

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 2 – WBS GN14F, GN14J, GN15G, GN15J
Relazione geotecnica**

| | |
|---|----------------------|
| GENERAL CONTRACTOR | DIRETTORE DEI LAVORI |
| Consorzio Cociv Ing. N. Meistero | |

| | | | | | | | |
|----------|-------|------|------|-----------|------------------|--------|------|
| COMMESSA | LOTTO | FASE | ENTE | TIPO DOC. | OPERA/DISCIPLINA | PROGR. | REV. |
| I G 5 1 | 0 4 | E | C V | R B | G N 0 0 0 0 | 0 0 3 | A |

Progettazione :

| Rev | Descrizione | Redatto | Data | Verificato | Data | Progettista Integratore | Data | IL PROGETTISTA |
|-----|-------------|---------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|---|
| A00 | Emissione | COCIV | 25/05/2017 | DI SALVO | 25/05/2017 | A. Mancarella | 25/05/2017 | Consorzio Collegamenti Integrati Veloci Dott. Ing. Aldo Mancarella Ordine Ingegneri Prov. TO n. 6271 R |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| n. Elab.: | File: IG51-04-E-CV-RB-GN00-00-003-A00 |
|-----------|---------------------------------------|

CUP: F81H92000000008

| | |
|---|--|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> <p style="text-align: right;">Foglio 3 di 110</p> |

INDICE

| | |
|--|-----|
| INDICE..... | 3 |
| 1 PREMESSA..... | 5 |
| 2 DOCUMENTAZIONE, NORMATIVA E STRUMENTI TERRITORIALI DI RIFERIMENTO | |
| 7 | |
| 2.1 Documentazione di riferimento..... | 7 |
| 2.2 Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento | 7 |
| 3 INQUADRAMENTO GENERALE..... | 9 |
| 3.1 Inquadramento dell'opera | 9 |
| 3.1.1 Caratteristiche generali..... | 9 |
| 3.2 Inquadramento geologico-geomorfologico | 12 |
| 3.2.1 Metabasalti del M. Figogna | 15 |
| 3.2.2 Metasedimenti silicei della Madonna della Guardia | 15 |
| 3.2.3 Argille a Palombini del Passo della Bocchetta aP, AGI, AGF (Cretaceo inf.) | 15 |
| 3.2.4 Unità tettonometamorfica Gazzo – Isoverde | 18 |
| 3.2.5 Gessi del Rio Riasso ("Gessi, anidriti e carniole" nella cartografia PE) | 19 |
| 3.2.6 Unità tettonometamorfica Cravasco-Voltaggio..... | 20 |
| 3.2.7 Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera | 21 |
| 3.2.8 Principali elementi di incertezza geologica..... | 23 |
| 3.3 Inquadramento idrogeologico | 25 |
| 3.3.1 Complessi idrogeologici e permeabilità | 25 |
| 3.3.2 Condizioni idrogeologiche attese in corrispondenza dell'opera | 27 |
| 4 INDAGINI GEOGNOSTICHE | 35 |
| 4.1 Note generali | 35 |
| 5 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA/GEOMECCANICA | 36 |
| 5.1 Note generali | 36 |
| 5.2 Formazioni rocciose..... | 36 |
| 5.2.1 Generalità | 36 |
| 5.2.2 Valutazione del parametro RMR'89 | 37 |
| 5.2.3 Criteri di rottura | 39 |
| 5.2.4 Caratteristiche di deformabilità | 44 |
| 6 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA – GEOMECCANICA DELLE PRINCIPALI FORMAZIONI INTERAGENTI CON L'OPERA | 46 |
| 6.1 Argillite a Palombini (Argilloscisti filladici) | 46 |
| 6.1.1 Analisi completa campione risultati indagini pregresse..... | 47 |
| 6.1.2 Analisi campione risultati correlata alle caratteristiche di fratturazione dell'ammasso | 72 |
| 6.1.3 Classificazione GSI dell'ammasso sul campione analizzato | 80 |
| 6.1.4 Caratterizzazione Geo-meccanica degli argilloscisti..... | 84 |
| 6.1.5 Considerazioni sul fenomeno di squeezing..... | 92 |
| 6.2 Argilloscisti neri - Scisti Micaceo Carbonatici Milonitici (Myl) | 99 |
| 6.2.1 Caratteristiche fisiche | 99 |
| 6.2.2 Caratteristiche di resistenza | 100 |
| 6.2.3 Caratteristiche di deformabilità | 103 |
| 6.2.4 Classificazione geomeccanica – calcolo del GSI | 105 |
| 6.2.5 Sintesi caratterizzazione geo-meccanica | 105 |
| 6.3 Calcarei di Gallaneto (cG) | 107 |
| 6.4 Successioni litoidi di Cravasco-Voltaggio (cV, B", Se") | 108 |

GENERAL CONTRACTOR



ALTA SORVEGLIANZA



IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03

Foglio
4 di 110

| | | |
|---|-------------------|-----|
| 7 | BIBLIOGRAFIA..... | 109 |
|---|-------------------|-----|

| | |
|---|--|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> <p style="text-align: right;">Foglio 5 di 110</p> |

1 PREMESSA

Oggetto della presente relazione è la descrizione delle principali problematiche legate allo scavo di una tratta 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, di cui 5.3km circa verranno eseguiti mediante scavo meccanizzato mentre la restante parte verrà scavata in tradizionale.

Il presente documento, introdotto nella WBS GN00, è relativo allo sviluppo delle seguenti tratte:

Binario pari:

- GN14F da pk 7+914.00 a 10+334.00
- GN14J da pk 10+334.00 a 12+673.50

Binario dispari:

- GN15G da pk 7+924.03 a 10+334.05
- GN15J da pk 10+334.05 a 12+683.53

Queste tratte, riassunte nel seguito come “Tratta 2”, sono realizzate mediante scavo tradizionale impiegando due canne a singolo binario di sezione policentrica poste ad interasse pari a 35m.

Lo scavo della tratta 2, di lunghezza complessiva pari a 9.5 km considerando entrambi i binari, avviene prevalentemente nella Formazione degli 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.

La relazione si articola come segue:

- il **capitolo 2** elenca i documenti, le normative e la bibliografia di riferimento.
- il **capitolo 3** propone un inquadramento generale dell’opera e l’inquadramento geologico e idrogeologico di sintesi riprendendo quanto descritto nella relazione geologica e idrogeologica di progetto; vengono inoltre delineati in maniera organica gli elementi geologici essenziali ai fini della caratterizzazione geomeccanica.
- il **capitolo 4** riporta un riepilogo delle indagini geotecniche disponibili effettuate in più fasi per la progettazione preliminare, definitiva e per l’attuale fase di progettazione esecutiva;

| | | |
|---|--|----------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  | |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> | <p>Foglio 6 di 110</p> |

- il **capitolo 5** descrive i criteri di interpretazione delle indagini geotecniche,
- il **capitolo 6** 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 § 5, 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>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> | <p>Foglio 7 di 110</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:
 - Carta geologico-geomorfologica
 - Carta idrogeologica
 - Profilo geologico ed idrogeologico
- Indagini geognostiche eseguite durante la fase di Progetto Preliminare della galleria di linea.
- Indagini in situ eseguite durante lo scavo della prima tratta dei cunicoli esplorativi Vallemme e Castagnola
- Elaborazione ed analisi di tutti i rilievi strutturali dei fronti di scavo
- Indagini effettuate durante la fase di Progetto Definitivo.
- Indagini effettuate per la presente fase di Progetto Esecutivo.

2.2 Normative, raccomandazioni e strumenti territoriali di riferimento

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

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

| | | |
|---|--|----------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  | |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> | <p>Foglio 8 di 110</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”.

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 9 di 110 |

3 INQUADRAMENTO GENERALE

3.1 Inquadramento dell'opera

3.1.1 Caratteristiche generali

L'opera in oggetto rientra nella realizzazione della Linea AV/AC Milano- Genova III Valico ed in particolare della galleria di Valico-tratta 2.

Come descritto in precedenza, la tratta in oggetto consta di due canne ed è composta da più WBS, per una lunghezza totale considerando i due binari di circa 9.5 km. Si riportano per chiarezza le progressive relative ad ogni WBS ed il profilo longitudinale dei due binari. Si rimanda per ulteriori approfondimenti alle tavole dei profili geomeccanici.

Binario pari:

- GN14F da pk 7+914.00 a 10+334.00
- GN14J da pk 10+334.00 a 12+673.50

Binario dispari:

- GN15G da pk 7+924.03 a 10+334.05
- GN15J da pk 10+334.05 a 12+683.53

Si precisa che alla PK 9+995.388 del binario pari e alla PK 9+973.659 del binario dispari la linea si innesta con la Finestra Cravasco: per i tratti di lunghezza 100m a cavallo delle PK indicate si faccia riferimento alle WBS relative all'innesto Cravasco (GN14G e GN15H).

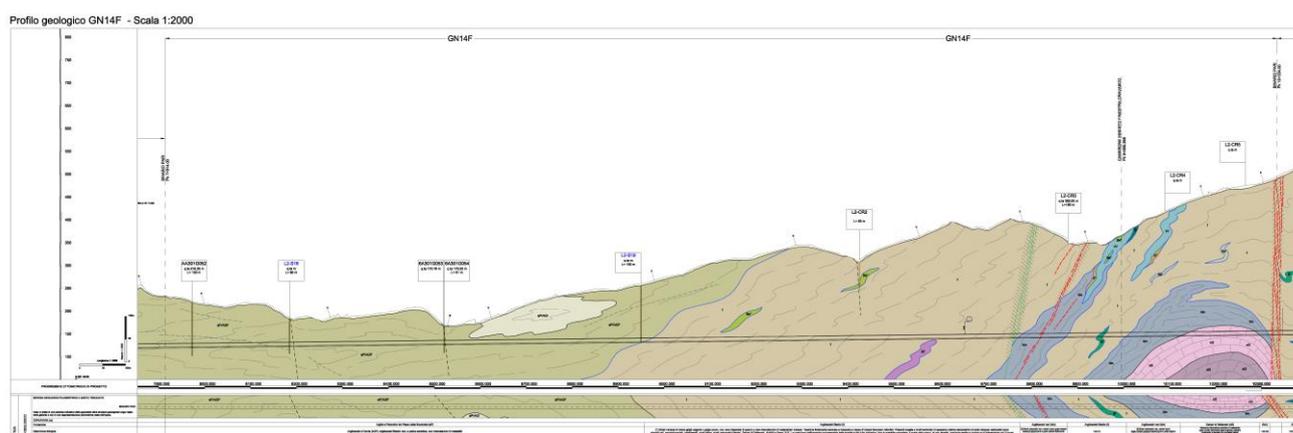


Figura 3-1. Stralcio del profilo longitudinale – binario pari GN14F

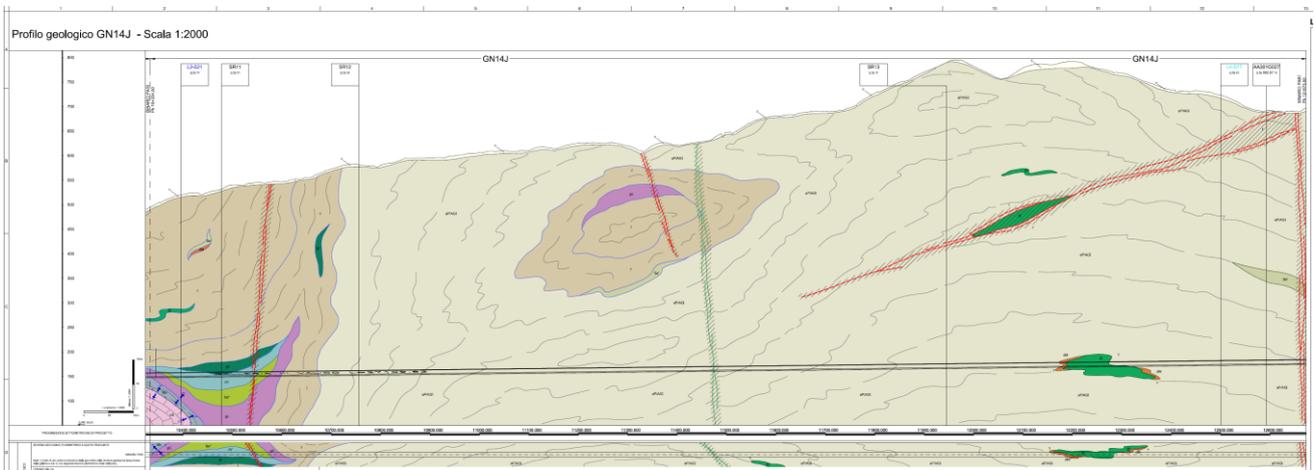


Figura 3-2. Stralcio del profilo longitudinale – binario pari GN14J

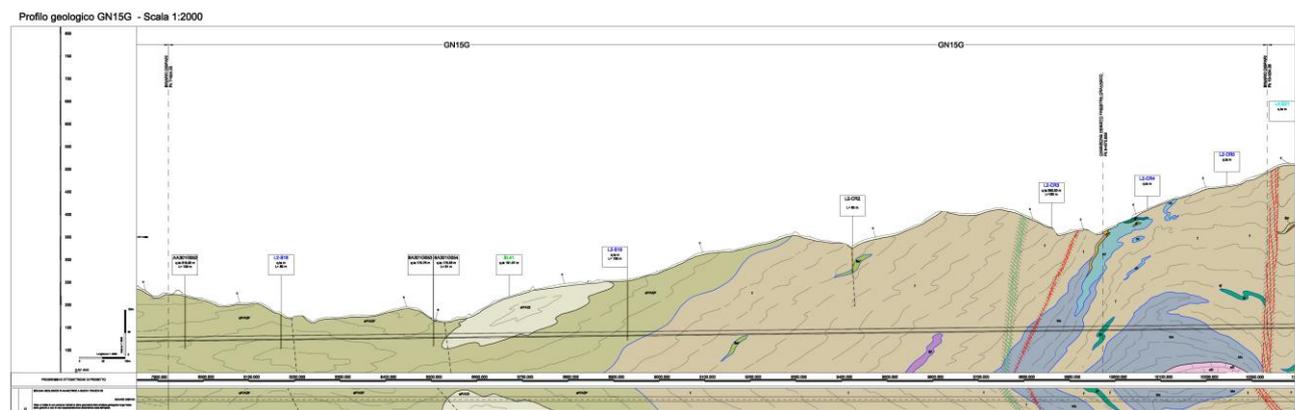


Figura 3-3. Stralcio del profilo longitudinale – binario dispari tratto GN15G

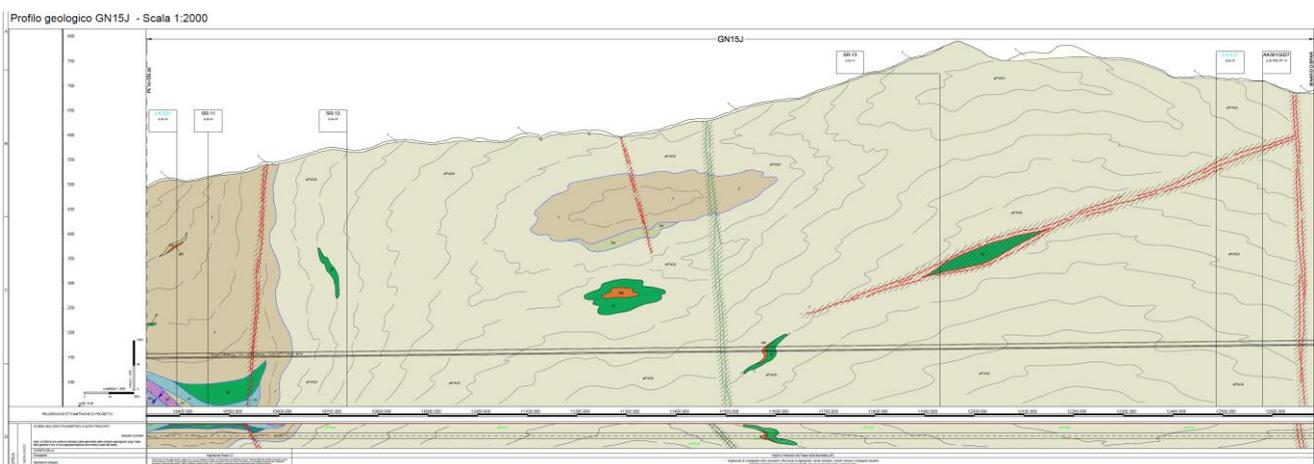
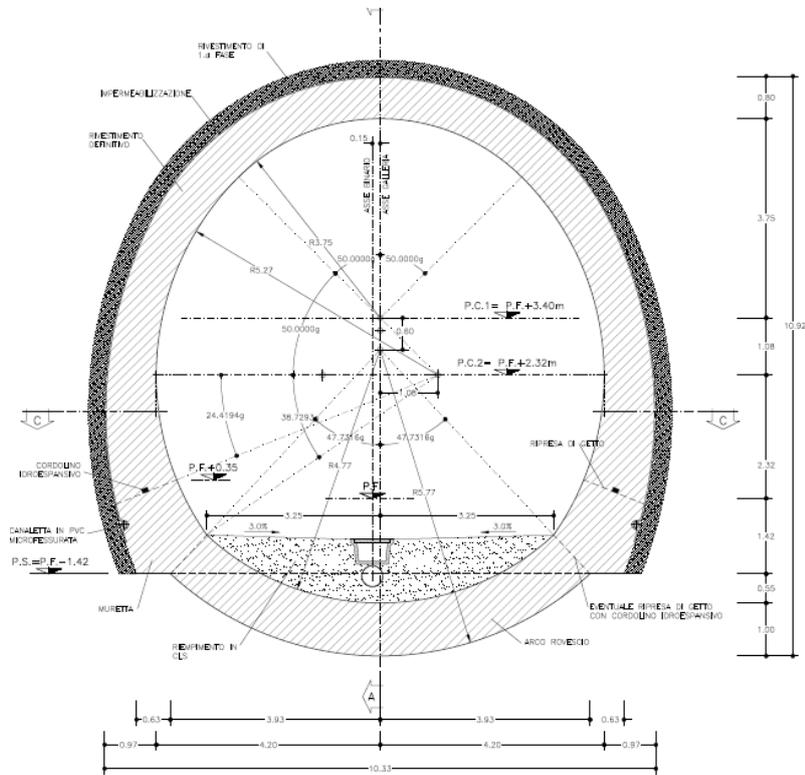


Figura 3-4. Stralcio del profilo longitudinale – binario dispari tratto GN15J

Il tratto di galleria in esame presenta quindi una lunghezza di circa 4750m per canna, con coperture massime di circa 600m. La sezione corrente adottata, per consentire il traffico ferroviario, è caratterizzata da un raggio interno in chiave calotta di 3.75m e da una larghezza massima misurata

in intradosso pari a 8.40m. La sagoma esterna presenta invece geometria variabile in funzione della sezione tipo.



Sezione corrente

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 12 di 110 |

3.2 Inquadramento geologico-geomorfologico

L'area di studio si colloca nella zona di giustapposizione tra i domini orogenici alpino e appenninico (Figura 3-5), nota in letteratura come "nodo collisionale ligure" (Laubscher at. al., 1992).

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 3-5):

1. le **unità tettonometamorfiche Voltri e Palmaro-Caffarella** ("*Gruppo di Voltri*" auct.)
2. la **Zona Sestri-Voltaggio**
3. Il **dominio dei Flysch Appenninici**

Il tracciato della linea AC/AV Milano-Genova si sviluppa, tra il territorio ligure e quello piemontese, a cavallo delle unità tettonometamorfiche Palmaro-Caffarella e Sestri-Voltaggio. A scala locale, il territorio in cui si colloca il sito di intervento è ubicato nell'areale di affioramento della ZSV e più precisamente entro la formazione delle "Argille a Palombini del Passo della Bocchetta" (aP), dell'unità tettonometamorfica Figogna e nella zona milonitica di contatto con le unità tettonometamorfiche Gazzo-Isoverde e Cravasco-Voltaggio.

Si riportano di seguito lo stralcio geologico dell'area in esame attraversata dal tracciato, ed una breve descrizione geologica delle unità interessate dallo scavo; oltre alle unità interferenti con lo scavo della galleria, sono evidenti altre unità geologiche riportate nella relazione geologica, a cui si rimanda per maggiori dettagli.



- | | |
|----|--|
| 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 sovrainpronta metamorfica di alta pressione |
| 9 | UNITÀ TETTONOMETAMORFICA PALMARO - CAFFARELLA Unità di crosta oceanica, a metamorfismo in facies Scisti Blu (glauberite, 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 sovrainpronta metamorfica di alta pressione |
| 12 | UNITÀ TETTONOMETAMORFICA ARENZANO Costituita da un Complesso di margine continentale, monometamorfico, a sovrainpronta metamorfica alpina da alta pressione a Scisti Verdi e da un Complesso di margine continentale, polimetamorfico, a metamorfismo pre-alpino in facies Anfibolitica e sovrainpronta metamorfica alpina da alta pressione a Scisti Verdi |
- Limite stratigrafico
 — Contatto tettonico
 — Faglia
 A-A' Traccia di sezione geologica

Figura 3-5 - Schema tettonico dell'area interessata dal progetto (tratto dal foglio CARG "Genova"); è riportata la tratta del tracciato di linea, per la parte inclusa nel taglio cartografico.

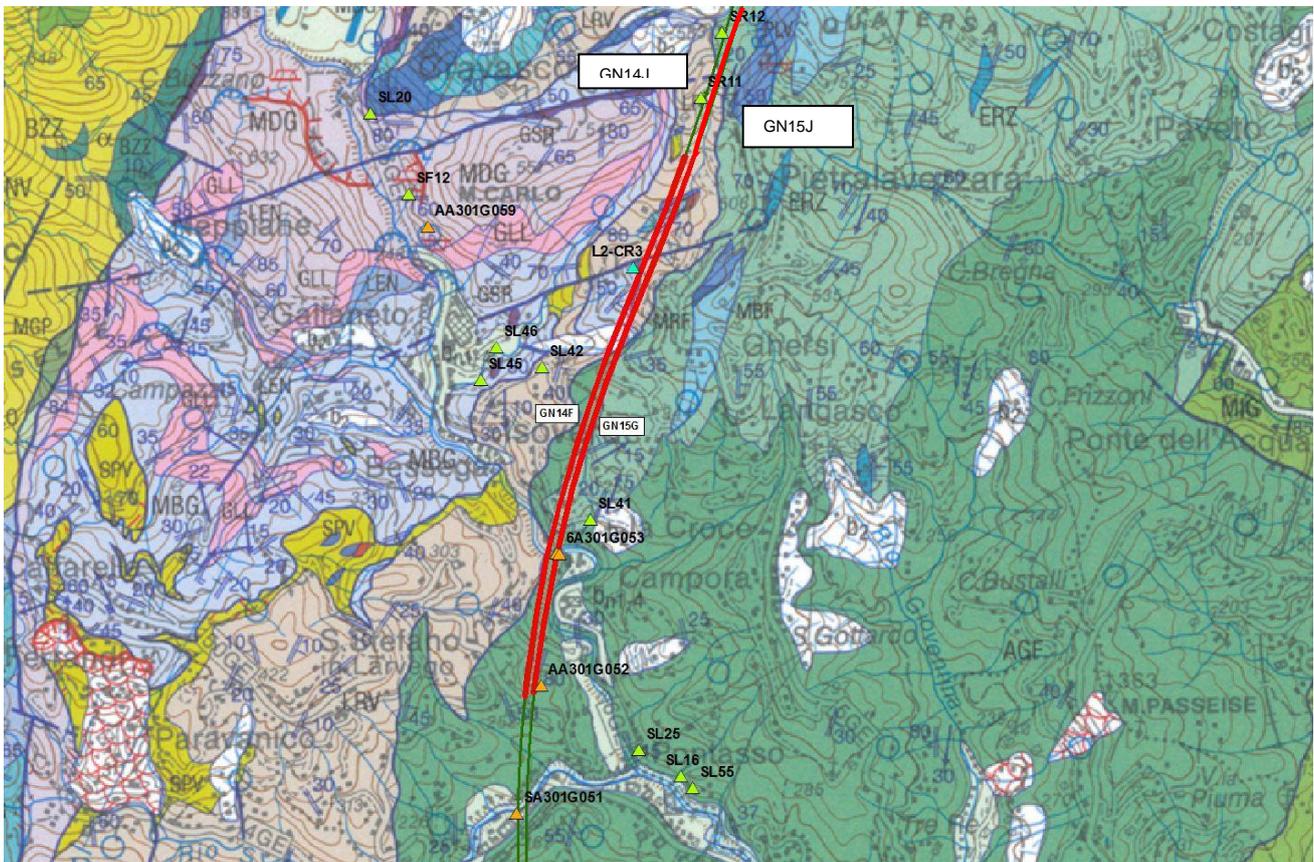


Figura 3-6. Stralcio della carta geologica relativa alle WBS in esame e ubicazione indagini

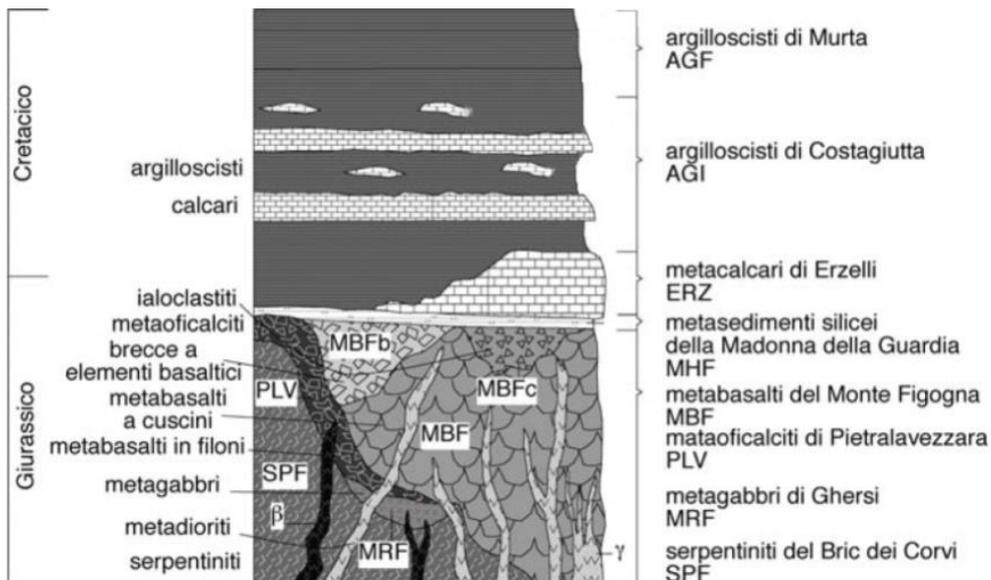


Figura 3-7 – Schema dei rapporti stratigrafici tra le varie formazioni che costituiscono l'unità tettonometamorfica Figogna (Capponi et al., 2008).

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <div style="float: right;">Foglio 15 di 110</div> |

3.2.1 *Metabasalti del M. Figogna*

B', Malm? (MBF nella cartografia CARG)

Si tratta di metabasalti massivi e a pillow, con orizzonti di brecce basaltiche a tessitura fluidale, più raramente in filoni massicci a tessitura doleritica e con locali filoni decimetrico-metrici di metadioriti. I metabasalti si presentano poco deformati; un accenno di scistosità è più evidente dove si osserva lo stiramento dei pillow, che raramente è accentuato.

Nelle parti centrali della formazione si osservano brecce basaltiche non deformate, con matrice a tessitura fluidale evidenziata da tessiture vacuolari primarie preservate. Presso la cresta spartiacque del M. Figogna sono osservabili facies ialoclastitiche vere e proprie. Più a S, nella cava di Borzoli, ubicata nella parte bassa in asse alla struttura, sono presenti orizzonti di oficalci, interessati da campi di fratture tensionali suturate da calcite.

