UCS associate alle tre concentrazioni di indici RQD emerse dalla rappresentazione grafica – campione 0-35/40 MPa, con cut-off inferiore pari a 5 MPa (limite minimo rappresentativo delle resistenze a compressione misurate in direzione sub-parallela alla foliazione)

RQD	70-100	≅ 50	< 20-25
numerosità campione	8	1	2
σt max - MPa	3,5	0,6	1,1
σt min - MPa	0,3	0,6	0,6
σt med - MPa	1,6	0,6	0,8
Sqm - MPa	1,0	1	2
sqm/med	64%	0,6	1,1

Tabella 6.8: Parametri rappresentativi delle distribuzioni dei valori di resistenza a trazione indiretta (brasiliiana) associate alle tre concentrazioni di indici RQD emerse dalla rappresentazione grafica

RQD	70-100	≅ 50	< 20-25
numerosità campione	4	1	2
mi Max	13	24	43
mi Min	7	24	31
mi Med	10	24	37
mi Sqm	3	-	8
sqm/med	34%	-	22%

Tabella 6.9: Parametri rappresentativi delle distribuzioni dei valori dei parametri mi di Hoek-Brown associate alle tre concentrazioni di indici RQD emerse dalla rappresentazione grafica

Caratteristiche di deformabilità

Si riportano nel grafico che segue, in funzione dei valori di RQD, i seguenti parametri di deformabilità:

- **Modulo di deformazione da prove dilatometriche** in foro di sondaggio;
- **Modulo di scarico (unloading) da prove dilatometriche** in foro di sondaggio e **Modulo elastico da prove di carotaggio sonico**;
- **Modulo elastico secante** da prove di compressione mono-assiale;
- **Modulo elastico tangente** da prove di compressione mono-assiale.
- **Modulo elastico della matrice E_i** determinato secondo Deere-Palmstrom.

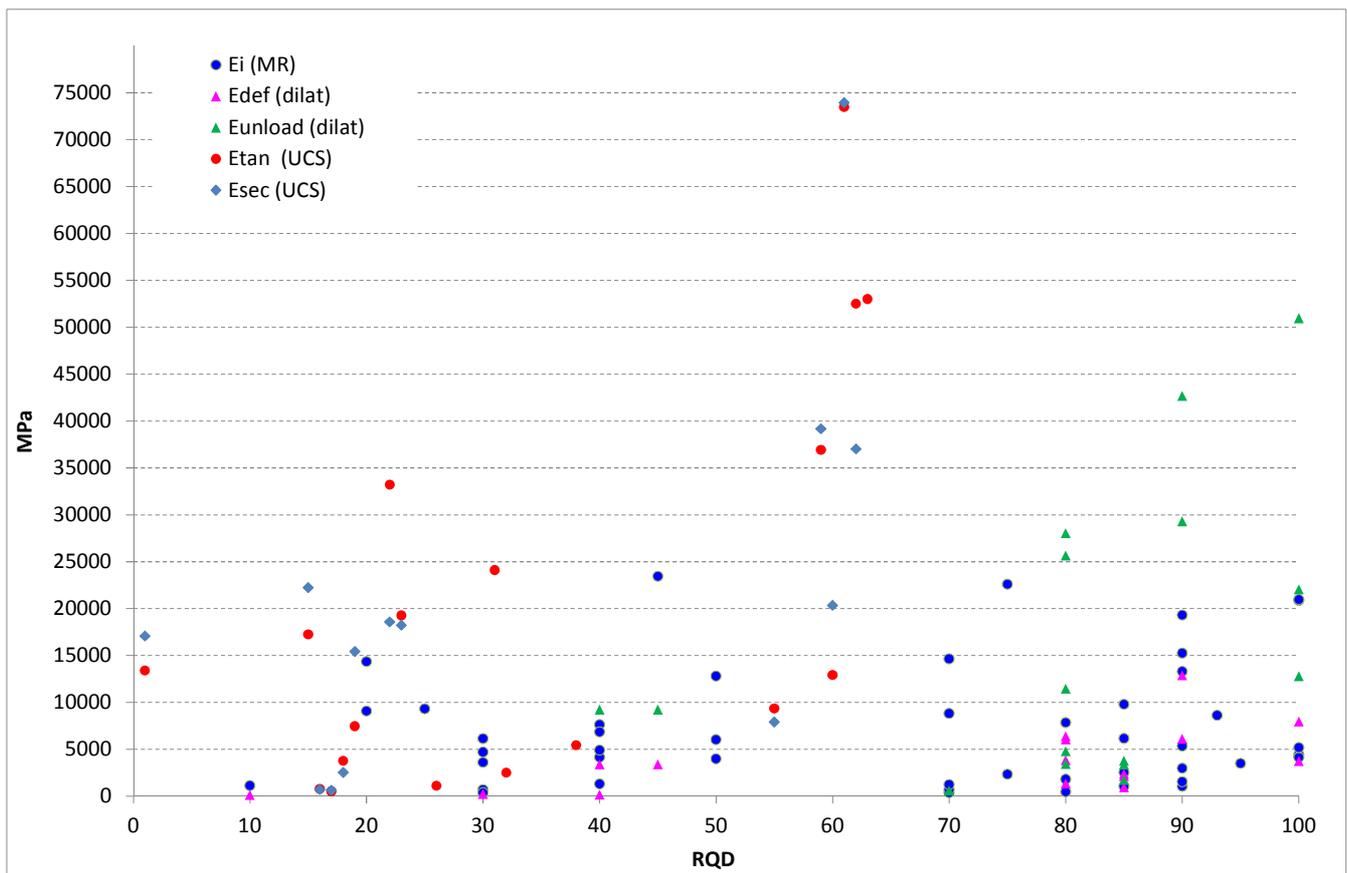


Figura 7-35 Caratteristiche di deformabilità in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 95 di 117

Dall'esame della distribuzione di risultati sperimentali deriva quanto segue:

- si rileva una relazione di proporzionalità diretta fra i parametri di deformabilità e l'indice RQD, maggiormente delineata con l'esclusione dal campione dei punti sperimentali aventi valori dei moduli superiori ai 50000 MPa e collocati nel range RQD 60-65 (dati da prove di compressione mono-assiale);
- si riscontra in generale una discreta uniformità dei parametri di deformabilità derivati da prove in situ o interpretati da prove UCS; è evidente inoltre la notevole estensione del range dei valori, variabili con continuità fra i 2000 e i 30000 MPa e, con valori dispersi oltre tale limite superiore.

Tale variabilità è riconducibile, analogamente a quanto emerso dall'analisi della distribuzione statistica degli UCS, alla anisotropia della matrice rocciosa caratterizzante gli argilloscisti, nonché alla presenza locale di inclusi calcarei cui attribuire i valori massimali di modulo raggiunti.

Come evidenziato per le caratteristiche di resistenza al paragrafo precedente, si riportano, nella tabella che segue, gli intervalli di valori rappresentativi delle tre concentrazioni di punti sperimentali individuabili anche con riferimento alle distribuzioni del parametro di deformabilità (si escludono dal campione i punti sperimentali con valori dei moduli superiori ai 50000 MPa, collocati nel range RQD 60-65).

RQD	70-100	≅ 50	< 20-25
E min - MPa	3000	2000	1000
E max - MPa	40000	25000	20000

Tabella 6.10: Parametri di deformabilità (min/max) delle rappresentativi delle tre concentrazioni di punti sperimentali individuabili per via grafica.

Si precisa che i valori minimo e massimo individuati non discendono da analisi statistica ma da valutazioni ingegneristiche consideranti in particolare le differenti metodologie di derivazione dei moduli.

Si specifica inoltre che i parametri di deformabilità così definiti, in ragione della tipologia di prova o della formulazione teorica di derivazione, sono assimilabili alle caratteristiche elastiche della matrice rocciosa.

