

Provincia di Cuneo
S.S. 28 del Colle di Nava
Lavori di realizzazione della Tangenziale di Mondovì con collegamento alla S.S. 28 Dir – 564 e al casello A6 "Torino–Savona" – III Lotto (Variante di Mondovì)

PROGETTO DEFINITIVO

COD. T008

PROGETTAZIONE: RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO PROGETTISTI	MANDATARIA: 	MANDANTI:  
IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: <i>Ing. Andrea Renso – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2413</i>	IL PROGETTISTA: <i>Ing. Corrado Pesce – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A1984</i>	
IL GEOLOGO: <i>Geol. Emanuele Fresia – TECHNITAL Ordine Geologi Veneto n. A501</i>	GRUPPO DI PROGETTAZIONE: COORDINAMENTO PROGETTAZIONE E PROGETTAZIONE STRADALE: <i>Ing. Carlo Vittorio Matildi – MATILDI + PARTNERS Ordine Ingegneri Provincia di Bologna n. 6457/A</i> COORDINAMENTO PROGETTAZIONE E COORDINATORE STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE: <i>Ing. Edoardo Piccoli – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A3381</i>	
IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE: <i>Ing. Paolo Barrasso – MATILDI + PARTNERS Ordine Ingegneri Provincia di Bologna n. A9513</i>	OPERE D'ARTE MAGGIORI GALLERIA: <i>Ing. Corrado Pesce – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A1984</i> OPERE D'ARTE MAGGIORI PONTI E MINORI: <i>Ing. Stefano Isani – MATILDI + PARTNERS Ordine Ingegneri Provincia di Bologna n. A4550</i>	
VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO: <i>Ing. Giuseppe Danilo Malgeri</i>	GEOTECNICA: <i>Ing. Alessandro Rizzo – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. A19598</i> IDROLOGIA ED IDRAULICA: <i>Ing. Simone Venturini – TECHNITAL Ordine Ingegneri Provincia di Verona n. A2515</i>	
PROTOCOLLO:	DATA:	

11 – OPERE D'ARTE MAGGIORI: GALLERIA
11.1 – PARTE GENERALE
RELAZIONE GEOMECCANICA

CODICE PROGETTO	NOME FILE	PROGR. ELAB.	REV.	SCALA:
DPT00008D16	11-01_P00_GN00_STR_RE01_B	11-01		/
	CODICE ELAB.			
	P00GN00STRRE01		B	
D				
C				
B	Istruttoria ANAS	Mag. 2020	Technital	Longo S. Piccoli E. Pesce C.
A	EMISSIONE	Mar. 2020	Technital	MboazioSC. Piccoli E. Pesce C.
REV.	DESCRIZIONE	DATA	SOCIETA'	REDATTO VERIFICATO APPROVATO

SOMMARIO

1	INTRODUZIONE	4
2	OGGETTO E SCOPO	6
3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	7
4	ELABORATI PROGETTUALI DI RIFERIMENTO.....	8
5	INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO	9
5.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	9
5.2	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	12
5.3	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	13
6	INDAGINI ESEGUITE	15
6.1	INDAGINI PREGRESSE	15
6.1.1	Indagini di progetto preliminare 2003.....	15
6.1.2	Indagini e monitoraggi ARPA 2011	17
6.1.3	Indagini SNAM Rete Gas 2016	18
6.1.4	Banca dati ISPRA.....	19
6.2	INDAGINI DI PROGETTO DEFINITIVO 2019	20
6.2.1	Sondaggi geognostici.....	20
6.2.2	Prove in sito	23
6.2.3	Prove di laboratorio.....	25
6.2.4	Indagini geofisiche.....	27
7	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	30
7.1	DEPOSITI QUATERNARI	30
7.1.1	Unità Ab. Depositi alluvionali dei piani terrazzati	30
7.2	FORMAZIONI MIOCENICHE.....	33
7.2.1	Unità Cs. Formazione di Cassano Spinola	33
7.2.2	Unità Sa. Marne di S. Agata Fossili	37
7.2.3	Unità L. Formazione di Lequio	52
8	PREVISIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DEI MATERIALI INTERESSATI DAGLI SCAVI	66
8.1	GALLERIA NATURALE	66
8.2	AREE DI IMBOCCO.....	66

ELENCO DEI SIMBOLI

σ_{v0} (MPa)	=	sforzo verticale totale in sito
σ'_{v0} (MPa)	=	sforzo verticale efficace in sito
σ_1 (MPa)	=	sforzo principale maggiore a rottura
σ_3 (MPa)	=	sforzo principale minore a rottura
RQD	=	Rock Quality Designation
RMR	=	Rock Mass Rating
GSI	=	Geological Strength Index
σ_{ci} (MPa)	=	resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta
σ_{ti} (MPa)	=	resistenza a trazione della roccia intatta
σ_{cm} (MPa)	=	resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso roccioso
σ_{tm} (MPa)	=	resistenza a trazione dell'ammasso roccioso
LL (%)	=	limite liquido
LP (%)	=	limite plastico
IP (%)	=	indice di plasticità
w_n (%)	=	contenuto naturale d'acqua
OCR (-)	=	grado di sovraconsolidazione
g (m/s)	=	accelerazione di gravità
γ (kN/m ³)	=	peso di volume totale
e_0 (-)	=	indice dei vuoti in sito
DR (%)	=	densità relativa
c' (kPa)	=	coesione in sforzi efficaci
c_u (kPa)	=	coesione non consolidata non drenata
ϕ' (°)	=	angolo di attrito di picco, in sforzi efficaci
E (MPa)	=	modulo di elasticità – valore operativo
ν (-)	=	coefficiente di Poisson
K_0 (-)	=	coefficiente di spinta a riposo
K (m/s)	=	coefficiente di permeabilità
V_s (m/s)	=	velocità delle onde di taglio
V_p (m/s)	=	velocità delle onde longitudinali

SPT = prova penetrometrica dinamica standard (Standard Penetration Test)

NSPT (colpi/0.3 m) = numero di colpi SPT per la penetrazione di 0.3 m (=1 piede)

BIBLIOGRAFIA

- [1] AFTES (2000). Recommendations for the design of sprayed concrete for underground structures
- [2] Barla G. (2005) Sviluppi nell'analisi progettuale delle opere in sotterraneo. Rivista italiana di Geotecnica 3/2005
- [3] Carranza-Torres C. and Fairhurst C. (1999). General formulation of the elastoplastic response of openings in rock using the Hoek-Brown failure criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 36 (6), 777-809
- [4] Hoek E., Marinos P. G., Marinos V. P. (2004). Characterization and engineering properties of tectonically undisturbed but lithologically varied sedimentary rock masses - International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences
- [5] Hoek E., Carranza-Torres C., Diederichs M., Corkum B. (2008). The 2008 Kersten Lecture. Integration of geotechnical and structural design in tunneling. 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis, February 2008
- [6] Lunardi P. (1994-1996). Progetto e costruzione di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli. Quarry and Construction, Marzo 1994, Marzo 1995, Aprile 1996
- [7] Panet M. (1995). Le Calcul Des Tunnels Par La Méthode Convergence-Confinement, edizioni ENPC, Parigi
- [8] Tanzini, M. (2006). Gallerie. Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione. Seconda Edizione. Dario Flaccovio Editore. Palermo

1 INTRODUZIONE

La nuova tangenziale di Mondovì (Cuneo) rientra nel piano di riordino del sistema viario del Piemonte Sud Occidentale. Sviluppata interamente nel territorio comunale di Mondovì drena il flusso di traffico proveniente dal quadrante Sud-Est collegando la S.S.28, la S.P.5 e la S.S.564 con l'Autostrada A6 Torino-Savona presso lo svincolo di Mondovì.

La progettazione e realizzazione della suddetta arteria stradale è stata suddivisa in 3 lotti funzionali, Figura 1.1, dei quali i primi due sono stati già completati e sono pienamente operativi, mentre il terzo è oggetto di progettazione.

Il lotto 3 di cui al presente Progetto Definitivo è lungo 2692 m circa e, con direzione sostanzialmente Est-Ovest, mette in collegamento a Sud del centro abitato la S.P.5 Villanova – Mondovì con la S.S. 28 del Colle di Nava.

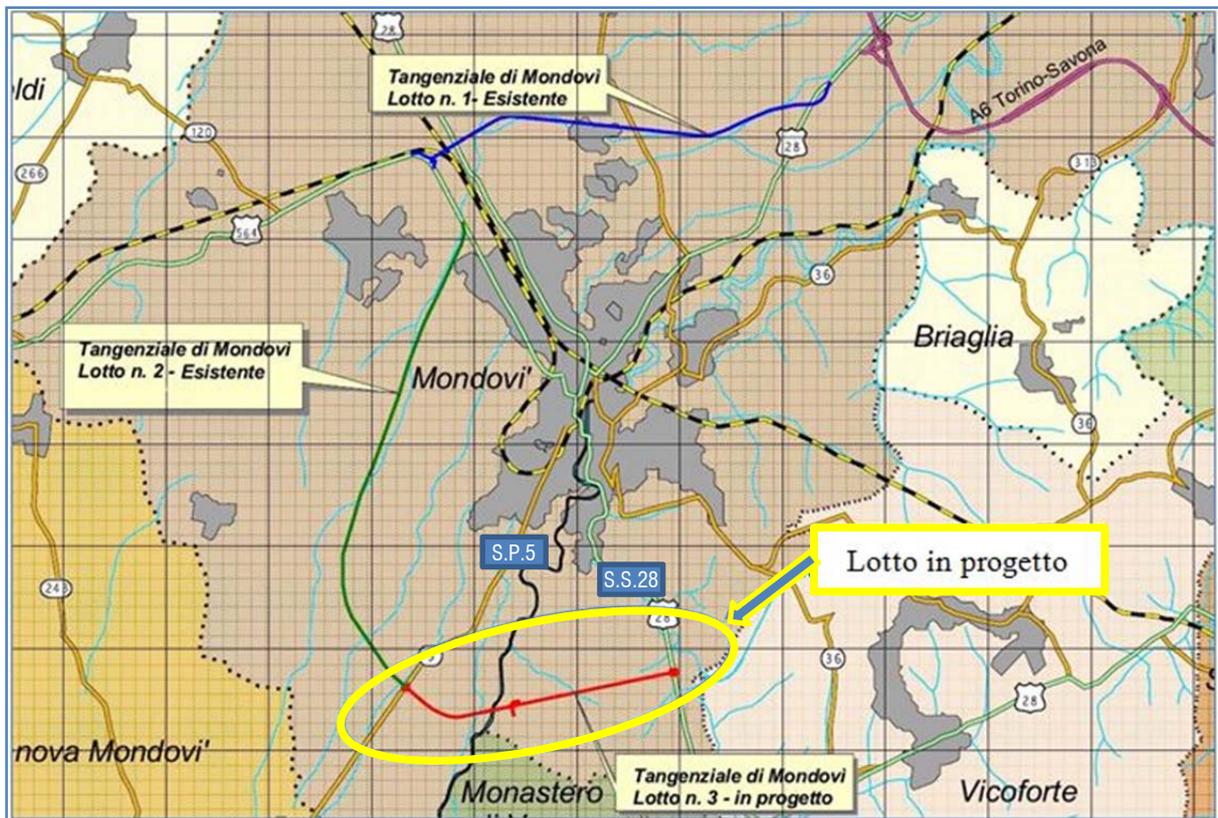


Figura 1.1 Tangenziale di Mondovì: individuazione del lotto in progetto

L'arteria stradale, in analogia con i lotti precedenti, è una classe C1 a doppio senso di marcia con corsie da 3.75 m e banchine laterali da 1.5 m.

L'intervento ha inizio sull'esistente rotatoria lungo la S.P.5, al termine del lotto 2, per poi proseguire in direzione Est. Dopo un tratto di circa 500 m che vede in sequenza un tratto in rilevato, uno in scavo ed una galleria artificiale, il tracciato scavalca il Torrente Ellero su viadotto e raggiunge in sponda destra il piede della collina monregalese di S. Lorenzo, poco a valle di Via Vecchia di Frabosa. Al viadotto fa immediatamente seguito la galleria naturale S. Lorenzo, che attraversa una dorsale allungata in direzione Nord – Sud. L'opera in sotterraneo sottopassa non solo

Via Vecchia di Frabosa ma anche altre due viabilità ad essa parallele, poste a quota maggiore, che sono Via delle Oche e Via Vecchia di Monastero. Terminata la galleria naturale il tracciato prosegue con un breve tratto all'aperto di circa un centinaio di metri fino a collegarsi, tramite una seconda rotatoria, con la S.S.28.