I metabasalti, relativamente indisturbati da Borzoli al M. Figogna, sono interessati, nel settore occidentale, da numerose faglie transpressive dirette N-S e a vergenza W, che delineano dei duplex della sequenza serpentiniti-metabasalti. Queste strutture sono associate a tessiture cataclastiche, soprattutto nelle serpentiniti, che nella sequenza serpentinite/basalto sembrano agire da orizzonte plastico, assorbendo la maggior parte della deformazione. A ridosso del limite occidentale dell'unità si osservano nuovamente scaglie dei termini bacinali sedimentari, pinzate tra le metabasiti e le unità Cravasco-Voltaggio e Gazzo. A nord del M. Figogna i metabasalti affiorano in lembi allungati e discontinui di origine tettonica, all'interno della formazione degli argilloscisti di Costagiutta, dove sono frequentemente associati a lembi di metasedimenti silicei (§ 3.2.2), metacalcari e metaoficalciti.

3.2.2 *Metasedimenti silicei della Madonna della Guardia*

dM, Malm? (MHF nella cartografia CARG)

Formano lembi sottilissimi e discontinui, sempre in associazione con i basalti nella caratteristica posizione stratigrafica che questi depositi conservano nelle successioni ofiolitifere. Possono essere rappresentati da scisti silicei, rossi o più raramente verdi e da ftaniti zonate con sporadici livelli radiolaritici, oppure da scisti quarzosi rosso-rosati, fittamente foliati e con giunti. Il loro spessore medio non supera di solito i pochi metri (Marini, 1998). Localmente sono intercalati a peliti grigie e possono presentare livelli inquinati da prodotti vulcanoclastici (zona ad ovest del M. Figogna; Cortesogno & Haccard, 1984). Differiscono dai diaspri appartenenti alle serie Liguridi, in quanto queste ultime mostrano caratteri marcatamente propri di radiolariti e selci.

3.2.3 *Argille a Palombini del Passo della Bocchetta aP, AGI, AGF (Cretaceo inf.)*

L'unità Figogna include le seguenti formazioni:

- Argille a Palombini del Passo della Bocchetta (aP) (suddivise nella cartografia CARG nelle due sottounità degli "argilloscisti di Murta, AGF" e degli "argilloscisti di Costagiutta, AGI");
- Metacalcari di Erzelli;

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 16 di 110 |

- Metasedimenti silicei della Madonna della Guardia;
- Metabasalti del M. Figogna;
- Serpentiniti del Bric dei Corvi (zona di deformazione di Scarpino).

L'unità delle "Argille a Palombini del Passo della Bocchetta", descritta come un complesso litostratigrafico unico dagli autori pre-CARG e dal Progetto Definitivo, è stata successivamente suddivisa nel foglio CARG Genova in due sottounità (cfr. Figura 3-7):

- argillocisti di Costagiutta (codice CARG: AGI);
- argillocisti di Murta (codice CARG: AGF).

Per coerenza con il Progetto Definitivo e per evitare eccessive confusioni, si è scelto di mantenere la terminologia e il codice pre-CARG (aP), indicando, dove possibile, l'attribuzione dei litotipi affioranti all'una o all'altra delle due sottounità CARG sopra citate e distinguendo cartograficamente, sempre ove possibile, le due litofacies principali.

Dal punto di vista litostratigrafico, la sottounità degli **argillocisti di Costagiutta** è costituita da alternanze di argillocisti e di calcari cristallini ("Palombini" auct.), metapeliti scistose grigio-nerastre, più o meno siltose, metasiltiti e metaareniti in strati centimetrici, con intercalazioni di metacalcilutiti siltose più o meno marnose, di colore grigio o grigio-bruno in strati e banchi, più frequenti alla base della successione. I cosiddetti "Palombini" sono rappresentati da calcari cristallini comprendenti calcari micritici silicei, di colore grigio scuro tendente al grigio azzurro, a tessitura massiva, più raramente stratificata, calcari arenacei e meno frequenti calcari marnosi, che formano strati e banchi di potenza variabile da pochi cm a 1.5-2 m.

Le giaciture individuate sono frequentemente la media di una stratificazione disturbata da serie di pieghe più o meno frammentate; la scistosità descrive frequentemente pieghe a ginocchio con cerniere più o meno acute e pieghe serrate, a scala da centimetrica a pluridecimetica. Gli argillocisti di Costagiutta affiorano diffusamente a E della dorsale del M. Figogna e, in misura minore, sul suo lato occidentale, dove sono in contatto tettonico con le unità Gazzo e Cravasco-Voltaggio. Nel settore meridionale del Foglio Genova affiorano soprattutto lungo il T. Chiaravagna e sono segnalati in scavi di fondazione e sondaggi; nel settore settentrionale si estendono diffusamente oltre il confine regionale, da Pietralavezzara a Fraconalto (AL).

Gli **Argillocisti di Murta** a differenza dei precedenti sono privi dei caratteristici interstrati calcarei, i "Palombini" auct. che hanno dato il nome all'intera formazione. Sono rappresentati da un'alternanza di argillocisti filladici color grigio scuro e grigio argenteo (Figura 3-9), a patina sericitica, con intercalazioni di sottili straterelli calcarei, di metasiltiti e di metaareniti fini, color grigio chiaro, nocciola in alterazione, con laminazioni piano-parallele localmente convolute. Gli strati hanno generalmente spessore da centimetrico a decimetrico; sono presenti orizzonti con strati fino a 30 cm di argilliti e metasiltiti.

L'unità affiora in una fascia allungata N-S, da Sampierdarena a Campomorone e oltre, in territorio piemontese, separando verso est gli argillocisti di Costagiutta dall'unità flyschoidi di Mignanego (dominio dei Flysch Appenninici). L'età presunta è cretacea.

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 17 di 110 |

Le giaciture della stratificazione sono vergenti ad E presso il contatto con il Flysch di Mignanego, mentre nella direzione opposta (verso W) le giaciture sono raramente significative, poiché la stratificazione è disturbata da fitte sequenze di pieghe strizzate alla macroscale con assi orientati circa NNE-SSW.

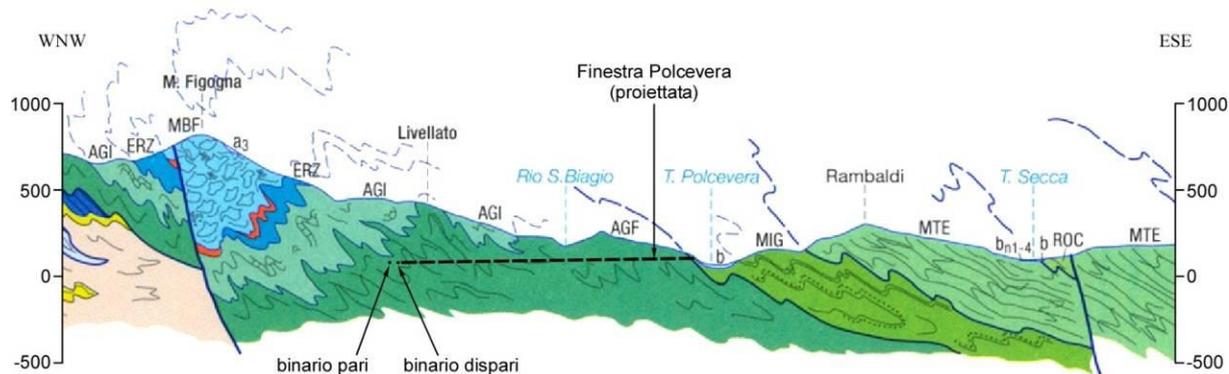


Figura 3-8 – Stralcio del profilo geologico BB' attraverso la Val Polcevera e la dorsale del M. Figogna; il profilo si colloca in corrispondenza della pk 4+764 (binario pari).

Le Argille a Palombini nell'area di studio

Nel settore oggetto di studio affiorano, in superficie, i litotipi della formazione delle “Argille a Palombini del Passo della Bocchetta” (aP); secondo quanto riportato nel Foglio CARG “Genova”, il settore interessato dallo scavo della WBS in oggetto ricade a cavallo di due aree in cui affiorano sia l'unità degli Argilloscisti di Murta (AGF), sia l'unità degli Argilloscisti di Costagiutta (AGI), strutturalmente soprastante.

In sintesi, le due litofacies si differenziano per la presenza (Argilloscisti di Costagiutta, AGI) o l'assenza (Argilloscisti di Murta, AGF) di livelli di calcari micritici silicei a grana fine (“Palombini”).

Per quanto riguarda una più dettagliata descrizione delle caratteristiche per ogni WBS della formazione si rimanda alle specifiche relazioni.

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 18 di 110 |



Figura 3-9 – Argilloscisti in sponda destra del Rio Trasta, a sud dell'area di intervento.

3.2.4 Unità tettonometamorfica Gazzo – Isoverde

L'Unità Gazzo–Isoverde è costituita da un nucleo di dolomie di età norica (Dolomie del M.Gazzo), equivalenti alla Dolomia Principale del sudalpino, con al tetto lembi preservati di unità bacinali a sedimentazione mista carbonatica/silicoclastica (Serie di Gallaneto-Lencisa e meta-argilliti di Bessega). Nel seguito si darà descrizione delle formazioni che maggiormente potrebbero interessare l'opera. Descrizioni più dettagliate su tutte le altre formazioni possono essere reperite nelle relazioni geologiche di riferimento.

Dolomie del monte Gazzo (dG nella cartografia di PE)

Dolomie e calcari dolomitici, di colore da grigio chiaro a nerastro, ricristallizzati, spesso saccaroidi. Tessitura grossolanamente stratificata, con spessore degli strati variabile in media tra 0.5 e 2 m, ma con banchi potenti fino a 10 m ca., costituiti da strati decimetrici rinsaldati. Sono frequenti le intercalazioni di metapeliti e di calcari marnosi giallastri. La stratificazione non è sempre facilmente riconoscibile anche a causa della deformazione tettonica. Verso l'alto stratigrafico sono presenti filoni sedimentari e breccie intraformazionali ad intraclasti dolomitici scuri fino a nerastri. Raramente sono conservate strutture sedimentarie (tappeti algali, oospariti, intramicrospariti e fossili). La porzione superiore della serie è costituita da dolomicriti nerastre e facies di breccia.

I sistemi di fratture presenti sono sede di frequenti fenomeni carsici, associati a condotti di dimensioni metriche, impostati lungo le discontinuità e particolarmente sviluppati nel settore centro-meridionale dell'unità. Il sistema carsico della Dolomia del Gazzo costituiva un acquifero significativo, che presumibilmente è stato modificato dalla perforazione del tunnel ferroviario di

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 19 di 110 |

Borzoli, diretto al porto di Voltri. Tuttavia sul versante della Val Chiaravagna vi sono sorgenti ancora attive. Sono inoltre presenti diverse cavità carsiche oggetto di esplorazione, segnalate nel database "Gestionale Speleologico Ligure" (<http://www.catastogrotte.net>).

3.2.5 Gessi del Rio Riasso ("Gessi, anidriti e carniole" nella cartografia PE)

GSR, Norico (gc nella cartografia di PE)

Si tratta di gessi saccaroidi associati a calcari vacuolari, brecce dolomitiche e anidriti, osservabili solo in alcuni limitatissimi affioramenti lungo il Rio Riasso e tra Cravasco e Isoverde.

Le note illustrative del foglio Genova riportano non meglio precisate "fonti storiche" da cui risulta che i gessi siano stati oggetto di coltivazione in sottosuolo nell'area tra Cravasco e il Passo della Bocchetta; nella zona di Isoverde sono riportati problemi di instabilità, a causa sia di fenomeni di dissoluzione, sia del probabile collasso di gallerie realizzate all'epoca della coltivazione.

Non sono noti in superficie affioramenti di anidriti, la cui presenza in profondità è però attestata da alcuni carotaggi profondi realizzati nell'area. È probabile che le anidriti esposte in superficie si siano idratate in gesso, mentre in profondità esse si siano mantenute inalterate.

L'associazione di questi litotipi suggerisce un ambiente costiero di transizione, con locali emersioni. La posizione stratigrafica di questa formazione è ambigua: per alcuni autori alla base della successione stratigrafica triassico-liassica, per altri al *top* delle dolomie e calcari dolomitici e al *bottom* dei Calcari di Gallaneto. Al *top* delle dolomie e dei calcari dolomitici sarebbe stato riconosciuto, nell'evoluzione del bacino deposizionale, un progressivo avvicinamento a condizioni evaporitiche. Le note illustrative del CARG propendono per questa seconda interpretazione.

Calcari di Gallaneto (cG nella cartografia di PE)

Metacalcari grigi più o meno micacei, alternati a scisti pelitici e marnosi; verso l'alto stratigrafico si rinvencono calcari cristallini puri. La stratificazione è generalmente ben riconoscibile, mentre lo sviluppo del clivaggio è poco pervasivo. Lo spessore degli strati varia da decimetrico a metrico.

Argilloscisti neri (Mn nella cartografia di PE)

Meta-argilliti scistose grigio-scure e nere, più o meno siltose, organizzate in strati di spessore da centimetrico a decimetrico, con intercalazioni di calcari cristallini in strati da millimetrici a centimetrici. A tale unità sono state attribuite anche facies chiaramente scistose, a basso tenore in carbonati, organizzate in strati centimetrici talora filladici di colore bruno-grigiastro, che affiorano in modo discontinuo in sinistra idrografica della Val Bianchetta.

Le meta-argilliti di Bessega sono interpretate come depositi bacinali distali, disposti al tetto della successione Norica.

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 20 di 110 |

3.2.6 Unità tettonometamorfica Cravasco-Voltaggio

L'unità tettonometamorfica Cravasco-Voltaggio affiora con maggiore continuità a nord di Pietralavezzara, mentre verso sud essa si chiude lateralmente, restando compresa tra le unità tettonometamorfiche Figogna e Gazzo-Isoverde. Le linee strutturali che delimitano l'unità a tetto e a letto immergono verso ENE con una giacitura che delinea una struttura regionale "a fiore", tipica di zone di taglio transpressive; in posizione intermedia tra le due unità si rileva un piano di possibile sovrascorrimento che porta a contatto gli scisti filladici di Larvego con le serpentiniti di Case Bardane. Nel seguito si darà descrizione delle formazioni che maggiormente potrebbero interessare l'opera. Descrizioni più dettagliate su tutte le altre formazioni possono essere reperite nelle relazioni geologiche di riferimento.

Argilloscisti filladici (f nella cartografia di PE)

Scisti filladici grigio-verdastri, fittamente laminati, con scistosità a spaziatura da millimetrica a centimetrica e superfici untuose al tatto e di aspetto sericeo, che in alterazione prendono un colore nocciola. Locali livelli di metasiltiti e metaareniti bruno scuro di spessore centimetrico e lenti di silice microcristallina biancastra, di spessore centimetrico. La scistosità principale descrive localmente pieghe da aperte a serrate.

Le filladi sono caratterizzate da diverse generazioni di scistosità, con fasce tettonizzate piuttosto ampie; gli affioramenti, a causa dell'alterazione, risultano di estensione ridotta, mascherati da una coltre detritica di alterazione piuttosto continua.

Calcarei di Voltaggio (cV nella cartografia di PE)

La formazione dei calcari di Voltaggio, nota anche con il termine di "calcaires pointillés" (Cortesogno & Haccard, 1979), affiora in forma di sottili scaglie essenzialmente a N di Cravasco; è costituita da calcari cristallini grigi, spesso a grana grossa, con livelli sottili ricchi in fillosilicati, che presentano almeno due scistosità sovrapposte (Marini, 1998). Generalmente questi litotipi presentano un'abbondante frazione quarzosa e micacea, indicante un'origine detritica.

Verso la parte basale della sequenza, al contatto con un orizzonte di diaspri, si possono incontrare alcuni metri di calcari cristallini bianchi, ricchi in quarzo microcristallino. Il limite stratigrafico inferiore è determinato dai diaspri o, in loro assenza, direttamente dall'unità basaltica di Cravasco; il limite stratigrafico superiore è rappresentato dal passaggio graduale agli scisti filladici.

L'ambiente di deposizione delle originarie sequenze calcareo-silicee e calcareo-marnose era presumibilmente di tipo pelagico. I calcari di Voltaggio presentano inoltre una spiccata analogia di facies con i calcari a Calpionella dell'Appennino settentrionale (Cortesogno & Haccard, 1984).

Serpentiniti di case Bardane (Se" nella cartografia di PE)

Si tratta di serpentiniti a crisotilo e antigorite con frequenti relitti mineralogici e tessiturali di lherzolite.

Le serpentiniti, di colore da verdastro a grigio-verde chiaro, hanno tessitura da scistosa e intensamente laminata, con sviluppo di piani di clivaggio pervasivi, a spaziatura submillimetrica, con

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 |
| | Foglio 21 di 110 |

superficie liscia o untuosa al tatto; la tessitura può localmente divenire cataclastica, fino a ultracataclastica, in particolare in corrispondenza della zona di deformazione tettonica di Timone, un importante piano di taglio duttile-fragile che fa parte del più esteso sistema di deformazione della linea Sestri-Voltaggio.

All'interno delle serpentiniti si riconoscono pieghe disarmoniche a scala da centimetrica a plurimetrica, riferibili a pieghe di trascinamento di una foliazione preesistente, sviluppatasi nell'ambito di zone di taglio. Le facies deformate (brecce, cataclasiti, ultracataclasiti e gouge) possono avvolgere litoni di forma amigdalare, meno deformati ma comunque intensamente fratturati e brecciati, da centimetrici a metrici. Localmente si osservano fasce brecciate con litoni allungati metrici o plurimetrici, circondati da zone di taglio cataclastico da decimetriche a metriche, percentualmente subordinate, che definiscono un pattern anastomosato.

Sono spesso presenti minerali asbestiformi visibili ad occhio nudo, concentrati lungo piani di frattura o in vene estensionali.

3.2.7 Condizioni geologiche attese in corrispondenza dell'opera

Il tratto di galleria considerato si sviluppa all'interno della formazione delle Argille a Palombini del P.so della Bocchetta (aP) ed all'interno della fascia milonitica di Isoverde, che coinvolge anche litotipi appartenenti alle unità tettonometamorfiche Cravasco-Voltaggio e Gazzo-Isoverde, quest'ultima in particolare nella zona a cavallo tra le WBS GN14F e GN14J per il binario pari e GN15G e GN15J per il binario dispari.

Le Argille a Palombini del P.so della Bocchetta (aP), sono costituite da argilloscisti, localmente con interstrati calcarei o calcareo-marnosi, riferibili alle due litofacies di Murta (AGF, senza interstrati calcarei) e Costagiutta (AGI, con interstrati calcarei o "Palombini").

Quali siano gli esatti rapporti geometrici e stratigrafici tra queste due litofacies alla quota del tunnel può essere definito solo a livello ipotetico: è presumibile che per gran parte predomini in galleria la litofacies a Palombini (AGI), con subordinati settori a prevalenti argilloscisti non carbonatici (AGF) e, localmente, con la possibile presenza di masse di metavulcaniti basaltiche di dimensioni da pluridecametriche a pluriettometriche. Ai metabasalti possono essere associati livelli di scisti silicei varicolori, che in genere indicano al posizione del top stratigrafico.

All'interno della fascia milonitica di Isoverde saranno attraversati prevalentemente livelli riferibili agli argilloscisti filladici (f), in facies milonitica, consistenti in scisti micacei di colore grigio-argenteo o grigio scuro, con vene trasposte di quarzo e rare intercalazioni di meta-calcarei micacei a tessitura fortemente laminata e trasposta a causa di intensi fenomeni milonitici. La presenza di bancate con minor deformazione milonitica è possibile; in questo caso la scistosità, pur risultando meno pervasiva, presenta una partizione meno fitta. All'interno di questa fascia di deformazione duttile sarà possibile intersecare anche livelli milonitici derivanti da argilloscisti neri (Mn), costituiti da scisti carbonatici neri e calcari impuri grigio-nerastri fortemente laminati. Questi litotipi sono stati individuati nella parte terminale del sondaggio L2-CR3, eseguito all'incirca sulla verticale del binario pari e proiettato lungo il tracciato alla pk 9+900 circa.

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <div style="float: right;">Foglio 22 di 110</div> |

Sono inoltre presenti, per le WBS GN14J e GN15J, ma non è da escludere che si possano incontrare anche nelle GN14F e GN15G, livelli a presumibile geometria lenticolare e potenza metrica o decametrica derivanti da altri litotipi a composizione basaltica, serpentinitica, calcarea o evaporitica, con tessitura più o meno laminata. Alcune di queste scaglie tettoniche, costituite in prevalenza da anidriti, metabasalti, calcari cristallini e serpentiniti sono state attraversate dai sondaggi SR11 (pk 10+480) ed SR12 (pk 10+750) eseguiti in fase di progetto definitivo a partire all'incirca dalla verticale del binario pari con inclinati rispetto alla verticale in direzione circa E-SE.

La presenza e posizione di altri corpi litologici di questo tipo all'interno della fascia milonitica lungo le WBS in questione è indeterminabile in assenza di ulteriori indagini dirette.

La zona finale della WBS GN14F per il binario pari (e GN15G per il binario dispari), sarà probabilmente interessata per un'estensione ettometrica dagli argilloscisti neri (Mn), consistenti in scisti carbonatici neri, calcari impuri grigio-nerastri passanti lateralmente a scisti calcarei fortemente foliati di colore grigio scuro-argenteo. Le bancate maggiormente carbonatiche non superano in genere il metro di spessore e solo localmente esse sono presenti in quantità consistente, mentre più sovente prevalgono gli scisti. All'interno della successione si intersecheranno anche livelli milonitici, con tessitura fortemente foliata e più fissili delle facies non milonitiche. Inoltre, nella tratta terminale della WBS GN14F, oltre alla presenza degli argilloscisti neri descritti, dai risultati emersi dai sondaggi eseguiti per il progetto esecutivo (CR3 – CR4 –CR5) si prevede l'attraversamento, per una tratta di lunghezza pari a circa 170m circa, dei Calcari di Gallaneto (cG). I Calcari di Gallaneto (cG), sono costituiti da meta-calcari grigi e scisti carbonatici grigio-argentei, passanti localmente a bancate con prevalenti calcari cristallini grigio chiari di aspetto tegulare. Localmente, presso il contatto con gli argilloscisti neri (Mn), possono essere presenti anche bancate di calcari scuri, di potenza da pluri-metrica a decametrica, con scistosità meno marcata e quindi più massicci e con elevata densità di vene carbonatiche.

Lo scavo della galleria verrà realizzato in un ammasso roccioso caratterizzato da una discreta omogeneità litologica ma da una forte anisotropia strutturale, quest'ultima dovuta sia alla presenza delle intercalazioni di strati calcarei, sia alla foliazione metamorfica pervasiva, con spaziatura da submillimetrica a centimetrica, sia infine alle frequenti variazioni di giacitura della foliazione, riscontrabili a tutte le scale.

Al di fuori delle zone di faglia, gli argilloscisti saranno quindi abbastanza omogenei, se considerati alla scala dell'intero sviluppo dell'opera, ma strutturalmente eterogenei alla scala del fronte di scavo: il motivo geometrico dominante lungo lo sviluppo dell'opera sarà la presenza di pieghe aperte e disarmoniche, da centimetriche a pluridecametriche, con vergenza prevalente verso W o WSW, probabilmente associate a piccoli piani di taglio cataclastico, immergenti verso E-ENE, con cinematisimo prevalentemente inverso, sviluppati parallelamente al piano assiale delle pieghe e più frequenti in zona di cerniera e di fianco inverso.

All'interno di eventuali lenti tettoniche di metabasalti, è prevedibile una situazione di maggiore omogeneità tessiturale e strutturale, anche in presenza di facies di brecce basaltiche; ai bordi delle masse di metabasalto, è invece prevedibile che si possano concentrare deformazioni di taglio, anche legate al contrasto di competenza con gli argilloscisti incassanti, che potrebbero essere associate a un netto peggioramento delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso.

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 |
| | Foglio 23 di 110 |

Nel settore d'indagine non è stata direttamente riscontrata la presenza di faglie in affioramento, soprattutto per l'estesa copertura di detrito, suolo e vegetazione, che limitano fortemente la percentuale di affioramento. Ciononostante, come evidenziato dai profili geomeccanici delle singole WBS, è previsto l'attraversamento in zone di faglia principali (osservate direttamente nei sondaggi o desumibili dalla cartografia CARG) che costituiscono tratte di criticità per lo scavo, come evidenziato nel capitolo di analisi del rischio per le singole WBS; questo aspetto risulta particolarmente evidente nelle WBS GN14F e WBS GN15G mentre nelle WBS GN14J e WBS GN15J si riscontra perlopiù la presenza di zone di faglia minori. A livello locale infatti (alla scala del fronte di scavo), saranno molto probabilmente presenti diversi piccoli piani di taglio a basso-medio angolo, inoltre, saranno probabilmente incontrate diverse faglie subverticali minori, con spessore della zona di deformazione cataclastica inferiore a 1 m e con damage zone estesa per 1-2 m al massimo ai due lati del piano principale. La posizione di questo insieme di strutture però non è determinabile con precisione.

Il grado di fratturazione al di fuori delle zone di faglia può variare da medio a basso, con sviluppo di fratture più nette all'interno di livelli più compatti e di clivaggi di fratturazione pervasivi nei livelli più fillosilicatici.

Per quanto riguarda la valutazione qualitativa del grado di stabilità del fronte di scavo, sono state stimate condizioni di stabilità a breve-medio termine, al di fuori delle zone di faglia; condizioni di instabilità localizzata, con possibili splaccamenti, localizzati principalmente in calotta o sul paramento sinistro (considerando una direzione di avanzamento verso N), potranno verificarsi nel caso che la foliazione intersechi l'asse tunnel con direzione ad esso subparallela, immersione prevalente verso W e inclinazione a medio-basso angolo (20-50° dall'orizzontale).

3.2.8 Principali elementi di incertezza geologica

Il principale elemento d'incertezza geologica lungo il tracciato è costituito dalla difficoltà di posizionare il contatto litologico tra gli argilloscisti neri (Mn) e gli argilloscisti filladici (f), con inglobate scaglie tettoniche di varia natura tra cui metabasalti, serpentiniti, calcari cristallini e anidriti.

In questo settore non è possibile escludere che il limite tra gli argilloscisti "Mn" e gli argilloscisti "f" si posizioni in un punto diverso rispetto a quanto ipotizzato nel profilo ed intersechi quindi la galleria a progressive differenti. Peraltro, uno spostamento del limite degli argilloscisti Mn implicherebbe anche un analogo spostamento del limite tra questi argilloscisti ed i sottostanti calcari di Gallaneto (cG) e Dolomie del Monte Gazzo (dG), che potrebbero anche arrivare ad intersecare e/o lambire la galleria. Tali incertezze potrebbero avere risvolti idrogeologici piuttosto rilevanti, dal momento che i calcari di Gallaneto ed in particolare le Dolomie sottostanti sono un potenziale acquifero di tipo carsico.

Ulteriore elemento di incertezza geologica risulta costituito dalla difficoltà di collocare il contatto successivo tra gli argilloscisti "Mn" e i calcari di Gallaneto "cG", con particolare riferimento alla WBS GN14F in cui la presenza della formazione è evidenziata nel profilo geologico di progetto.

Le incertezze sulla posizione di questi limiti sono principalmente connesse con le difficoltà di proiezione in profondità dei dati giacitureali di superficie.

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 24 di 110 |

Anche l'interpretazione delle geometrie del contatto tra la successione non milonitica, costituita da argilloscisti Mn + calcari cG + dolomie dG (per brevità definita nel seguito *successione Mn-dG*) e gli argilloscisti milonitici f è piuttosto problematica. In superficie, in prossimità del contatto tra la *successione Mn-dG* e gli argilloscisti milonitici, la prima presenta spesso un'immersione ad alto angolo (70-80°) verso SE e, localmente, un rovesciamento verso NW. Tuttavia, man mano che dal contatto ci si sposta verso SE all'interno del dominio di affioramento degli argilloscisti, le giaciture della foliazione milonitica presentano per lo più immersioni a medio o a basso angolo verso SE, talora rovesciate verso NW per effetto di pieghe D3. In ogni caso, in quest'ultimo settore, all'interno degli argilloscisti milonitici prevalgono di gran lunga le immersioni a medio angolo verso SE.