Si evidenzia nuovamente la tipica estensione del range dei valori, variabili con continuità all'interno di ogni intervallo, riconducibile all'anisotropia della matrice rocciosa caratterizzante gli argilloscisti, nonché alla presenza locale di inclusi calcarei cui attribuire i valori massimali di modulo raggiunti.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 96 di 117

7.2.3 Classificazione GSI dell'ammasso sul campione analizzato

Note generali

Il presente paragrafo propone la classificazione dell'ammasso roccioso, tramite attribuzione del parametro GSI, condotta sia sui campioni estratti dalle verticali di indagine e testati in laboratorio che sulle carote associate ai punti di esecuzione delle prove in foro di sondaggio (prove dilatometriche, prove di permeabilità LUGEON). Obiettivo è dunque la determinazione dei gruppi geomeccanici associati alla formazione degli argilloscisti filladici.

Si evidenzia che, nell'attività di classificazione dell'ammasso, si è adottata, quale criterio guida, la ripartizione in gruppi geo-meccanici emersa dalla campagna di indagine condotta nell'ambito dello scavo delle tratte dei cunicoli esplorativi Vallemme e Castagnola. Tale criterio di classificazione geomeccanica sarà illustrato nel paragrafo che segue.

La classificazione della roccia è stata condotta considerando l'ammasso roccioso nella sua globalità, senza distinzione di matrice e discontinuità, applicando il metodo degli indici di qualità. Nel merito, si è ricorso alla determinazione del GSI (Geological Strength Index) proposto da Hoek (1991).

Il parametro GSI che quantifica lo stato strutturale di un ammasso roccioso, è stato stimato, nel caso in oggetto, utilizzando direttamente i ratings della classificazione di Bieniawski, adottando la seguente formula di conversione:

$$GSI = RMR89 - 5$$

Come mostrato nel seguito, la determinazione del parametro GSI è stata condotta con riferimento ai punti sperimentali RQD – caratteristiche fisico-meccaniche oggetto di analisi nella precedente FASE 2.

Criterio di classificazione geomeccanica definito dallo scavo dei cunicoli esplorativi

Sulla base dei dati raccolti, scaturiti dai rilievi strutturali, dalle colonne stratigrafiche ricavate dai sondaggi, nonché dai rilievi del fronte di scavo durante l'avanzamento del cunicolo esplorativo, è stato possibile effettuare una suddivisione dell'ammasso roccioso in 3 differenti gruppi geomeccanici (gruppi 1, 2 e 3). Per la descrizione dettagliata di tale fase di studio, si rimanda alla Relazione Geomeccanica Generale del Progetto Definitivo – documento A301-00-D-CV-RO-GN000X-003-A.

L'omogeneità e l'assimilabilità nell'ambito di ciascun gruppo sono state definite in base a criteri litologici (composizione mineralogica e petrografica, percentuale di palombino relativamente alla matrice argillitica, grado di alterazione).

I principali fattori considerati per l'individuazione di tali gruppi sono:

- **Criteri litologici** (composizione mineralogica e petrografica, percentuale di palombino relativamente alla matrice argillitica, grado di alterazione, eventuale presenza di acqua)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	
	IG5103ECVRBGN0000001A00 <table border="1" data-bbox="1420 235 1532 313"> <tr> <td>Foglio 97 di 117</td> </tr> </table>	Foglio 97 di 117
Foglio 97 di 117		

- **Criteri strutturali** (caratteristiche delle strutture di separazione, indice RDQ, intensità della foliazione, intensità della tettonizzazione come ad esempio la presenza di struttura a pieghe fino alla microscala,
- **Criteri litomeccanici** (con riferimento ad una prima valutazione delle proprietà fisiche, di resistenza e deformabilità).

Nel seguito si fornisce una sommaria descrizione dei gruppi geomeccanici individuati:

Gruppo geomeccanico 1

L'ammasso presenta discrete proprietà geomeccaniche. L'RQD è mediamente maggiore del 50-60%; si individua chiaramente la foliazione regolarmente spaziata anche se la struttura non è intensamente piegata fino alla microscala. Le superfici dei giunti sono prive di alterazione e la circolazione idrica è scarsa o assente. La presenza dei palombini può superare il 50% fino a condizionare completamente il comportamento generale dell'ammasso; gli strati calcarei sono però poco fratturati e poco alterati. Mediamente nel corso dello scavo questo gruppo litologico è stato incontrato con una percentuale pari al 28%.

Gruppo geomeccanico 2

L'ammasso mostra scadenti proprietà geomeccaniche. L'RQD è variabile mediamente tra il 20 e il 50%; si individua ancora chiaramente la foliazione regolarmente e fittamente spaziata ma con struttura più intensamente piegata, fino alla microscala. Le superfici dei giunti sono da poco alterate ad alterate e la circolazione idrica è scarsa. I palombini, quando presenti (non oltre il 50%), risultano da fratturati a molto fratturati e localmente alterati. Mediamente nel corso dello scavo è stato incontrato con una percentuale pari al 55%.

Gruppo geomeccanico 3

L'ammasso che ricade in questo gruppo appartiene a zone particolarmente tettonizzate o alterate e mostra proprietà geomeccaniche molto scadenti. L'RQD è inferiore mediamente al 20%; la foliazione è talmente intensa ed irregolarmente e fittamente spaziata che può non essere più riconoscibile (ammasso destrutturato con perdita di coesione); la struttura, quando riconoscibile, è intensamente piegata fino alla microscala. Le superfici dei giunti sono da alterate a molto alterate e la circolazione idrica può essere significativa. I palombini, quando presenti (non oltre il 30%), risultano intensamente fratturati ed alterati. Mediamente nel corso dello scavo è stato incontrato con una percentuale pari al 17%.

In sintesi:

- il **Gruppo 1** può essere considerato rappresentativo delle condizioni migliori d'ammasso roccioso;
- il **Gruppo 2** può essere considerato rappresentativo delle caratteristiche medie dell'ammasso roccioso;
- il **Gruppo 3** può essere considerato rappresentativo del comportamento dell'ammasso roccioso delle zone a bassa copertura o in corrispondenza di importanti strutture geologiche (es. faglie, nuclei di pieghe, sovrascorrimenti, ecc.).

Implementazione della classificazione geomeccanica

La determinazione del BRMR è stata condotta secondo la procedura operativa descritta la 5.3.2 della presente relazione geotecnica.

Si precisa in particolare quanto segue:

- il **punteggio 1** è stato attribuito considerando il dato RQD associato ad ogni punto sperimentale oggetto di analisi in fase 2;
- la somma dei **punteggi 2 e 3** è stata definita coerentemente con le indicazioni fornite dal grafico sotto riportato, noto il dato sull'indice RQD;

CHART D Chart for Correlation between RQD and Discontinuity Spacing

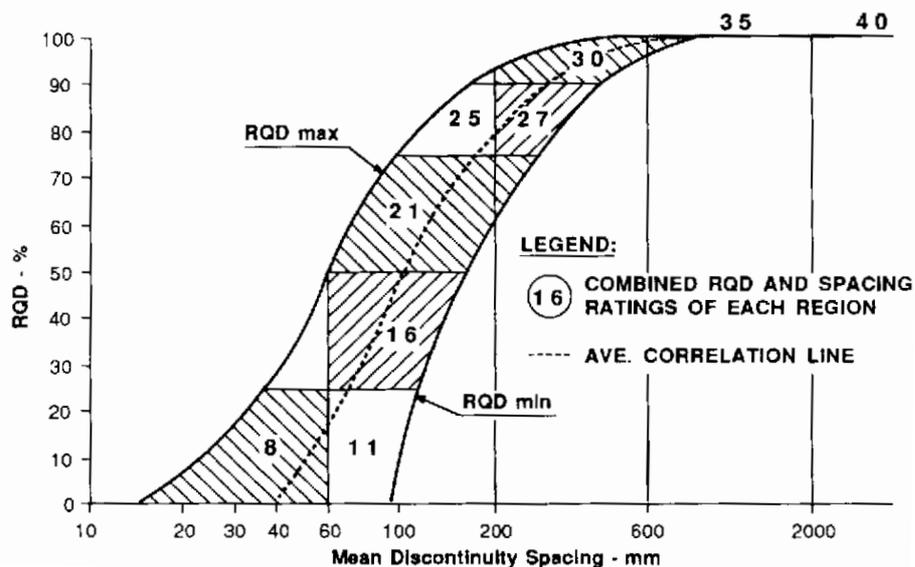


Figura 7-36 Nomogramma per la determinazione del punteggio combinato associato allo stato di fratturazione dell'ammasso (RQD) ed alla spaziatura delle discontinuità, nell'ambito della definizione dell'indice RMR.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 99 di 117