La presente relazione riguarda nel dettaglio la galleria naturale S. Lorenzo. L'opera è compresa tra progressive 1+125,00 e 2+536,92 ed ha quindi uno sviluppo totale di 1411,92 m, di cui 1296 m in naturale ed i restanti in galleria artificiale, con 60 m in corrispondenza dell'imbocco ovest e 55,92 m in quello est.

La seguente Figura 1.2 riporta uno stralcio del profilo di progetto a scale sfalsate.

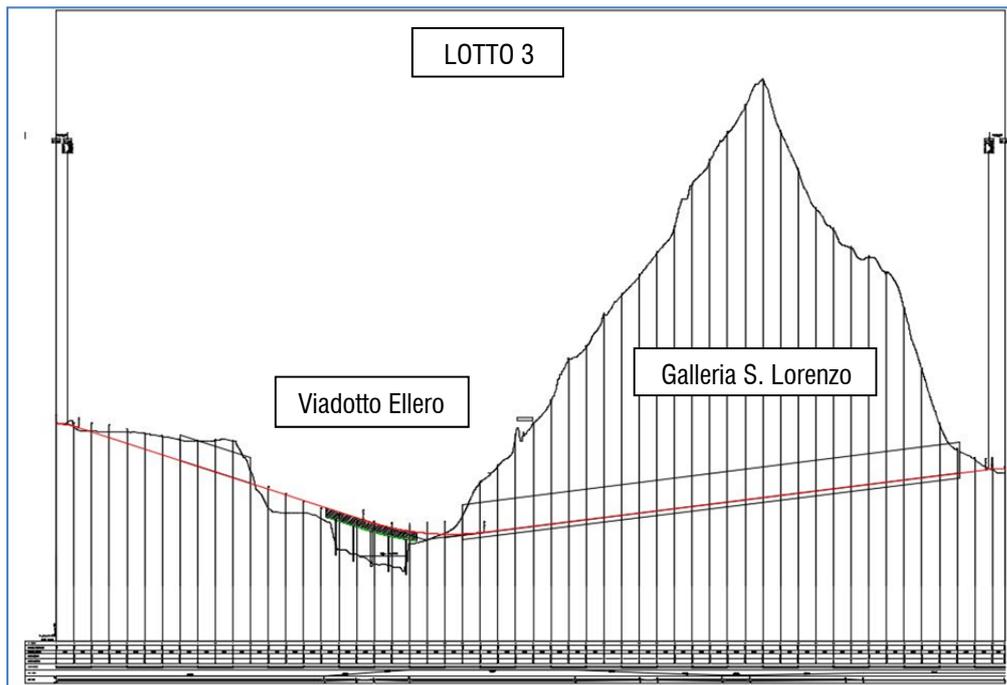


Figura 1.2 Profilo di progetto

2 OGGETTO E SCOPO

Oggetto del lavoro è l'illustrazione delle indagini, dei rilievi di campagna, delle prove in sito e di laboratorio disponibili lungo il tracciato del 3° lotto della tangenziale di Mondovì.

Scopo del lavoro è quello di definire, attraverso l'analisi delle informazioni acquisite integrate da documentazione bibliografica, la caratterizzazione geotecnica dei terreni interessati dalle opere in sottoterraneo in progetto.

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- Decreto Ministero dei Lavori Pubblici n. 47 (11 marzo 1988) "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".
- Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, Strutture di contenimento ed Aspetti geotecnici (1998).
- Circolare Ministero Lavori Pubblici 24 settembre 1988 n.30483 "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 e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione. Istruzioni per l'applicazione". (Pres. Cons. Superiore — Servizio Tecnico Centrale).
- Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al DM 17/01/2018, pubblicate sulla G.U. del 20.02.2018.
- Circolare 21/01/2019 n 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al DM 17/01/2018

4 ELABORATI PROGETTUALI DI RIFERIMENTO

I seguenti elaborati progettuali sono di riferimento per il presente documento:

- Relazione geologica
- Relazione geotecnica

5 INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO

5.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area in studio ricade all'interno del Bacino Terziario Piemontese (BTP), un vasto ambiente marino posto all'interno dell'arco delle Alpi Occidentali e nel quale si è depositata, fra la fine dell'Eocene e il Pliocene, una potente successione terziaria marina seguita nel Quaternario, fra Plio-Pleistocene e Olocene, da una successione di ambiente continentale.

L'arco delle Alpi Occidentali che racchiude il BTP è costituito da una serie di terreni metamorfici e cristallini, ripetutamente corrugati in senso radiale, con forti ribaltamenti, rovesciamenti e scorrimenti accompagnati da importanti faglie.

Nel terziario buona parte del Piemonte, come tutta la Pianura Padana, è coperto dal mare. All'interno di quell'estrema porzione di depressione identificata dal BTP, bordata dalla catena alpina, avviene una deposizione per correnti di torbidità in facies di flysch e molassa provenienti prevalentemente dai quadranti occidentali (Gnaccolini 1968) che raggiunge spessori massimi di oltre 4000 m. Sono entrambi depositi clastici, costituiti quindi dallo smantellamento di rocce preesistenti affioranti in zone più o meno attigue, che confluiscono in aree bacinali. Tipicamente sono rappresentati dall'associazione, con spiccata variabilità laterale e verticale, di diversi litotipi fra cui arenarie cementate, conglomerati, peliti e marne. Nel caso del BTP le diverse unità stratigrafiche che si depongono nel bacino costituiscono fasce allungate in direzione NE-SO che descrivono una blanda monoclinale immergente generalmente verso N o NW.

Segue una fase di regressione marina che culmina nel Messiniano con condizioni di mare poco profondo, passanti ad ambiente salmastro o lagunare per la progressiva chiusura del Mediterraneo che ormai costituisce un mare isolato rispetto all'atlantico dove l'evaporazione non è compensata dall'ingresso di sufficienti volumi d'acqua.

Nel Pliocene una nuova trasgressione marina porta ad una diffusa e nuova sommersione del Piemonte con la deposizione di Argille Azzurre relativamente omogenee e prive di stratificazione. Il livello marino torna quindi a diminuire portando alla deposizione di sabbie giallastre astiane, con talvolta orizzonti arenacei al tetto contenenti fossili di molluschi e foraminiferi bentonici.

Con l'avvento del Quaternario si registra la definitiva scomparsa del mare piemontese che lascia il posto ad un potente complesso granulare di origine continentale, deltizia e costiera, che disegna gli attuali sistemi collinari.

L'ultimo grande contributo alla deposizione ed alla modellazione del territorio è fornito dall'alternarsi delle fasi glaciali e interglaciali che, con il loro importante trasporto delle acque e del vento rimodellano il territorio e permettono la deposizione di coltri alluvionali e fluvioglaciali prevalentemente granulari.

La successione stratigrafica che interessa il tracciato di progetto, interpretata dal basso verso l'alto, è di seguito descritta. e, identificata da riferimenti bibliografici e dall'esito delle indagini geognostiche, è geo-cronologicamente di difficile attribuzione in quanto la cartografia geologica ufficiale disponibile per quest'area non è cogente con le più recenti unità stratigrafiche adottate. Si sottolinea la difficoltà incontrata nell'attribuzione dei litotipi incontrati alle diverse formazioni indicate in letteratura e nella cartografia scientifica, dovuta alla presenza di unità marnose ed arenacee fra loro difficilmente distinguibili in assenza di precise datazioni micropaleontologiche:

- Formazione di Lequio: Prevalenti arenarie e subordinate marne del Tortoniano-Serravalliano;
- Marne di S. Agata Fossili: Prevalenti marne con subordinate arenarie del Tortoniano-Messiniano inferiore.;
- Formazione di Cassano Spinola: Alternanza irregolare di limi, sabbie ed argille con anche blocchi quarzoarenitici del Messiniano;
- Argille grigio azzurre del Pliocene inferiore;
- Depositi alluvionali attuali, antichi e dei piani terrazzati prevalentemente granulari, Quaternario.

Nel dettaglio, la galleria S. Lorenzo attraversa la collina omonima, Figura 5.1. Gli scavi si svilupperanno alle due estremità nelle marne con subordinate intercalazioni di arenarie della Formazione di S. Agata Fossili, Figura 5.2, un materiale lapideo o pseudolapideo ed a permeabilità modesta. I sondaggi eseguiti hanno evidenziato la presenza, nel tratto centrale della galleria, di un'unità stratigrafica costituita da arenarie da poco a mediamente cementate con subordinate alternanze di marne, conglomerati e calcari marnosi attribuita alla Formazione di Lequio, Figura 5.3.

All'imbocco Est, lungo il tratto in approccio alla galleria naturale, le marne di S. Agata sono ricoperte dalla formazione di Cassano Spinola in forma di alternanze sabbioso limose o limoso sabbioso argillose, e subordinatamente ghiaioso sabbiose, con locale presenza di blocchi generalmente pluridecimetrici di quarzite, arrotondati, visibili anche in affioramento a margine della viabilità esistente. Lo spessore è di circa 10 m all'altezza della strada (Via Vecchia di Frabosa) in diminuzione verso l'alveo dell'Ellero (a valle).

All'imbocco Ovest il tracciato interessa depositi alluvionali limoso sabbiosi debolmente argillosi in appoggio sulle marne di S. Agata Fossili.



Figura 5.1 Vista sulla colina di S. Lorenzo dalla sponda sinistra dell'Ellero



Figura 5.2 Marne di S Agata Fossili nel sondaggio S10 fra 10-15 m da p.c.

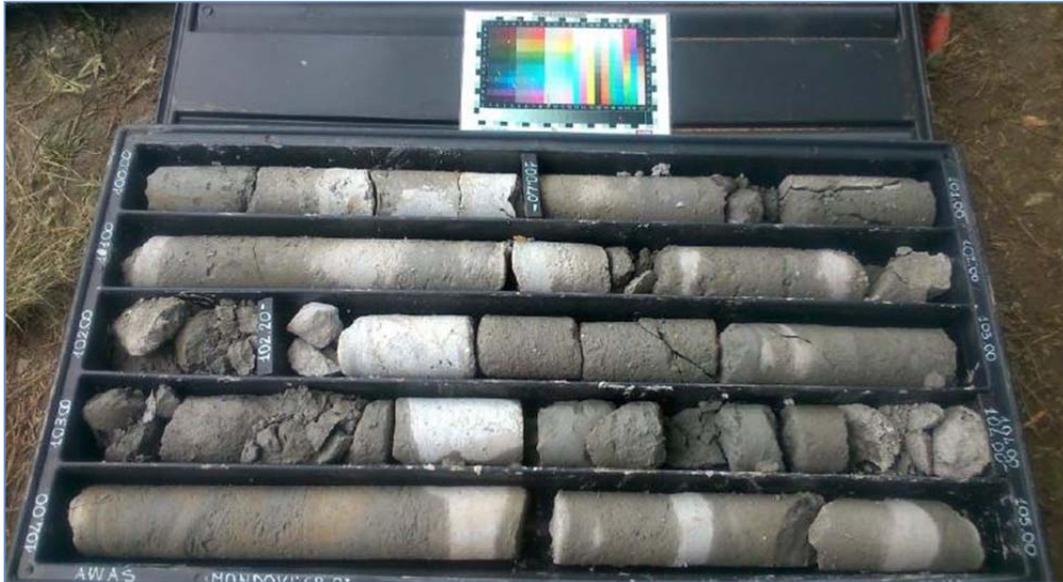


Figura 5.3 Arenarie della F.ne di Lequio nel sondaggio S8 fra 100-105 m da p.c.

5.2 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Lungo la collina di San Lorenzo la documentazione bibliografica disponibile evidenzia diffuse condizioni di pericolosità geomorfologica. In Figura 5.4 si riporta la scheda SIFRAP (Sistema Informativo Frane di Arpa Piemonte) della zona di progetto.

Dalla carta è evidente la presenza di perimetrazioni di frana generalmente per colata localizzate lungo il versante orientale della collina, che risultano però esterne al tracciato di progetto e comunque superficiali rispetto alle opere (poste in galleria).

Sul versante occidentale, occupato dai depositi sabbioso limoso argillosi della Formazione di Cassano Spinola in appoggio sul substrato marnoso, la carta riporta un'ampia perimetrazione di frana quiescente all'interno della quale sono censite frane più piccole, quiescenti o potenzialmente attive generalmente per scivolamento o traslazione. Due di queste ricadono in prossimità dell'imbocco ovest della galleria. La frana più settentrionale non dispone di pregressi monitoraggi e dai rilievi di campo viene interpretata come quiescente o stabilizzata nelle porzioni intermedie e sommitali mentre nella porzione inferiore, a valle di Via Vecchia di Frabosa, sono osservabili fenomeni deformativi superficiali. Per la frana meridionale un monitoraggio inclinometrico effettuato da ARPA ha evidenziato possibili fenomeni deformativi stagionali, di modesta entità e concentrati entro i primi 4 m di profondità, nei settori intermedi e superiori. Tali deformazioni sono confermate da spostamenti osservati su una rete di caposaldi topografici e lesioni su fabbricati esistenti. Nella porzione inferiore non vi sono evidenze di fenomeni attivi significativi anche se le condizioni di stabilità, a livello dei depositi superficiali, possono cautelativamente essere ricondotte ad una condizione prossima all'equilibrio limite.