In presenza di tali dati di superficie sono possibili due diverse interpretazioni:

1. tra la *successione Mn-dG* e gli argilloscisti milonitici f esiste una discordanza angolare; la *successione Mn-dG* immerge ad alto angolo verso SE, mentre la foliazione degli argilloscisti vi termina contro con un angolo inferiore (immersione a medio angolo verso SE). Questa discordanza angolare può essere interpretata come una struttura S-C a grande scala, che si sviluppa, spesso, ove vi sia un forte contrasto reologico tra rocce più rigide (*successione Mn-dG*) e rocce più plastiche (argilloscisti milonitici f). Secondo questa interpretazione, che è quella utilizzata per la ricostruzione del profilo geologico, gli argilloscisti Mn interessano la parte finale della WBS GN14F per il binario pari (GN15G per il binario dispari), mentre i sottostanti calcari di Gallaneto (cG) non raggiungono la sezione di scavo, arrivando ad alcuni metri sotto l'arco rovescio poco prima dell'estremità sud della tratta d'opera in questione.
2. Non esistono discordanze angolari tra la *successione Mn-dG* e gli argilloscisti milonitici f. Le diverse giaciture osservate sul terreno nei vari punti di osservazione sono semplicemente da riferire ad effetti di piegamento che determinano variazioni locali in superficie; in questo contesto però, la *successione Mn-dG*, al di sotto degli argilloscisti milonitici f, dovrebbe presentare giaciture a medio angolo man mano che si procede verso est (quindi verso il tracciato della galleria di linea) e quindi giaciture meno inclinate di quanto osservabile in superficie. In questa ipotesi, gli argilloscisti Mn e anche i calcari di Gallaneto intersecano il cavo della galleria per una tratta di lunghezza superiore rispetto al caso precedente (intersezione dei calcari di Gallaneto per una lunghezza di circa 170m nella WBS GN14F, mentre nella WBS GN15G i calcari rimangono al di sotto della quota della galleria); in questa seconda ipotesi non è escluso che anche le Dolomie del Monte Gazzo dG possano arrivare a lambire l'arco rovescio della galleria.

Le due ipotesi hanno la medesima probabilità di accadimento. Sul profilo geologico di progetto si è scelto di presentare la seconda ipotesi mettendo però in evidenza mediante punti interrogativi e frecce tutte le incertezze esistenti.

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 25 di 110 |

3.3 Inquadramento idrogeologico

3.3.1 Complessi idrogeologici e permeabilità

La zona interessata dal progetto della linea del III Valico è stata suddivisa, su base litologica, in diversi *complessi idrogeologici* a permeabilità differente, distinguendo lungo l'asse delle gallerie settori con comportamento idrogeologico omogeneo.

La caratterizzazione dettagliata dei vari complessi idrogeologici intercettati dal tracciato dell'opera è contenuta nella Relazione Idrogeologica Generale del Progetto Esecutivo (elaborato IG51-00-E-CV-RO-GE-00-0-2-001-A00) e nelle tavole idrogeologiche allegate.

Nel presente rapporto verrà fornita una sintesi dei dati principali utili alla descrizione del comportamento idrogeologico delle formazioni attraversate, mentre per i dettagli si rimanda alla lettura della suddetta relazione idrogeologica generale.

I sistemi di flusso idrico sotterraneo possono svilupparsi all'interno di un solo complesso idrogeologico, quando questo è limitato lateralmente da complessi meno permeabili, oppure possono attraversare più complessi permeabili adiacenti.

La formazione delle "Argille a Palombini del Passo della Bocchetta" (aP) corrisponde, insieme agli argilloscisti filladici (f) ed agli argilloscisti neri (Mn) ed ad altre unità litostratigrafiche costituenti scaglie tettoniche all'interno delle zone milonitiche, al complesso idrogeologico 15, mentre i "Metabasalti del M. Figogna" corrispondono al complesso idrogeologico 17. I Calcari di Gallaneto appartengono al complesso idrogeologico 16, mentre le Dolomie del Monte Gazzo costituiscono il complesso idrogeologico 19 ed i Gessi ed Anidriti del Rio Riasso formano il complesso 20.

I test idraulici disponibili sull'intera area di progetto indicano per i complessi idrogeologici sopra elencati, i seguenti valori di conducibilità idraulica:

Complesso 15 (aP, dM, d", f, Mn, Se")

1E-07 ÷ 1E-08 m/s

1E-05 ÷ 1E-07 m/s nell'ammasso detensionato (da 5 a 20 m dalla superficie)

1E-06 ÷ 1E-07 m/s in zona di faglia a profondità < 100 m

1E-07 ÷ 1E-09 m/s in zona di faglia a profondità > 100 m

Le prove idrauliche eseguite in zone di faglia mostrano valori dispersi; i valori più elevati riguardano le zone di danneggiamento, mentre le zone di nucleo possono anche avere un effetto compartimentante, per la presenza di prodotti di frizione con granulometria fine (gouge di faglia). In ogni caso, la permeabilità all'interno delle zone di faglia non differisce di molto rispetto a quella dell'ammasso in normale stato di fratturazione.

I sistemi di flusso idrico sotterraneo negli argilloscisti sono sviluppati prevalentemente in corrispondenza di zone intensamente fratturate; negli argilloscisti sono quindi generalmente prevedibili condizioni di umidità e solo localmente stillicidi da deboli a diffusi, in particolare nelle zone a debole copertura, considerato anche che nel settore interessato dallo scavo non è presente un bacino idrogeologico significativo.

| | | |
|--|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 313"> <tr> <td>Foglio 26 di 110</td> </tr> </table> | Foglio 26 di 110 |
| Foglio 26 di 110 | | |

Complesso 16 (cE, cV, cG, eN, MyI)

1E-07 ÷ 1E-08 m/s con possibili incrementi fino a 1E-06 m/s e riduzioni fino a 1E-09 m/s
 fino a 1E-05 m/s in zona di faglia

La composizione carbonatica è dominante, pur con presenza di interstrati a composizione fillosilicatica prevalente, quindi la permeabilità principale è per fratturazione.

Non esistono test idraulici realizzati direttamente all'interno del complesso; in base alle osservazioni di terreno, si può ragionevolmente ipotizzare una permeabilità bassa in condizioni di fratturazione normali, con incrementi anche consistenti in zona di faglia, soprattutto nella damage zone. I piani di faglia principali possono localmente avere un effetto compartimentante, se contengono materiale fine di frizione (gouge argilloso), tuttavia tale ha rilevanza solo locale.

Sono possibili fenomeni di dissoluzione del carbonato non trascurabili, con sviluppo di reticoli microcarsici o di condotti carsici con apertura centimetrico-decimetrica. L'eventuale carsismo potrebbe essere parzialmente compartimentato dagli interstrati fillosilicatici, poco o non soggetti a dissoluzione, con sviluppo di flussi su più livelli separati.

Complesso 17 (B', B'', mG)

1E-06 ÷ 1E-07 m/s, fino a 1E-08 m/s
 1E-04 - 1E-07 m/s (stima) in zona di faglia

I litotipi di questo complesso hanno un comportamento più fragile rispetto alla maggior parte degli altri complessi, con discontinuità più persistenti e pervasive; la conducibilità media è quindi maggiore che negli altri complessi. I valori di conducibilità più bassi sono correlabili a scarsa fratturazione e/o alla chiusura delle discontinuità.

Le faglie sono mediamente caratterizzate da un'ampia zona di danneggiamento in cui la permeabilità è più elevata; la zona di nucleo generalmente non è caratterizzata da rocce di faglia a grana fine e quindi presenta permeabilità analoghe alla damage zone. Fenomeni di compartimentazione lungo la faglia, pur non potendo essere esclusi, sono poco probabili.

Complesso 19 (dG)

1E-06 m/s
 1E-04 ÷ 1E-07 m/s in zona di faglia

Le Dolomie del Monte Gazzo costituiscono uno dei complessi idrogeologici più rilevanti dell'area, con circolazioni sotterranee molto attive, legate soprattutto alla presenza di cavità carsiche, tra cui anche alcune grotte. A parte i fenomeni carsici, le dolomie hanno un comportamento fragile e una densità di fratturazione più elevata rispetto alle formazioni adiacenti.

Le prove idrauliche disponibili non riguardano l'ammasso carsificato e riflettono quindi condizioni legate alla sola presenza di fratture. Anche per le zone di faglia non esistono ad oggi test

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 313"> <tr> <td>Foglio 27 di 110</td> </tr> </table> | Foglio 27 di 110 |
| Foglio 27 di 110 | | |

idraulici. Le osservazioni di superficie indicano la presenza di zone di deformazione fragile molto fratturate e permeabili, senza effetti di compartimentazione.

Gli elementi idraulici di maggior rilievo sono costituiti dai condotti carsici, che possono avere uno sviluppo considerevole e piuttosto casuale. Le aperture dei condotti possono variare da pochi centimetri ai metri e possono inoltre essere alimentati anche da una rete secondaria microcarsica che si sviluppa principalmente lungo il reticolo di fratture con pareti parzialmente beanti o corrose.

Complesso 20 (gc)

1E-08 ÷ 1E-09 m/s

I litotipi di questo complesso presentano un comportamento plastico quando sottoposti a deformazione. Inoltre sono soggetti a frequenti e pervasivi fenomeni di deformazione che tendono a sigillare i giunti che si sviluppano lungo le zone di faglia.

La permeabilità media è da bassa a molto bassa, tuttavia i litotipi evaporitici sono potenzialmente soggetti a dissoluzione chimica. È possibile che in corrispondenza dei principali corpi di gessi, anidriti e carniole, si sviluppino orizzonti di dissoluzione, con presenza di materiale residuale che dal punto di vista idrogeologico presenta delle caratteristiche simili a quelle di un mezzo poroso. Il fenomeno è discontinuo e probabilmente non interessa tutti i corpi di rocce evaporitiche presenti nell'ammasso. Sarà comunque opportuno tenere in considerazione il fatto che localmente possano esistere fasce di materiale a permeabilità anche molto elevata.

3.3.2 Condizioni idrogeologiche attese in corrispondenza dell'opera

Gli argilloscisti attraversati sono caratterizzati da permeabilità per fratturazione da bassa a molto bassa e non costituiscono quindi un acquifero significativo, salvo possibili condizioni di maggiore permeabilità legate alla presenza delle zone di faglia. In base ai dati idrogeologici raccolti durante lo scavo delle finestre Castagnola e Vallemme, già scavate all'interno della formazione degli Argilloscisti (aP), risulta che le tratte scavate hanno incontrato un ammasso roccioso, costituito da argilloscisti con intercalazioni di "palombini", sostanzialmente impermeabile. Ad eccezione delle zone di imbocco, più permeabili e con stillicidi più o meno diffusi (portate medie di 0.5 l/s per 10 m di galleria), la restante parte delle due gallerie non ha messo in evidenza significative venute d'acqua, ad esclusione di alcune piccole manifestazioni idriche nei tratti con maggiore densità di intercalazioni di "palombini" fratturati; le venute risultano comunque di entità molto modesta e di durata limitata nel tempo.

Nella galleria in esame quindi, negli argilloscisti della formazione aP con o senza "palombini", si attendono in assenza di faglie, condizioni generalizzate di umidità e solo localmente stillicidi da deboli a diffusi, in particolare nelle zone con debole copertura, dove gli scisti sono alterati e maggiormente permeabili.

La permeabilità all'interno delle zone di faglia non differisce di molto rispetto a quella dell'ammasso in normale stato di fratturazione, poiché la tessitura fortemente scistosa e la dominante componente fillosilicatica degli argilloscisti prevengono lo sviluppo di larghe fasce di fratturazione, accomodando parte della deformazione attraverso scorrimenti intra-scistosità.

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 28 di 110 |

I piani di faglia, associati allo sviluppo di prodotti di frizione a forte componente argillosa (gouge) possono addirittura svolgere un'azione di compartimentazione dell'acquifero, piuttosto che rappresentare canali a maggiore conduttività, data la bassa permeabilità delle rocce di faglia argillose. Le fasce idraulicamente più trasmissive, legate alle faglie, sono quindi limitate a uno spessore di pochi metri di roccia intensamente fratturata (*damage zone*), ai lati dei piani di taglio principali.

Nel complesso quindi, durante lo scavo del tratto della galleria di linea in oggetto, potranno essere incontrate condizioni idrogeologiche di due tipi: i) ammasso roccioso in normali condizioni di fratturazione (con eventuali zone di faglia minori) e ii) zone di faglia minori.

Nel primo caso non si attendono problematiche particolari dal punto di vista idrogeologico, considerata la bassa permeabilità dei litotipi attraversati; le condizioni idrogeologiche saranno analoghe a quelle incontrate nello scavo della finestra Val Lemme, con umidità e deboli stillicidi.

Alle zone di faglia potranno essere associate venute d'acqua di debole entità (stillicidi concentrati e/o piccole venute puntuali) in rapido esaurimento nel tempo, ma con carico idraulico che, almeno nella fase iniziale, potrà anche essere elevato.

Dagli approfondimenti di superficie svolti durante il Progetto Esecutivo e dall'analisi dei sondaggi eseguiti nell'area in oggetto, è stata rilevata la presenza all'interno degli argilloscisti di lenti di dimensioni da metriche a decametriche di metabasalti del M. Figogna. È stata quindi ipotizzata la presenza di lenti anche a quota galleria, pur se di collocazione incerta. I metabasalti sono caratterizzati da una permeabilità più elevata rispetto agli argilloscisti, legata al più intenso grado di fratturazione.

Nel complesso è quindi ipotizzabile, durante lo scavo del tratto di galleria in oggetto, la presenza per brevi tratti di litotipi a maggiore permeabilità (metabasalti), che potranno dare luogo a venute d'acqua di modesta entità, in rapido esaurimento, trattandosi di masse di metabasalto di dimensioni limitate, annegate in un mezzo a bassa permeabilità rappresentato dagli argilloscisti e nella maggior parte dei casi non in comunicazione idraulica con la superficie; una volta drenato il mezzo fratturato a permeabilità più elevata, le portate in galleria torneranno a essere condizionate essenzialmente dalla permeabilità del litotipo dominante, cioè gli argilloscisti.

L'interpretazione dei dati dei sondaggi CR4 e CR5 ha permesso inoltre di ipotizzare l'attraversamento di una tratta lungo circa 170 m all'interno dei Calcari di Gallaneto, caratterizzati da un grado di permeabilità decisamente più alto rispetto a quello dei circostanti argilloscisti. Localmente ed in particolare nei pressi delle faglie, i Calcari di Gallaneto presentano una debole carsificazione e possono quindi essere sede di circolazione idrica più sostenuta. In tale tratta è stato pertanto stimato un possibile afflusso idrico durante lo scavo più consistente rispetto a quanto stimato nei settori in cui verranno attraversati gli argilloscisti.

Carico idraulico

Il carico idraulico in regime imperturbato è valutato in base alle indicazioni fornite dai piezometri collocati in diversi sondaggi posti lungo l'asse di linea nell'unità delle Argille a Palombini e attrezzati

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 29 di 110 |

con cella Casagrande, che indicano un livello di falda in roccia, oscillante tra 2-3 m e 10-15 m dal p.c. (escludendo i valori estremi), a seconda della posizione del foro e delle variazioni stagionali.

Ciò premesso, si può stimare che il carico idraulico imperturbato, riferito alla quota del piano del ferro, sia variabile da pochi metri nelle zone a basse coperture presenti nella tratta iniziale, fino a raggiungere valori prossimi a 500 m nella parte terminale. Si fa notare che un carico idraulico elevato non implica necessariamente la presenza di venute cospicue; è possibile avere un carico idraulico elevatissimo in presenza di semplici stillicidi, così come un carico idraulico molto basso in presenza di venute diffuse e abbondanti, poiché non vi è un nesso tra le due grandezze.

Afflussi in galleria

La portata drenata dalle gallerie è stata valutata effettuando una serie di modelli numerici mediante il programma di calcolo FEFLOW. Per i dettagli della metodologia si rimanda alla Relazione Idrogeologica Generale di progetto; di seguito, vengono illustrate le principali conclusioni.

I risultati ottenuti per il regime transitorio relativamente alla tratta in esame sono riportati nella specifica tabella, allegata allo studio idrogeologico generale (elaborato GE00-IG51-00-E-CV-RO-GE-00-0-2-001-A00), in cui viene valutata la portata in regime transitorio a un giorno dallo scavo.

Con riferimento alle classi di portata indicate nella tabella sottostante e riportate nel profilo geologico-idrogeologico previsionale, gli afflussi idrici stimati per questa tratta, in fase di scavo (regime transitorio), rientrano nella classe 1 con portate comprese tra 0,03 e 0,08 l/s per 10 m di galleria, come condizione dominante connessa allo scavo in argilloscisti. Locali aumenti alla classe 3 saranno attesi in corrispondenza delle faglie (afflussi di 0,45 l/s per 10 m di galleria) e dove lo scavo avverrà nei calcari di Gallaneto (afflussi di 0,55 l/s per 10 m di galleria).

| classe | da | a | unità di misura |
|--------|------|------|--------------------------|
| 1 | 0 | 0.16 | |
| 2 | 0.16 | 0.4 | l/s per 10 m di galleria |
| 3 | 0.4 | 2 | |
| 4 | > 2 | | |

Tabella 1 – Classi di portata delle venute d’acqua in galleria utilizzate nel profilo geologico-idrogeologico previsionale.

Tale stima è stata eseguita con un approccio semi-quantitativo basato su un modello idrogeologico concettuale. Per una più dettagliata valutazione della stima degli afflussi idrici in fase di scavo, relativamente alla sola tratta pk 10+100 – pk 10+500 in prossimità dell’innesto con la Finestra Cravasco, si è svolta un’apposita modellazione numerica nel seguito descritta. Si rimanda al rapporto allegato alla relazione idrogeologica generale per maggiori dettagli.

Modellazione numerica della tratta tra la pk 10+100 e 10+500 circa

La modellazione numerica eseguita per il settore Cravasco ha interessato la simulazione in fase di scavo (di breve termine) e in fase di messa in esercizio (di lungo termine) delle due canne della

| | | |
|---|--|---------------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  | |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> | <p>Foglio 30 di 110</p> |

galleria di linea. Le simulazioni sono partite dall'assunzione che, preliminarmente allo scavo delle due tratte di Linea in esame, siano stati terminati i lavori di scavo e di impermeabilizzazione della Finestra Cravasco. Pertanto, le simulazioni realizzate considerano che, dopo gli interventi di impermeabilizzazione della finestra, siano state ripristinate le condizioni di falda ante-operam.

Un'ulteriore assunzione, fedele alle fasistiche previste dal progetto dell'opera nel tratto di interesse, è stata fatta per le condizioni di scavo delle due canne: si è considerato prima lo scavo del binario dispari e, in un secondo momento, quello del binario pari. Pertanto, le simulazioni sono state effettuate assumendo prima il drenaggio lungo la canna dispari e successivamente lungo la canna pari. La simulazione del drenaggio sulle due gallerie di linea è stata effettuata imponendo ai nodi corrispondenti una condizione idraulica di tipo "seepage", ovvero di carico idraulico con vincolo di sola fuoriuscita del flusso dal modello.

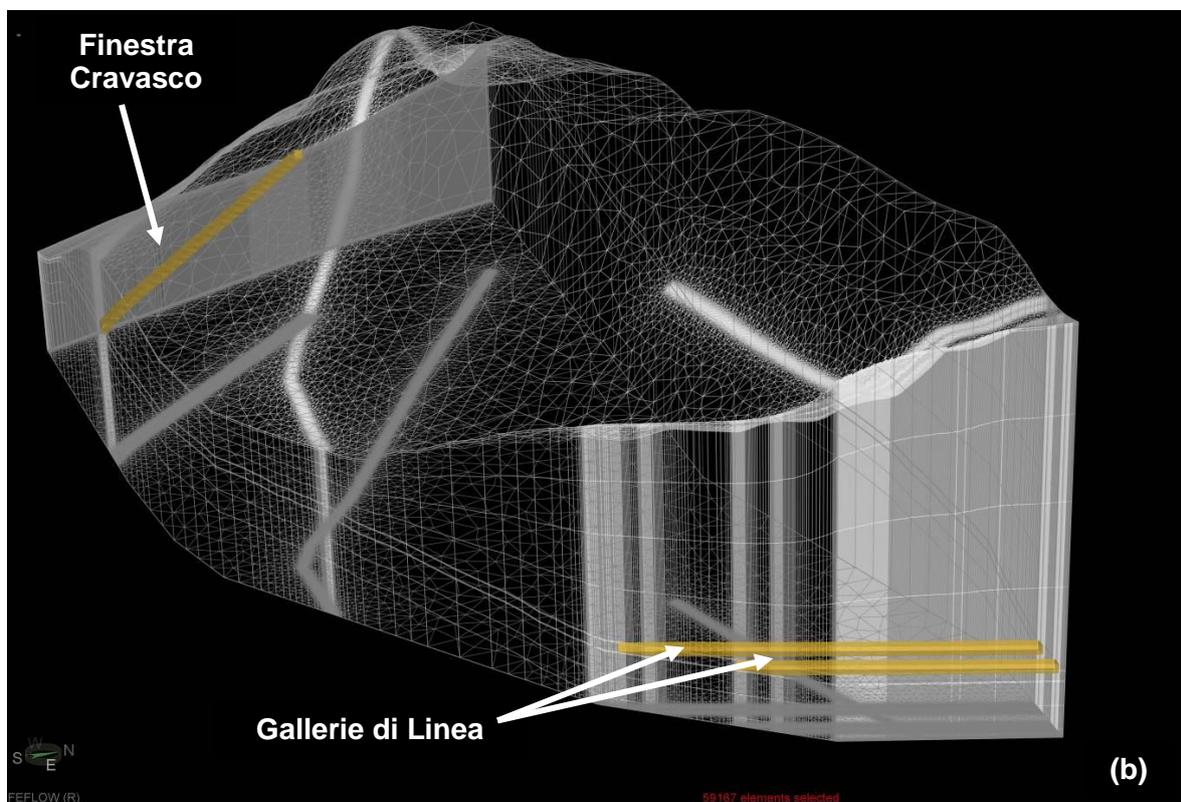
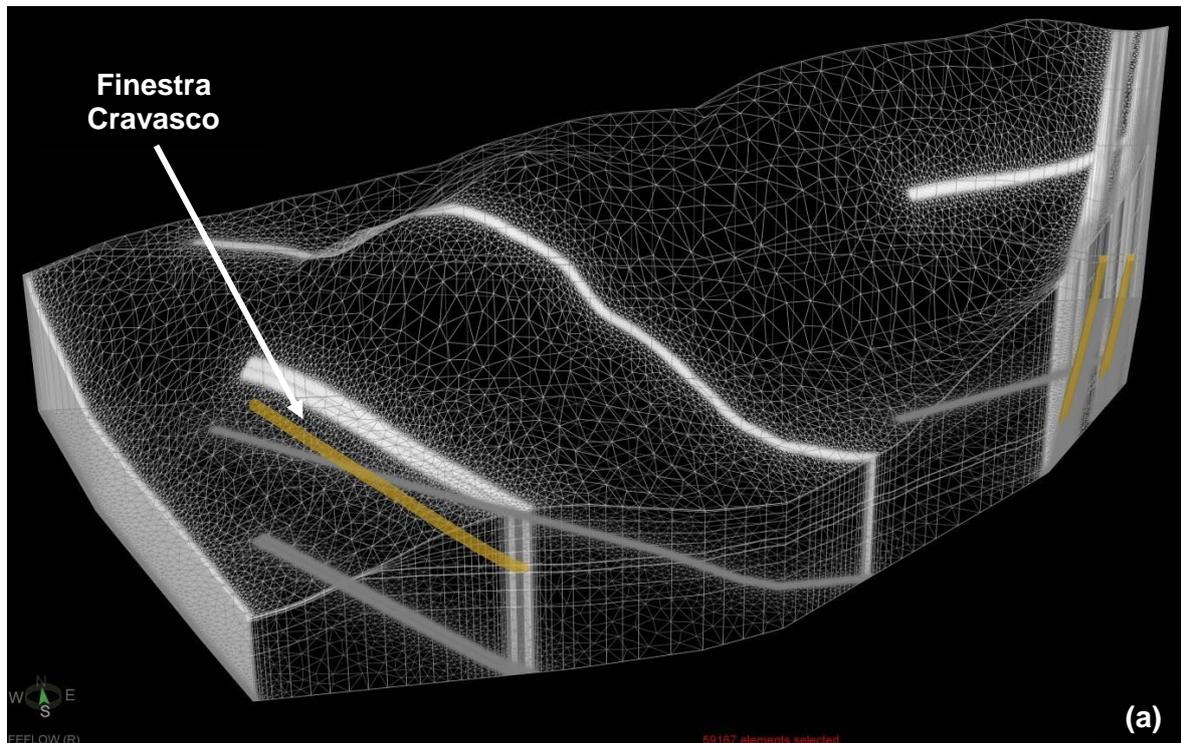


Figura 3-10 Immagine 3D della maglia degli elementi discreti utilizzati per il modello di Cravasco e della Finestra Cravasco e di un tratto circostante delle Gallerie di Linea. Visualizzazione prospettica da Sud a Nord (a), da ESE a WNW.

In una prima fase si mostrano i risultati ottenuti considerando il drenaggio di acqua lungo il tracciato di scavo della sola canna dispari. La previsione di venute d'acqua in periodi diversi dopo lo scavo è la seguente:

| Periodo [giorni] | Scenario pessimistico [l/s/10 m] | Scenario ottimistico [l/s/10 m] |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 10 | 0.4 | 0.15 |
| 100 | 0.3 | 0.04 |
| 365 | 0.3 | 0.03 |

In regime stabilizzato (ovvero già dopo circa. 100 giorni), le venute d'acqua previste sono dell'ordine dei 0.03-0.3l/s, con maggiore probabilità che le portate effettive si collochino più vicino al limite inferiore della previsione (in relazione alle conducibilità idrauliche effettive attese).

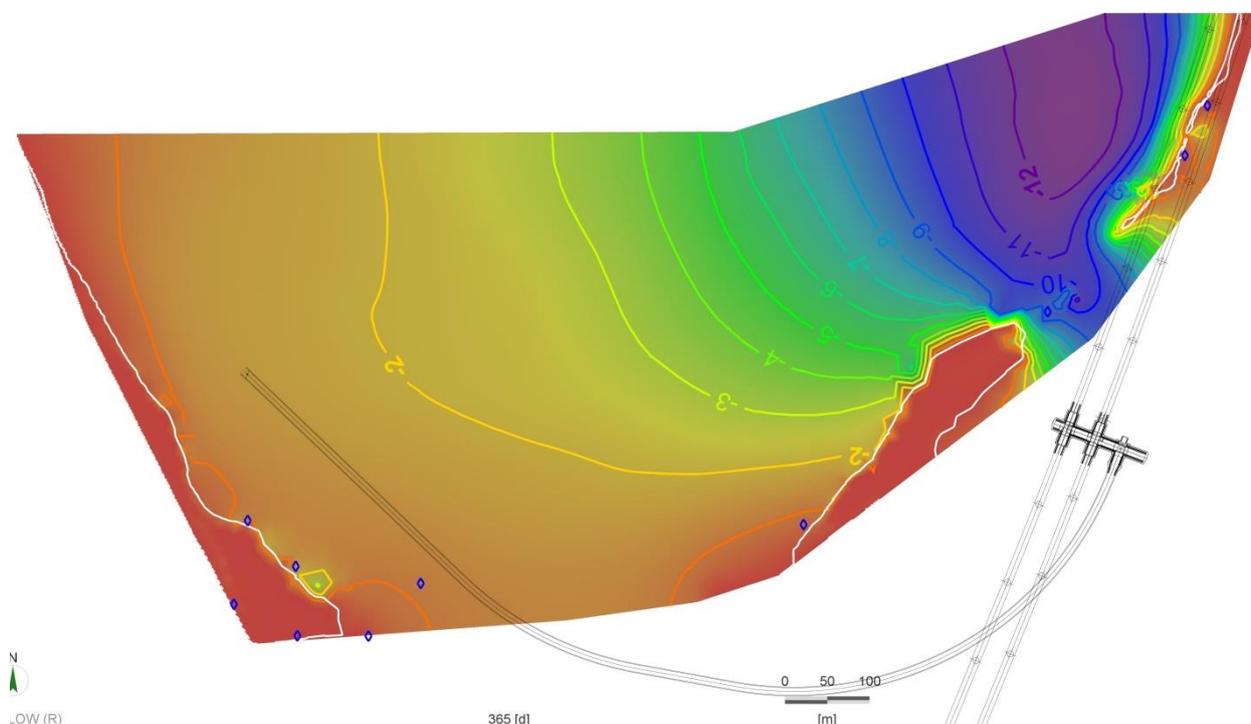


Figura 3-11 - Visualizzazione delle differenze di carico idraulico tra la situazione iniziale e dopo un anno dallo scavo del binario dispari.