- il **punteggio 4** è stato definito assumendo tre tipologie tipiche di discontinuità, ognuna riconducibile ai tre gruppi geo-meccanici emersi dalle analisi condotte in seguito allo scavo dei cunicoli esplorativi. L'attribuzione dei ratings propri delle condizioni di rugosità e alterazione delle superfici di giunto, delle caratteristiche fisiche e geometriche del materiale di riempimento è stata dunque dettata dalle indicazioni contenute in merito nelle descrizioni sommarie degli stessi gruppi geomeccanici riportate al paragrafo precedente. Il punteggio assegnato alla persistenza è stato definito sulla base delle informazioni ottenute dai rilievi geo-strutturali di superficie (PP), inerenti la formazione in esame, già presentati al paragrafo 4.2

Si è dunque considerata la seguente variabilità del punteggio 4, per ognuno dei gruppi geomeccanici:

- gruppo G1: min 19 max 22
- gruppo G2: min 8 max 18 (15)
- gruppo G3: min 3 max 8

- il **punteggio 5** è stato posto pari a 15, coerentemente con l'assunzione di condizioni asciutte per l'ammasso, finalizzata alla conversione del BRMR in GSI.

A valle della definizione di valori minimo/massimo del BRMR per ogni punto sperimentale (derivati dal range imposto al punteggio 4 – condizioni di giunto), si è ottenuta, per ogni gruppo geomeccanico, composto dai punti sperimentali aventi valore di RQD compreso nel rispettivo intervallo di pertinenza (0-20 / 20-55 / 55-100), la distribuzione di GSI descritta nel prospetto che segue.

GRUPPO G1				GRUPPO G2				GRUPPO G3			
Numerosità campione	32			Numerosità campione	15			Numerosità campione	3		
GSI	min	max	avg	GSI	min	max	avg	GSI	min	max	avg
max	68	71	70	max	38	48	43	max	26	31	29
min	51	54	53	min	35	45	40	min	22	27	25
med	58	61	60	med	36	46	41	med	25	30	27
sqm	5	5	5	sqm	1	1	1	sqm	2	2	2
sqm/med	8%	8%	8%	sqm/med	2%	2%	2%	sqm/med	9%	8%	9%

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 100 di 117

Sulla base dell'analisi dei risultati delle prove di laboratorio ed in foro di sondaggio, associate alle verticali di indagini condotte in sede di PP, PD, PE 1° lotto, si delineano dunque i seguenti intervalli di GSI, per ognuno dei gruppi-geomeccanici classificati secondo i criteri dettati dall'esperienza dei cunicoli esplorativi:

- gruppo **G1**: 50 - 60 (*)
- gruppo **G2**: 35 - 50
- gruppo **G3**: 20 - 30

(*) Si è posto il limite superiore pari a 60 (valore medio della distribuzione dei GSI max), in linea con le indicazioni di letteratura in merito alle formazioni scistose. Si sottolinea inoltre la debole rappresentatività del risultato ricavato per il gruppo 3, in virtù del basso numero di campioni a disposizione.

7.2.4 Caratterizzazione Geo-meccanica degli argilloscisti

Note generali

La caratterizzazione geotecnica-geomeccanica delle Argilliti a Palombini descritta nel seguito, conduce definizione dei parametri fisico-meccanici rappresentativi di ogni gruppo geomeccanico individuato nella fase precedente.

L'esito finale di tale attività è disceso dall'analisi comparata delle risultanze dell'elaborazione condotta sui dati derivati dalle campagne geognostiche del PP-PD-PE e del quadro conoscitivo completo emerso dallo scavo dei cunicoli esplorativi.

Caratteristiche fisiche

L'esito delle analisi condotte nel presente studio, avente come oggetto tutti i sondaggi rappresentativi della formazione degli argilloscisti (PP+PD+PE), è in linea con le determinazioni ottenute dallo scavo dei cunicoli esplorativi. Si definiscono pertanto i seguenti parametri, per i tre gruppi geomeccanici:

- **Gruppo G1**

- Peso di volume: 27 kN/m³
- Coefficiente di Poisson. 0.25-0.30
- Conducibilità idraulica: 1E-6 m/s / 1E-7 m/s

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 101 di 117

- **Gruppo G2**

- Peso di volume: 27 kN/m³
- Coefficiente di Poisson. 0.25-0.30
- Conducibilità idraulica: 4E-6 m/s

- **Gruppo G3**

- Peso di volume: 26 kN/m³
- Coefficiente di Poisson. 0.30
- Conducibilità idraulica: 4E-6 m/s

Caratteristiche di resistenza

Come emerso al paragrafo 6.1.1, la concentrazione di punti sperimentali individuabili con riferimento alle distribuzioni delle caratteristiche di resistenza, mostra una notevole dispersione dei risultati, associabile alla marcata anisotropia della matrice (sensibilità del risultato alla giacitura della scistosità rispetto alla direzione di carico) ed alla presenza di inclusi palombinici. Tale variabilità era peraltro emersa anche dalla campagna di indagini condotta durante lo scavo dei cunicoli esplorativi, per cui si rimanda alla Relazione Geomeccanica Generale del Progetto Definitivo – documento A301-00-D-CV-RO-GN000X-003-A.

La tabella che segue mostra i range di UCS, associati ai medesimi gruppi geo-meccanici, derivanti dalle indagini sui cunicoli e dalle elaborazioni oggetto del presente studio (sondaggi PP, PD, PE 1° lotto). Si fornisce infine il range di variazione derivato, secondo le considerazioni esposte nel seguito, dagli esiti delle citate analisi (scavo cunicoli e sondaggi).

Formazione	UCS (MPa)		
	cunicoli	sondaggi (PP+PD+PE)	PE
aP-G1	37	10 (17) (*)	30 - 40
aP-G2	12	9 (12) (*)	10 - 12
aP-G3	7	3-5 (**)	5 - 7
(*) media distribuzione con cut-off inferiore a 5 MPa			
(**) scarsa numerosità campione			

Tabella 6.11: Resistenza a compressione mono-assiale per i gruppi geomeccanici rappresentativi degli Argilloscisti Filladici.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 102 di 117

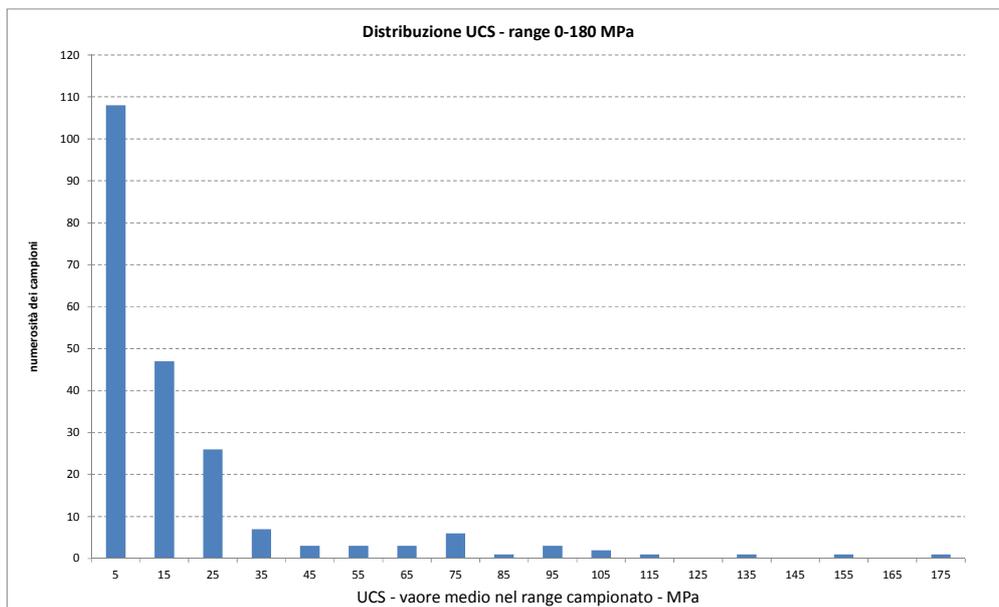
Con riferimento al **gruppo geo-meccanico G1**, il range 10-17 MPa, ottenuto dall'analisi completa dei sondaggi di PP – PD - PE, discende dai valori medi delle 2 distribuzioni analizzate, ovvero:

- distribuzione UCS-RQD limitata al range 0-35/40 MPa, rappresentativo della matrice argillitica;
- distribuzione UCS-RQD limitata al range 0-35/40 MPa con cut-off inferiore posto sul valore dei 5 MPa, considerato come limite minimo rappresentativo, da un punto di vista ingegneristico, delle resistenze a compressione misurate in direzione sub-parallela alla foliazione.

Si rammenta che entrambe le distribuzioni sono state ottenute escludendo dal campione i due punti sperimentali associati a valori di UCS compresi fra 80-90 MPa, considerando gli stessi rappresentativi degli inclusi calcarei (palombini) e non della matrice rocciosa degli argilloscisti. Si aggiunge inoltre che il limite inferiore di 10 MPa (prima distribuzione) è significativamente influenzato dal contributo di valori di resistenza nel range 3-7 MPa, valori riconducibili alla natura marcatamente anisotropa della matrice rocciosa, caratterizzata dalla foliazione intensa propria degli argilloscisti, con seguente riduzione della resistenza a compressione in condizioni di sollecitazione sub-parallela alla direzione prevalente della foliazione stessa. Si ricorda comunque che la rappresentatività del valor medio 10 MPa è confermata dai risultati delle prove di laboratorio (campagna di indagine del PD - 2004) caratterizzate dall'applicazione del carico in direzione parallela ai piani di scistosità, dalle quali si è ottenuto che la resistenza media a compressione si colloca sul medesimo valore dei 10 MPa.

Secondo i criteri di classificazione dei gruppi geomeccanici, emessi in sede di analisi dell'attività di scavo dei cunicoli, il gruppo G1 è caratterizzato da una presenza di strati calcarei poco alterati e poco fratturati (palombini) che può superare il 50% fino a condizionare il comportamento generale dell'ammasso.

Dall'analisi completa dei dati di resistenza a compressione mono-assiale, è emerso che, su un campione complessivo di oltre 180 dati, circa 20 (pari al 10%) si collocano su valori superiori ai 35-40 MPa. Dall'esame delle prove a compressione eseguite in sede di progettazione esecutiva, è stato possibile associare tali valori di resistenza ad una componente calcarea molto compatta caratterizzante il provino testato, rappresentativa del palombino. E' ragionevole dunque ricondurre la gran parte di valori di resistenza superiori alla soglia dei 35-40 MPa agli inclusi calcarei caratterizzanti la formazione degli argilloscisti a palombini. Si riporta per completezza il medesimo grafico con distribuzione di frequenza delle UCS, proposto al par. 6.2.1, dal quale si riscontra una concentrazione di risultati sperimentali nel **range 50-80 MPa**, cui è possibile associare dunque il valore di resistenza media a compressione rappresentativo degli inclusi calcarei.



**Figura 7-37 Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 10 MPa
(campione aggregato PP+PD+PE)**

Considerando quindi una presenza di palombini pari al 50%, con resistenza a compressione di 50-70 MPa, ed un valore di resistenza della matrice nell'ordine dei 10 MPa (come detto rappresentativa dell'influenza della foliazione), si delinea una resistenza media nel range dei 30-40 MPa caratterizzante il comportamento generale dell'ammasso.

L'attribuzione del range di variabilità di UCS, per i gruppi geomeccanici **G2 e G3**, discende dall'affinità delle determinazioni ottenute dall'analisi dei sondaggi realizzati nelle campagne di PP, PD e PE e le risultanze associate allo scavo dei cunicoli esplorativi.

Si evidenzia, in merito al gruppo geo-meccanico G3, l'adozione del valore di 5 MPa quale limite inferiore del range di variazione. Come già dichiarato, tale valore è assunto quale minimo rappresentativo, da un punto di vista ingegneristico, delle resistenze a compressione misurate in direzione sub-parallela alla foliazione.

Con riferimento alla **resistenza a trazione indiretta della matrice rocciosa**, viste le caratteristiche delle distribuzioni di punti sperimentali discusse al 6.1.1 della presente relazione tecnica, si attribuiscono i range di variazione del parametro per i tre gruppi-geomeccanici, come elencato nella tabella che segue. Si evidenzia il carattere locale delle determinazioni, stante l'esiguità del campione sperimentale a disposizione, specie con riferimento ai gruppi G2 - G3.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 104 di 117

Resistenza a trazione indiretta della matrice rocciosa	
aP-G1 -MPa	1.00 - 2.50
aP-G2 - MPa	0.50-1.00
aP-G3 - MPa	≅ 0.50

Tabella 6.12: Resistenza a trazione indiretta per i gruppi geomeccanici rappresentativi degli Argilloscisti Filladici.

L'attribuzione del parametro m_i di Hoek-Brown deriva altresì dall'analisi comparata delle determinazioni da sondaggi ed indagini in cunicolo, come espresso nella tabella qui di seguito. A fronte di un dato ben delineato per i gruppi G1 e G2 (peraltro confermato dalla letteratura) risulta evidente la discrepanza relativa alle determinazioni per il gruppo G3, peraltro condizionate dall'esiguità del campione a disposizione. Si è assunto pertanto un valore di m_i pari a 19, come da letteratura specifica, associando l'ammasso roccioso appartenente al gruppo geomeccanico 3 ad una breccia.

L'ammasso che ricade in questo gruppo, infatti, appartiene a zone particolarmente tettonizzate o alterate e mostra proprietà geomeccaniche molto scadenti. La foliazione è talmente intensa ed irregolarmente e fittamente spaziata che può non essere più riconoscibile (ammasso destrutturato con perdita di coesione).

Formazione	mi (Hoek-Brown)		
	cunicoli	sondaggi (PP+PD+PE)	PE
aP-G1	19	10 +- 2	15 - 20
aP-G2	16	20 +- 2	25 - 25
aP-G3	2	> 20	19

Tabella 6.13. Parametro m_i di Hoek-Brown per i gruppi geomeccanici rappresentativi degli Argilloscisti Filladici.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 105 di 117

Caratteristiche di deformabilità.

Come ottenuto dall'analisi condotta in Fase 2, gli intervalli di valori rappresentativi delle tre concentrazioni dei parametri di deformabilità della matrice rocciosa in funzione della fratturazione d'ammasso, mostrano la tipica estensione del range riconducibile all'anisotropia della matrice rocciosa caratterizzante gli argilloscisti, nonché alla presenza locale di inclusi calcarei cui attribuire i valori massimali di modulo raggiunti.

Nella tabella che segue si propone una sintesi dei parametri di deformabilità della matrice, attribuendo alle concentrazioni di cui al punto precedente la funzione di gruppo geo-meccanico, e definendo per il modulo elastico un limite superiore di significato ingegneristico.