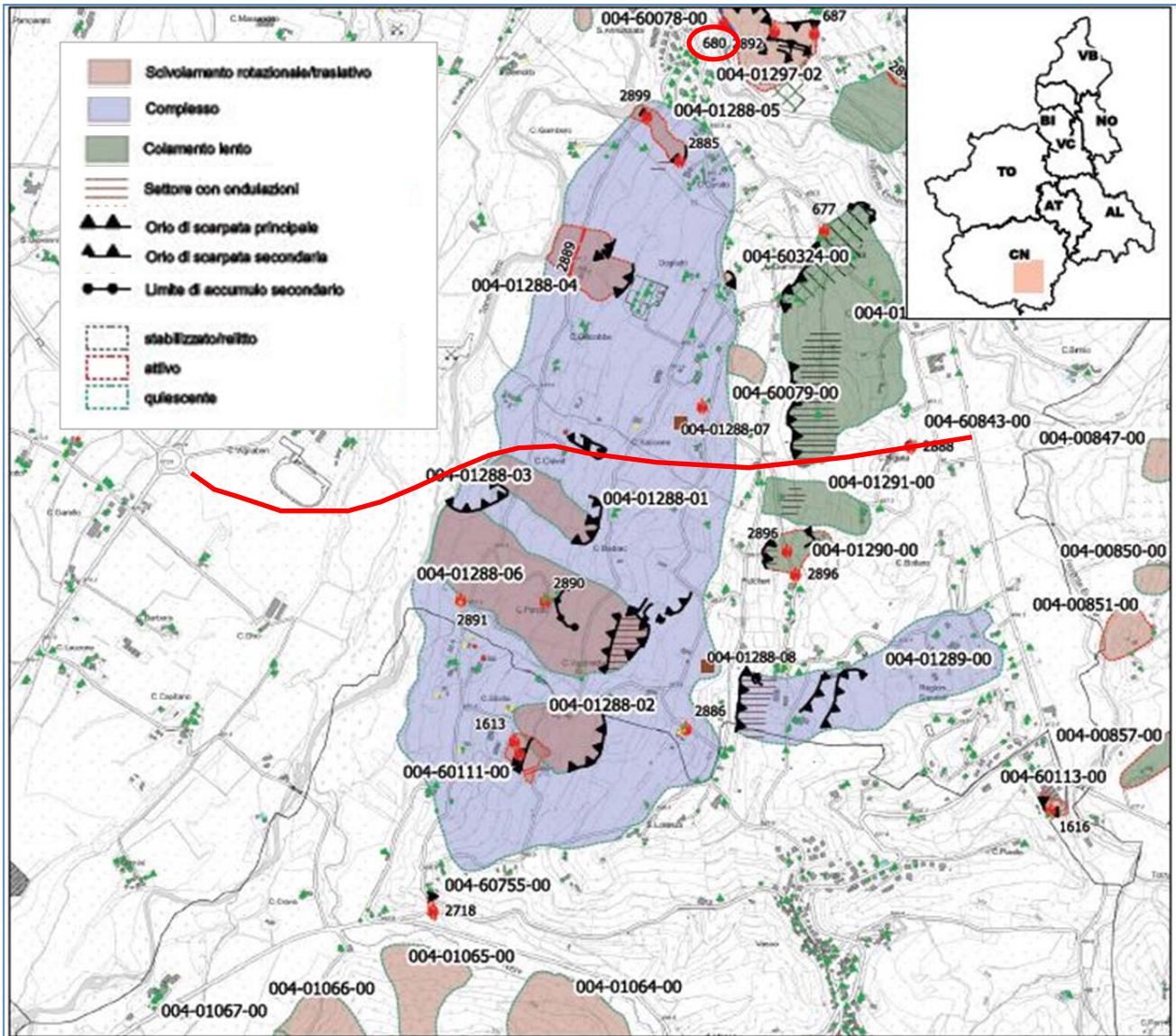


Figura 5.4 Scheda SIFRAP con indicazione del tracciato stradale di progetto definitivo

5.3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

La tabella seguente riepiloga i principali rilievi di falda effettuati in corrispondenza dei piezometri installati nel corso dei sondaggi eseguiti nel 2019.

INDAGINI DI PROGETTO DEFINITIVO. MISURE ANNO 2019										
Sondaggio	Ubicazione	01-ago	22-ago	28-ago	06-set	12-set	19-set	25-set	03-ott	10-ott
S02-Pz	Sx Ellero	5.73	5.21	4.82	4.39	3.97	3.92	3.44	3.41	3.40
S05-Pz	Imbocco W galleria	4.21	4.11	4.15	4.19	4.23	4.18	4.18	4.26	4.35
S05ter-Pz	Imbocco W galleria	0.10	pc	pc	pc	pc	0.1	0.1	0.2	0.31
S07-Pz	Galleria									24.00
S08-Pz	Galleria		71.85	71.72	71.98	72.09	72.25	72.58	72.81	73.00
S09-Pz	Galleria								20.23	20.20
S10-Pz	Imbocco E galleria	4.21	5.03	5.12	5.34	5.55	5.69	5.45	5.61	5.75
S11-Pz	Ponte Ermena	3.58	4.53	4.70	4.89	4.99	4.88	4.84	5.95	5.10

Tabella 5.1 Livelli di falda (m. da p.c.) nei piezometri di progetto definitivo (2019)

Con riferimento alla galleria in progetto, lungo il versante ovest della collina di S Lorenzo i sondaggi hanno evidenziato una falda contenuta nelle sabbie limose del Cassano Spinola che, sostenuta dal sottostante substrato marnoso poco permeabile, si attesta a profondità variabile fra 1 e 4 m ma che stagionalmente si spinge sino a piano campagna. La presenza d'acqua a modesta profondità è confermata da periodici ristagni idrici, da alcuni piccoli pozzi usati a scopo agricolo e da una rete di fossi e canali di drenaggio, naturali e artificiali, nei quali molto spesso, anche durante il periodo estivo, è presente un deflusso idrico, per quanto modesto, o acqua stagnante.

Una falda posta a circa 4 m da p.c., ma che in occasione degli eventi meteorici più intensi può giungere a piano campagna, si riscontra anche nelle alluvioni terrazzate sabbioso limose all'imbocco est della galleria, anche in questo caso sostenuta dal substrato marnoso.

Lungo il tratto in galleria tutti i piezometri installati hanno evidenziato la presenza di una falda idrica che interessa sia le arenarie della Formazione di Lequio, da poco a mediamente permeabili per fratturazione e porosità, sia le poco permeabili marne di S. Agata Fossili. Il livello idrico misurato rimane costantemente al di sopra della galleria con un battente che raggiunge punte massime di circa 40 m in calotta nei settori centrali. Negli scavi in sotterraneo saranno quindi da attendersi condizioni di umidità o limitato stillicidio nei termini marnosi, e stillicidi diffusi nelle arenarie, sino a venute concentrate nei tratti più fratturati.

Non sono censite sorgenti entro e nell'intorno dell'asse stradale in progetto.

6 INDAGINI ESEGUITE

Le indagini geognostiche ricadenti in corrispondenza e nell'immediato intorno del sedime progettuale sono state suddivise in:

- indagini pregresse, relative ad altri lavori o a precedenti fasi progettuali;
- indagini specificamente eseguite in sede di progettazione definitiva nella primavera del 2019.

Le relative ubicazioni sono riportate nella planimetria allegata al progetto. Al progetto sono inoltre allegate le stratigrafie dei sondaggi ed i risultati delle prove in sito e di laboratorio, cui si rimanda per maggiori dettagli.

6.1 INDAGINI PREGRESSE

6.1.1 Indagini di progetto preliminare 2003

Nel settembre 2003 sono stati eseguiti dalla ditta Abrate di Carmagnola (To) n° 4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo profondi 25 m ciascuno per verificare la stratigrafia lungo l'asse stradale in progetto fra l'attuale termine della tangenziale di Mondovì e la S.S. 28. Dalle colonne stratigrafiche risulta che le perforazioni sono state attrezzate con piezometri a tubo aperto fessurati a partire dalla profondità di circa 3 m da p.c.

I sondaggi sono corredati da n.50 prove penetrometriche tipo SPT in avanzamento, mentre i fori sono attrezzati con piezometri a tubo aperto in PVC protetti da chiusino metallico. Non risulta, dalla documentazione allegata al progetto preliminare, che siano stati prelevati campioni in fase di perforazione.

La Tabella 6.1 riepiloga i dati essenziali dei sondaggi eseguiti nel 2003.

INDAGINI DI PROGETTO PRELIMINARE 2003						
Sondaggio	Profondità (m)	Ubicazione	Strumentazione	Livello di falda (m da p.c.)	Prove in sito	Campioni
S1 (2003)	25	Sinistra Ellero	Piezometro	4.2	n 16 SPT	NO
S2 (2003)	25	Imbocco W galleria	Piezometro	2.1	n 9 SPT	NO
S3 (2003)	25	Imbocco W galleria	Piezometro	4.3	n 16 SPT	NO
S4 (2003)	25	Imbocco E galleria	Piezometro	3.8	n 9 SPT	NO

Tabella 6.1 Sondaggi a carotaggio continuo di progetto preliminare

Con riferimento alla galleria S. Lorenzo, i sondaggi da considerare sono S2, S3 ed S4. Il sondaggio S2 in destra idrografica dell'Ellero attraversa un deposito di spessore 4.5 m di ciottoli e blocchi in matrice ghiaioso sabbioso limosa attribuito all'unità di Cassano Spinola poggiate su un substrato costituito da marne litoidi o sublittoidi con intercalati subordinati livelli sabbioso arenacei (Marne di S. Agata). Il sondaggio S3 ricade a margine della Via Vecchia di Frabosa a monte dell'S2 ed in prossimità dell'imbocco ovest della galleria; al di sotto di circa 1 m di

riporto vede un potente complesso attribuibile al Cassano Spinola costituito da una facies superficiale limoso sabbiosa con ghiaie, da poco a mediamente consistente, passante a 12 m di profondità ad una facies sabbioso ghiaiosa con ciottoli in matrice limoso argillosa. Il substrato marnoso arenaceo delle marne di S. Agata si attesta a 20 m da p.c.. Il sondaggio S4 ricade sul versante orientale della dorsale in prossimità dell'imbocco est della galleria. Al di sotto di una coltre di riporto vede la presenza di argille limose che si spingono sino a 5.5 m da p.c. direttamente in appoggio, con un contatto sfumato potente circa 1 m, sul substrato marnoso arenaceo di S. Agata.

I rilievi di falda effettuati dopo l'installazione dei piezometri rilevano in tutti i casi, nel settembre 2003, livelli idrici compresi fra 2 m e 4 m da p.c. circa.

Guardando ai risultati delle prove penetrometriche, in S2 nel Cassano Spinola gli SPT sono variabili fra 57 colpi e rifiuto, e vanno generalmente a rifiuto nel substrato marnoso. Nel sondaggio S3 nel Cassano Spinola il numero di colpi è linearmente crescente con la profondità: nella più superficiale facies limoso sabbiosa si ha numero di colpi compreso fra 4 – 15 che sale poi a 25-45 nella sottostante facies ghiaiosa sabbiosa; fino al raggiungimento di una condizione di rifiuto entro il substrato marnoso. In S4 nelle argille limose superficiali si ha numero di colpi variabile fra 25-50 colpi cui fanno seguito condizioni di rifiuto al raggiungimento del substrato marnoso.

Ad integrazione dei sondaggi lungo l'intero tracciato di progetto preliminare della galleria S. Lorenzo è stata eseguita una tomografia elettrica utilizzando uno stendimento da 2.172 m articolato su 182 elettrodi intervallati di 12 m, Figura 6.1. L'interpretazione dell'indagine, che rimane leggermente più a sud del tracciato di progetto definitivo, evidenzia eteropie laterali e verticali di resistività imputabili alla diversa natura litologica dei materiali (stato di cementazione, grado lapideo etc..) ed al diverso grado di saturazione. Difficilmente tali eteropie sono imputabili alla presenza di discontinuità strutturali significative, vista l'assenza di tali indicazioni né sul territorio né in letteratura. I terreni più resistivi sono correlabili ai depositi arenacei (colori rosso, giallo e verde) mentre quelli conduttivi, marnosi e/o a maggiore saturazione hanno colorazione azzurra. In estrema sintesi, i termini marnosi sembrano prevalere agli estremi del profilo e quelli arenacei in profondità. Da notare in particolare la presenza di un brusco contatto laterale resistivo/conduttivo/resistivo in corrispondenza della zona di crinale.