Si mostrano ora i risultati ottenuti considerando il drenaggio di acqua lungo il tracciato di scavo della canna pari, con la canna dispari già scavata e drenante. Le portate drenate dalla canna in corrispondenza dei calcari di Gallaneto ottenute dalla modellazione sono:

| Periodo [giorni] | Scenario pessimistico [l/s/10 m] | Scenario ottimistico [l/s/10 m] |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 10 | 1.7 | 0.5 |
| 100 | 1.1 | 0.4 |
| 365 | 0.9 | 0.3 |
| 1000 | 0.9 | 0.3 |
| 3650 | 0.9 | 0.3 |

Dopo circa 1 anno dallo scavo le portate d'acqua in galleria diventano circa costanti (regime stabilizzato), con valori che possono variare tra 0.3 e ca. 1l/s su 10m di tracciato.

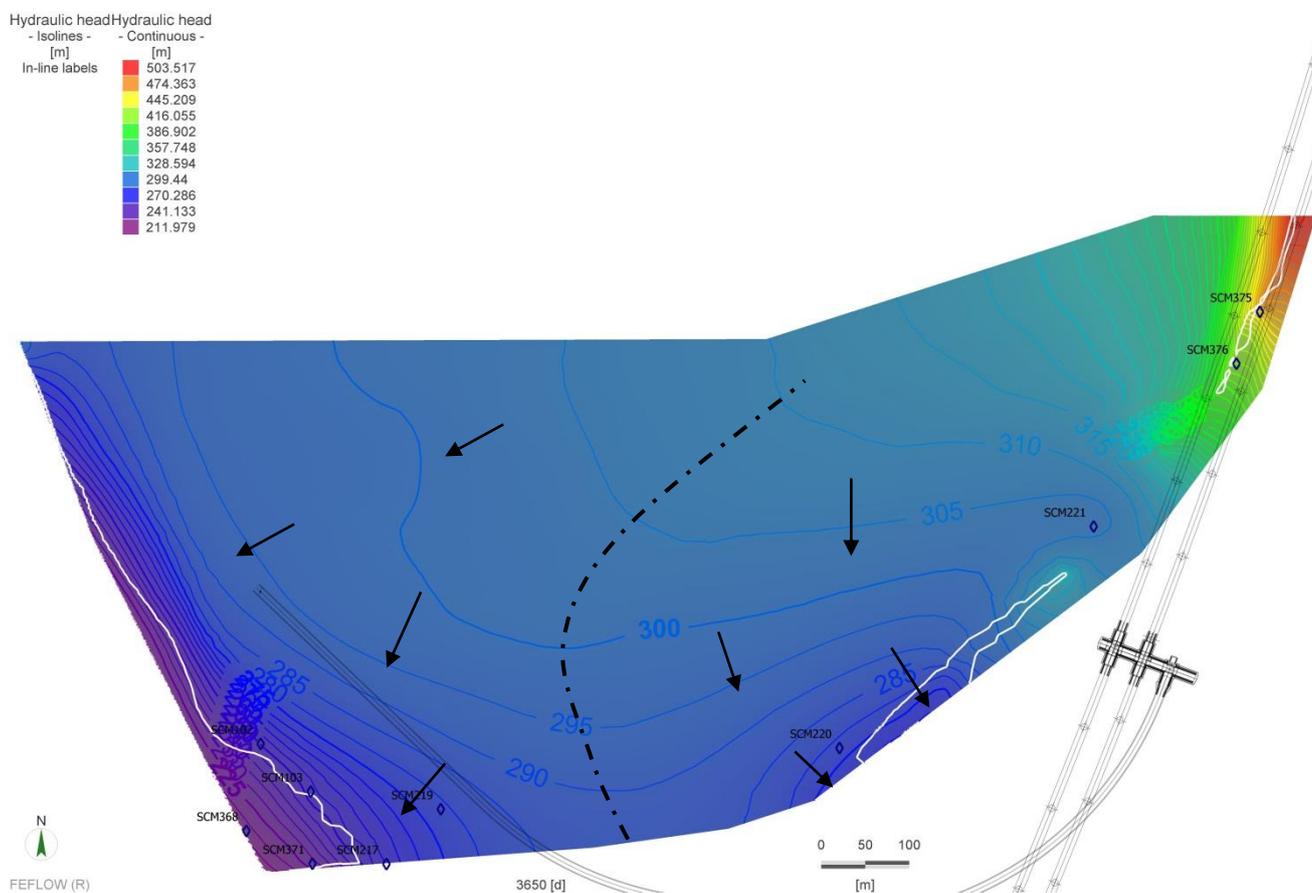


Figura 3-12 - Distribuzione del carico idraulico dopo un anno dallo scavo del binario pari (scenario pessimistico). Il punto-linea nero identifica lo spartiacque idrogeologico che separa sistemi di flusso con diverso recapito.

Le figure seguenti mostrano la distribuzione dei carichi idraulici dopo 10 anni dallo scavo delle due canne. Come si può evincere, l'aspetto significativo è che il drenaggio delle gallerie non provoca una redistribuzione significativa dei sistemi di flusso già presenti in condizioni naturali. La posizione dello spartiacque idrogeologico che separa il sistema di flusso con recapito nel T. Verde dal sistema con recapito nel R. Rizzolo rimane grosso modo la stessa di quella ottenuta con le simulazioni di flusso naturale. Il drenaggio delle gallerie, quindi, non modifica sostanzialmente la distribuzione dei

due sistemi di flusso: tale condizione è stata verificata sia per lo scenario pessimistico che per quello ottimistico.

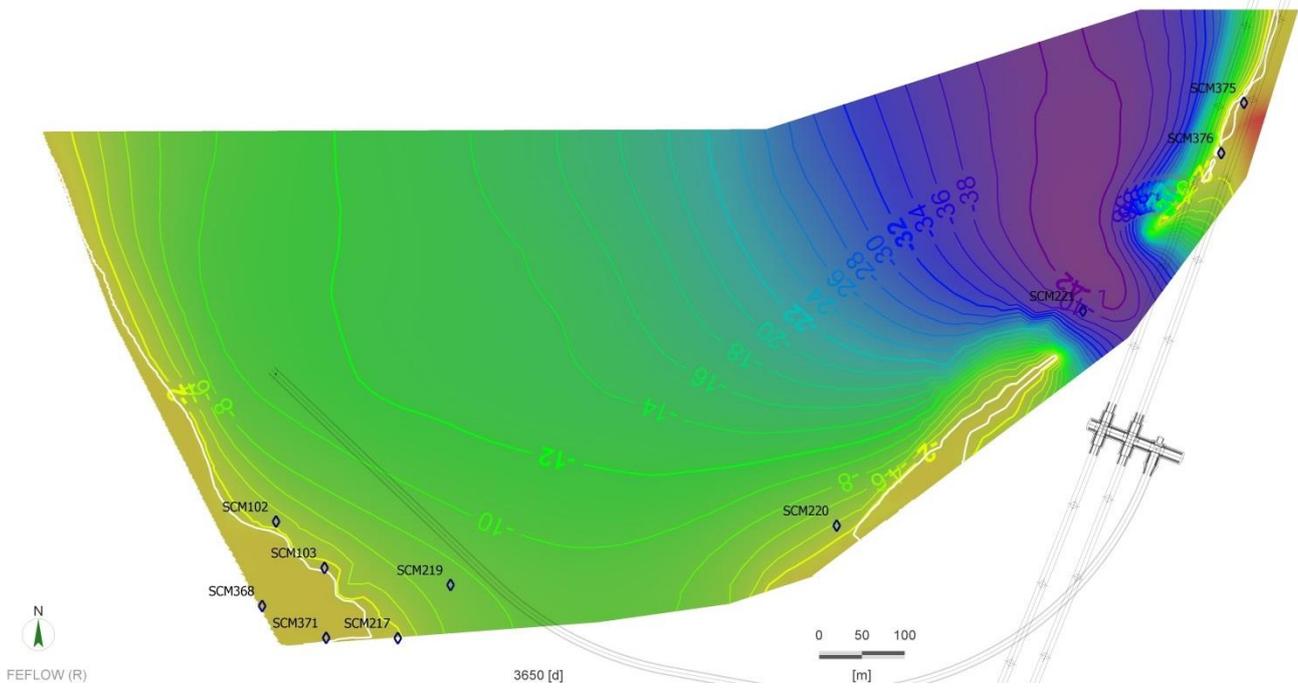


Figura 3-13 Differenze di carico idraulico tra lo stato iniziale della falda e quello dopo 10 anni dal completamento dello scavo (scenario pessimistico). Il colore blu indica i gradienti massimi, mentre il rosso indica l'assenza di variazioni.

Si mostra infine l'andamento delle pressioni idrauliche al contorno delle canne della galleria ad un anno dallo scavo. Si noti come in prossimità delle gallerie il carico idraulico risulti pressochè nullo.

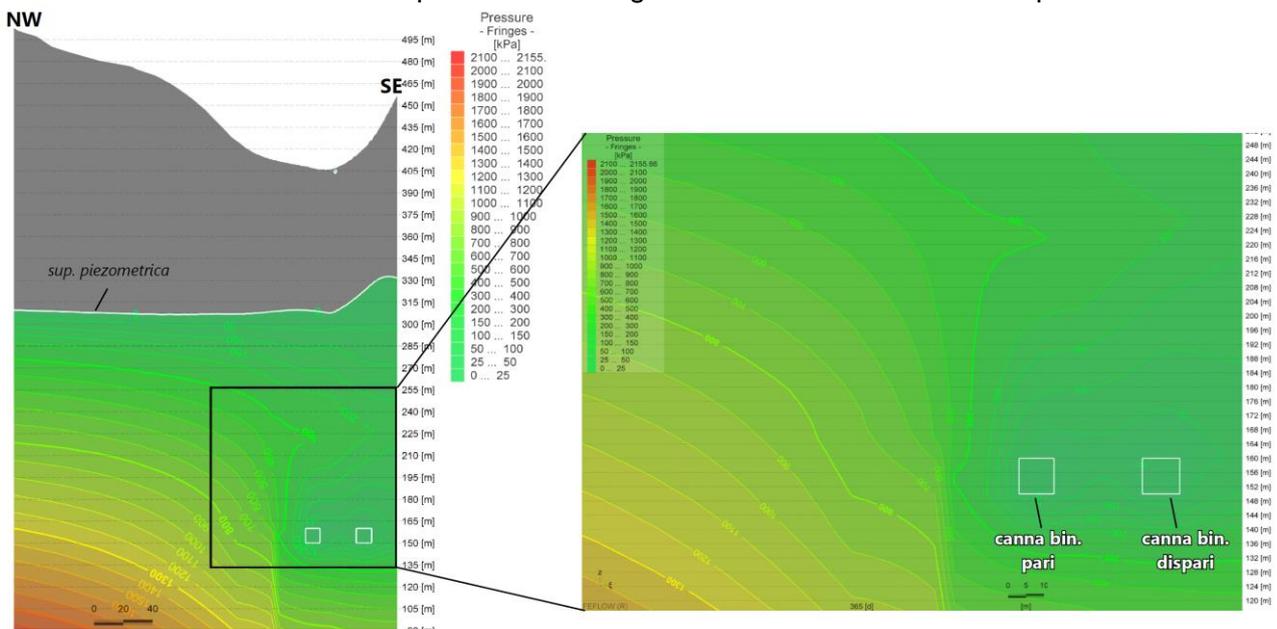


Figura 3-14 Pressioni idrauliche [KPa] dopo un anno dallo scavo sulle due canne della galleria

4 INDAGINI GEOGNOSTICHE

4.1 Note generali

Si riportano di seguito i sondaggi al momento disponibili nella zona la tratta in esame, eseguiti in fase di di PP e di PD; i seguenti sondaggi sono stati utilizzati, ove possibile, per una caratterizzazione più specifica del tratto in esame dal punto di vista geologico-idrogeologico e geotecnico-geomeccanico, e per una verifica dello stato dell'ammasso roccioso in profondità, in relazione a quanto osservato sul terreno. Per quanto riguarda la fase di PE è disponibile un solo sondaggio mentre altri sono in fase di esecuzione.

| FASE | SONDAGGIO |
|------|-----------|
| PP | AA301G052 |
| PP | AA301G053 |
| PP | AA301G054 |
| PP | AA301G027 |
| PD | SL41 |
| PD | SL42 |
| PD | SL45 |
| PD | SL46 |
| PD | SR11 |
| PD | SR12 |
| PD | SR13 |
| PE | L2-CR3 |

Tabella 4-1. Elenco dei sondaggi eseguiti lungo la tratta

| | | |
|--|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 315"> <tr> <td>Foglio 36 di 110</td> </tr> </table> | Foglio 36 di 110 |
| Foglio 36 di 110 | | |

5 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA/GEOMECCANICA

5.1 Note generali

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

- materiali a grana medio-fine
- materiali a grana fine
- rocce metamorfiche

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

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

Nei paragrafi che seguono sono pertanto illustrati solamente i criteri adottati per la caratterizzazione dei materiali inerenti allo scavo dell'opera in esame. :

5.2 Formazioni rocciose

5.2.1 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 5.2.2**; il parametro **GSI** (Geological Strength Index) verrà valutato con la seguente espressione (vedi Sjöberg, 1997):

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

- 2 L'involuppo delle resistenze dell'ammasso roccioso in condizioni "undisturbed" o "disturbed" verrà valutato sulla base di quanto riportato in Brown & Hoek (1988), Hoek & Brown (1988), Hoek, Kaiser & Bawden (1995), Hoek et al (2002) (vedi il **paragrafo 5.2.3**).

| | |
|---|--|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 37 di 110 |

3 Le caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso verranno stimate sulla base di quanto riportato nel paragrafo 5.2.4.

5.2.2 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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 39 di 110 |

- 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.

5.2.3 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  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 |
| | Foglio 40 di 110 |

GSI = RMR'89 –5

RMR'89 = vedi il paragrafo 5.2.2

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 Marinos & 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 | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <table border="1" data-bbox="1420 224 1546 318"> <tr> <td>Foglio 41 di 110</td> </tr> </table> | Foglio 41 di 110 |
| Foglio 41 di 110 | | |

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:

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

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

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

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 | |
| | Slightly foliated | | Migmatite (29 ± 3) | Amphibolites 26 ± 6 | | |
| | Foliated** | | Gneiss 28 ± 5 | Schists 12 ± 3 | Phyllites (7 ± 3) | Slates 7 ± 4 |
| IGNEOUS | Plutonic | Light | Granite 32 ± 3 Granodiorite (29 ± 3) | Diorite 25 ± 5 | | |
| | | Dark | Gabbro 27 ± 3 Norite 20 ± 5 | Dolerite (16 ± 5) | | |
| | Hypabyssal | | Porphyries (20 ± 5) | | Diabase (15 ± 5) | Peridotite (25 ± 5) |
| | Volcanic | Lava | | Rhyolite (25 ± 5) Andesite 25 ± 5 | Dacite (25 ± 3) Basalt (25 ± 5) | Obsidian (19 ± 3) |
| | | Pyroclastic | Agglomerate (19 ± 3) | Breccia (19 ± 5) | Tuff (13 ± 5) | |

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

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

Tabella 5-1. 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)

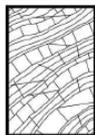
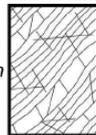
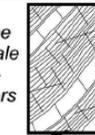
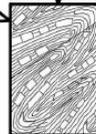
| GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos.P and Hoek. E, 2000) | | SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes) | | SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes) | | SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes) | | SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|--|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| <p>From a description of the lithology, structure and surface conditions (particularly of the bedding planes), choose a box in the chart. Locate the position in the box that corresponds to the condition of the discontinuities and estimate the average value of GSI from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than giving GSI = 35. Note that the Hoek-Brown criterion does not apply to structurally controlled failures. Where unfavourably oriented continuous weak planar discontinuities are present, these will dominate the behaviour of the rock mass. The strength of some rock masses is reduced by the presence of groundwater and this can be allowed for by a slight shift to the right in the columns for fair, poor and very poor conditions. Water pressure does not change the value of GSI and it is dealt with by using effective stress analysis.</p> <p>COMPOSITION AND STRUCTURE</p> | | <p>VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces</p> | | <p>GOOD - Rough, slightly weathered surfaces</p> | | <p>FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> | | <p>POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments</p> | | <p>VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p> | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  <p>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.</p> | | 70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  <p>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</p> |  <p>C. Sandstone and siltstone in similar amounts</p> |  <p>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</p> |  <p>E. Weak siltstone or clayey shale with sandstone layers</p> | 50 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>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.</p> | |  <p>F. Tectonically deformed, intensively folded/faulted, sheared clayey shale or siltstone with broken and deformed sandstone layers forming an almost chaotic structure</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|  <p>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</p> |  <p>H. Tectonically deformed silty or clayey shale forming a chaotic structure with pockets of clay. Thin layers of sandstone are transformed into small rock pieces.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>→ : Means deformation after tectonic disturbance</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <thead> <tr> <th>Flysch type see Table 4.</th> <th>Proportions of values for each rock type to be included in rock mass property determination</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A and B</td> <td>Use values for sandstone beds</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone</td> </tr> <tr> <td>E</td> <td>Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>Reduce sandstone values by 60% and use full values for siltstone</td> </tr> <tr> <td>G</td> <td>Use values for siltstone or shale</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>Use values for siltstone or shale</td> </tr> </tbody> </table> | 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 |  | | | | | | | | | |
| 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 5-2 Prospetto per la Classificazione Geomeccanica (GSI) degli ammassi rocciosi eterogenei i (Flysch) secondo Marinos-Hoek (2000).

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 44 di 110 |

| 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 5-3: Ammassi rocciosi eterogenei – Criteri di valutazione di σ_c e di m_i (Hoek et al.,1998; Marinos & Hoek, 2000)

5.2.4 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 seguente espressioni (Hoek et Diederichs, 2006) in MPa:

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

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

Oppure

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

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

In presenza di formazioni flyshoidi (prospetto **8.5**, Marinos & Hoek - 2000) il modulo elastico della roccia intatta verrà determinando 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.

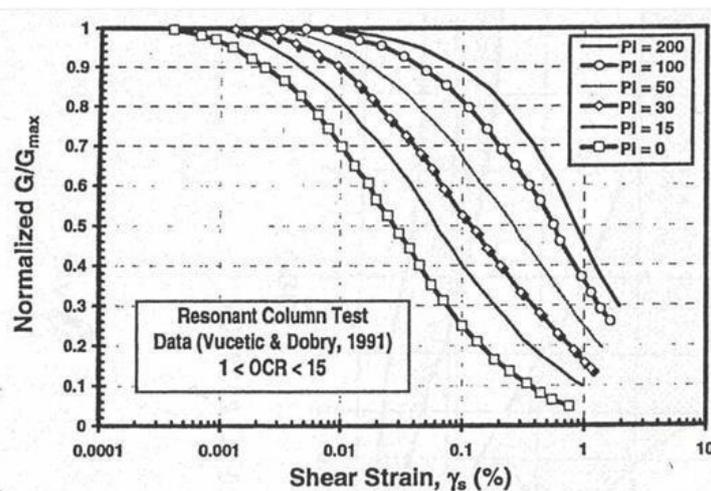


Figura 5-1. Curve di decadimento secondo Vucetic e Dobry, 1991

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 46 di 110 |

6 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 2. La Formazione delle Argilliti a Palombini sarà quella che interagirà maggiormente con l'opera ma, come descritto nell'inquadramento geologico, si potranno incontrare formazioni appartenenti all' Unità Gazzo-Isoverde, come ad esempio gli Argilloscisti neri e i Calcari di Gallaneto ed infine successioni di lenti a carattere litoide appartenenti alla piega di Cravasco-Voltaggio.

6.1 Argillite a Palombini (Argilloscisti filladici)

Oggetto del presente capitolo è la caratterizzazione geotecnica-geomeccanica della formazione costituita da Argilloscisti filladici, appartenenti alle Formazioni degli "Argilloscisti di Murta" (AGF) e degli "Argilloscisti 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:
 - **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

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 47 di 110 |

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.
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.

6.1.1 *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,.

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 48 di 110 |

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.

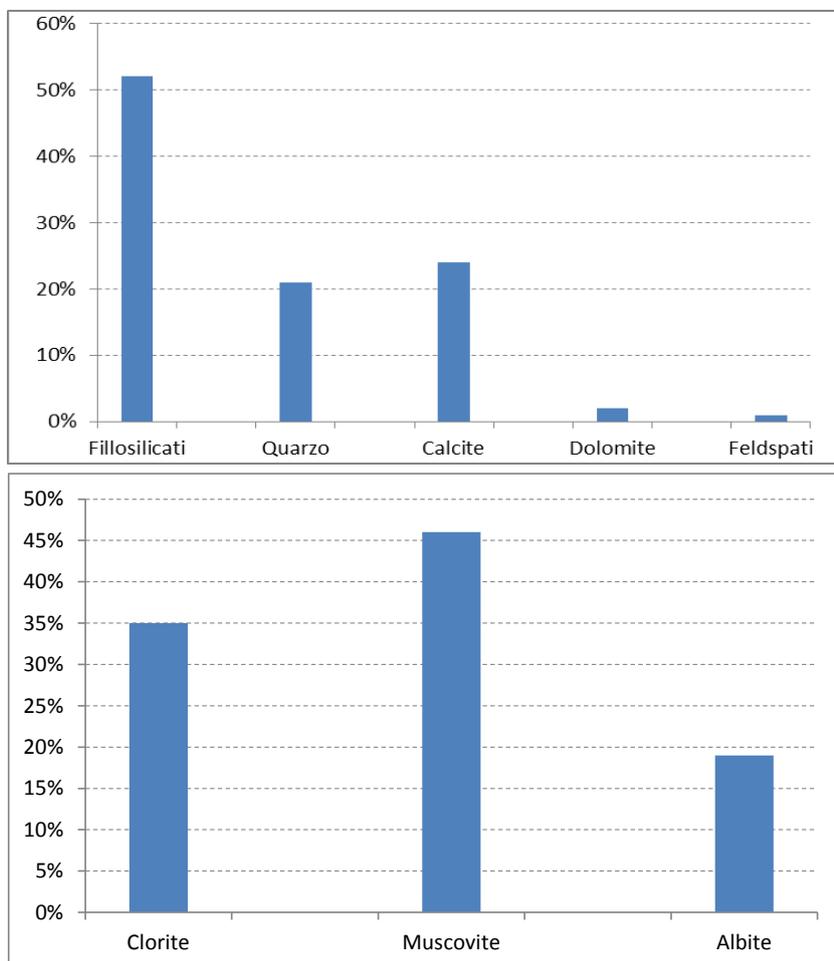


Figura 6-1. Composizione mineralogica media della matrice degli Argilloscisti Filladici (da PD)

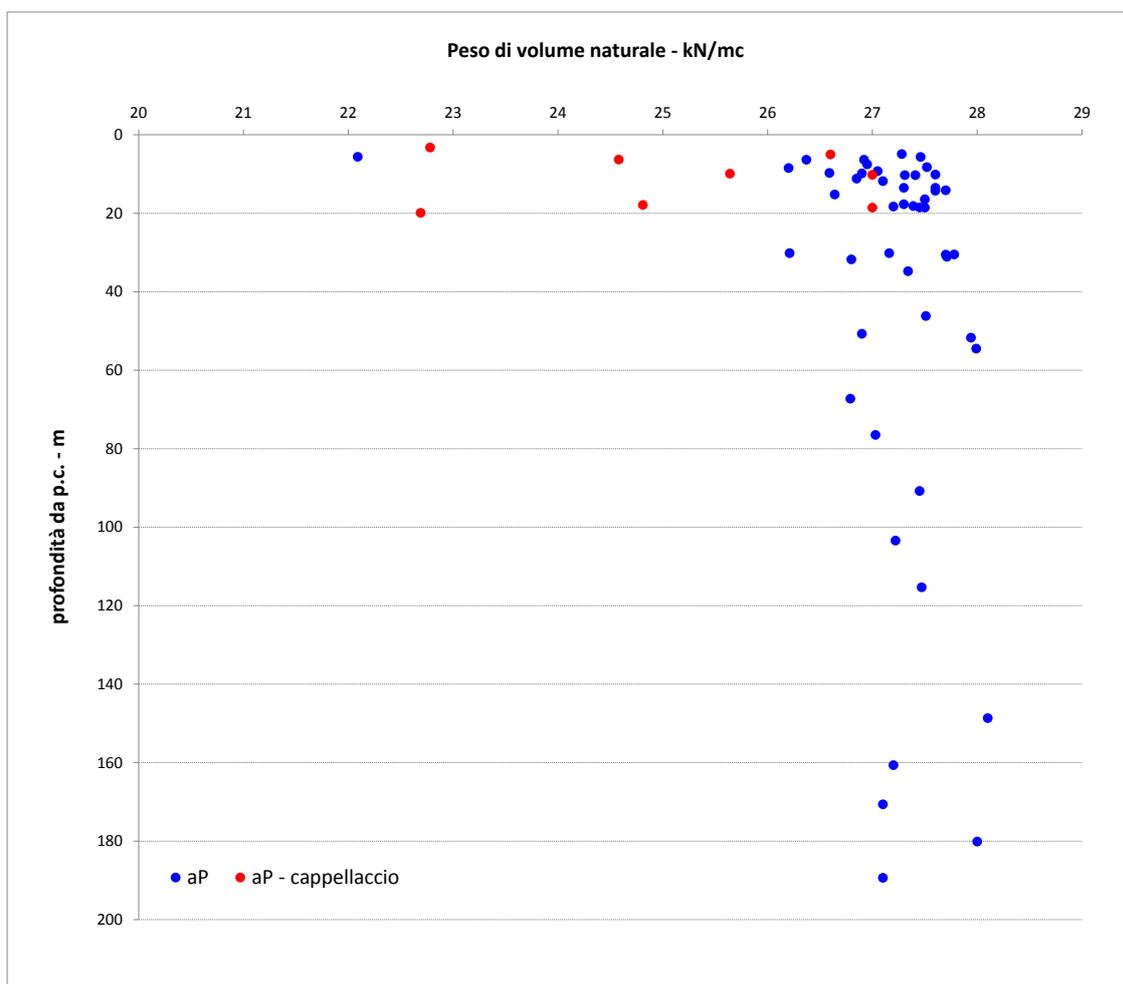
Limitatamente ai campioni con litotipo proprio degli argilloscisti, si evidenzia che gli elementi codificati con CR3 e R2 hanno evidenziato la presenza di materiali asbestosi, cui tuttavia si associa una non-pericolosità nei riguardi del rilascio di fibre. Le risultanze delle analisi dei campioni non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

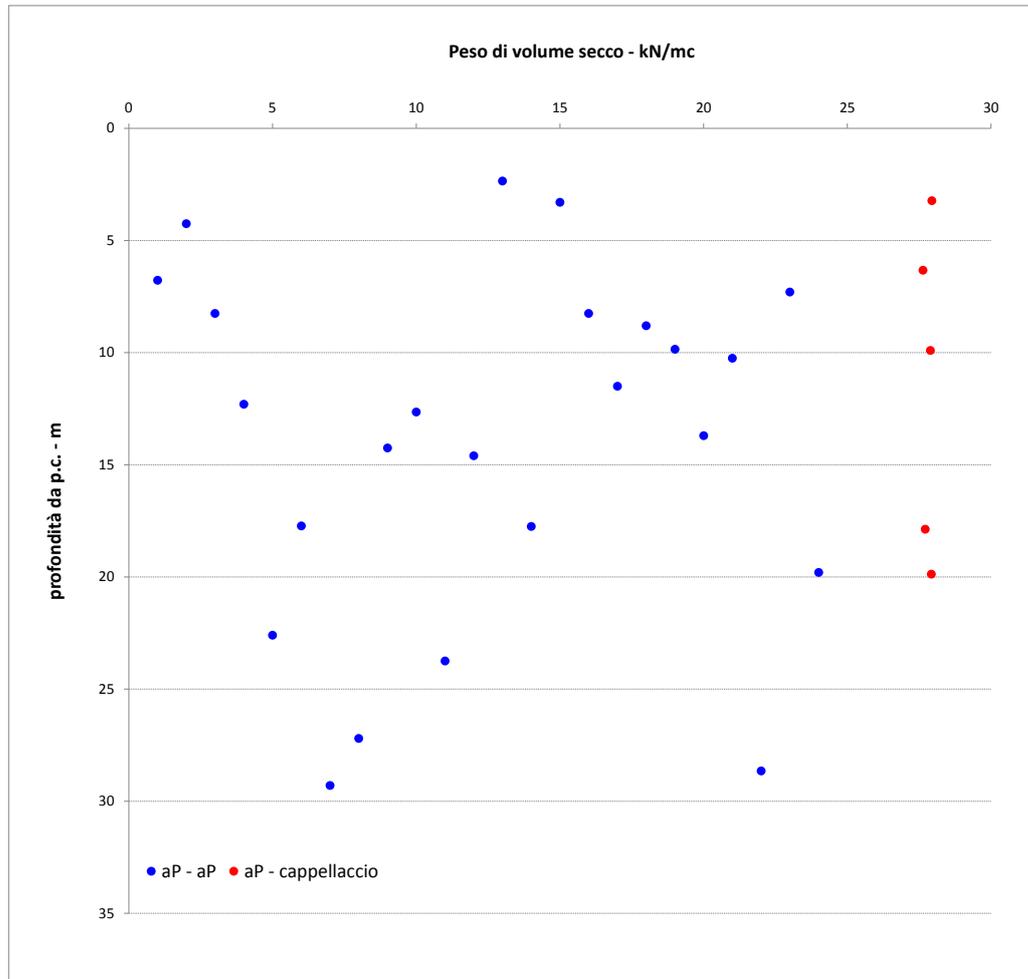


| Formazione | aP | aP - cappellaccio |
|----------------------------|----|-------------------|
| numerosità campione | 48 | 8 |
| Yn max – kN/m ³ | 28 | 27 |
| Yn Min – kN/m ³ | 22 | 23 |
| Yn Med – kN/m ³ | 27 | 25 |
| Yn Sqm – kN/m ³ | 1 | 2 |
| sqm/med | 5% | 7% |

Figura 6-2. 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/m ³ | 28 | 28 |
| Ys Min – kN/m ³ | 22 | 28 |
| Ys Med – kN/m ³ | 27 | 28 |
| Ys Sqm – kN/m ³ | 2 | 0 |
| sqm/med | 6% | 1% |

Figura 6-3. 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.