Tale limite è determinato in funzione della percentuale di inclusi calcarei nella matrice argillitica, in misura variabile dal 50% al 30% (si veda descrizione dei Gruppi Geo-meccanici), pesando dunque il contributo dei palombini stessi sulla matrice argillitica, in termini di caratteristiche meccaniche di deformabilità (analogamente a quanto considerato per la valutazione dell'UCS).

Contestualmente è fornita la variazione del modulo elastico d'ammasso E_m , condotta secondo la relazione di Hoek-Diederichs (2006) e calcolata in condizioni indisturbate ($D=0$), associando i minimi ed i massimi del range GSI agli estremi dell'intervallo di E_i – modulo elastico della matrice.

Gruppo geo-meccanico	G1	G2	G3
	MPa	MPa	MPa
Ei min – matrice	3000	2000	1000
Ei max– inclusi calcarei	40000	25000	20000
% inclusi calcarei	50%	40%	30%
Ei max – matrice+inclusi calcarei	21500	11200	6700
Erm (Rock Mass): min - max	700-8700	250-2500	100-800

Tabella 6.14: Parametri di deformabilità della matrice rocciosa e dell'ammasso in condizioni indisturbate rappresentativi dei tre gruppi geo-meccanici, da analisi aggregata sondaggi PP + PD + PE 1° lotto.

Da un primo esame dei moduli d'ammasso, appare evidente l'ampia variabilità degli stessi nell'ambito del medesimo gruppo geo-meccanico, effetto del processo di derivazione del valore del modulo, per mezzo dell' E_i (matrice) a sua volta condizionato dai modesti valori di resistenza a compressione associati alla marcata anisotropia della matrice.

Ai fini della valutazione finale del modulo d'ammasso, è significativo il confronto con i moduli d'ammasso derivanti dalle prove di laboratorio e dalle prove in situ eseguite nell'ambito dello scavo dei cunicoli Vallemme e Castagnola.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRGBN0000001A00 Foglio 106 di 117

Nel prospetto è data quindi evidenza delle valutazioni ingegneristiche condotte comparando le varie sorgenti di dati a disposizione, pervenendo al valore di progetto del modulo elastico d'ammasso per i tre gruppi geo-meccanici.

Formazione	Erm (rock mass) (MPa)			
	$E_{unloading}$ dilatometro media – (min – max)	Erm (TX-UCS-IDT)	sondaggi (PP+PD+PE)	PE
aP-G1	7900 (3100-20100)	4300-7700	700-8700	3000-7800
aP-G2	850 (280 – 1700)	1400-2500	250-2500	1000-2000
aP-G3	590 (280-1690)	730-1000	100-800	600-1200

Tabella 6.15: Parametri di deformabilità dell'ammasso, in condizioni indisturbato, rappresentativi dei tre gruppi geo-meccanici, da indagini in cunicolo, analisi aggregata sondaggi PP + PD + PE 1° lotto e determinazione valori di progetto esecutivo.

L'operazione di sintesi delle indagini condotte su più fronti è confluita essenzialmente nella soluzione così determinata, per ogni gruppo geo-meccanico:

- Limiti superiori degli intervalli di variazione del modulo dettati dalla buona affinità dei risultati desunti da fonti differenti e secondo approcci teorico/procedurali distinti;
- Limiti inferiori degli intervalli di variazione del modulo allineati con le determinazioni sperimentali caratterizzate da una maggiore rappresentatività delle reali condizioni in situ, ovvero con i risultati delle indagini in cunicolo. Questi risultano essere generalmente associati a valori superiori dei moduli elastici d'ammasso.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 107 di 117

Quadro di sintesi caratterizzazione geomeccanica

Si riportano nel seguito:

- Quadro di sintesi di caratterizzazione geomeccanica per i 3 gruppi individuati, con ulteriore partizione dei gruppi G2 e G3 a vantaggio della versatilità della classificazione rispetto alle esigenze progettuali e costruttive;
- Parametri geotecnici/geomeccanici di calcolo propri di ogni gruppo geomeccanico individuato, espressi secondo il criterio di rottura di Hoek-Brown. Sono riportati anche i parametri associati alle condizioni residue, corrispondenti all'assunzione di un fattore di disturbo $D=0.3$.

Formazione	γ	ν	E_{op}	σ_c	m_i	GSI
	[kN/m ³]	[-]	[GPa]	[MPa]	[-]	[-]
GR1	27	0,25-0,3	3.0÷7.8	30÷40	15÷20	45÷55
GR2a	27	0,25-0,3	1.5÷2.0	10÷12	20÷25	40÷45
GR2b	27	0,25-0,3	1.0÷1.5		15÷20	35÷40
GR3a	26	0,3	0.6÷1.2	5÷7	19	30÷35
GR3b	26	0,3			19	25÷30

Tabella 6.16: • Quadro di sintesi di caratterizzazione geomeccanica per i 3 gruppi geomeccanici

Formazione	γ	ν	E_{op}	σ_c	m_i	GSI	a	m_{bp}	s_p	m_{br}	s_r
	[kN/m ³]	[-]	[GPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
GR1	27	0,3	5,4	35	17,5	50	0,506	2,93	0,0039	2,14	0,0021
GR2a	27	0,3	1,75	12	20	42	0,510	2,52	0,0016	1,75	0,0008
GR2b	27	0,3	1,25	10	17,5	37	0,514	1,84	0,0009	1,24	0,0004
GR3a	26	0,3	1,1	7	19	33	0,518	1,74	0,0006	1,14	0,0003
GR3b	26	0,3	0,9	5		28	0,526	1,45	0,0003	0,92	0,0001

Tabella 6.17: • Parametri geotecnici/geomeccanici di calcolo, criterio di rottura di Hoek-Brown.

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 108 di 117

7.2.5 Considerazioni sul fenomeno di squeezing

Note introduttive

Oggetto del presente paragrafo è la *valutazione del rischio* associato all'insorgere del fenomeno di *squeezing* durante lo scavo delle gallerie per la nuova linea AC Genova-Milano all'interno della formazione degli argilloscisti filladici, in special modo sotto le alte coperture previste.

Con la denominazione di *squeezing* si identifica il fenomeno di intensa deformazione, dipendente dal tempo, che si manifesta all'intorno di una cavità sotterranea ed è principalmente connessa con l'instaurarsi di un fenomeno di "creep" per valori di tensioni che superano la resistenza al taglio del mezzo. La deformazione può terminare durante la fase di costruzione o continuare anche per molto tempo dopo ("International Society for Rock Mechanics", ISRM, Barla, 1995). Il fenomeno implica pertanto una lenta deformazione di tipo plastico e/o viscoso a carico di una fascia più o meno ampia di ammasso roccioso a diretto contatto con il tunnel o la cavità sotterranee in generale.

La valutazione dell'intensità dello *squeezing* potenzialmente connesso con le operazioni di scavo condotte in un determinato ammasso, è stata condotta ricorrendo alle metodologie di natura empirica derivanti dall'analisi di esperienze raccolte su una vasta gamma di contesti geo-meccanici.

I paragrafi che seguono forniscono una rapida illustrazione dei seguenti criteri adottati nella presente analisi del potenziale rischio di *squeezing*:

- *Criterio di GOEL (1994)*
- *Criterio di BARLA (1995)*
- *Criterio di HOEK & MARINOS (2000)*

Contestualmente alla trattazione teorica delle metodologie di analisi, per ogni criterio di valutazione, saranno presentati in forma grafica i limiti associati ai differenti livelli di rischio, derivati in funzione delle caratteristiche fisico-meccaniche proprie dei gruppi geo-meccanici rappresentativi della formazione degli argilloscisti filladici.

Criterio di GOEL (1994)

L'autore propone un criterio per la determinazione dello *squeezing* basato sulla stima dell'indice Q di Barton relativo all'ammasso roccioso sulla base di una casistica di circa un centinaio di opere in sottterraneo scavate in Scandinavia, Regno Unito e India.

Goel definisce tre gradi/intensità di *squeezing* che chiama leggero, moderato e severo.