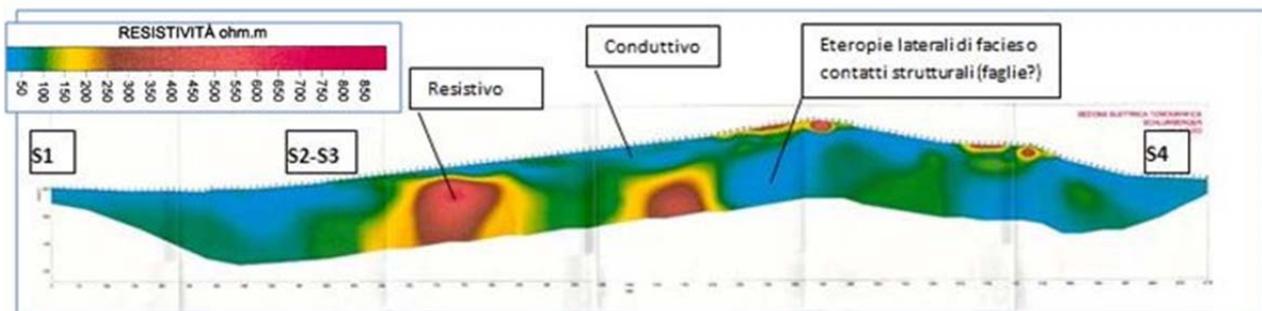


Figura 6.1 Sezione geoelettrica di progetto preliminare

6.1.2 Indagini e monitoraggi ARPA 2011

Nel febbraio 2011 l'Ufficio di Protezione Civile del Comune di Mondovì in collaborazione con ARPA Piemonte ha realizzato, sul versante occidentale della collina di S Lorenzo, n.6 sondaggi allo scopo di monitorare la stabilità delle aree dove ricadono le cascine Perotti e Vacchetta. Le indagini sono state eseguite dalla ditta Citiemme di Torino e ricadono a SE dell'imbocco ovest della galleria S Lorenzo ed a monte della Via Vecchia di Frabosa.

I sondaggi, riepilogati in Tabella 6.2, sono profondi 15 m e suddivisi in 3 coppie, ciascuna delle quali attrezzata con un inclinometro posto in foro realizzato a carotaggio continuo e un piezometro a tubo aperto in un foro contiguo eseguito a distruzione di nucleo.

Sondaggio	Profondità (m)	Ubicazione	Tipologia di esecuzione	Strumentazione	Tetto substrato (m)	Livello di falda (m da p.c.) ad inizio misure	Escursione massima fra 28.4.2011 e 7.11.2013
AP1	15 m	Versante W	Distruzione	Piezometro	6,7	Strumento abbandonato	
AS1	15 m	Versante W	Carotaggio	Inclinometro	6,7		
AP2	15 m	Versante W	Distruzione	Piezometro	6,9	7,04	2,9
AS2	15 m	Versante W	Carotaggio	Inclinometro	7		
AP3	15 m	Versante W	Distruzione	Piezometro	7,3	10,84	0,96
AS3	15 m	Versante W	Carotaggio	Inclinometro	7,5		

Tabella 6.2 Sondaggi ARPA 2011 sul versante ovest della collina di S Lorenzo

In tutti i casi la successione dei terreni è simile evidenziando un deposito, attribuito dagli scriventi alla Formazione di Cassano Spinola, potente circa 7 m e poggiante su di un substrato marnoso siltoso con intercalazioni di sabbie e presenza di conchiglie fossili (Formazione di S. Agata fossili). All'interno del Cassano Spinola si riscontra una facies limoso argillosa sabbiosa più superficiale che si estende da p.c. a circa 4-5 m, seguita da una facies ghiaiosa o sabbiosa da 4-5 m a 7 m da p.c. Le prove con pocket penetrometer eseguite nei tratti a carotaggio rilevano valori medi di 2 Kg/cm^q nel Cassano Spinola limoso argilloso sabbioso e 5-10 Kg/cm^q (talvolta >15) nel substrato marnoso.

Non risulta siano state eseguite prove in sito. Dalle stratigrafie risulta il prelievo di 2 campioni indisturbati, rispettivamente in AS1 ed AS3, di cui non sono stati forniti dati.

Il monitoraggio piezometrico rileva una falda oscillante fra il tetto del substrato marnoso ed il letto del Cassano Spinola, con una variazione stagionale di circa 3 m ed una rapida risposta dei livelli idrici alle piogge più intense.

Il monitoraggio inclinometrico condotto con cadenza annuale o semestrale dal 2012 al 2019 ha evidenziato un primo modesto spostamento nella primavera del 2015 sull'inclinometro AS1 a 4 m da p.c., successivamente incrementatosi nelle letture successive sino ad uno spostamento totale cumulato di 2.8 cm in 7 anni. In AS2 le

misure del 2018 hanno per la prima volta evidenziato uno spostamento di circa 1 cm a 2.8 m da p.c. senza alcuna ulteriore evoluzione nel corso del 2019 In AS3 non si segnalano spostamenti apprezzabili.

Gli strumenti di monitoraggio di cui sopra ricadono in una perimetrazione di frana censita dal SIFRAP intercettata (in galleria) dal tracciato di progetto preliminare. Tale perimetrazione di frana viene evitata/aggirata nella soluzione di tracciato sviluppata in sede di progetto definitivo.

6.1.3 Indagini SNAM Rete Gas 2016

Nel marzo 2016 Snam Rete Gas nell'ambito di lavori di allacciamento e rifacimento della rete del metanodotto fra i Comuni di Mondovì e Monastero di Vasco ha eseguito 12 sondaggi a carotaggio continuo, di profondità variabile fra 15 m e 30 m, sul versante orientale della collina di S Lorenzo allo scopo di verificare la profondità del substrato integro entro al quale posare, "al riparo da possibili dinamiche superficiali", le condotte. I sondaggi, pur se relativamente disassati rispetto alle opere in progetto, sono comunque utili per meglio comprendere l'assetto stratigrafico di questa porzione di territorio.

In alcuni casi negli orizzonti superficiali sono state eseguite prove SPT mentre non risultano disponibili informazioni relative a campioni geotecnici.

Le stratigrafie riportano quella che nella documentazione Snam viene identificata come una coltre colluviale limoso argillosa di spessore variabile fra 3 m e 8 m circa poggiante su una siltite marnoso arenacea grigia con presenza di livelli arenacei centimetrici e decimetrici e conchiglie. Le prove penetrometriche, eseguite nella coltre riportano numero di colpi, quando diverso dal rifiuto, variabile fra 30 e 80.

INDAGINI SNAM RETE GAS 2016				
Sondaggio	Profondità (m)	Ubicazione	Tetto substrato (m)	Prove in sito (n°)
SS1	20	Versante E	8,4	
SS2	20	Versante E	5,1	
SS3	30	Versante E	7,5	
SS4	30	Versante E	3	
SS5	20	Versante E	5,7	
SS6	20	Versante E	4,5	
SS7	20	Versante E	4,5	
SS8	20	Versante E	4,5	
SS9	20	Versante E	8,4	
SS11	15	Versante E	6,3	3
SS12	25	Versante E	7,6	3
SS13	25	Versante E	7,3	3

Tabella 6.3 Indagini Snam anno 2016 sul versante orientale della collina di S. Lorenzo

6.1.4 Banca dati ISPRA

La consultazione della banca dati ISPRA ha portato al riscontro della stratigrafia di un pozzo per acqua profondo ben 270m ubicato sul versante orientale della collina di S. Lorenzo, alcune decine di metri a nord dell'imbocco della galleria. La successione stratigrafica descritta riporta la presenza di 30 m di alluvioni seguite da 120 m di marne grigie cui soggiacciono, fino a 270 m da p.c., alternanze di marne grigie e quarziti. La falda profonda è indicata a profondità non inferiore a 150 m in seno agli orizzonti quarziticci.

6.2 INDAGINI DI PROGETTO DEFINITIVO 2019

La campagna d'indagini finalizzata alla progettazione definitiva è stata eseguita fra la primavera e l'autunno del 2019 ed affidata direttamente da Anas alla ditta Tecno In di S. Donato Milanese. Le attività eseguite comprendono:

1. 14 sondaggi a carotaggio continuo eseguiti con sonda oleodinamica Comacchio 1200 montata su trattore. Di questi 4 sono attrezzati con inclinometro, 8 con piezometro a tubo aperto e 2 con tubazione in PVC pesante per prova down hole;
2. prelievo nel corso dei sondaggi di 9 campioni indisturbati, 59 campioni rimaneggiati e 49 campioni litoidi;
3. esecuzione di 18 prove SPT, 2 prove pressiometriche, 8 prove dilatometriche, 7 prove di permeabilità tipo Lugeon in roccia;
4. 4 pozzetti esplorativi profondi 2 m ciascuno, ubicati nei tratti in rilevato o a raso, con 3 prove di carico su piastra in due cicli e prelievo di 8 campioni rimaneggiati;
5. 6 traverse sismiche a rifrazione in onde P e SH di lunghezza 200 m (la sola prova SR1 era lunga 115) concentrate in corrispondenza dell'imbocco ovest della galleria;
6. 2 prove tipo Masw per la determinazione della categoria di suolo di fondazione in prossimità dell'imbocco della galleria;
7. 2 prove down hole in foro di sondaggio per la determinazione della categoria di suolo di fondazione in corrispondenza dei viadotti.

Nei paragrafi seguenti sono commentati i risultati ottenuti per le diverse tipologie d'indagine, con particolare riferimento alla galleria S. Lorenzo. Per il commento esteso di tutte le indagini, comprese quelle non direttamente afferenti con la galleria, si rimanda alla Relazione Geotecnica generale.

6.2.1 Sondaggi geognostici

I sondaggi eseguiti nel 2003 in sede di progetto preliminare avevano evidenziato come i maggiori spessori (circa 20 m) dei terreni sabbioso limosi del Cassano – Spinola, potenzialmente coinvolti in fenomeni deformativi ed in appoggio sul sottostante substrato delle marne di S. Agata, fossero attesi proprio in corrispondenza dell'imbocco ovest della galleria. In sede di progettazione definitiva si sono quindi prese in considerazione due possibili varianti di tracciato, spostate rispettivamente a sud e a nord le quali, fermo restando i punti di inizio e fine intervento, potessero garantire una minore pericolosità geomorfologica e un migliore modello stratigrafico (Figura 6.2).

Pertanto in una prima fase svoltasi nella primavera del 2019 sono stati eseguiti i sondaggi S5 – S5bis – S5ter ed S13, disposti lungo un allineamento nord – sud parallelo a via Vecchia di Frabosa, al fine di valutare una proposta di tracciato che permettesse di evitare le perimetrazioni di frana e/o imboccare con minori spessori delle coltri detritiche. Ottenuti ed interpretati i risultati dei carotaggi, unitamente a quelli dell'indagine geofisica concentrata nelle medesime aree, i rimanenti sondaggi sono stati realizzati lungo il nuovo tracciato individuato (variante nord) secondo un allineamento disposto circa est – ovest.