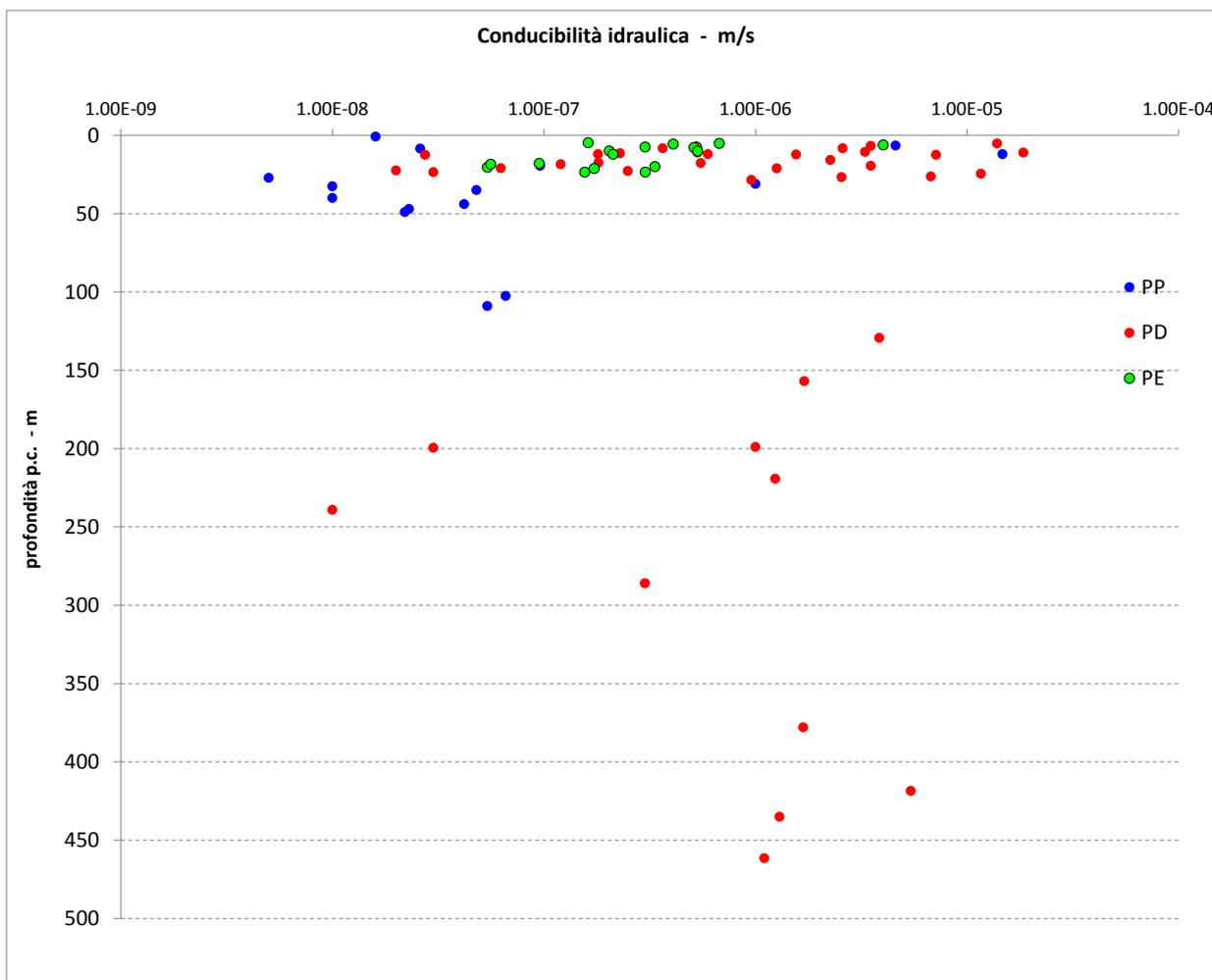


Figura 6-4. Risultati delle prove di permeabilità Lugeon in foro di sondaggio

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 $UCS = K_{50} * I_{s50}$), 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.

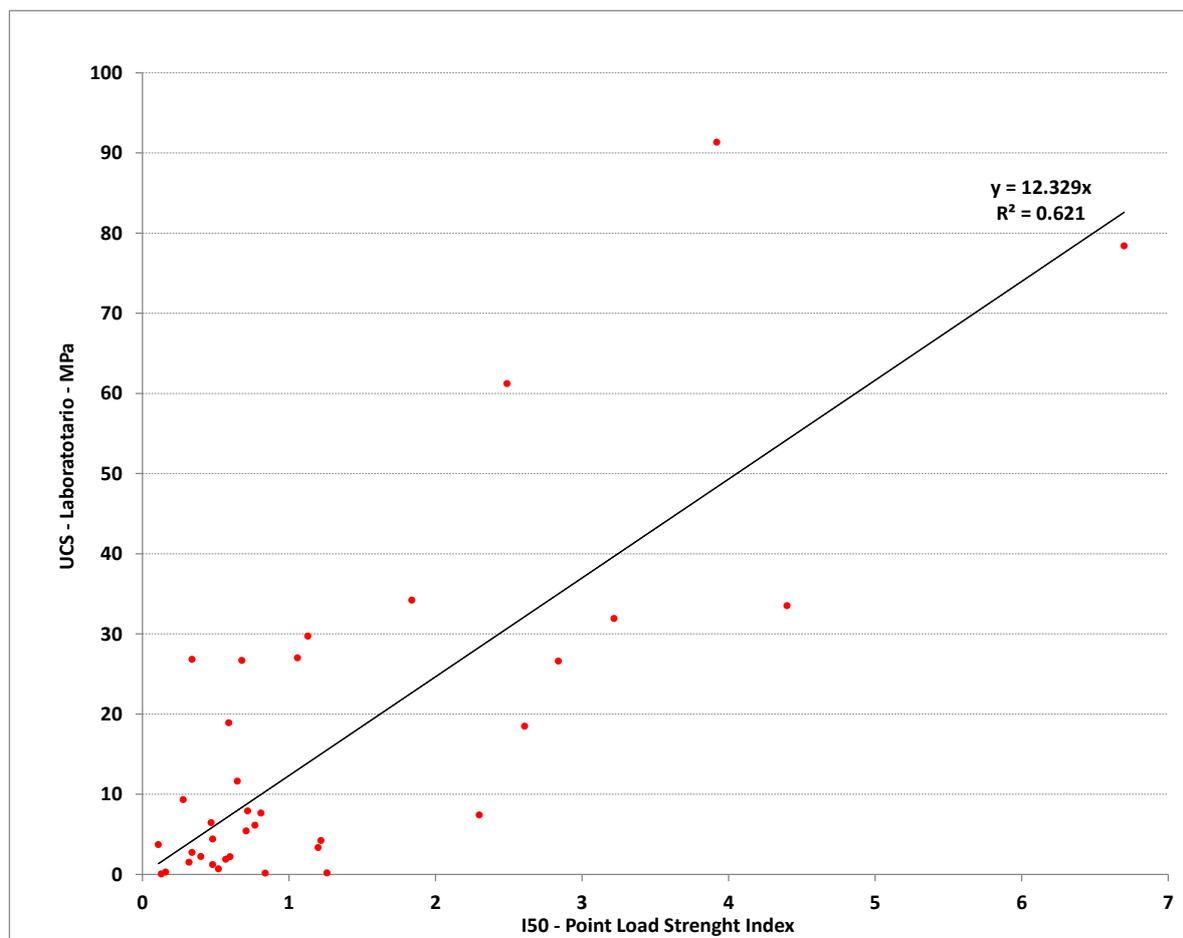


Figura 6-5. Correlazione UCS – I50 Point Load Strenght Index (elaborazione risultati campagna PP)

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 54 di 110 |

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 Strength 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 Strength.

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.

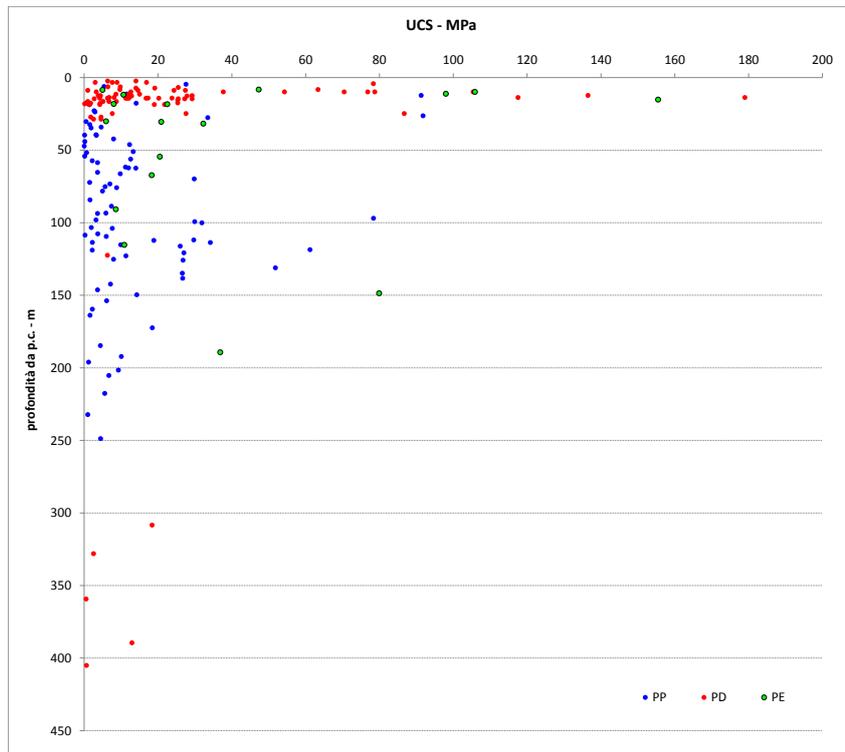


Figura 6-6. Rappresentazione grafica UCS – profondità di campionamento

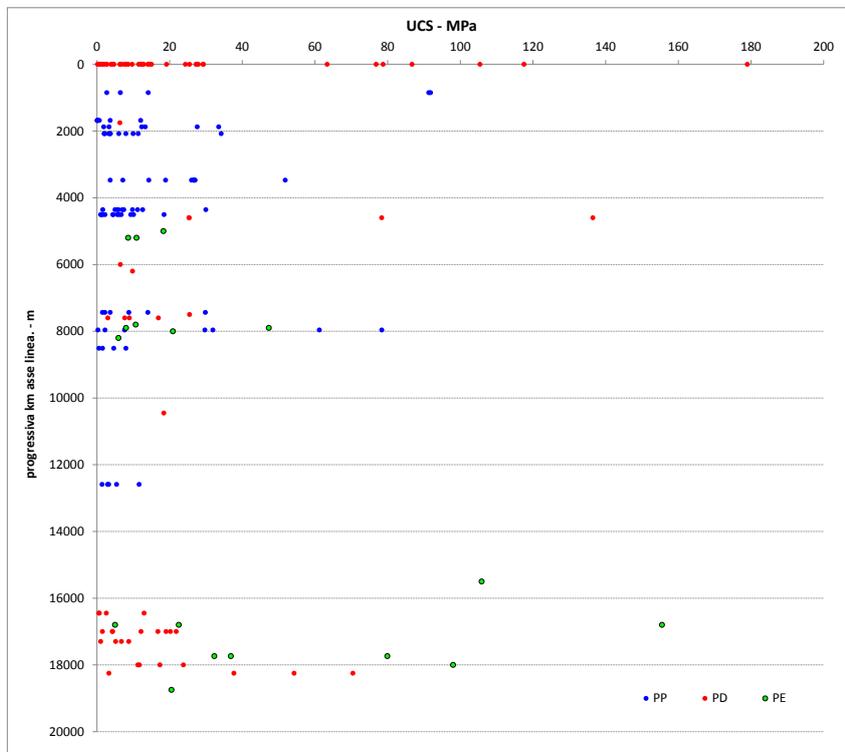


Figura 6-7. Rappresentazione grafica UCS – posizione planimetrica sondaggio di riferimento (pk linea)

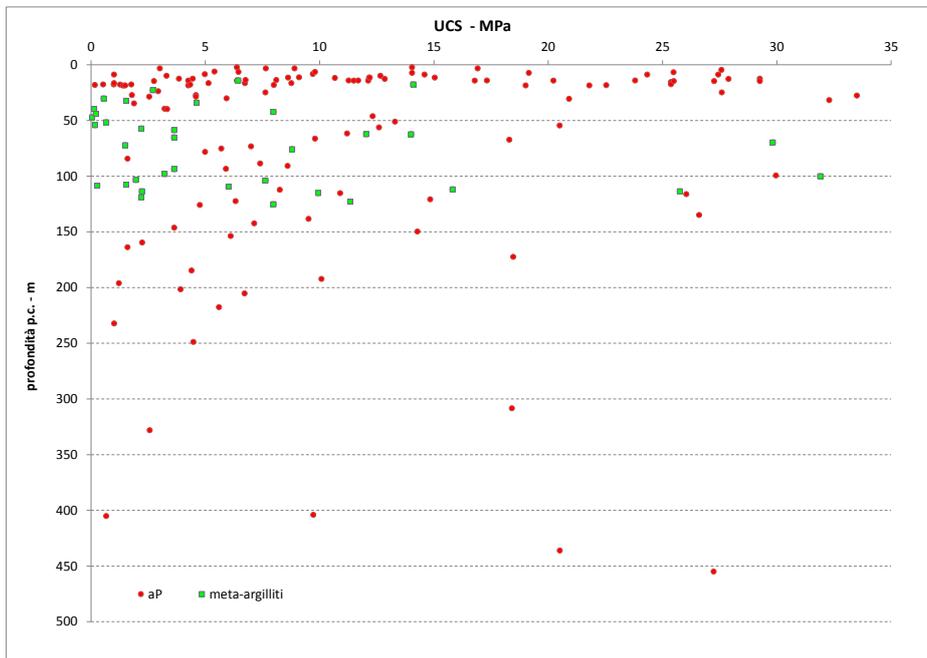


Figura 6-8. Correlazione UCS – I50 Point Load Strength Index (elaborazione risultati campagna PP)

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.

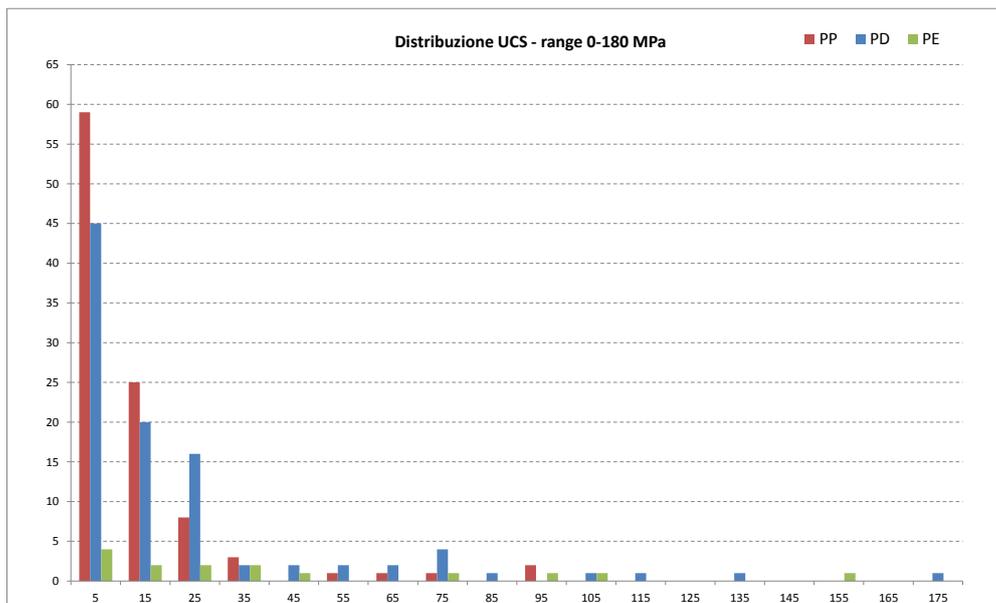


Figura 6-9. Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 10 MPa (per campagne di indagine)

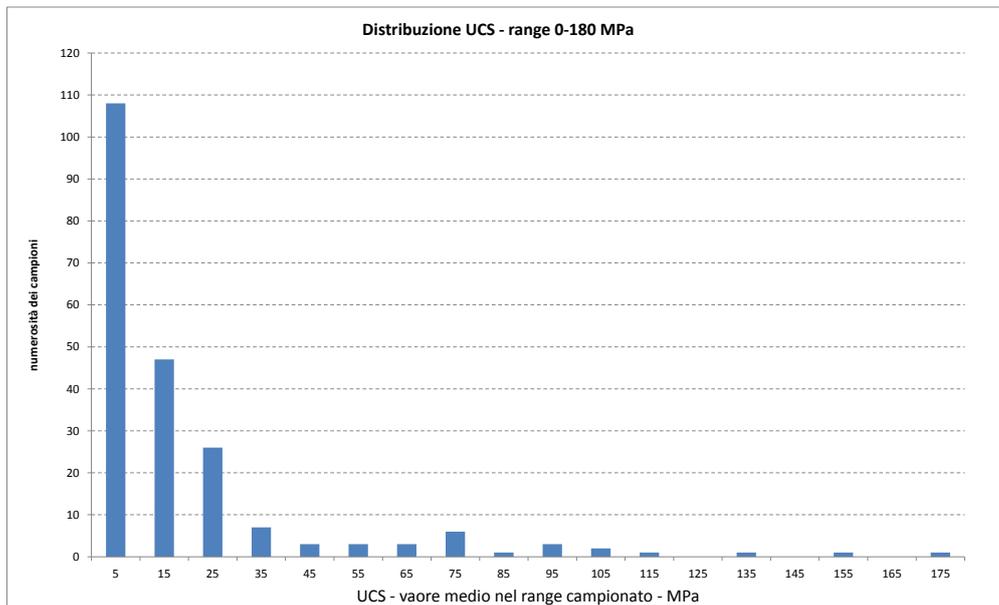


Figura 6-10. Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 10 MPa (campione aggregato)

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.

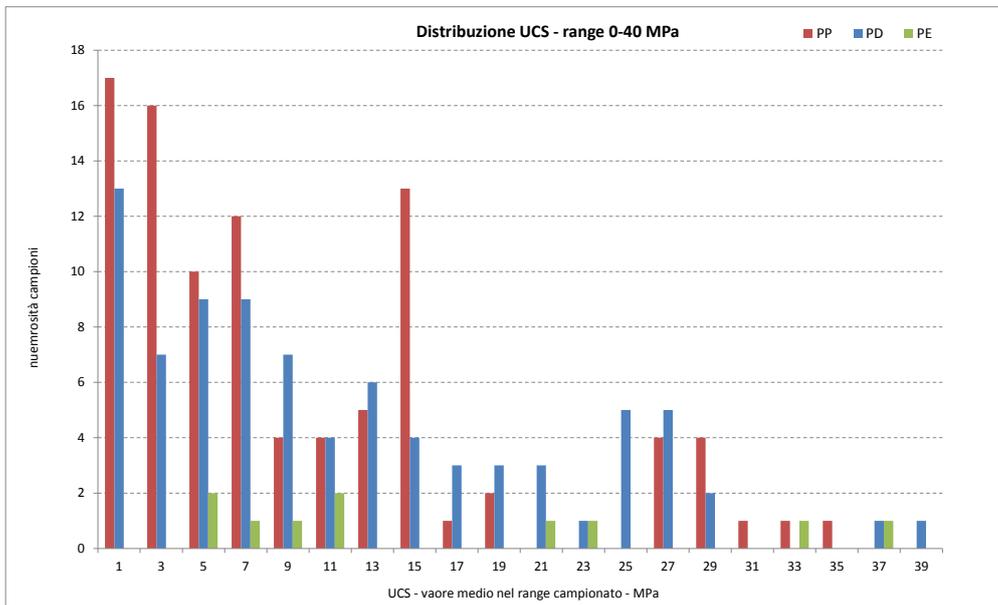


Figura 6-11. Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 2 MPa (per campagne di indagine)

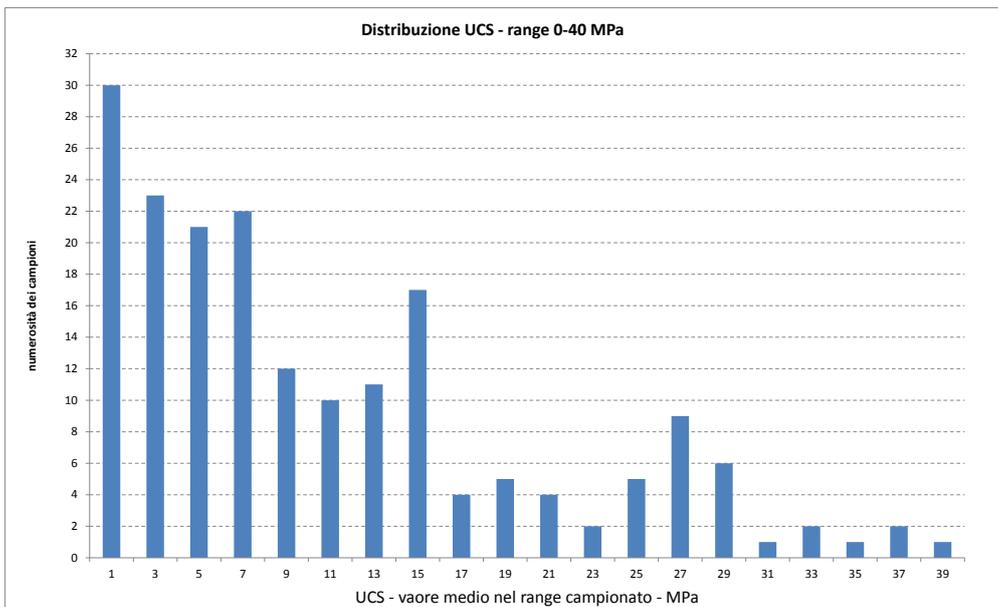


Figura 6-12. Numerosità campione UCS in relazione a intervalli di 2 MPa (campione aggregato)

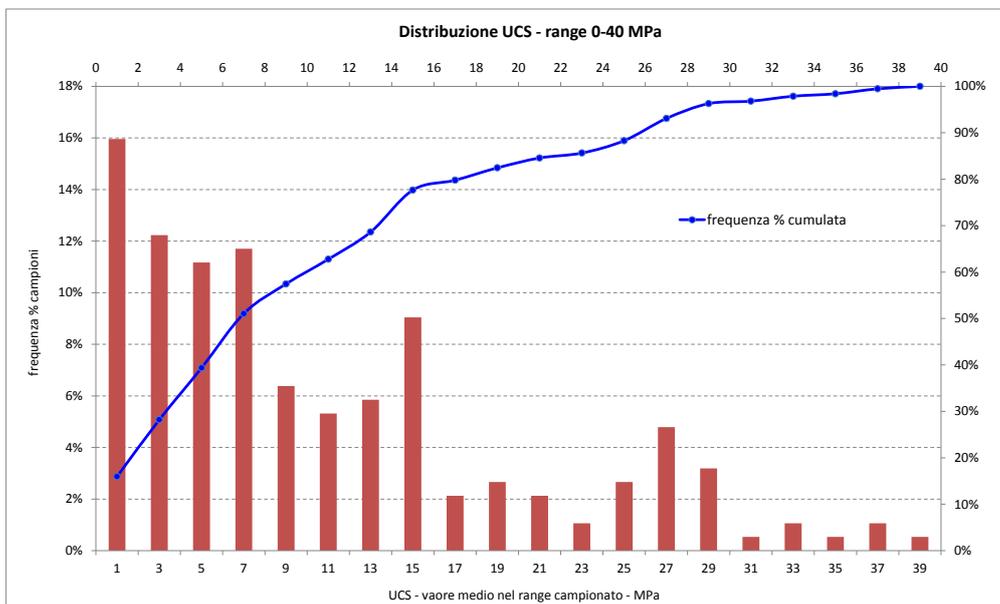


Figura 6-13. Frequenza % campione UCS in relazione a intervalli di 2 MPa (campione aggregato) con rappresentazione della curva di frequenza cumulata

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.

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 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.

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 61 di 110 |

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.