La determinazione empirica di questi gradi richiede solo la conoscenza della copertura H, delle dimensioni del tunnel B e dell'indice Q di Barton secondo gli intervalli espressi nella seguente tabella.

Squeezing Assente	$H < 275 * Q^{0,33} * B^{-0,1}$
Squeezing Leggero	$275 * Q^{0,33} * B^{-0,1} < H < 450 * Q^{0,33} * B^{-0,1}$
Squeezing Moderato	$450 * Q^{0,33} * B^{-0,1} < H < 630 * Q^{0,33} * B^{-0,1}$
Squeezing Severo	$630 * Q^{0,33} * B^{-0,1} < H$

Tabella 6.18: • Potenziale di squeezing secondo Goel (1994)

Si è pertanto derivato l'indice Q, attraverso l'indice RMR, secondo la nota relazione di Bieniawski, dal valore medio di GSI identificativo di ogni gruppo geo-meccanico, ottenendo le curve di potenziale di *squeezing* in funzione della copertura della galleria e dello stesso GSI identificativo dell'ammasso. Nelle determinazioni si è assunto il diametro equivalente di scavo pari a 10/11 m.

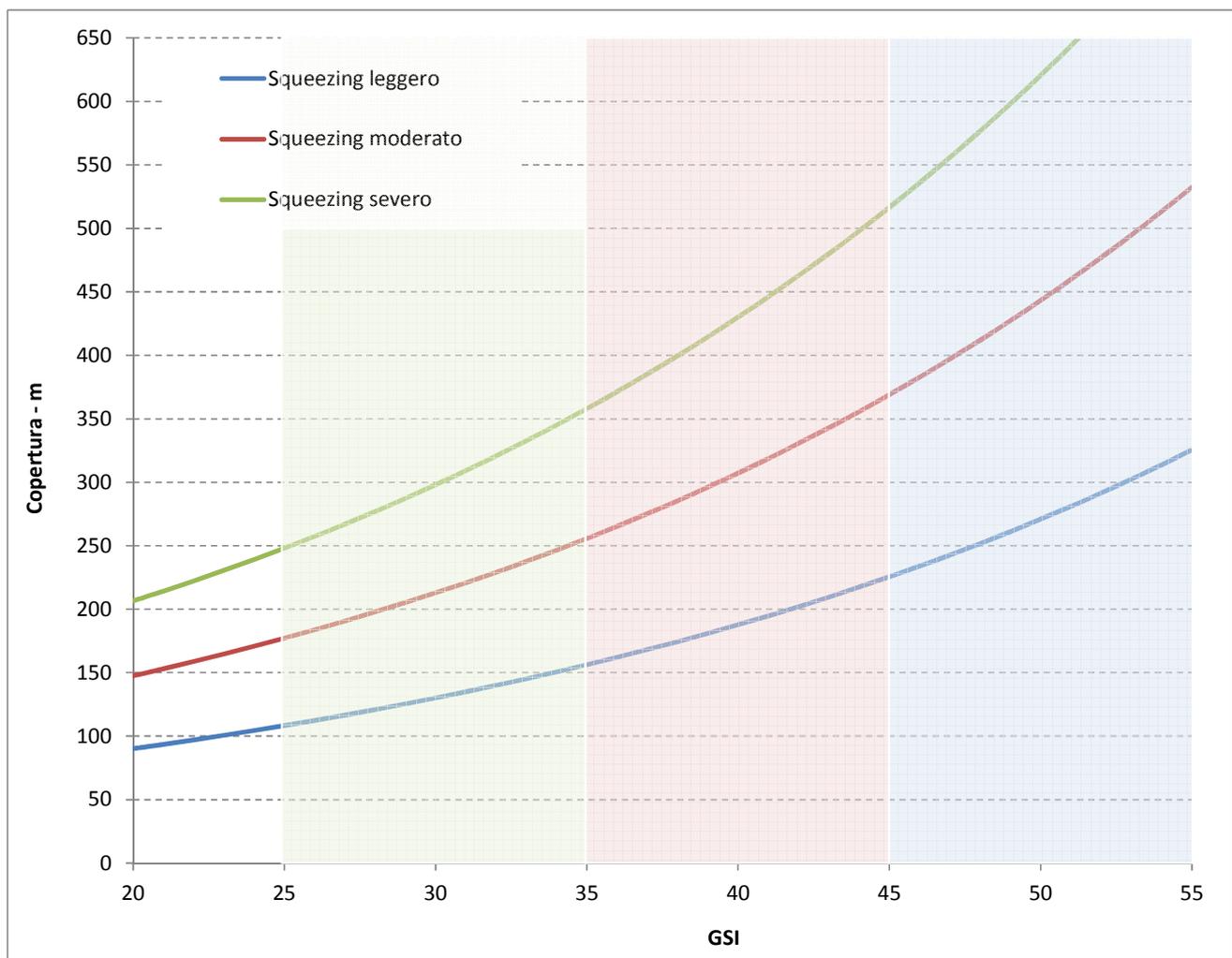


Figura 7-38 Curve Potenziale di squeezing secondo Goel (1994)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 110 di 117

Nel grafico sono campite le fasce corrispondenti ai range di variazione di GSI per i tre gruppi geo-meccanici G1, G2, G3. Le curve rappresentano il limite inferiore associato all'intensità del fenomeno dichiarata.

Si evince che solamente in presenza di un ammasso roccioso riferibile al gruppo geo-meccanico G1, l'insorgenza di fenomeni di *squeezing* risulta comunque di intensità moderata fin quasi alle massime coperture previste (630 m). In tutti gli altri casi l'ammasso, in presenza di coperture medio-alte, variabili nel range da 250 m a 500 m, in relazione al gruppo geo-meccanico coinvolto, mostrerà invece fenomeni di *squeezing* severo.

Critero di BARLA (1995)

L'autore propone una stima del fenomeno sulla base del calcolo del rapporto:

$$\sigma_{c\text{ amm}} / \gamma * z$$

dove $\sigma_{c\text{ amm}}$ è la resistenza a compressione dell'ammasso roccioso, calcolata nel caso in esame tramite la relazione di Hoek (2000) – si veda paragrafo successivo - , γ il peso di volume naturale della roccia soprastante e z è la copertura sopra la galleria.

Anche in questo caso si definiscono tre gradi di *squeezing* in funzione del valore assunto dal precedente rapporto, secondo quanto espresso nella tabella seguente:

Grado di squeezing	Rapporto $\sigma_{c\text{ amm}} / \gamma * z$
Assente	>1,0
Leggero	0,4 – 1,0
Moderato	0,2 – 0,4
Alto	< 0,2

Tabella 6.19: • Potenziale di squeezing secondo Barla (1995)

Il diagramma che segue mostra graficamente i limiti associati alle intensità del fenomeno in oggetto, espressi come metri copertura in funzione della resistenza a compressione dell'ammasso $\sigma_{c\text{ amm}}$. Le linee rappresentano il limite inferiore associato all'intensità del fenomeno dichiarata. Nel grafico sono campite le fasce corrispondenti ai range di variazione di resistenza a compressione dell'ammasso roccioso, calcolata per i tre gruppi geo-meccanici G1, G2, G3.

Emerge che il gruppo geo-meccanico G1, anche in presenza delle massime coperture previste, risulta essere interessato da fenomeni di squeezing da leggero a moderato; di contro l'insorgere di episodi di intensità elevata è potenzialmente riscontrabile già a partire da profondità di 100 m, in presenza del gruppo geo-meccanico G3: La corrispondente soglia, riferita al gruppo G2 è posta sui 200 m circa.