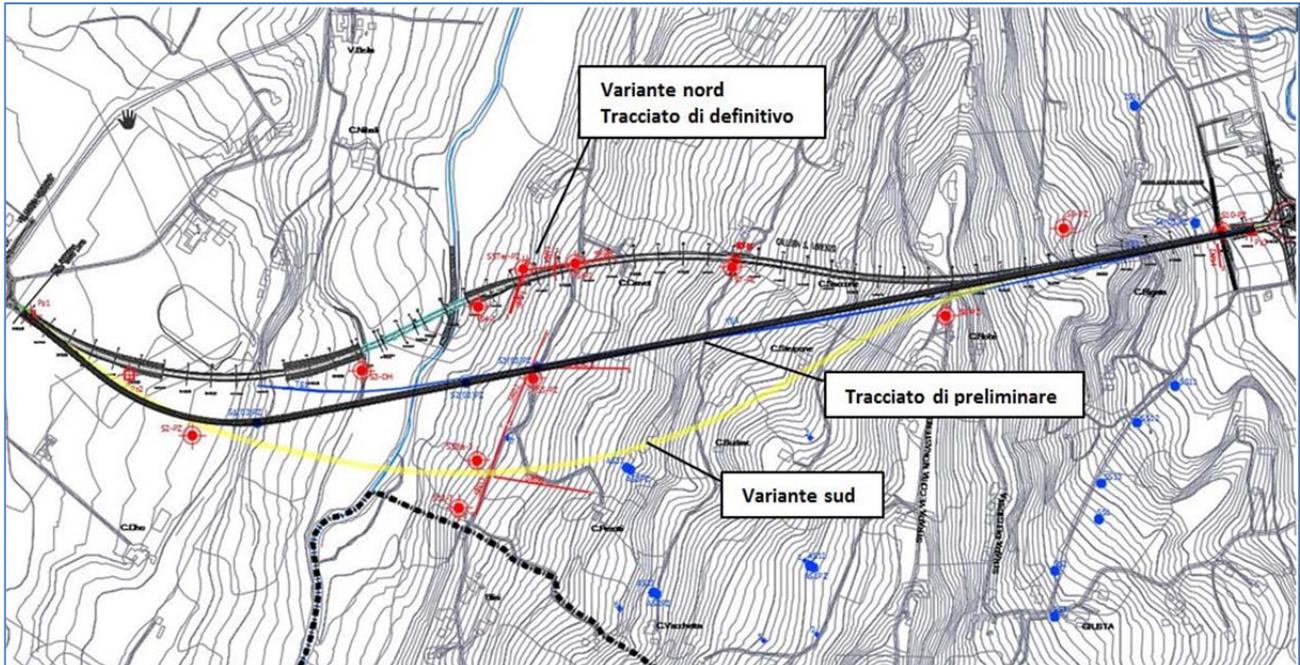


Figura 6.2 Varianti di tracciato studiate in sede di progettazione definitiva. Alla soluzione di preliminare è stata preferita la variante nord in quanto ritenuta migliorativa dal punto di vista stratigrafico e geomorfologico

La tabella seguente riepiloga i sondaggi eseguiti con relative profondità, ubicazione, livello di falda, numero prove in sito e campioni distinti per tipologia. Le prove di permeabilità, pressiometriche e dilatometriche, in particolare, sono concentrate in corrispondenza di sondaggi posti lungo lo sviluppo della galleria.

Con riferimento alla galleria S. Lorenzo, i sondaggi di riferimento sono:

- S5, S5ter, S6 per quanto riguarda l'imbocco lato Ovest di PD
- S7, S8, S9 per il tratto in naturale
- S10 per quanto riguarda l'imbocco lato Est

Sul versante destro i sondaggi S5-S5ter-S6 hanno indagato la zona d'imbocco Ovest della galleria mettendo in luce una diffusa presenza di sabbie e limi del Cassano Spinola poggianti, a profondità variabile fra 10 e 20m da p.c., sulle marne di S Agata. Come già anticipato il tracciato di progetto definitivo è stato sviluppato in variante (in questo tratto) rispetto al preliminare privilegiando i settori dove lo spessore del Cassano Spinola è minore (10 m nelle soluzioni in variante rispetto ai 20 m del preliminare) al contempo evitando di intercettare (con la soluzione scelta) le perimetrazioni di frana riconoscibili sul terreno, e riportate in bibliografia, che interessano lo stesso Cassano Spinola.

INDAGINI DI PROGETTO DEFINITIVO 2019													
Sondaggio	Profondità (m)	Ubicazione	PZ	DH	I	Livello di falda (m da p.c.)	SPT	CI	CR	CL	PERM	PRESS	DIL
S2_Pz	30	Tratto all'aperto				5,75	4	2	4				
S3_DH	35	Viadotto lato W				nd	1	1	11				
S4_I	30	Viadotto lato E				25	-	-	2	8			
S5_Pz	20	Imbocco W di PD				4,02	5	1	4	3			
S5bis_I	30	Imbocco W asse sud				nd	1	1	4	1			
S5ter_Pz	30	Imbocco W asse nord				2,68	-	-	3	2			
S6_I	30	Imbocco W asse nord				+1,22	-	-	4	4			
S7_Pz	60	Galleria naturale				24,00	-	-	9	5	2		2
S8_Pz	120	Galleria naturale				71,3	-	-	2	13	2		2
S9_Pz	70	Galleria naturale				21,22	-	-	4	7	3		2
S10_Pz	20	Imbocco est				4,4	1	2	2	1		2	2
S11_Pz	20	Ponte spalla E				3,58	-	-	1	4			
S12_DH	35	Ponte spalla W				nd	4	1	5	-			
S13_I	30	Imbocco W asse sud				1,2	2	1	4	1			
TOTALE							18	9	59	49	7	2	8

Tabella 6.4 Riepilogo sondaggi con relative prove in sito e campioni prelevati. PZ = Piezometro. DH = Down Hole. I = Inclinometro. CI = campione indisturbato. CR = campione rimaneggiato. CL = campione litoide. Perm = prova di permeabilità. PRESS = prova pressiometrica. DIL = prova dilatometrica

Lungo la galleria sono stati realizzati i sondaggi S7-S8-S9 che hanno raggiunto la profondità massima di ben 120 m da p.c.. Essi hanno riscontrato la presenza di un'unità più superficiale prevalentemente marnosa e subordinatamente arenacea attribuita alle Marne di S Agata Fossili, poggiate su una formazione prevalentemente arenacea e subordinatamente marnosa attribuita alle Arenarie di Lequio. Le stratigrafie ed i campioni prelevati mostrano in tutti i casi materiali molto eterogenei e complessi, di natura flyschide, dove variazioni laterali e verticali anche repentine sono piuttosto comuni. Tali variazioni riguardano la natura litologica (marne, marne argillose, marne calcaree, sabbie, ghiaie, arenarie, conglomerati ecc), la fratturazione, la consistenza ed il grado di cementazione, tanto che le carote ed i campioni prelevati, pur a parità di unità litologica, sono descritti ora come terrosi ora come litoidi o più spesso pseudolitoidi. Nel valutare il grado di cementazione delle unità litologiche si deve anche tener conto di una possibile soggettività nella descrizione e del possibile (e difficilmente valutabile) grado di disturbo arrecato in fase di sondaggio entro materiali caratterizzati da valori della resistenza meccanica piuttosto bassi. Per una più attendibile valutazione del grado di cementazione si è seguita con attenzione la fase di terebrazione dei sondaggi. Nel corso del sondaggio S8 il sondatore ha riferito una sostanziale stabilità del foro fino alla massima profondità raggiunta (120 m) da cui si potrebbe dedurre (si vedano per conforto anche le fotografie delle cassette) un materiale tutto sommato di buone caratteristiche, spesso litoide o pseudolitoide. Per contro nel corso del sondaggio S7 profondo 60 m vi sono stati frequenti problemi di stabilità del foro che hanno richiesto

l'utilizzo continuo di un privervestimento metallico, tanto che la velocità media di avanzamento è stata nell'ordine di 5 m/g. Nelle stratigrafie sono inoltre descritti alcuni orizzonti brecciati la cui posizione può essere correlata con le variazioni laterali di resistività evidenziate dall'indagine tomografica del 2003.

Il sondaggio S10 posizionato all'imbocco est è ben congruente con i sondaggi Snam rete Gas e riporta una coltre superficiale limoso argillosa potente circa 10 m in appoggio sul substrato delle marne di S Agata.

I piezometri hanno riscontrato una falda che in corrispondenza dell'imbocco ovest della galleria rimane assai prossima al piano campagna. Lungo la collina di S. Lorenzo la falda si attesta 20-40 m sopra la livelletta stradale mettendo in luce una diffusa condizione di saturazione, seppur con una permeabilità (dedotta dalle prove Lugeon in foro) complessivamente modesta.

I valori di RQD sono condizionati ed influenzati dalla complessa natura dei materiali attraversati (ora terrosi ora litoidi o pseudolitoidi) e come tali hanno, o localmente possono avere, un'attendibilità modesta. Fermo restando questi limiti i valori medi riscontrati nei sondaggi in corrispondenza delle opere sono riepilogati nella tabella seguente:

Sondaggio	Unità	RQD medio (%)
S5ter	S. Agata	40
S6	S. Agata	35
S7	Lequio	40
S8	Lequio	65
S9	Lequio	80
S10	S. Agata	35

Tabella 6.5 Valori medi RQD sondaggi 2019 in corrispondenza della galleria S. Lorenzo

6.2.2 Prove in sito

In linea generale le prove penetrometriche SPT portano ad un numero di colpi elevato nelle alluvioni (>50 fino a rifiuto), nelle Marne di S. Agata (>40-50 fino a rifiuto), nel Cassano Spinola (50-60) e nelle Argille plioceniche (>70) e valori più contenuti nella porzione superficiale della stessa S. Agata e del Cassano Spinola (rispettivamente 26-27 e 12-18). Si tenga conto che tali prove possono essere a tratti inadeguate per i terreni interessati dal tracciato, nelle alluvioni e nel Cassano Spinola in relazione alla spiccata eterogeneità del terreno, alla presenza di materiale grossolano o di intercalazioni fini, nelle marne di S. Agata dalla natura litologica e dalla presenza di un variabile grado di cementazione.

La tabella seguente riepiloga, per i soli sondaggi direttamente afferenti alla galleria S. Lorenzo, i valori degli SPT in funzione del sondaggio e della natura litologica del materiale:

Sondaggio	Profondità (m)	SPT (n)	Materiale	Sondaggio	Profondità (m)	SPT (n)	Materiale
S05_PZ	5.00	39	Cassano S	S05bis_I	3.00	25	Cassano S
	10.00	64	Cassano S	S10_PZ	10,6	R	S.Agata
	12.00	26	Cassano S				
	15.00	39	Cassano S				
	18.00	58	Cassano S				

Tabella 6.6 SPT eseguite nei sondaggi afferenti alla galleria S. Lorenzo

Due prove pressiometriche sono state condotte nelle alluvioni terrazzate del sondaggio S10 all'imbocco est della galleria fra 3 e 7.4 m da p.c., indicando valori medi del modulo di Young intorno a 20 MPa e della coesione non drenata intorno a 120 kPa.

RISULTATI PROVE PRESSIOMETRICHE						
Sondaggio	Profondità (m)	ID	Unità	Litologia	Modulo Young E (MPa)	Coesione non drenata Cu (kPa)
S10_PZ	3,0-4,5	P01	Alluvioni terrazzate	Sabbia limosa	16.7	166
	6,0-7,4	P02	Alluvioni terrazzate	Limo sabbioso	26.9	113

Tabella 6.7 Risultati delle prove pressiometriche

Alcune prove dilatometriche sono state eseguite lungo i sondaggi S7-S8-S9-S10 localizzati lungo la galleria naturale interessando sia la Formazione delle Marne di S. Agata che quella delle Arenarie di Lequio. Come da tabella seguente la formazione di Lequio è caratterizzata da un modulo di deformazione (E_d) mediamente intorno a 600 MPa e modulo elastico (E_e) di 1500 MPa, mentre valori più modesti e rispettivamente di 400 MPa e 800 MPa si hanno per le Marne di S. Agata.

RISULTATI PROVE DILATOMETRICHE						
Sondaggio	Profondità (m)	ID	Unità	Litologia	Ed (Mpa)	Ee (Mpa)
S07_PZ	57,00	D1	Lequio	Conglomerato	918	2334
	51,00	D2	Lequio	Conglomerato	764	1727
S08_PZ	95,00	D1	Lequio	Marna	739	1244
	85,00	D2	S. Agata	Marna e calcare	15	15
S09_PZ	55,00	D1	Lequio	Arenaria ben cementata	663	1125
	47,00	D2	Lequio	Arenaria poco cementata	427	873
S10_PZ	17,00	D1	S. Agata	Marna	368	510
	12,00	D2	S. Agata	Marna	471	1012

Tabella 6.8 Risultati delle prove dilatometriche eseguite lungo lo sviluppo della galleria (E_d = Modulo di deformabilità; E_e = Modulo elastico)

Infine alcune prove di permeabilità tipo Lugeon sono state condotte entro i sondaggi S7-S8-S9 in galleria interessando prevalentemente l'unità arenacea di Lequio e subordinatamente quella marnosa di S. Agata. La tabella seguente riporta i valori ottenuti in funzione della litologia e della lunghezza del tratto di prova, variabile fra 1 e 3 m circa.

Nelle arenarie di Lequio sono state eseguite 6 prove, che forniscono una permeabilità variabile fra 10^{-6} e 10^{-7} m/s, mentre nelle marne di S. Agata l'unica prova eseguita indica un valore di 10^{-7} m/s.