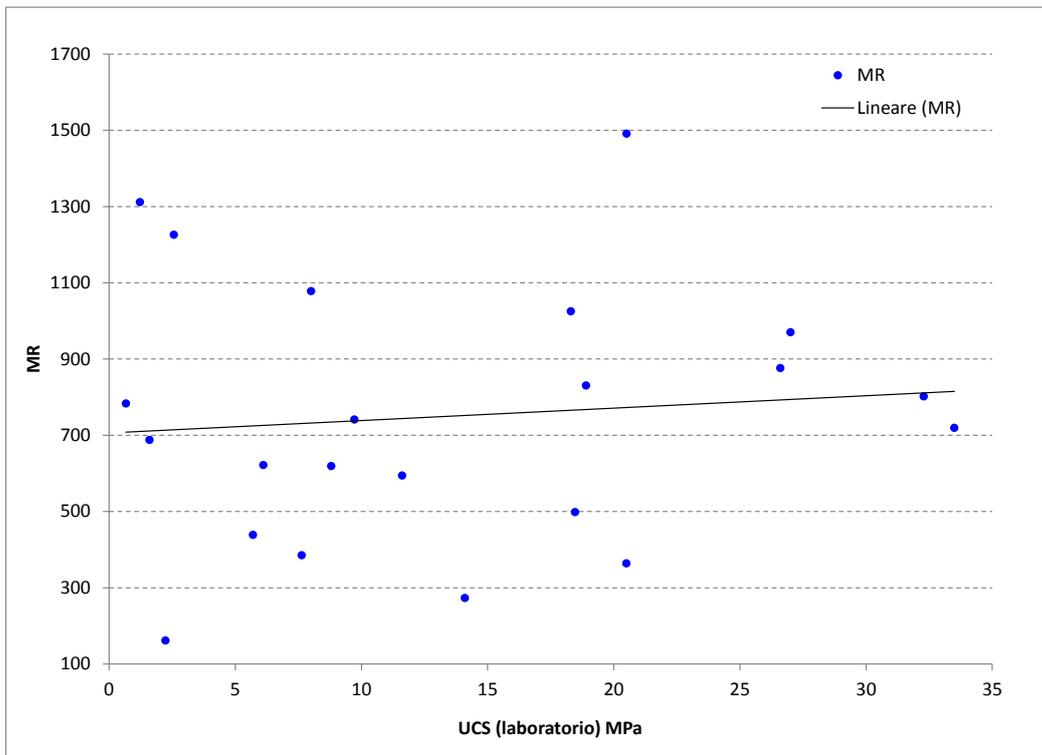


Figura 6-14. Modulus Ratio (MR) associato alle determinazioni in laboratorio UCS (range 0-35 MPa)

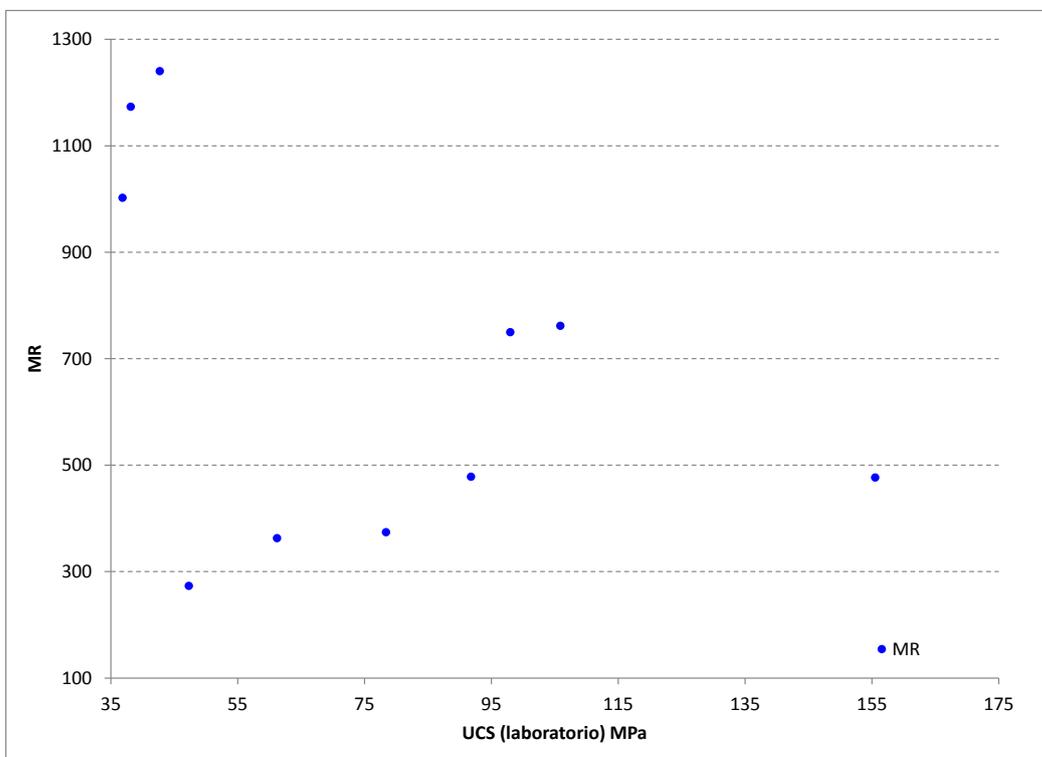


Figura 6-15. Modulus Ratio (MR) associato alle determinazioni in laboratorio UCS (range 35-180 MPa)

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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 63 di 110 |

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**.

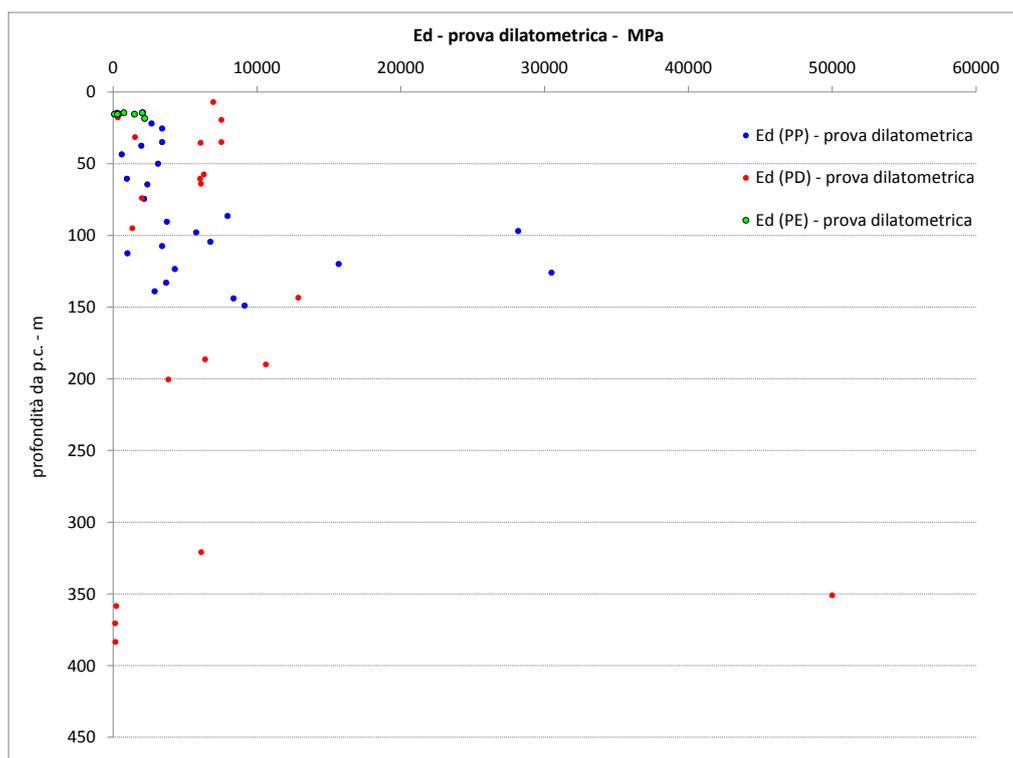


Figura 6-16. Moduli di deformazione da prova dilatometrica in foro di sondaggio, rappresentati in funzione della profondità di misurazione da p.c.

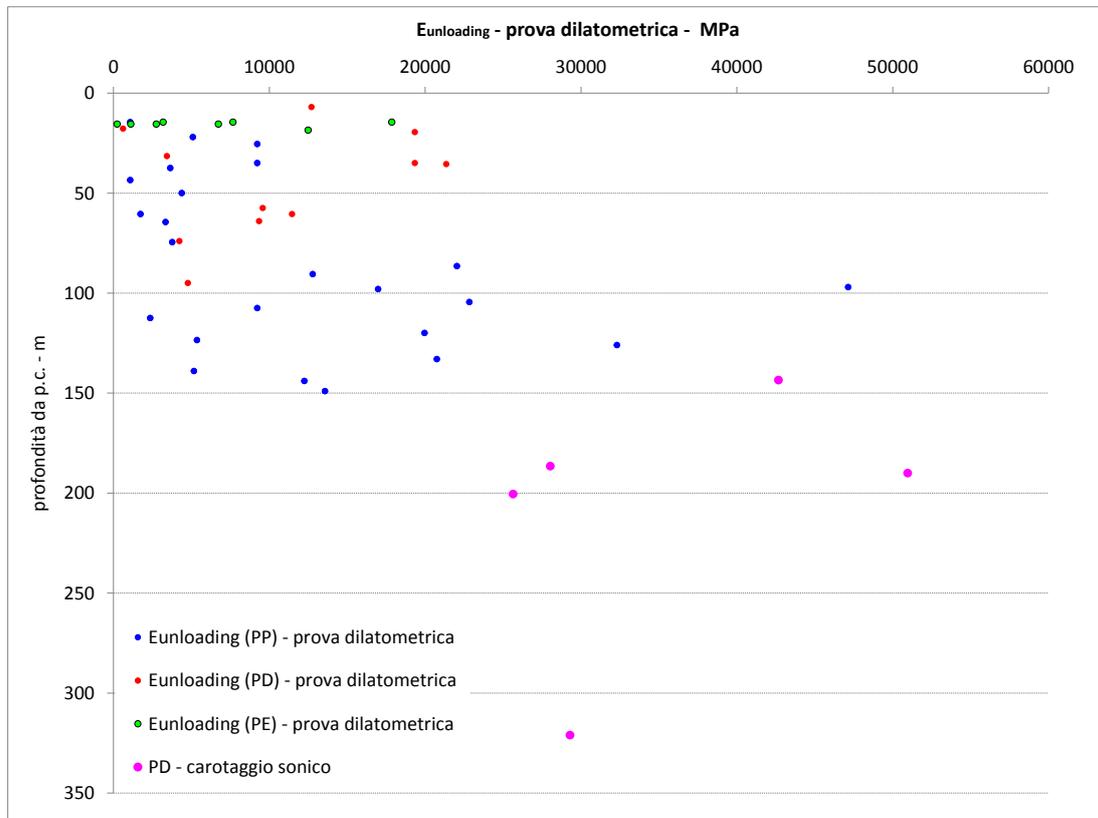


Figura 6-17. Moduli di scarico – unloading - da prova dilatometrica in foro di sondaggio, rappresentati in funzione della profondità di misurazione da p.c.

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).

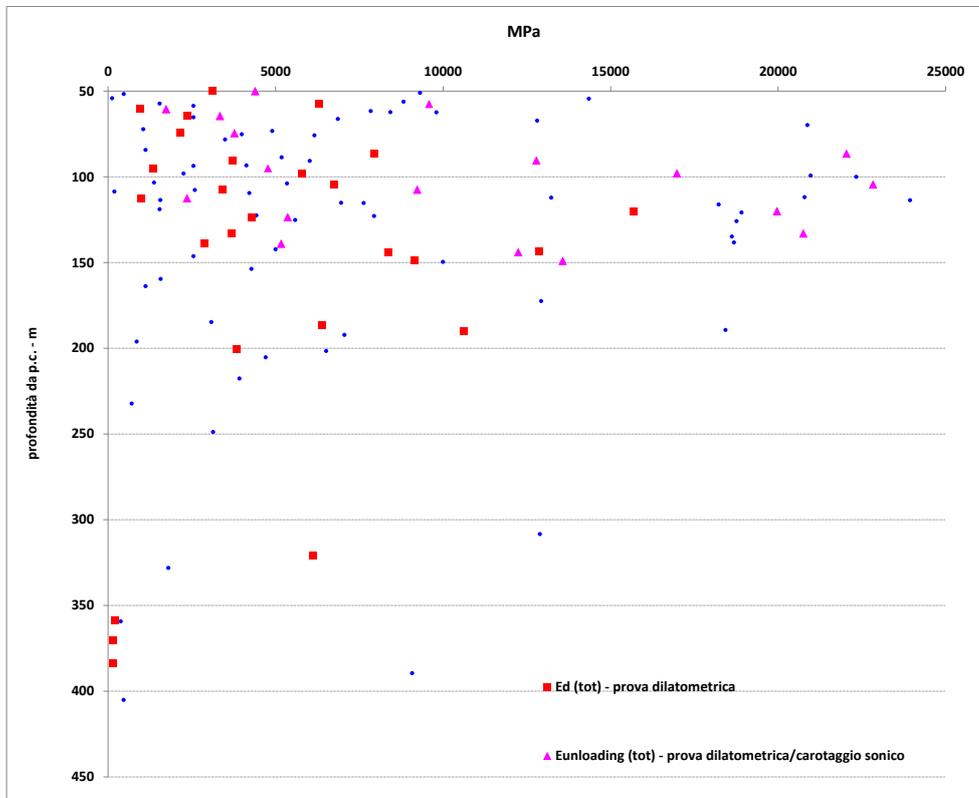
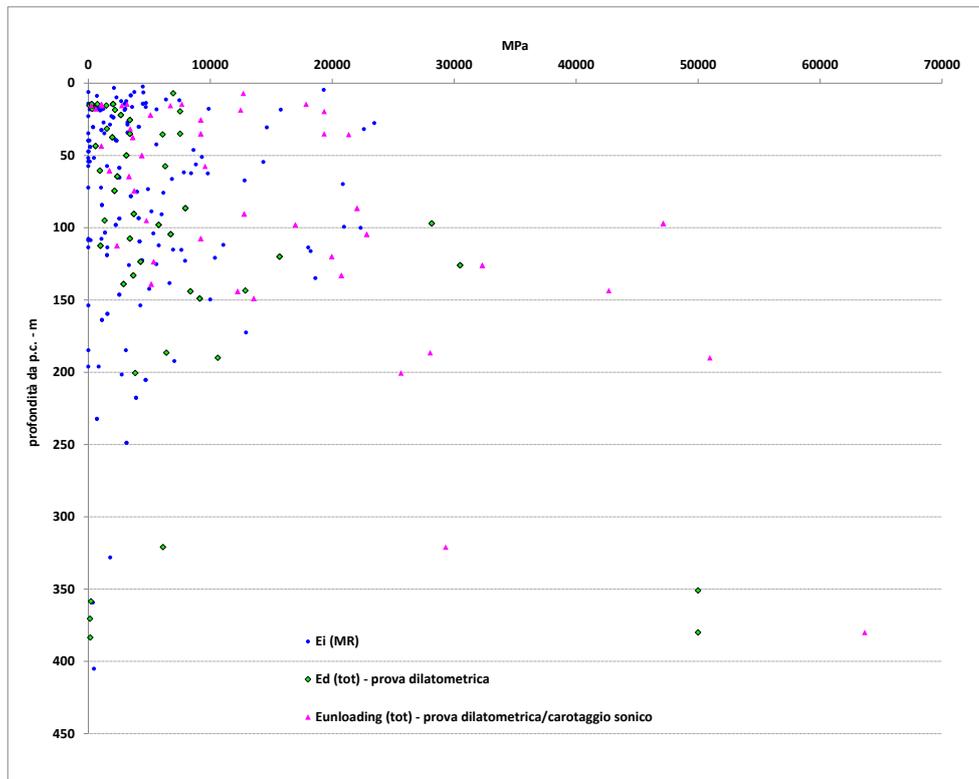


Figura 6-18. Moduli di deformazione e scarico da prova dilatometrica e moduli E_i ottenuti tramite correlazione MR-UCS, rappresentati in funzione della profondità dal p.c. della determinazione (prova in foro/campione-carota testati)

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 66 di 110 |

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:

- **Ei** derivato dal campione di **UCS fra 0 e 35 MPa** (rappresentativo del dato decurtato delle resistenze a compressione ascrivibili agli inclusi calcarei - palombini);
- **Ei** 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.

| | Ei (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

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

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 68 di 110 |

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: $k_0=2.5$

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: $k_0=2.1$

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 k0 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.

| | | |
|---|--|------------------------|
| GENERAL CONTRACTOR  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 69 di 110 |

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 ($\Psi \text{ max} = (94-274)^\circ \pm 26^\circ$).
- 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:

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

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

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).

STRESS FIELD PLOT N. 2

- maximum horizontal stress SH
- minimum horizontal stress Sh
- vertical stress Sv
- ▭ range of the test Ps values
- Test HF

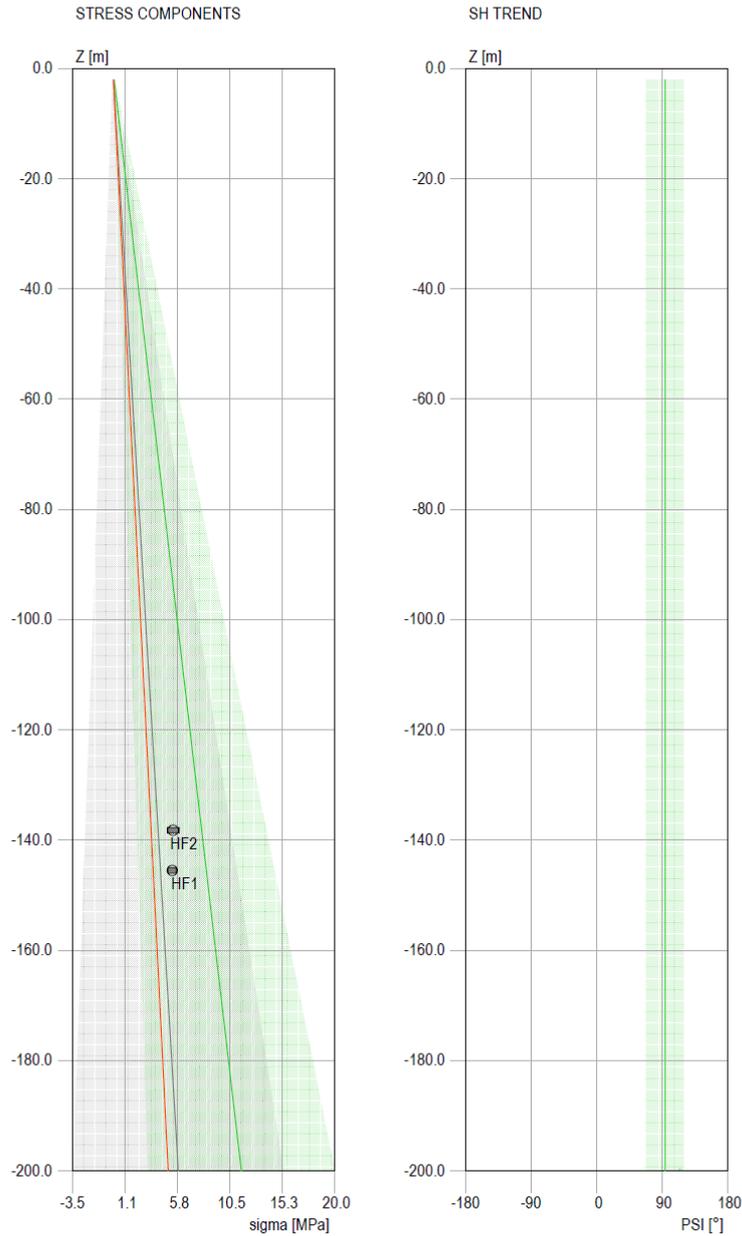
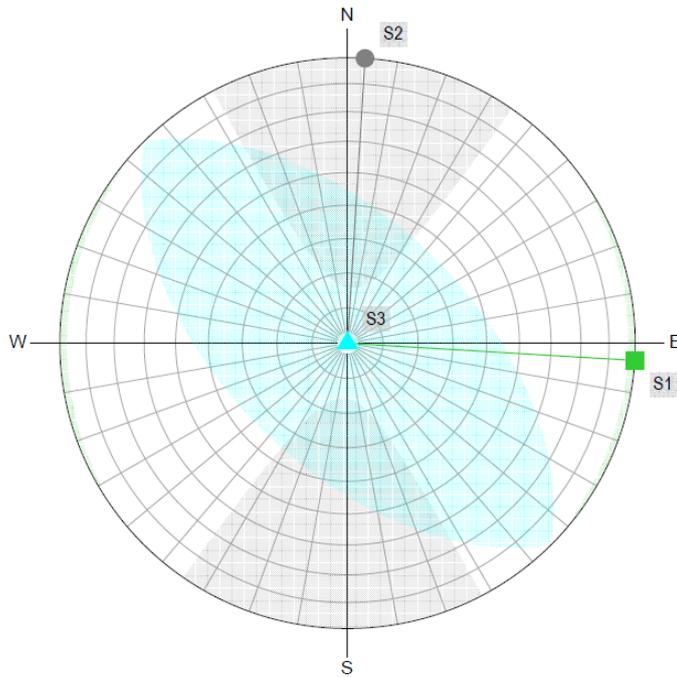


Figura 6-19. Interpretazione prove di fratturazione idraulica

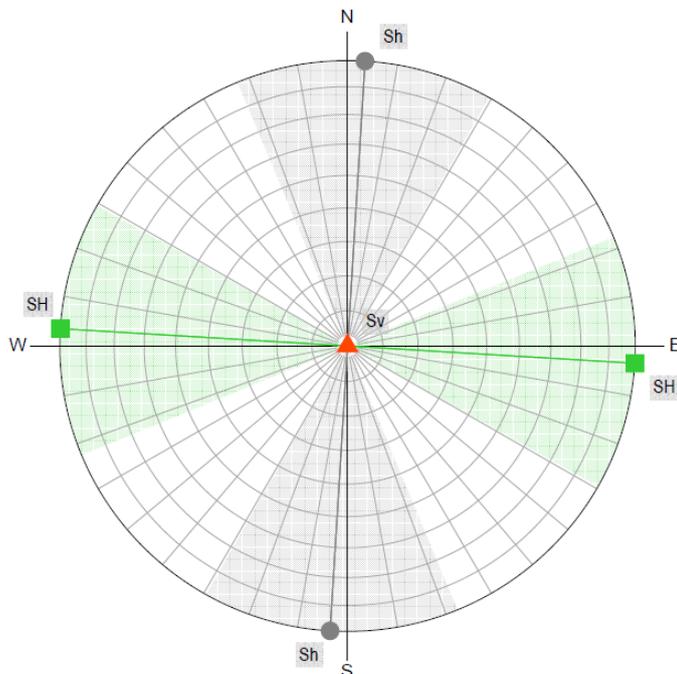
PRINCIPAL STRESS COMPONENTS
Schmidt Lower Emisphere

STRESS TENSOR AT Z = 150 m



| | STRESS [MPa] | PSI [°] | PHI [°] |
|-----|--------------|-------------|------------|
| S1: | 8.71 ± 6.38 | 93.5 ± 22.0 | 0.0 ± 0.0 |
| S2: | 4.43 ± 7.47 | 3.5 ± 22.0 | 0.0 ± 0.0 |
| S3: | 3.75 ± 0.00 | 0.0 ± 0.0 | 90.0 ± 0.0 |

HORIZONTAL AND VERTICAL STRESS STATE
Schmidt Lower Emisphere



| | STRESS [MPa] | PSI [°] | PHI [°] |
|-----|--------------|--------------|------------|
| SH: | 8.71 ± 6.34 | 93.5 ± 25.9 | 0.0 ± 0.0 |
| Sh: | 4.43 ± 7.13 | 183.5 ± 25.9 | 0.0 ± 0.0 |
| Sv: | 3.75 ± 0.00 | 0.0 ± 0.0 | 90.0 ± 0.0 |

Figura 6-20. Interpretazione prove di fratturazione idraulica

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 72 di 110 |

6.1.2 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.

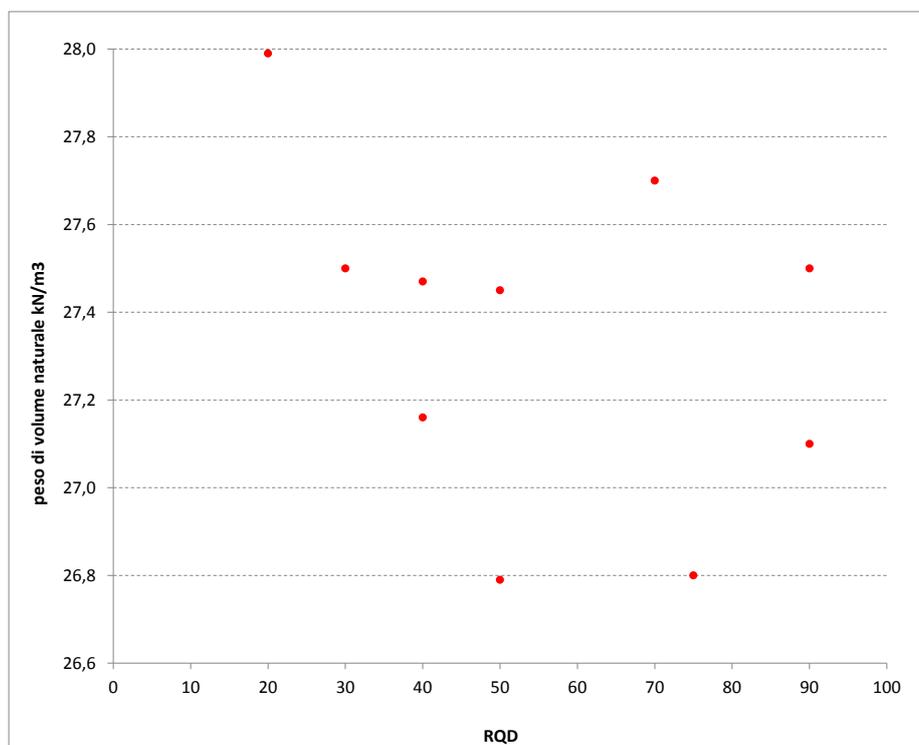


Figura 6-21. Peso di volume naturale in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

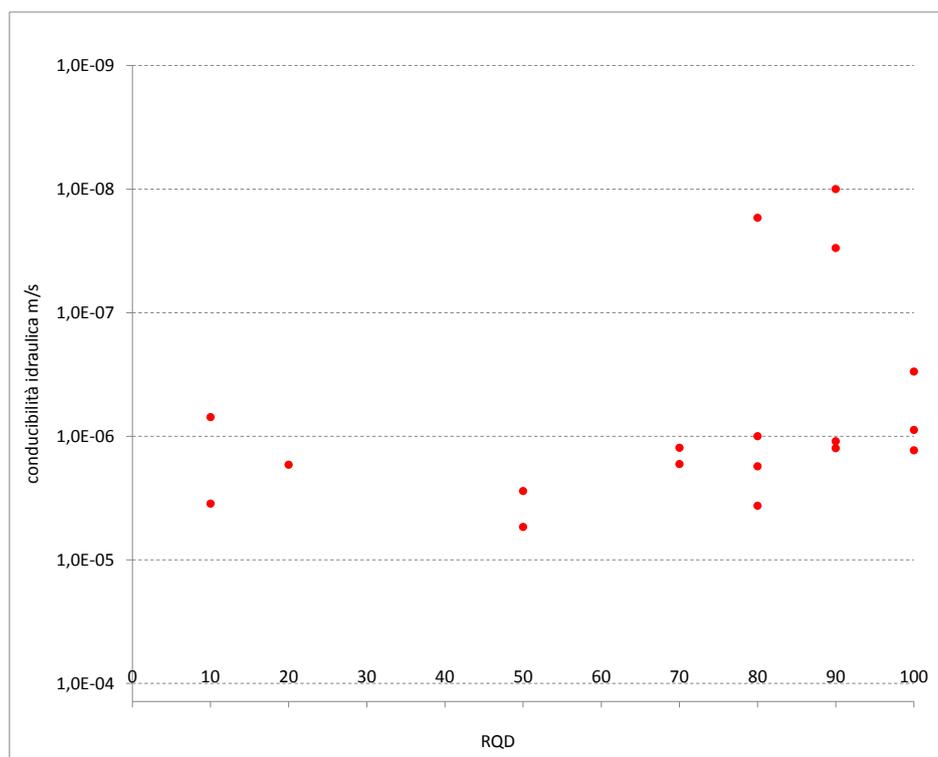


Figura 6-22. Conducibilità idraulica in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

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 mi** 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.