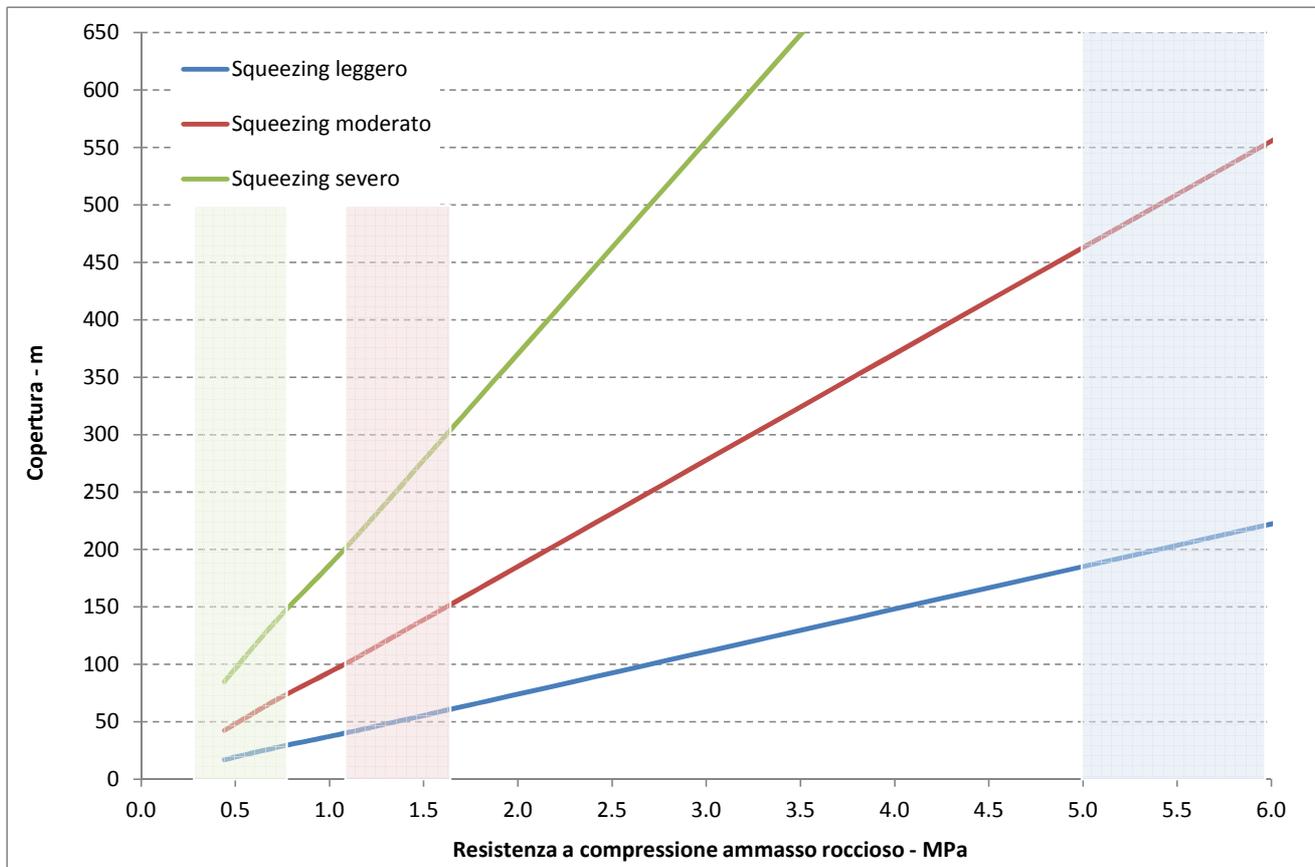


Figura 7-39 Potenziale di squeezing secondo Barla (1995)

Critério di HOEK & MARINOS (2000)

Il grado di *squeezing* è determinato sulla base del rapporto $\sigma_{c\text{ amm}} / p_0$, dove $\sigma_{c\text{ amm}}$ è la resistenza a compressione dell'ammasso roccioso e p_0 è, in senso più generale, il valore della tensione principale in situ. I parametri citati sono stati determinati in accordo alle seguenti espressioni:

$$\sigma_{c\text{ amm}} = (0,0034m_i^{0,8})\sigma_c[1,029+0,025e^{(-0,1m_i)}]^{GSI} \quad p_0 = \gamma z$$

dove σ_c è la resistenza a compressione semplice della matrice rocciosa; m_i è la costante del Criterio di rottura di Hoek & Brown; GSI è il Geological Strength Index dell'ammasso roccioso; γ è il peso specifico della roccia e z è la copertura della galleria.

La stima della convergenza attesa all'interno della galleria, espressa in termini di deformazione percentuale ε (%) rispetto al diametro, discende dalla seguente espressione di natura empirica.

$$\varepsilon = 0,2(\sigma_{c\text{ amm}} / p_0)^2$$

L'intensità del fenomeno di squeezing è dunque tarata sulla deformazione % diametrale, come espresso nella seguente tabella.

Classe	Convergenza $\epsilon(\%)$	Grado di squeezing
A	< 1,0%	Assente
B	1,0% - 2,5%	Leggero
C	2,5% - 5,0%	Moderato
D	5,0% - 10,0%	Severo
E	> 10,0%	Estremo

Tabella 6.20: • Potenziale di squeezing secondo Hoek-Marinos (2000)

Il diagramma che segue mostra graficamente i limiti associati alle intensità del fenomeno in oggetto, espressi come metri copertura in funzione della resistenza a compressione dell'ammasso $\sigma_{c\text{ amm}}$. Le linee rappresentano il limite inferiore associato all'intensità del fenomeno dichiarata. Nel grafico sono inoltre campite le fasce corrispondenti ai range di variazione di resistenza a compressione dell'ammasso roccioso, calcolata per i tre gruppi geo-meccanici G1, G2, G3.