Sondaggio	Profondità (m)	ID	Unità	Litologia	Permeabilità Lugeon (m/s)
S07_PZ	44,6-47,6	lug01	Lequio	Arenarie e marne	2.00E-07
	54,8-57,8	lug02	Lequio	Conglomerato	1.80E-06
S08_PZ	79,5-80,5	lug01	S. Agata	Marne	1.40E-07
	103-104	lug02	Lequio	Calcare marnoso	8.00E-08
S09_PZ	43,0-46,0	lug01	Lequio	Arenaria poco cementata	1.80E-07
	51,0-54,0	lug02	Lequio	Arenaria ben cementata	9.00E-07
	57,0-60,0	lug03	Lequio	Arenaria ben cementata	1.80E-07

Tabella 6.9 Prove Lugeon nei sondaggi in galleria

6.2.3 Prove di laboratorio

Come anticipato nel corso dei sondaggi sono stati prelevati 9 campioni indisturbati, 59 campioni rimaneggiati e 49 campioni lapidei. I provini sono poi stati sottoposti a prove di caratterizzazione (peso di volume, contenuto naturale d'acqua, granulometria, limiti di Atterberg, contenuto di sostanza organica) e di resistenza meccanica (compressione semplice, trazione, Point Load, taglio diretto, triassiale CD, UU, CU).

Rimandando alle tabelle riepilogative riportate in allegato alla Relazione Geotecnica generale per i risultati delle singole prove, di seguito sono riepilogate le principali caratteristiche dei terreni direttamente afferenti alla galleria S. Lorenzo.

Le **alluvioni terrazzate** presenti all'imbocco Est della galleria sono di natura sabbioso-limoso-argillosa o limoso-sabbioso-argillosa (sabbia 30-50%, limo 30-50%, argilla 10-20%) con LL 30-40, LP 20-25, IP inferiore a 20 e contenuto naturale d'acqua compreso tra 17 e 20%. Secondo la UNI 10006 sono classificabili da A4 ad A6. Il peso di volume è prossimo a 19 kN/m³ e non mostrano alcuna reazione all'HCl. Le prove di laboratorio indicano un angolo d'attrito medio di 32°, coesione efficace pari a 12 kPa e coesione non drenata di 26 kPa a 4.5 m da p.c..

La **Formazione di Cassano Spinola** rappresenta la coltre di copertura di tutta la collina di S. Lorenzo, ed interessa direttamente la zona dell'imbocco lato Ovest della galleria. Si tratta di un deposito granulometricamente eterogeneo composto generalmente da sabbie limoso-argillose con ghiaia (ghiaia 0-20%, sabbia 40-70%, limo 20-25%, argilla 5-15%) con LL 40, LP 20-25 e IP inferiore a 20. Localmente la frazione limoso-argillosa prevale (60-70%) su quella sabbiosa. L'eterogeneità è confermata dalla classificazione UNI 10006 con circa metà campioni classificabili come A2.4 – A2.6 e l'altra metà come A7 o più raramente A4. Il peso di volume è compreso fra 18 e 19 kN/m³ mentre la reazione all'HCl sempre assente. Dalle prove di laboratorio risultano angoli d'attrito variabili fra 30°-35° con coesione efficace 20-30 kPa. L'angolo d'attrito residuo è di 15-20°.

Le **Marne di S. Agata Fossili** interessano buona parte della galleria naturale e rappresentano la formazione che poggia sulle sottostanti Arenarie di Lequio, intercettate a loro volta nella parte centrale della galleria, caratterizzata dalla maggiore copertura litostatica. Le marne a livello di campione si dimostrano molto eterogenee, con il 40% dei campioni prelevati classificati come terrosi ed il 60% come lapidei. Tale variabilità è in parte correlabile al grado di cementazione, che a tratti si riduce sensibilmente, ma in parte dovuta al disturbo indotto dalle manovre di carotaggio, che è accentuato dalla scarsa resistenza meccanica della formazione. Per tali ragioni si sono considerati separatamente i provini rimaneggiati e quelli litoidi.

Con riferimento ai provini rimaneggiati le analisi granulometriche su campioni rimaneggiati mettono in luce una composizione limoso-argilloso-sabbiosa (limo 30-50%, argilla 10-35%, sabbia 20-35%) con una subordinata frazione ghiaiosa presente solo localmente, LL 30-40, LP 20-25, IP 10-18 e classificazione UNI 10006 A6 o A7. Il peso di volume è di 20-21 kN/m³ e la reazione all'HCl sempre vivace. Dalle prove di laboratorio l'angolo di attrito è mediamente di 30° e la coesione efficace di 25-40 kPa.

I provini litoidi mostrano un peso di volume analogo al precedente. Il materiale è strutturalmente eterogeneo come dimostrano valori di resistenza a compressione semplice variabili fra 1 e 13 MPa con un valore medio di 4 MPa. Il modulo elastico derivato dalle prove di compressione semplice è mediamente di 1000 MPa, ben confrontabile con quello ottenuto dalle prove dilatometriche che varia fra 400-800 MPa, considerando che il primo riguarda la scala del provino ed il secondo invece coglie meglio la variabilità caratteristica della formazione.

Le arenarie attribuite alla **Formazione di Lequio** sono state prelevate nella maggior parte dei casi in forma di campioni lapidei (>75%) e più limitatamente come campioni rimaneggiati. Anche in questo caso tale dato può essere falsato dal disturbo arrecato in fase di carotaggio.

Con riferimento ai provini rimaneggiati le analisi granulometriche disponibili mostrano una composizione sabbioso-limoso-argillosa a tratti ghiaiosa (sabbia 40-50%, limo 20-40%, argilla 10%, ghiaia 0-25%) con LL intorno a 30, LP intorno a 20, IP 10, classificazione UNI 10006 prevalente A4, subordinatamente A2 o A7. Il peso di volume è compreso fra 21 e 22 kN/m³ e la reazione all'HCl vivace. Le prove di laboratorio sui campioni rimaneggiati sono prevalentemente prove di taglio diretto che restituiscono angoli d'attrito di 35-36° ed una coesione efficace di 10-20 KPa.

I provini litoidi mostrano un peso di volume analogo al precedente. Il materiale è strutturalmente eterogeneo come dimostrano valori di resistenza a compressione semplice variabili fra 2 e 10 MPa con un valore medio di 5.5 MPa, la resistenza a trazione è di circa 0.2 MPa. Il modulo elastico derivato dalle prove di compressione semplice è mediamente di 1000 MPa, contro i 1500 MPa medi delle prove dilatometriche.

6.2.4 Indagini geofisiche

In supporto ai sondaggi sono state eseguite tomografie sismiche a rifrazione in corrispondenza dell'imbocco ovest della galleria, ortogonalmente e parallelamente a ciascuna delle tre possibili soluzioni di tracciato ipotizzate (tracciato di preliminare, variante nord e variante sud). Dal punto di vista puramente sismo-stratigrafico i risultati di queste prospezioni sono difficilmente interpretabili in quanto i terreni indagati, attribuibili al Cassano Spinola ed alle sottostanti marne di S. Agata, spesso saturi sin quasi a piano campagna, mostrano velocità delle onde sismiche progressivamente crescenti verso il basso con contrasti relativamente modesti che tendono a ridursi ed a sfumare ulteriormente in profondità. Le tarature fornite dai sondaggi hanno da un lato guidato l'interpretazione e dall'altro evidenziato sovrapposizioni di velocità che non sempre permettono di distinguere in maniera netta le singole unità stratigrafiche.

In zona d'imbocco del tracciato del Progetto Definitivo le sezioni SR1 ed SR4, tarate con i sondaggi S5ter ed S6, mettono in luce un'unità superficiale (Cassano Spinola) avente $V_p < 1200$ m/s e $V_s < 400$ m/s nei primi 5-6 m maggiormente allentati passante in seguito e fino alla profondità di 10 m a $V_p 1200-2000$ m/s e $V_s 400-700$ m/s. A maggiore profondità le velocità sismiche crescono rapidamente fino a valori di V_p di 2000-2400 m/s e $V_s 700-850$ m/s, attribuibili alle Marne di S. Agata.

Lungo il tracciato di Progetto Preliminare le sismiche SR2 ed SR5 tarate con il sondaggio S5 ed S3/03 evidenziano un orizzonte superficiale allentato e più lento di spessore 3-6 m con $V_p < 1300$ m/s e $V_s < 400$ m/s, ed il contatto fra Cassano Spinola e Marne posto intorno a 20 m da p.c. dove $V_p > 2100$ m/s e $V_s > 700$ m/s.

Infine lungo la variante sud le traverse SR3 ed SR6 tarate con i sondaggi S5bis ed S13 evidenziano come l'orizzonte superficiale allentato del Cassano Spinola, con spessore 2-5 m, vada a chiudersi lateralmente in congruenza con le evidenze di superficie. Segue il Cassano Spinola maggiormente consistente con $V_p < 1900$ m/s e $V_s < 475$ m/s sino a circa 10 m da p.c., ed oltre le marni di S. Agata con $V_p > 2000$ m/s.

Un'altra utile evidenza che ha guidato la progettazione deriva dal confronto fra le traverse sismiche SR4 - SR5 ed SR6 (vedi Figura 6.3) ortogonali alle curve di livello e parallele rispettivamente al tracciato di definitivo, al tracciato di preliminare ed alla possibile variante sud. In linea generale SR5 ed SR6 mettono in luce al piede del pendio (quindi in zona d'imbocco) un approfondimento dei terreni più veloci (sia in termini di onde P che di onde S), che per contro nella traversa SR4 parallela al tracciato scelto in sede di definitivo non si palesa. In un contesto di acclarata pericolosità geomorfologica anche questa informazione ha orientato la scelta verso il tracciato sviluppato in sede di progettazione definitiva.

Per una attribuzione della categoria di suolo di fondazione ai sensi della normativa vigente in zona d'imbocco della galleria sono stati eseguiti 2 stendimenti Masw che hanno evidenziato come entro i primi 30m non esista un substrato avente $V_s > 800$ m/s. I valori di V_s equivalente sono infatti compresi fra 370-415 m/s (vedi Tabella 6.10), configurando una categoria di suolo di fondazione tipo B ad entrambi gli imbocchi.

Masw	Ubicazione	V_s eq V_{s30} (m/s)
Masw 1	Imbocco W	415
Masw 2	Imbocco E	376

Tabella 6.10 Risultati prove Masw agli imbocchi della galleria

A conferma di questa indicazione, in corrispondenza del viadotto sull'Ellero e del ponte sull'Ermena i sondaggi S3DH e S12DH sono stati attrezzati con un tubo in PVC pesante per l'esecuzione di una prova down hole con la quale determinare il profilo di velocità delle onde sismiche di taglio e quindi, anche in questo caso, permettere un'attribuzione della categoria di suolo di fondazione. Coerentemente con le Masw risulta una V_s equivalente compresa fra 370-390 m/s (vedi Tabella 6.11) e quindi una categoria di suolo di fondazione tipo B.