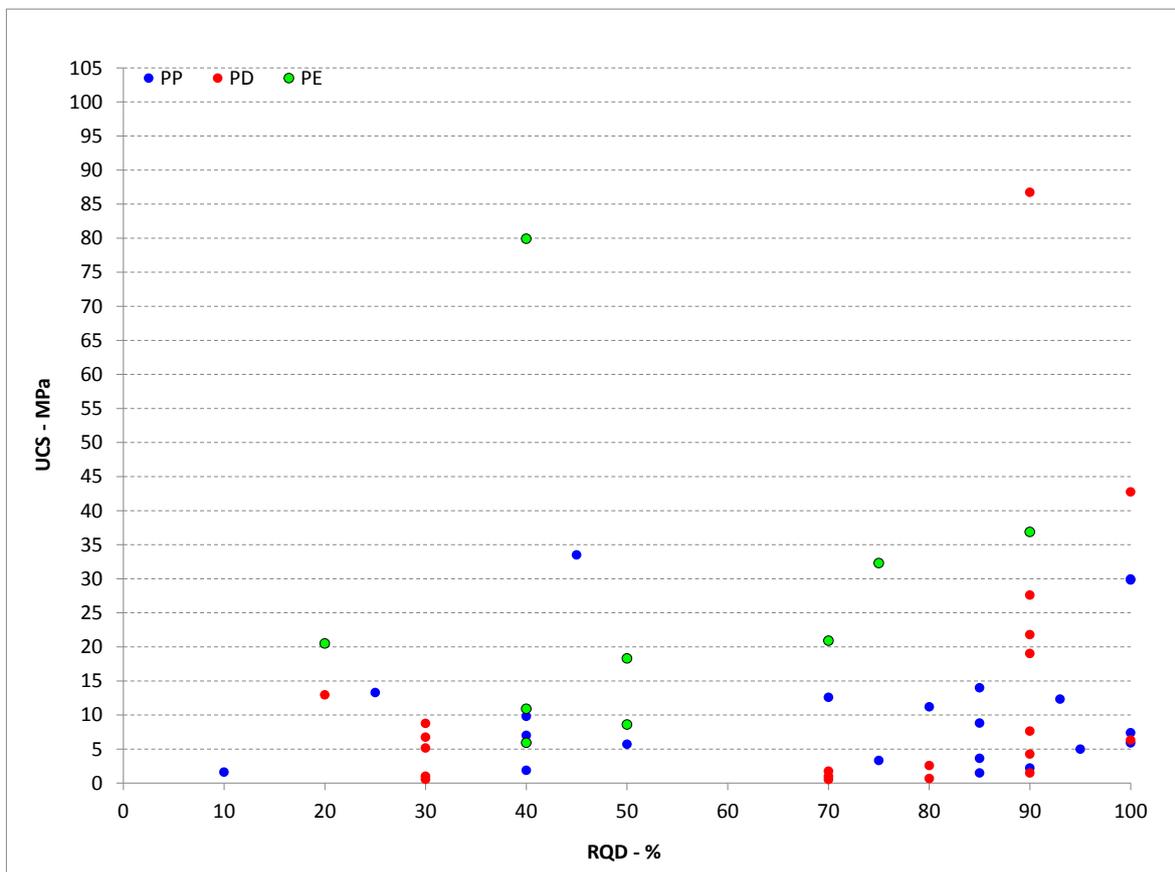


Figura 6-23. UCS in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

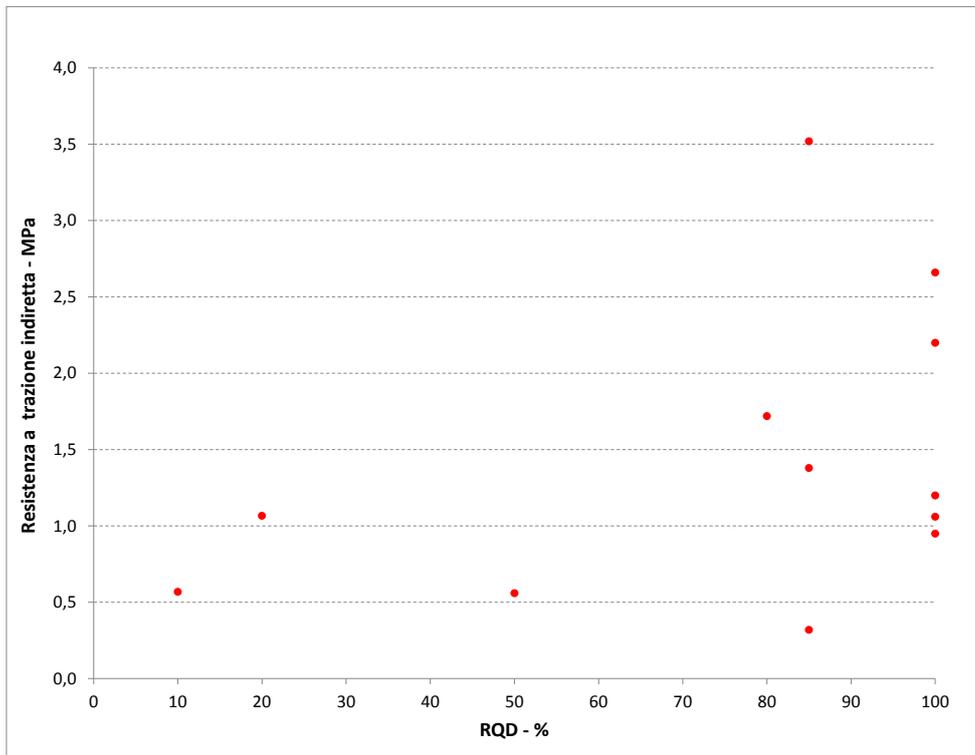


Figura 6-24. Resistenza a trazione indiretta in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

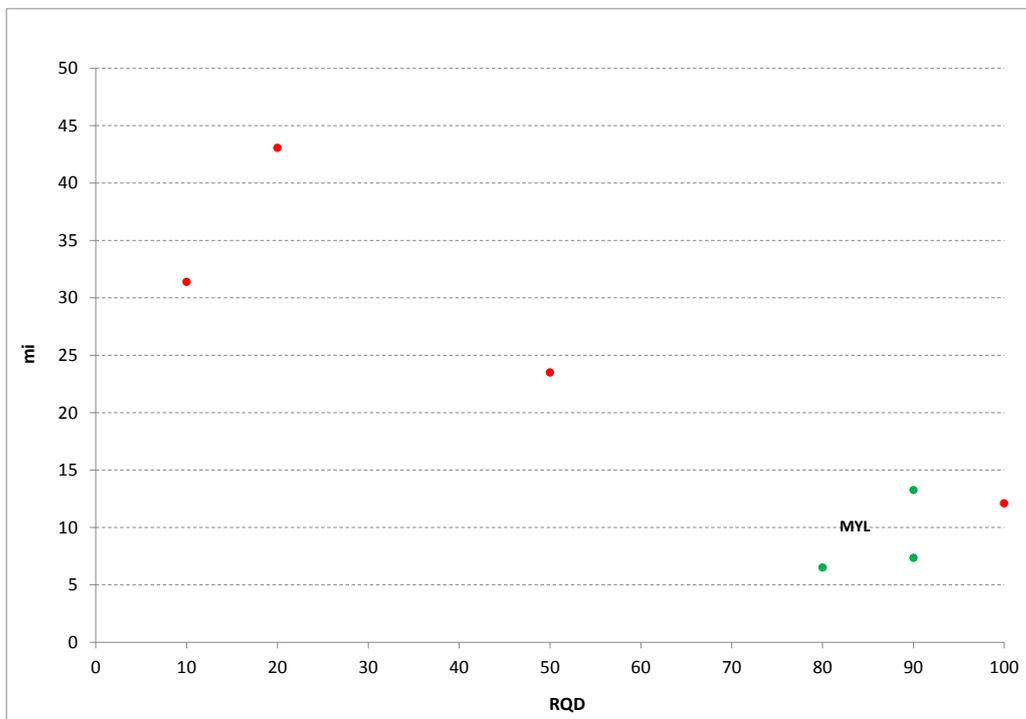


Figura 6-25. Parametri mi Hoek-Brown in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 76 di 110 |

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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 77 di 110 |

| 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 (brasiliana) 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.

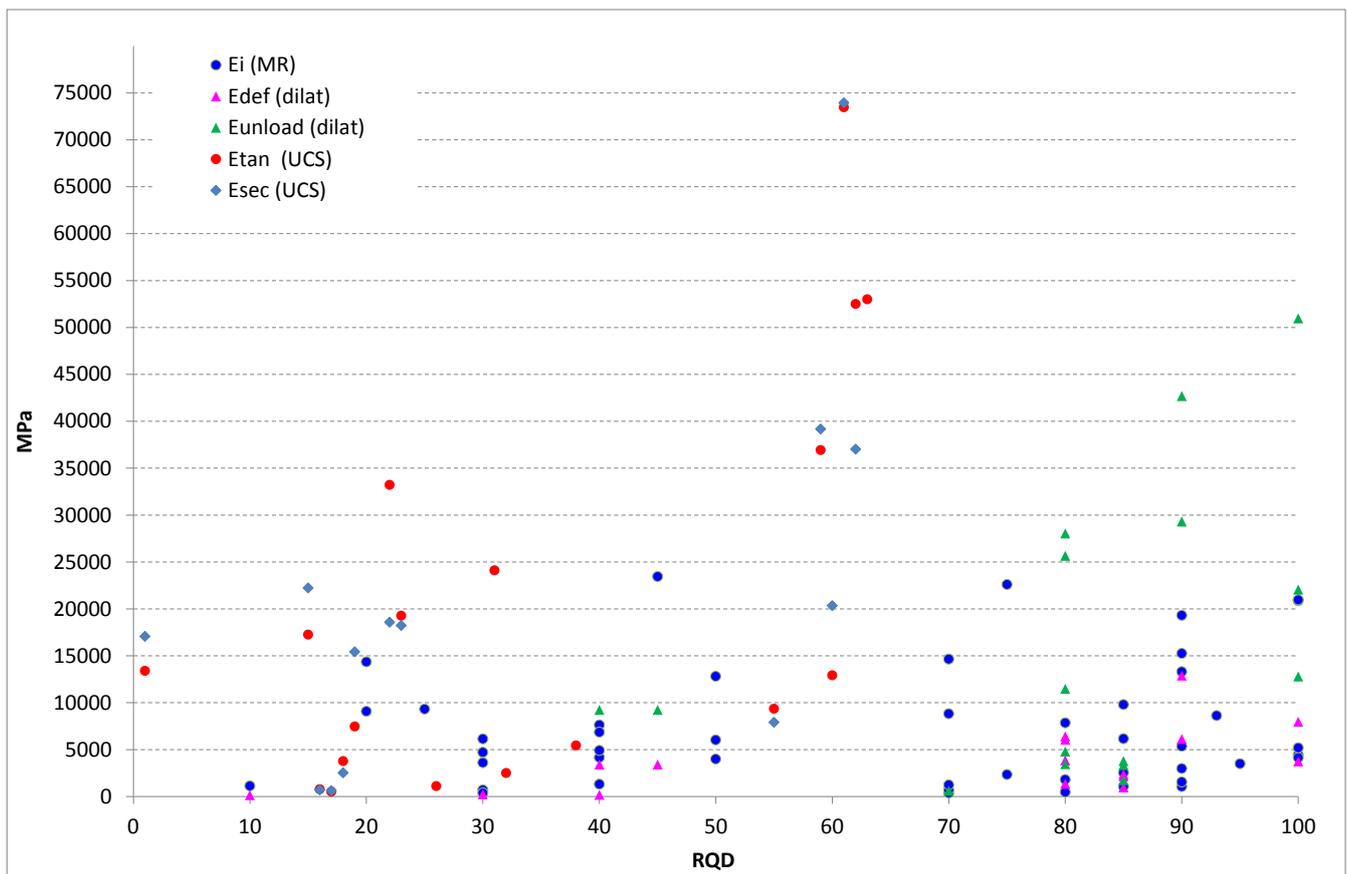


Figura 6-26. Caratteristiche di deformabilità in funzione dell'indice RQD proprio del settore di determinazione

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 79 di 110 |

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  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 <table border="1" data-bbox="1420 224 1532 313"> <tr> <td>Foglio 80 di 110</td> </tr> </table> | Foglio 80 di 110 |
| Foglio 80 di 110 | | |

6.1.3 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  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 81 di 110 |

- **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

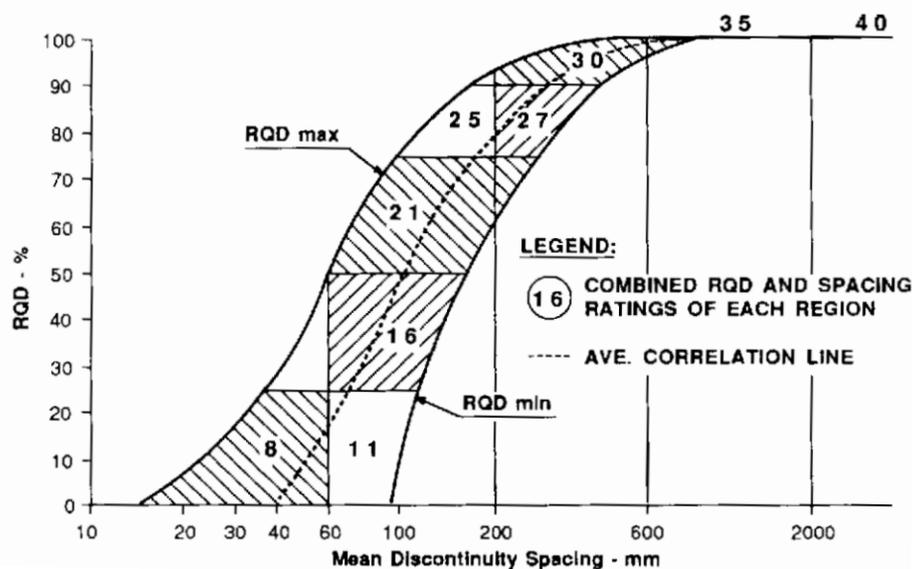


Figura 6-27. Nomogramma per la determinazione del punteggio combinato associato allo stato di fratturazione dell'ammasso (RQD) ed alla spaziatura delle discontinuità, nell'ambito della definizione dell'indice RMR.

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 83 di 110 |

- 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  | ALTA SORVEGLIANZA  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 84 di 110 |

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.

6.1.4 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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 85 di 110 |

- **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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 86 di 110 |

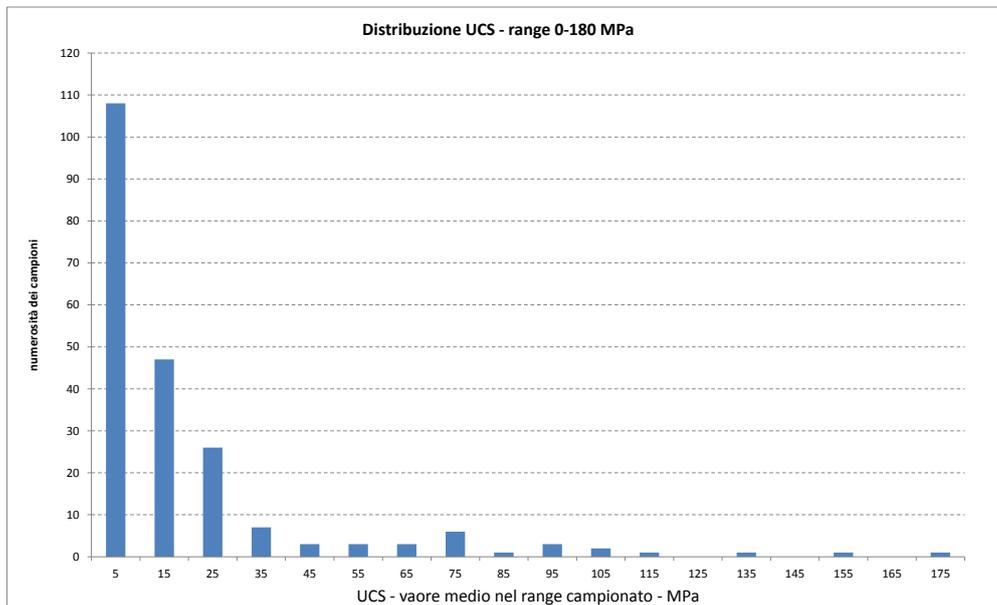
Con riferimento al **gruppo geo-meccanico G1**, il range 10-17 MPa, ottenuto dall'analisi completa dei sondaggi di PP – PD - PE, discende dai valori medi delle 2 distribuzioni analizzate, ovvero:

- 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 6-28. 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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 88 di 110 |

| 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 | m_i (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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 89 di 110 |

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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 90 di 110 |

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) | | | |
|------------|--|---------------------|------------------------|------------------|
| | Eunloading 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.

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 |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 |
| | Foglio 92 di 110 |

6.1.5 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 sotterranea 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 sotterraneo 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.

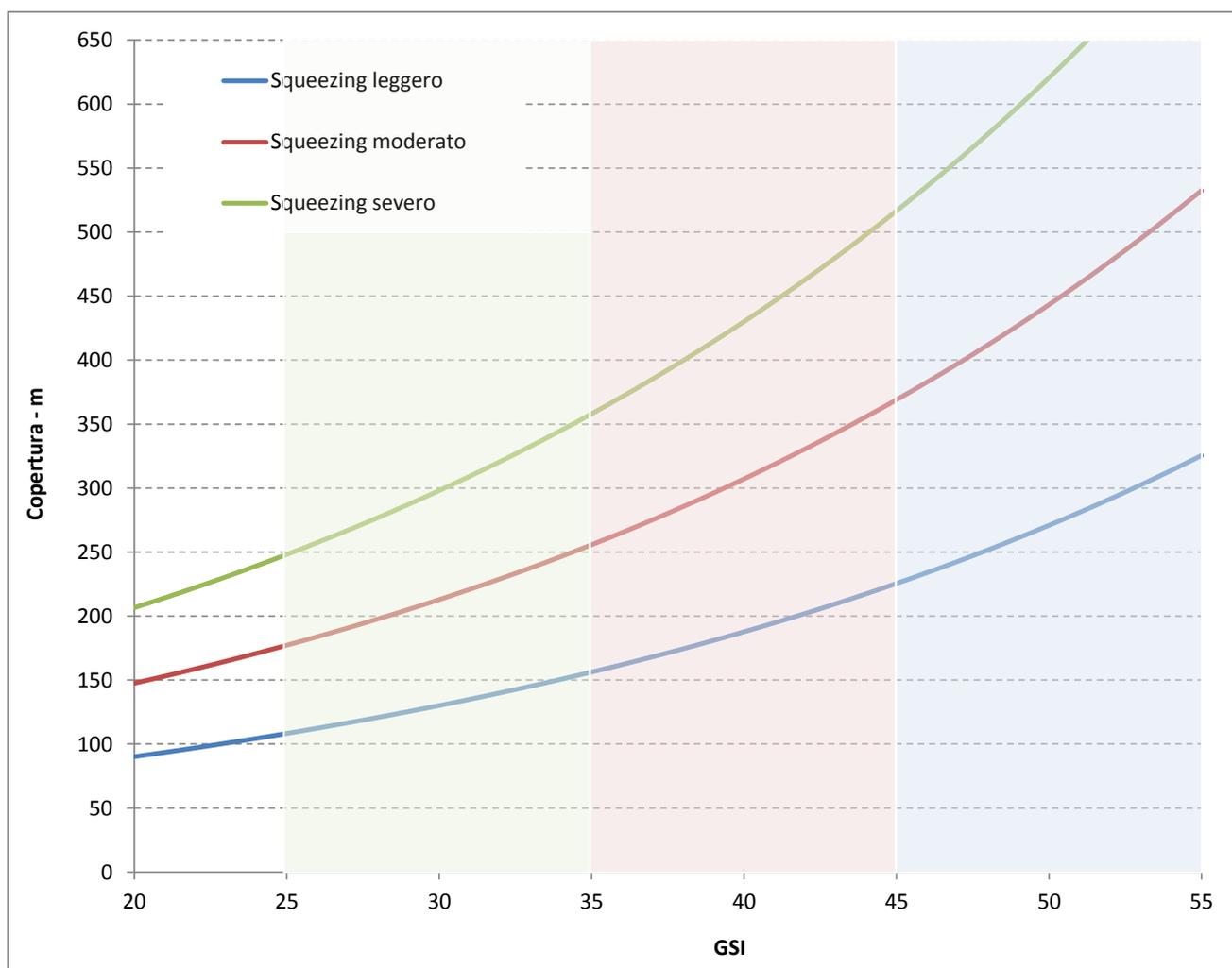


Figura 6-29. Curve Potenziale di squeezing secondo Goel (1994)

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 94 di 110 |

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.

Critério 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.

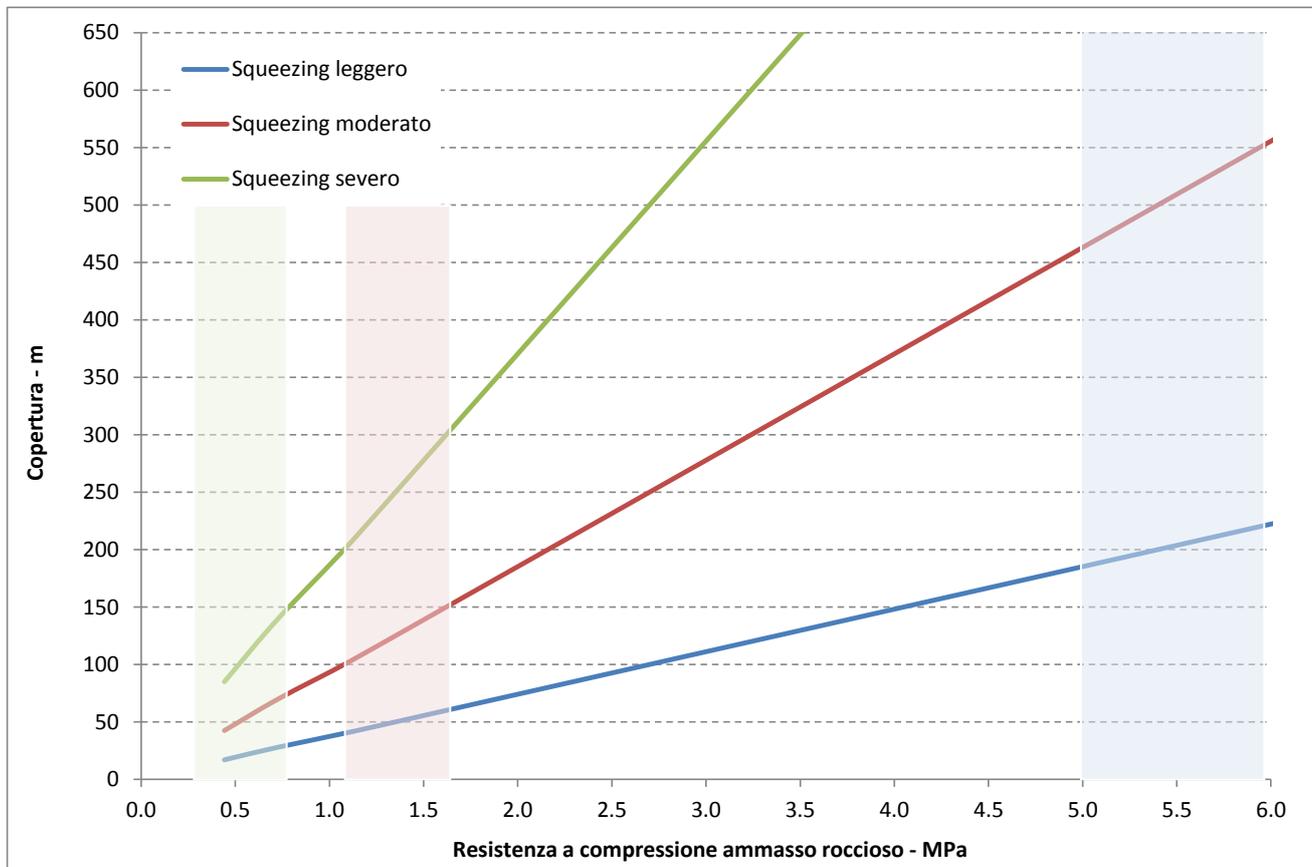


Figura 6-30. Potenziale di squeezing secondo Barla (1995)

Critério di HOEK & MARINOS (2000)

Il grado di *squeezing* è determinato sulla base del rapporto $\sigma_{c\ amm} / p_0$, dove $\sigma_{c\ amm}$ 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:

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

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.

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

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

| Classe | Convergenza ε (%) | 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.

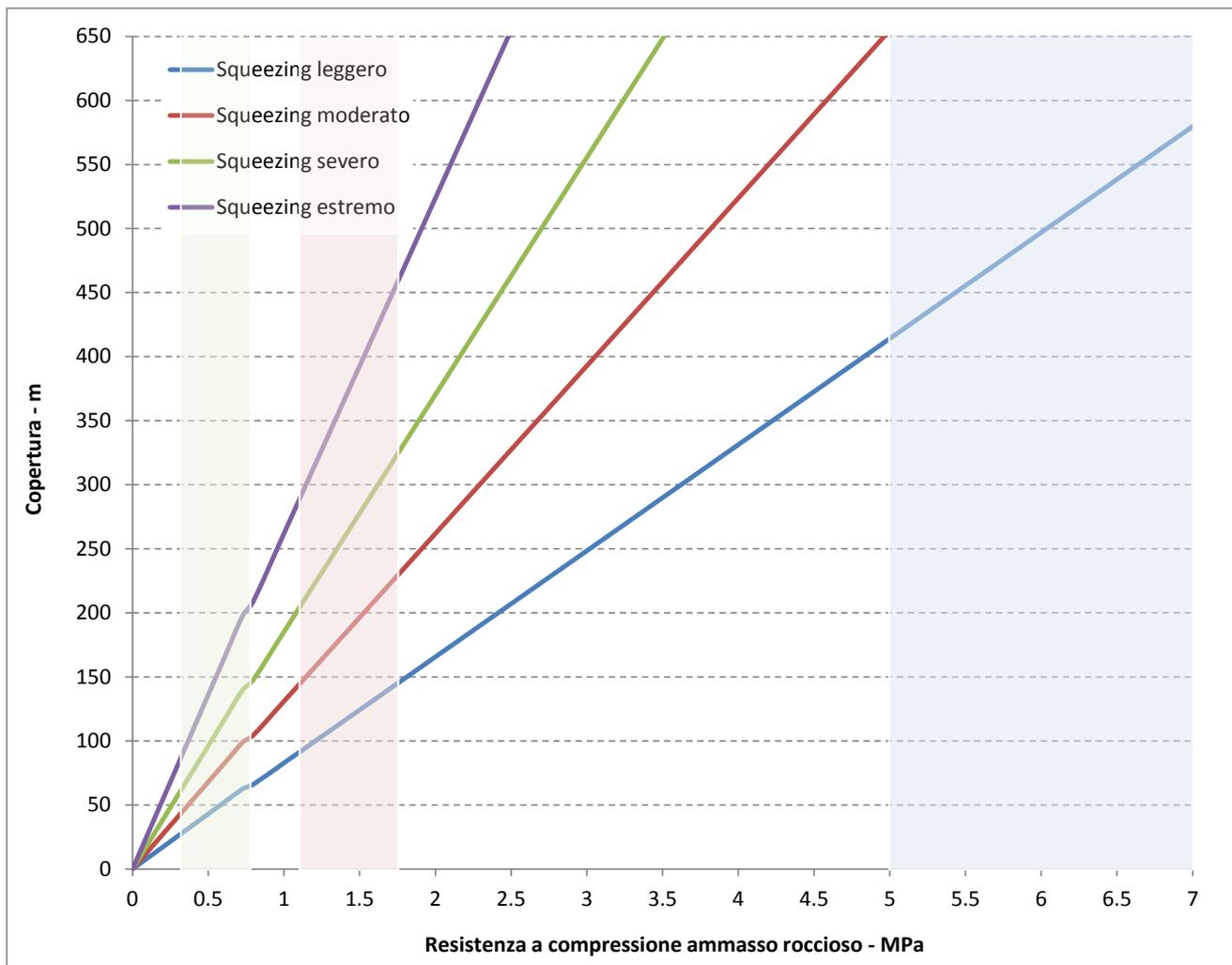


Figura 6-31. Potenziale di squeezing secondo Hoek-Marinos (2000)

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 97 di 110 |

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  | |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 | Foglio 98 di 110 |

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 m:
- 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  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 99 di 110 |

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.