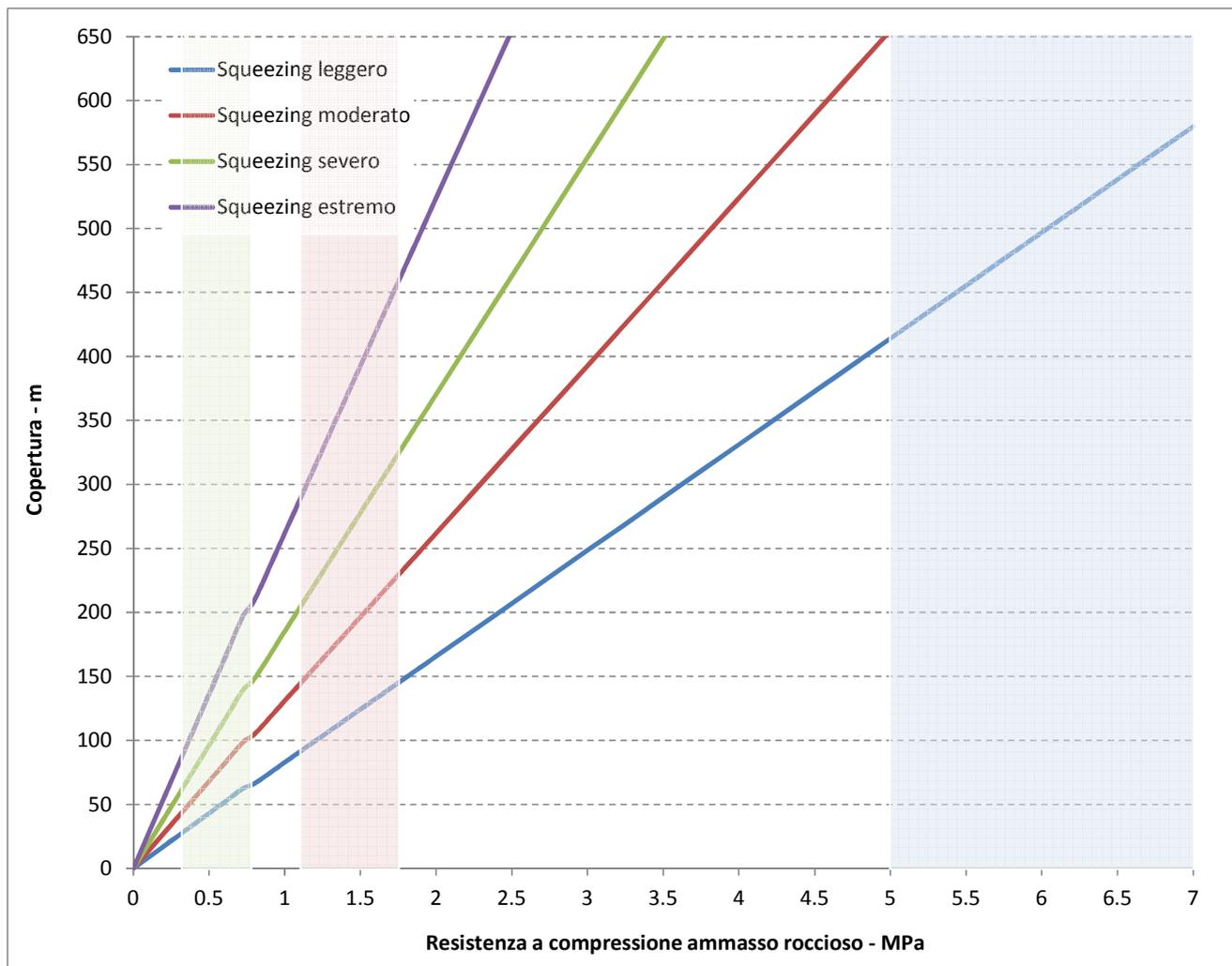


Figura 7-40 Potenziale di squeezing secondo Hoek-Marinos (2000)

GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci	ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE
	IG5103ECVRBGN0000001A00 Foglio 113 di 117

Si evince che il gruppo geo-meccanico G1, anche in presenza delle massime coperture previste, è potenzialmente interessato da fenomeni di squeezing di intensità comunque da leggera a moderata. Al contrario, si rileva il rischio di fenomeni di natura severa se non estrema, già a partire da profondità di rispettivamente 75-100 m, in presenza del gruppo geo-meccanico G3, e di 200-300 m per il gruppo G2.

Analisi comparata dei risultati

Il prospetto che segue costituisce il quadro di sintesi delle determinazioni ottenute ai paragrafi precedenti, in merito ai limiti di copertura connessi con l'insorgere potenziale del fenomeno di squeezing, nelle varie intensità previste dai criteri di valutazione di Goel, Barla e Hoek-Marinos.

Gruppo Geomeccanico		G1	G2a	G2b	G3a	G3b
Squeezing assente (copertura massima in metri)	Goel	270	200	170	145	120
	Barla	225	65	40	30	15
	Hoek-Marinos	500	140	90	60	40
Squeezing leggero (copertura massima in metri)	Goel	440	330	275	240	200
	Barla	560	160	105	70	40
	Hoek-Marinos	795	225	150	100	60
Squeezing moderato (copertura massima in metri)	Goel	620	465	385	330	280
	Barla	1120	320	210	140	85
	Hoek-Marinos	1120	320	210	140	85
Squeezing severo (copertura massima in metri)	Goel	--	--	--	--	--
	Barla	--	--	--	--	--
	Hoek-Marinos	1590	450	300	200	120

Tabella 6.21: • Quadro di sintesi dei limiti di copertura connessi con l'insorgere potenziale del fenomeno di squeezing, nelle varie intensità previste dai criteri di valutazione di Goel, Barla e Hoek-Marinos.

Dall'analisi comparata dei limiti di copertura ottenuti secondo i differenti criteri di valutazione, emerge quanto segue:

- il criterio di Goel determina limiti più conservativi – mediamente inferiori del 45%, rispetto alla formulazione di Hoek-Marinos, in condizioni buone/elevate di ammasso proprie del gruppo G1;
- i criteri di Hoek-Marinos e Barla, in linea comune nella definizione dei limiti di comportamento, esprimono risultati più cautelativi per condizioni di ammasso medio/basse – gruppi G2-G3, con livelli di copertura mediamente inferiori di un 55-60% rispetto ai limiti secondo Goel in corrispondenza di intensità leggere del fenomeno di squeezing, fino a valori

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00	Foglio 114 di 117

inferiori del 30 - 70%, più spiccatamente con il decadimento delle caratteristiche geo-meccaniche dell'ammasso (G2a→G3b).

In linea generale si delinea pertanto un quadro del potenziale di squeezing così strutturato:

- Gruppi geo-meccanici **G1 – G2a**: l'attività di scavo sotto coperture comunque elevate non è associabile, all'attuale livello conoscitivo, a fenomeni di squeezing severo. Limitatamente al gruppo G2a si delinea un livello di attenzione collocato intorno ai 400 m di copertura oltre il quale è possibile attendersi l'insorgere di squeezing di intensità notevole.
- Gruppi geo-meccanici **G2b – G3a**: la formazione degli argilloscisti in tale condizione di ammasso può essere suscettibile a fenomeni di squeezing con avviamento per range di copertura di 200-300 MPa:
- Gruppo geo-meccanico **G3b**: lo scavo in condizioni di ammasso fortemente tettonizzato ed alterato è correlabile con probabili fenomeni di squeezing severo, anche per coperture inferiori e comunque nell'ordine dei 100 m (stima ottimistica secondo Goel \cong 250 m).

Tale rischio potenziale connesso all'insorgenza del fenomeno potrà determinare l'adozione, nell'ambito delle previste sezioni di scavo ed avanzamento, dei limiti superiori indicati nel campo di variabilità degli interventi.

In conclusione delle analisi svolte, appare evidente che, in determinate situazioni geo-meccaniche e di copertura, la formazione degli Argilloscisti risulta potenzialmente suscettibile al fenomeno dello squeezing, anche con manifestazioni localmente molto importanti e pertanto non trascurabili, pur sussistendo le seguenti limitazioni riguardo la completa rappresentatività dei risultati ottenuti:

- la determinazione del potenziale di squeezing è discesa dall'assunzione, nelle formulazioni empiriche, di una tensione principale massima pari al carico geostatico, eludendo pertanto l'eventualità di tensioni orizzontali superiori alla verticale geostatica, peraltro emersa localmente dall'esito delle prove di fratturazione idraulica in foro di sondaggio;
- i dati acquisiti nelle campagne di indagine di PP, PD e PE sono limitati ad una profondità massima di indagine di circa 400 m, con significativa concentrazione del campione di rilevazioni entro profondità di 200 m.

In relazione dunque alle coperture identificate quali potenziali soglie per l'insorgenza dello squeezing, superiori ai 250 m, la valutazione del potenziale di squeezing, derivata estrapolando le caratteristiche geo-meccaniche attualmente disponibili, è da considerarsi non priva di margini di incertezza.

GENERAL CONTRACTOR 	ALTA SORVEGLIANZA 	
	IG5103ECVRBGN0000001A00	Foglio 115 di 117

Si sottolinea comunque che, sulla base delle distribuzioni attualmente note di GSI e UCS, non è determinabile alcuna forma di correlazione delle stesse con la profondità dal p.c. e pertanto non è possibile allo stato attuale estrapolare un'eventuale aumento con la profondità del valore della σ_{camm} media.

- i dati disponibili non consentono di determinare l'ampiezza della fascia plasticizzata al contorno della galleria né di poter tentare una stima, seppur grossolana, dei tempi in cui tale fenomeno si potrà evolvere;
- il carattere indicativo delle risultanze delle precedenti formulazioni è legato all'esperienza diretta dello scavo dei cunicoli Vallemme e Castagnola, nell'ambito del quale, pur essendo state incontrate zone con gruppo geomeccanico pari a 3, il monitoraggio tenso-deformativo dei rivestimenti nel tempo non ha evidenziato alcuna anomalia.

<p>GENERAL CONTRACTOR</p> 	<p>ALTA SORVEGLIANZA</p> 
	<p style="text-align: center;">IG5103ECVRBGN0000001A00</p> <p style="text-align: right;">Foglio 116 di 117</p>

8 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>IG5103ECVRBGN0000001A00</p>	<p>Foglio 117 di 117</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.