Sondaggio	Ubicazione	V_s eq V_{s30} (m/s)
S3-DH	Viadotto Ellero	499
S12-DH	Viadotto Ermena	391

Tabella 6.11 Risultati prove Down Hole

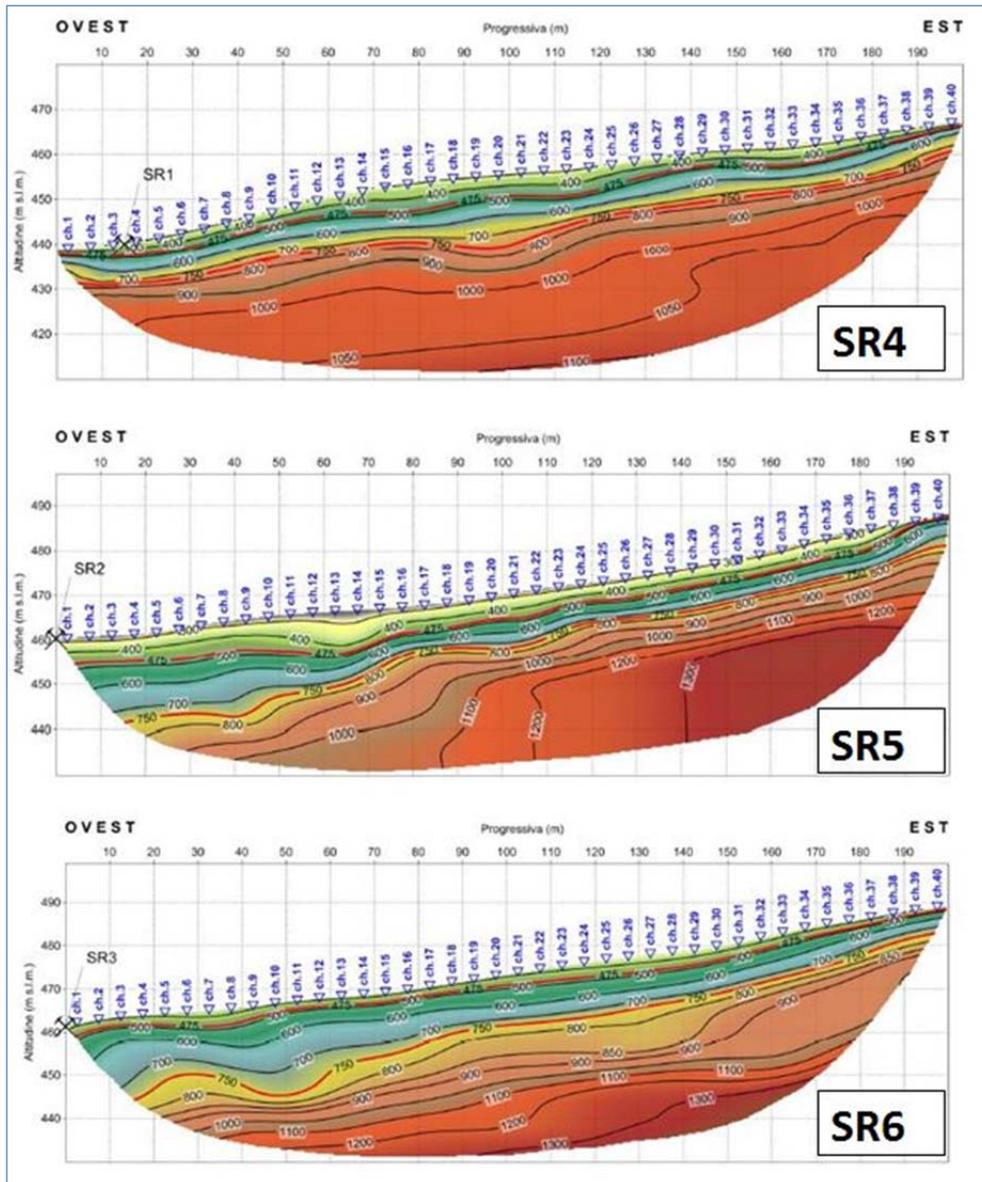


Figura 6.3 Confronto in Vs fra SR4 (tracciato selezionato), SR5 (tracciato di preliminare) e SR6 (variante sud). SR5 ed SR6 evidenziano al piede del versante (zona d'imbocco) un approfondimento dei rifrattori più veloci

7 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

7.1 DEPOSITI QUATERNARI

7.1.1 Unità Ab. Depositi alluvionali dei piani terrazzati

I depositi alluvionali terrazzati lungo l'Ellero non interessano il sedime progettuale. Sono invece cartografati ed interferiti dalle opere i terrazzi lungo l'Ermena che perimetrano il corso d'acqua nel tratto compreso fra fine intervento e l'imbocco Est della galleria S. Lorenzo, e in corrispondenza del Rione Borgato dov'è ubicato il ponte che scavalca lo stesso Ermena.

Litologicamente sono costituiti da sabbie limoso-argillose o limi sabbioso-argillosi (sabbia 30-50%, limo 30-50%, argilla 10-20%) con locali livelli ghiaie, LL 30-40, LP 20-25, IP inferiore a 20 e contenuto naturale d'acqua compreso tra il 17 ed il 20%. Secondo la UNI 10006 sono classificabili da A4 ad A6. Il terreno non mostra alcuna reazione all'HCl, palesando una composizione prevalentemente silicea.

Le prove di laboratorio riportano peso di volume medio intorno a 19 kN/m^3 , angolo d'attrito di $30^\circ\text{-}32^\circ$, in linea con quello dedotto dall'indice di plasticità tramite la correlazione di Sorense - Okkels (2013) secondo cui $\phi' = 43 - 10 \log(IP)$, e inferiore a quello estrapolato dalle SPT, coesione efficace 12-26 kPa e coesione non drenata da prova triassiale UU di 26 kPa a 4,5 m da p.c. Le prove pressiometriche in sito riportano valori di coesione non drenata intorno a 100 kPa fra 4m e 6 m da p.c. L'angolo d'attrito residuo da prove di taglio diretto è di 19° . Il modulo elastico da prova pressiometrica varia da 15 MPa a 25 MPa, inferiore a quello dedotto dalle prove SPT.

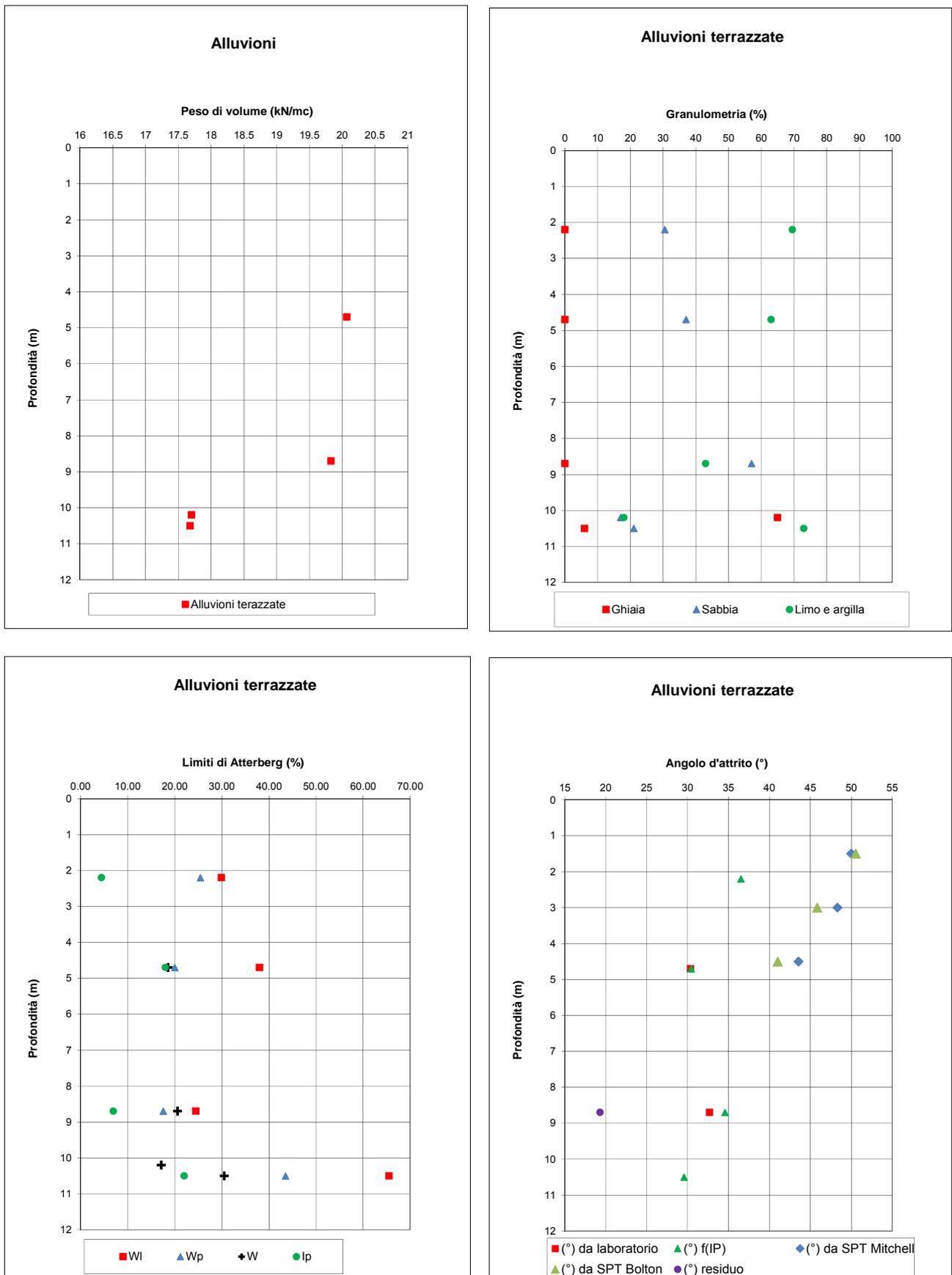


Figura 7.1 Alluvioni terrazzate. Peso di volume, granulometria, limiti di Atterberg e angolo d'attrito

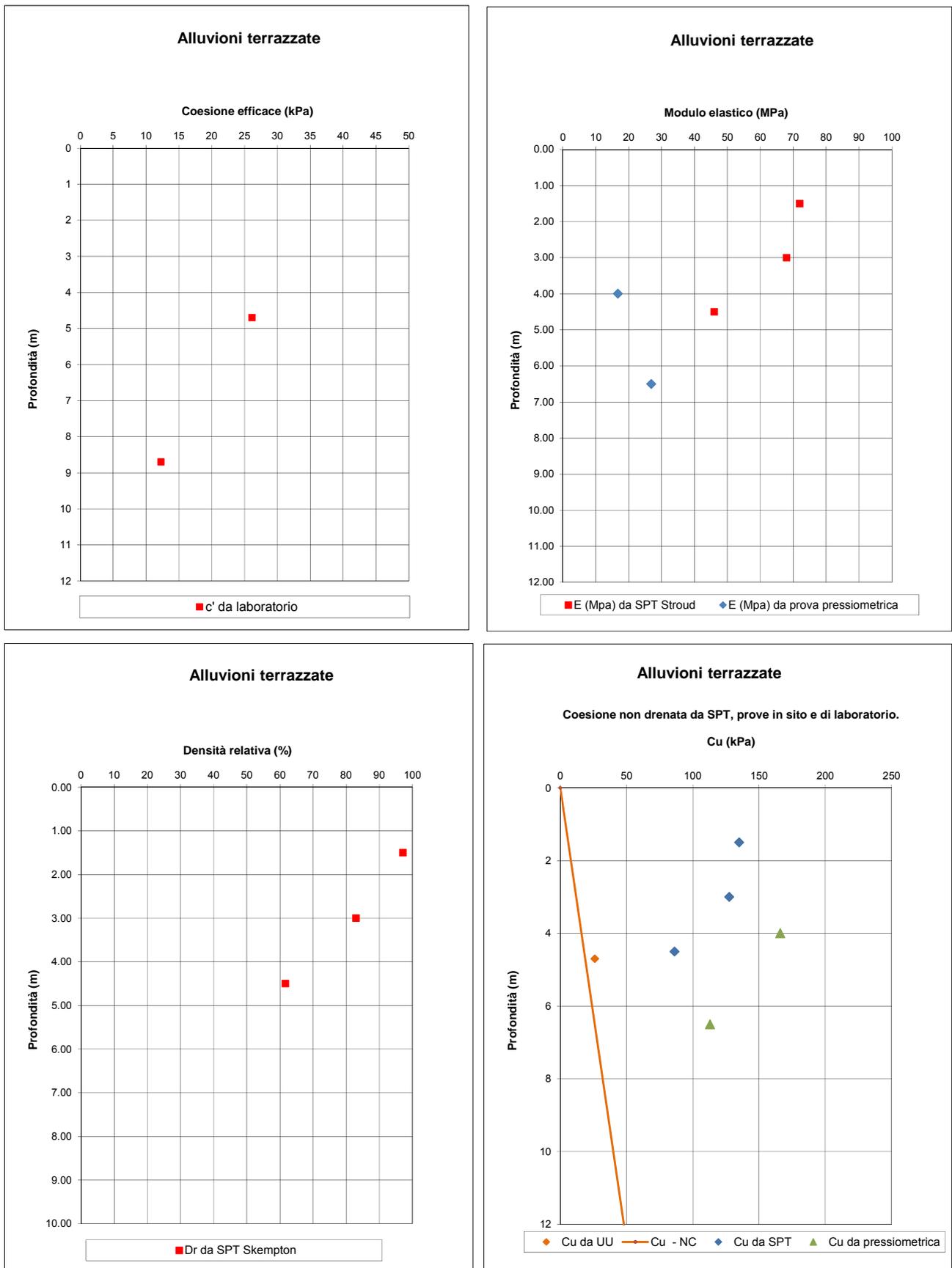


Figura 7.2 Alluvioni terrazzate. Coesione efficace, modulo elastico, densità relativa e coesione non drenata

In zona d'imbocco Est della galleria S. Lorenzo i terreni attribuiti alla coltre alluvionale terrazzata sono coinvolti da locali fenomeni deformativi che in superficie si manifestano con piccole nicchie di coronamento, avvallamenti, contropendenze, perdita di verticalità dei pali della luce. Si tratta di fenomeni corticali per la cui caratterizzazione, limitatamente ai primi metri sotto al piano campagna, è stata realizzata una back-analysis apposita nella Relazione Geotecnica, che ha consentito di indicare una condizione di resistenza residua (coesione nulla e angolo d'attrito di circa 19°) la quale, associata a temporanei innalzamenti del livello di falda al p.c., giustifica pienamente il raggiungimento di una condizione di equilibrio limite superficiale.