6.2 Argilloscisti neri - Scisti Micaceo Carbonatici Milonitici (Myl)

La caratterizzazione geotecnica/geomeccanica dell'ammasso roccioso compreso nella *Fascia Milonitica di Isoverde*, discende dall'interpretazione dei dati raccolti durante la Campagna di Indagine del PD, in particolare dall'esecuzione dei sondaggi a carotaggio continuo elencati nella seguente tabella.

| Sondaggio Codifica COCIV | Progressiva linea m | Distanza asse tracciamento linea m |
|-----------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| SL42 | 9200 | 250 |
| SR11 | 10450 | 10 |
| SR12 | 10750 | 10 |
| SR13 | 11950 | 50 |

Dallo studio dei dati posseduti, si è potuto associare il comportamento di questa formazione a quella delle Argilliti a Palombini, e si è adottata la medesima classificazione in gruppi geo-meccanici elaborata per la formazione degli argilloscisti filladici, con la relativa assunzione dei parametri fisici, meccanici e di deformabilità (cfr § 6.2.5). Si riportano nei paragrafi seguenti i dati relativi all'ammasso roccioso compreso nella *Fascia Milonitica di Isoverde*, isolati da quelli delle aP che sono stati discussi precedentemente.

6.2.1 Caratteristiche fisiche

L'analisi del dato sulla determinazione del peso di volume naturale dei campioni estratti dalle verticali di indagine ha condotto ad un valor medio di 27 kN/m³.

Il grafico che segue presenta le misurazioni del peso di volume secco, correlate alla profondità di prelievo del campione di riferimento.

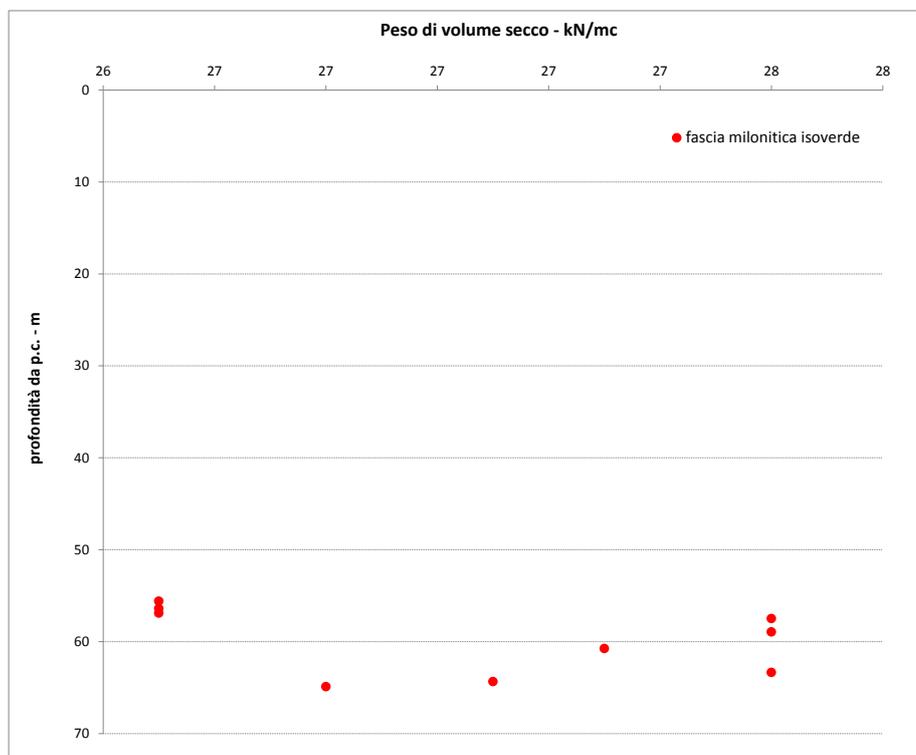


Figura 6-32. Peso di volume secco in funzione della profondità dal p.c.

Le conducibilità idrauliche, laddove disponibili come risultato delle prove di permeabilità LUGEON in foro di sondaggio, indicano un valor medio nell'ordine dei 4.0 -5.0 E-06 m/s.

6.2.2 Caratteristiche di resistenza

Si riporta nel seguito la distribuzione delle resistenze a compressione mono-assiale determinata per via diretta da prove di laboratorio e/o per via indiretta tramite correlazione con le determinazioni del Point Load Strength Index.

In relazione alla notevole numerosità del campione di rispetto alle prove di compressione monoassiale, si è verificata la calibratura del fattore di correlazione k50 (con $UCS = K50 \cdot I_s50$), alla luce dei dati sperimentali disponibili e della letteratura tecnica (Palmström A.: RMI – a rock mass characterization system for rock engineering purposes, 1994). L'intero campione di dati Point Load Strength Index (PP+PD+PE) è stato dunque analizzato con riferimento a fattori di correlazione k50 compresi fra 14-16, al variare del dato I_{s0} trattato, d'accordo con le indicazioni di letteratura mostrate nella tabella seguente.

| 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 6-22 – Point Load Strenght Index – parametro k_{50} in funzione I_{50} (Palmstrom, 1994)

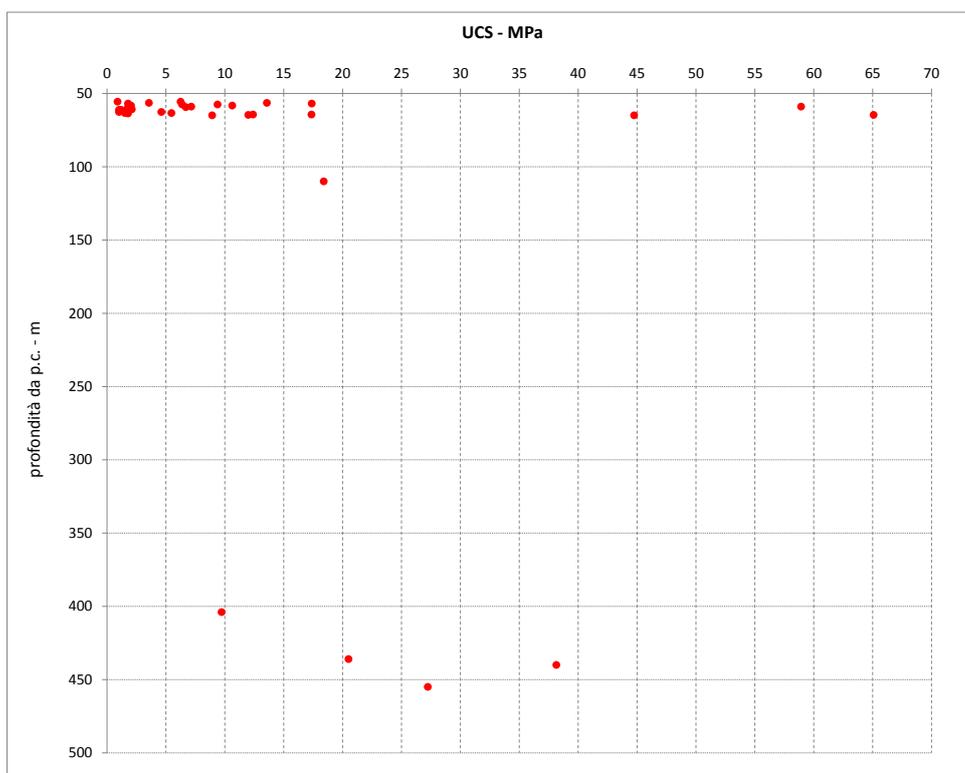


Figura 6-33 Distribuzione UCS – profondità di campionamento dal p.c.

Non si evidenzia alcuna particolare correlazione della resistenza a compressione mono-assiale con la profondità.

La distribuzione dei valori di UCS mostra una concentrazione nell'intervallo 0-20 MPa, considerato rappresentativo delle resistenze della matrice rocciosa costituita da un litotipo assimilabile ad argilloscisto. La frequenza % campionamento UCS per range di ampiezza 2 MPa e la relativa curva di Frequenza cumulata % sono mostrate nel grafico seguente.

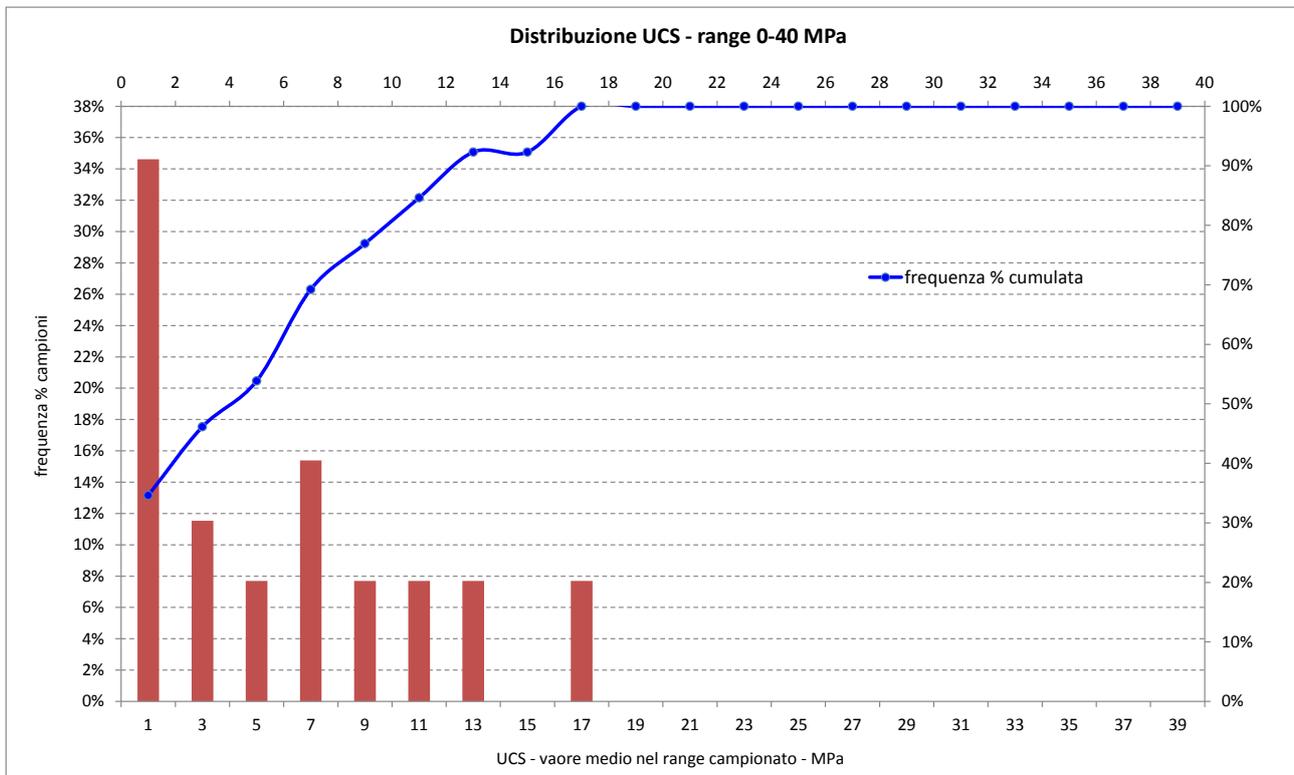


Figura 6-34 Frequenza % campionamento UCS per range di ampiezza 2 MPa e curva di Frequenza cumulata %.

La determinazione dell'UCS è stata inoltre associata all'indice RQD rappresentativo dello stato di fratturazione dell'ammasso, calcolato alla profondità di prelievo del campione o di determinazione del Point Load Strength Index. Dall'analisi del grafico che segue, emerge una tendenza alla proporzionalità dell'UCS nei confronti dell'RQD. Si evidenzia che i dati si concentrano su 4 valori distinti di RQD mediamente misurati sulle carote prese in esame.

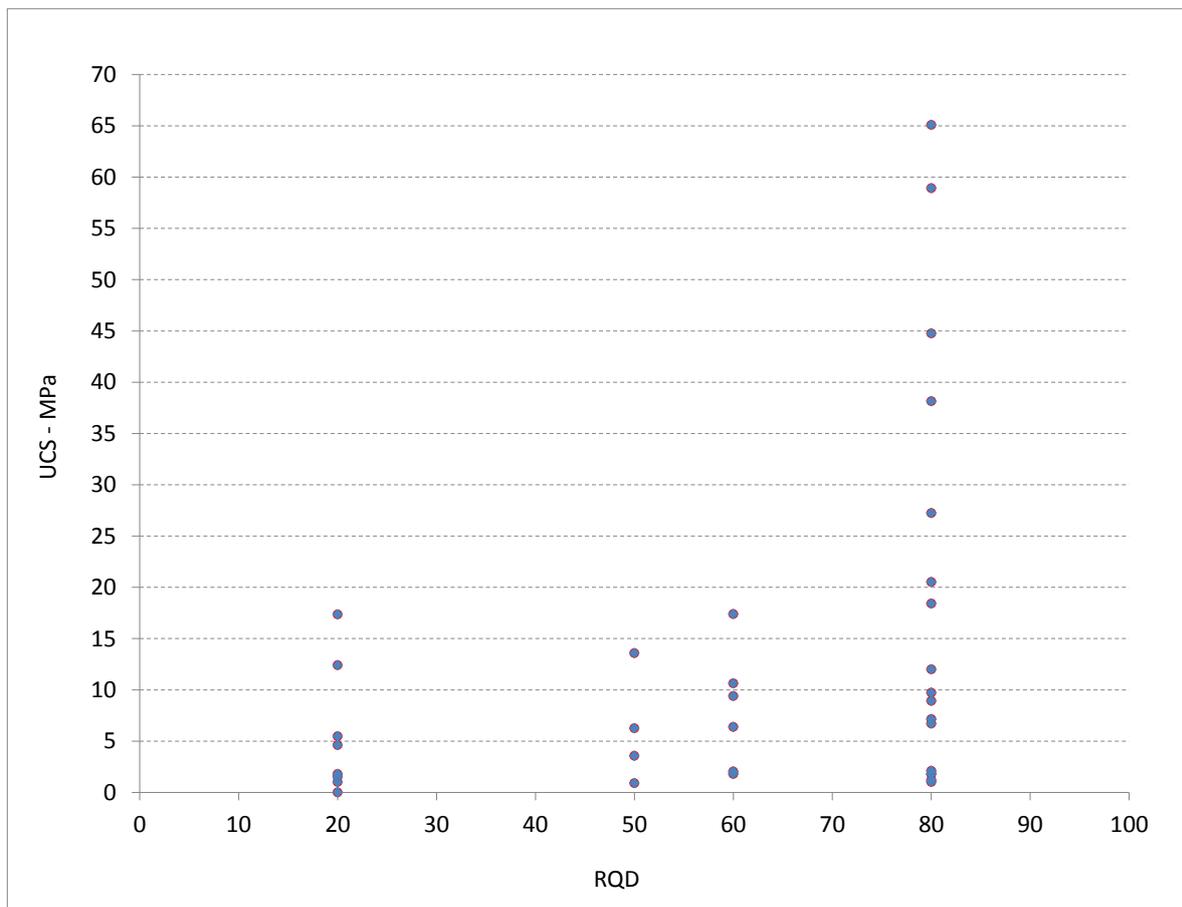


Figura 6-35 Distribuzione UCS – RQD

Le prove di laboratorio a trazione indiretta forniscono un valore di resistenza variabile da 2.30 a 6.90 MPa (media 4.00 MPa). L'elaborazione delle prove di compressione triassiale su provini di roccia ha condotto alla determinazione diretta del parametro m di Hoek-Brown variabile da 6.5 a 13.2 con media 9.07 (in linea con le indicazioni da letteratura).

6.2.3 Caratteristiche di deformabilità

Laddove disponibili sono state 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, è stato 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}).

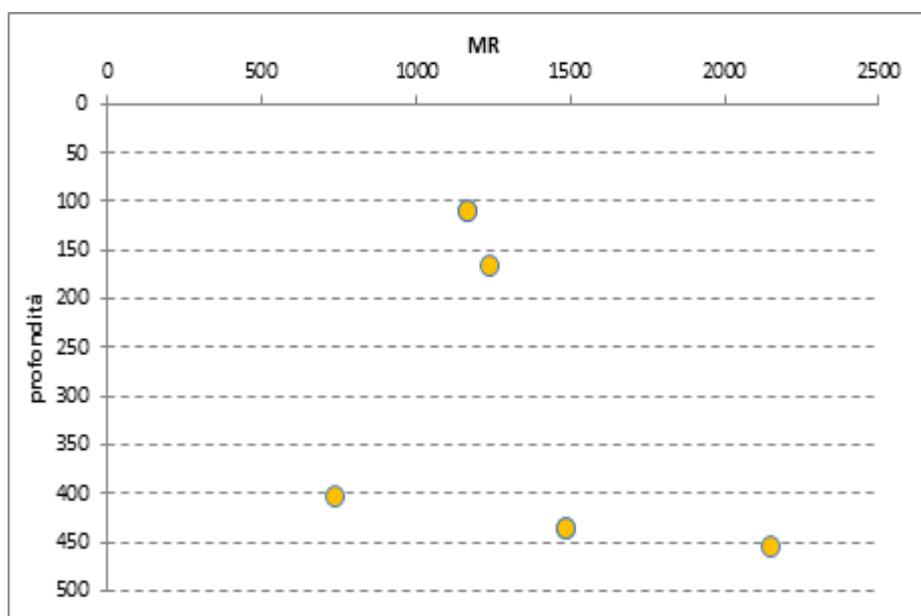


Figura 6-36 Distribuzione Mr - profondità

La tabella che segue fornisce i parametri rappresentativi della distribuzione statistica dei valori di E_i (modulo elastico della matrice rocciosa) calcolato secondo Deere, Palmstrom e Singh.

Sono stati adottati i valori MR pari a 700 (in analogia a quanto effettuato) per la formazione degli Argilloscisti filladici e 1100 (valor medio ottenuto dall'elaborazione dei soli dati relativi ai campioni riferiti alla formazione in esame - MYL).

| | Ei - 700 | | Ei - 1100 | |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| # campione | 34 | 31 | 34 | 31 |
| max | 45562 | 26705 | 71597 | 41965 |
| min | 627 | 627 | 986 | 986 |
| med | 9093 | 6162 | 14289 | 9683 |
| sqm | 11341 | 6109 | 17821 | 9600 |

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 105 di 110 |

| | | | | |
|---------|-------------|------------|-------------|------------|
| sqm/med | 125% | 99% | 125% | 99% |
|---------|-------------|------------|-------------|------------|

Il grafico che segue mostra la distribuzione dei Moduli elastici determinati attraverso le prove di carotaggio sonico, in relazione alla profondità di campionamento.

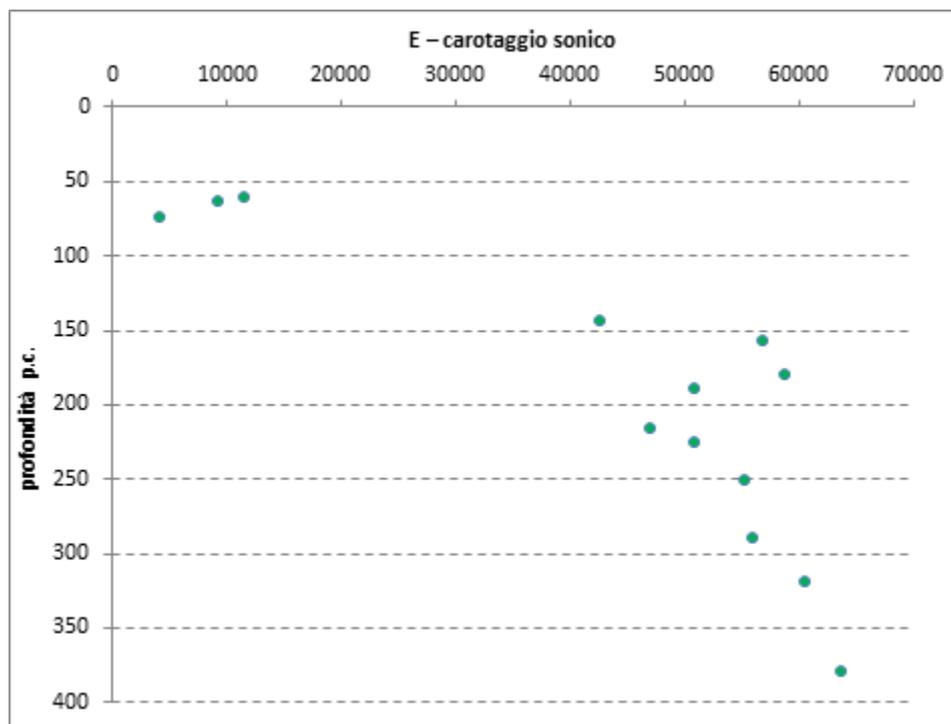


Figura 6-37 Distribuzione Modulo elastico da carotaggio sonico - profondità

6.2.4 Classificazione geomeccanica – calcolo del GSI

Dall'elaborazione dei log stratigrafici riferiti ai sondaggi geognostici eseguiti nella formazione in disamina, discende la classificazione geo-meccanica secondo il GSI, il cui esito delinea un quadro costituito dalla presenza di tre condizioni strutturali tipiche per l'ammasso, mediamente riconducibili ai seguenti range di GSI:

- 45÷55 - per la condizione d'ammasso discretamente compatto e de-fratturato
- 25÷35 - per condizione d'ammasso fratturato/alterato
- 35÷45 - associabile a condizioni d'ammasso intermedie fra le due sopra menzionate.

6.2.5 Sintesi caratterizzazione geo-meccanica

In relazione agli esiti delle elaborazioni condotte sulla formazione della Fascia Milonitica, si assume per la stessa la medesima classificazione in gruppi geo-meccanici elaborata per la formazione degli argilloscisti filladici, con la relativa assunzione dei parametri fisici, meccanici e di deformabilità.

In particolare, lo studio dei profili geotecnici e geologici dell'area escludono la presenza di zone di faglia nell'area in esame. Pertanto la formazione degli Scisti Micaceo Carbonatici Milonitici (Myl) si è

| | | |
|---|--|----------------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  | |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> | <p>Foglio 106 di 110</p> |

inquadrata da un punto di vista geo-meccanico nei gruppi 1 e 2 (2a e 2b) individuati per gli argilloscisti filladici.

Si riporta nel seguito il 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;

6.3 Calcari di Gallaneto (cG)

Come asserito in precedenza, c'è la possibilità che il tracciato in esame possa incontrare strati relativi alla formazione dei Calcari di Gallaneto. Per completezza si riportano i parametri desunti dai rilievi in situ di Progetto Definitivo.

RMR (rilievi di PD – ex NV11) : 40-50

GSI: 35 – 45

| Litologia | σ^*c (MPa) | GSI (-) | γ (kN/m ³) | m_i^* | D | MR* | E (MPa) |
|----------------------|-------------------|---------|-------------------------------|---------|---|---------|------------|
| Calcari di Gallaneto | 40-50 | 35-45 | 26-27 | 8±3 | 0 | 900±100 | 3000-10000 |

*: i valori di σ_c , m_i , MR e sono ottenuti da dati di letteratura

Tabella 6-23 – Caratterizzazione geo-meccanica dei Calcari di Gallaneto: caratteristiche fisiche e di deformabilità

A partire dai valori di GSI e dai valori di letteratura relativi ai calcari, si sono desunti i moduli elastici operativi da impiegare nel calcolo mediante la formulazione di Hoek & Diederichs (2006) precedentemente descritta.

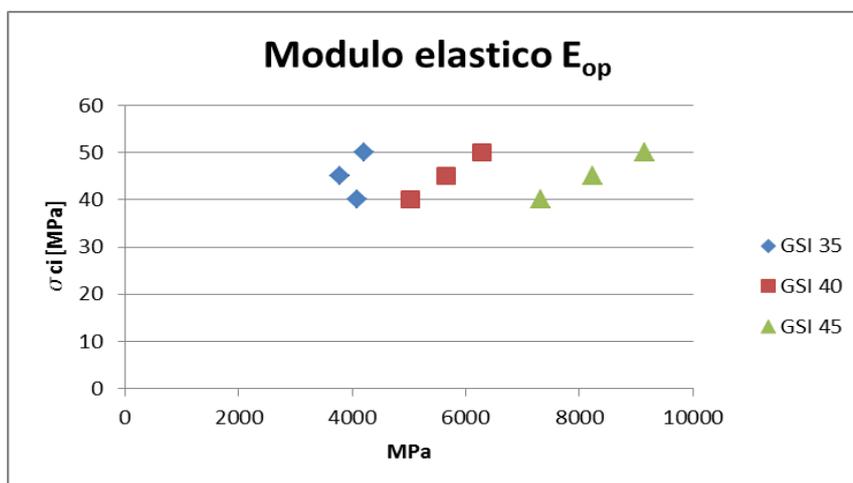


Figura 6-38. Moduli elastici operativi stimati

A titolo di confronto si riportano infine i parametri linearizzati di Mohr-Coulomb in corrispondenza della Finestra in esame sempre relativi alla fase di PD.

| Litologia | γ (kN/m ³) | c' (KPa) | Φ (°) | ν (-) | E (MPa) |
|----------------------|-------------------------------|------------|------------|-----------|------------|
| Calcari di Gallaneto | 26-27 | 300-1450 | 25-35 | 0.25-0.3 | 5000-11000 |

Tabella 6-24 – Caratterizzazione geo-meccanica Calcari di Gallaneto- parametri di Mohr Coulomb adottati in PD

| | |
|--|--|
| GENERAL CONTRACTOR  Consorzio Collegamenti Integrati Veloci | ALTA SORVEGLIANZA  GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE |
| | IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03 Foglio 108 di 110 |

6.4 Successioni litoidi di Cravasco-Voltaggio (cV, B", Se")

In conformità con quanto scritto nell'inquadramento geologico, e più in dettaglio riportato in relazione geologica, alla quale si rimanda per ulteriori dettagli, la tratta in esame può incontrare la zona di piega dell'unità Cravasco-Voltaggio, con lenti anche decametriche di calcari, basalti e serpentiniti. I materiali di scavo compresi in questa zona caotica, caratterizzata da forte tettonizzazione e improvvisi passaggi intraformazionali, hanno comunque un carattere litoide e caratteristiche geomeccaniche attese da discrete. Cautelativamente, in funzione anche delle incertezze geologiche che caratterizzano necessariamente una zona di piega tettonica, questa è stata caratterizzata con il range riportato in tabella.

| Formazione | γ [kN/m ³] | ν [-] | E_{op} [GPa] | σ_c [MPa] | m_i [-] | GSI [-] |
|---|----------------------------------|--------------|-------------------|---------------------|--------------|------------|
| Un_CrVo <i>(ammasso intensamente fratturato)</i> | 26 | 0,25-0,30 | 0,8÷1,2 | 10÷20 | 19 | 25÷35 |

Tabella 6-25. Successioni litoidi di Cravasco-Voltaggio: caratteristiche geomeccaniche

| | |
|---|--|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> <p>Foglio 109 di 110</p> |

7 BIBLIOGRAFIA

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

| | | |
|---|--|----------------------------------|
| <p>GENERAL CONTRACTOR</p>  | <p>ALTA SORVEGLIANZA</p>  | |
| | <p>IG51-00-E-CV-RB-GN00-00-008-A03</p> | <p>Foglio 110 di 110</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.