7.2 FORMAZIONI MIOCENICHE

7.2.1 Unità Cs. Formazione di Cassano Spinola

Geologicamente è un deposito post evaporitico in facies di lago mare caratterizzato da una sensibile eterogeneità dovuta alle condizioni di sedimentazione e, probabilmente, a rimaneggiamenti successivi. A prevalere è la facies sabbioso limosa (cui localmente soggiace una facies sabbioso ghiaioso) spesso più superficiale e per questo coinvolta, lungo il versante occidentale della collina di S Lorenzo, in una serie di fenomeni deformativi ben individuabili sul terreno e riportati nella documentazione di pianificazione territoriale. In particolare buona parte del versante in questione è occupato da un esteso perimetro di antica frana quiescente (paleofrana?) al cui interno si sviluppano frane di scivolamento, più raramente creep o colate, a carattere locale, quiescenti o stagionali, che il tracciato selezionato in fase progettuale evita. Il progetto si sviluppa comunque considerando condizioni di potenziale instabilità geomorfologica in zona d'imbocco. Un'altra caratteristica di questa unità è la presenza di blocchi grossolani (da pluridecimetri e metrici) quarziticici o quarzoarenitici, più frequenti negli orizzonti superficiali (indicativamente nei primi 3-4 m da p.c.). Le prove di laboratorio confermano l'eterogeneità granulometrica con una prevalenza di sabbie limoso argillose con ghiaia (ghiaia 0-20%, sabbia 40-70%, limo 20-25%, argilla 5-15%) aventi limite di liquidità 30-50, limite di plasticità 20-30 e indice di plasticità compreso fra 15-25. Localmente la frazione limoso argillosa prevale (60-70%) su quella sabbiosa. L'eterogeneità è confermata dalla classificazione UNI 10006 con circa metà campioni classificabili come A2.4 – A2.6 e l'altra metà come A7 o più raramente A4. Il peso di volume è compreso fra 18-19 kN/mc mentre la reazione all'HCl sempre assente. Per la caratterizzazione dei terreni sono state eseguite prove SPT a diverse profondità e si sono stati prelevati campioni rimaneggiati ed indisturbati. Dalle prove di laboratorio risultano angoli d'attrito variabili fra 30°-35°, inferiori ai valori estrapolabili dalle prove SPT ed in linea con quelli deducibili dall'indice di plasticità. La coesione efficace varia fra 20-30 kPa con punte sino a 35 kPa, mentre la coesione non drenata dedotta dalle SPT evidenzia un materiale normal consolidato o leggermente sovraconsolidato, specie in superficie. La densità relativa è compresa fra 40-50% mentre il modulo elastico,

crescente con la profondità, è variabile da 15 MPa in superficie a 50 MPa intorno a 15-20 m da p.c. L'angolo d'attrito residuo è di 15°-22°.

Anche in questo caso, stante la presenza di fenomeni deformativi circostanti la zona d'imbocco, nella Relazione Geotecnica è stata effettuata una back analysis del versante ricercando i parametri di coesione ed angolo d'attrito che si associano ad una condizione di equilibrio limite, in presenza di falda prossima a piano campagna (condizione confermata dai piezometri installati). Ne derivano valori di coesione nulla e angolo d'attrito di circa 19°, in linea con le prove di taglio residue.

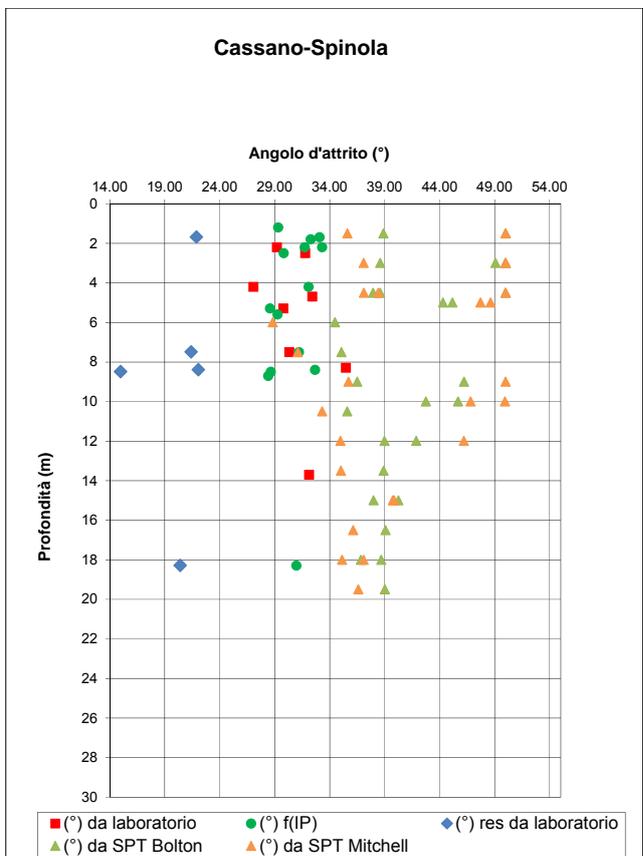
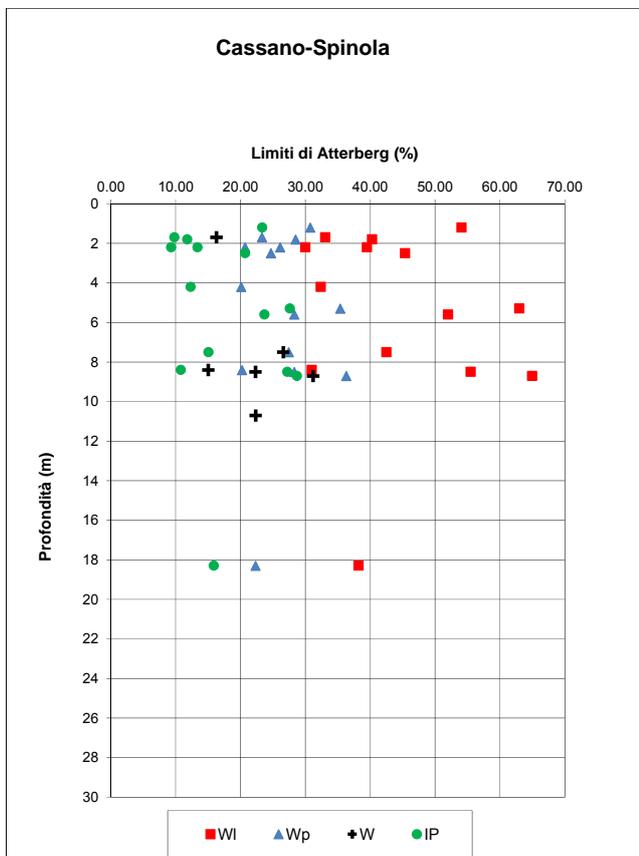
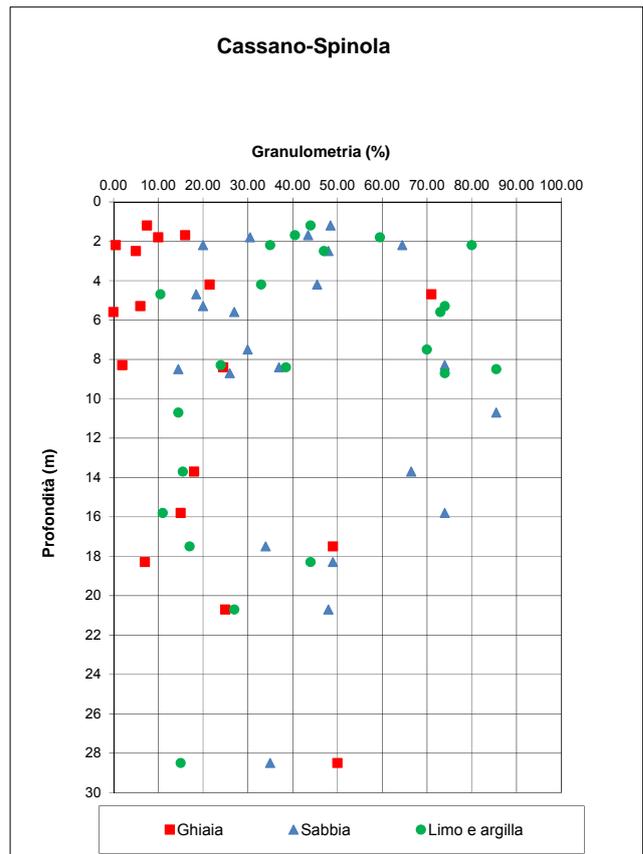
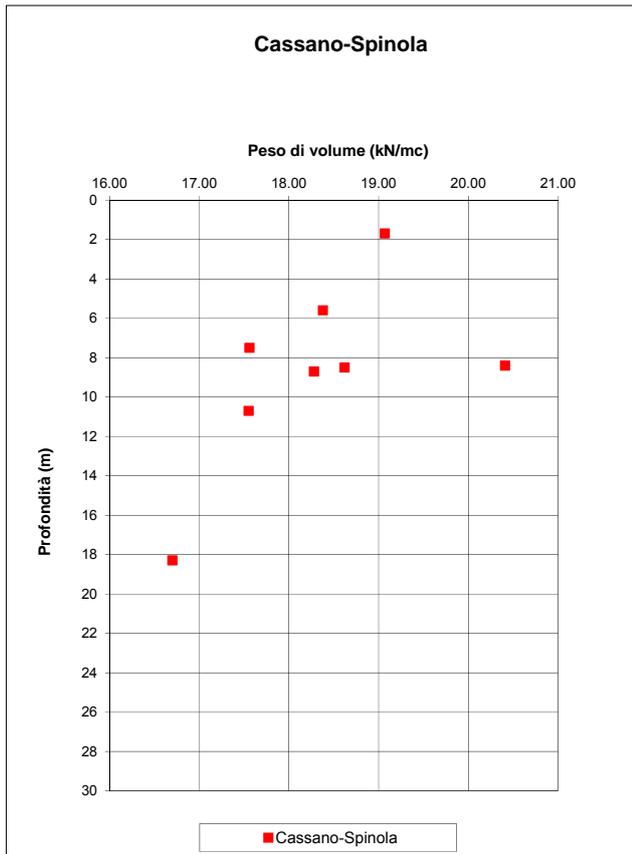


Figura 7.3 Cassano Spinola. Peso di volume granulometria, limiti di Atterberg, angolo d'attrito da SPT, prove di laboratorio e dall'indice di plasticità

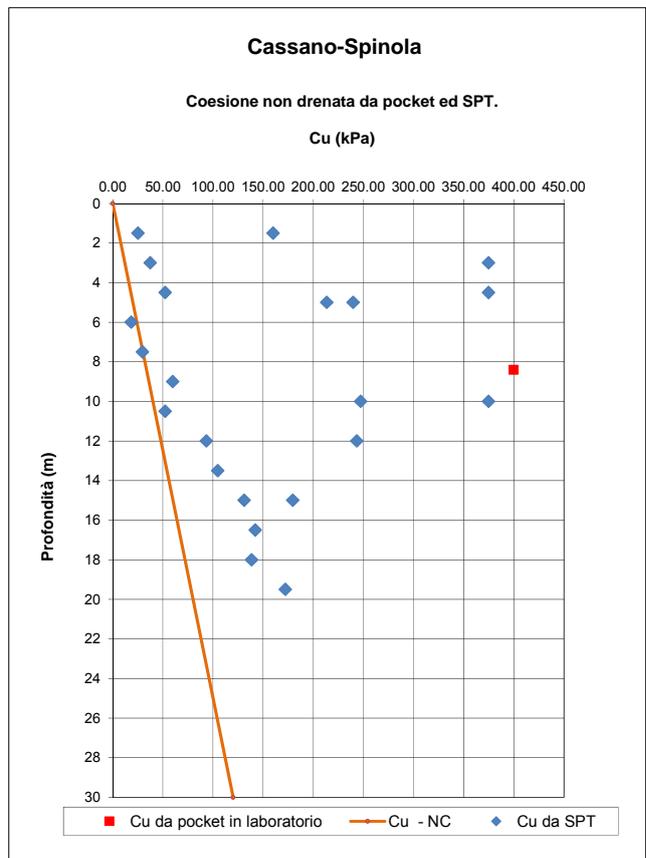
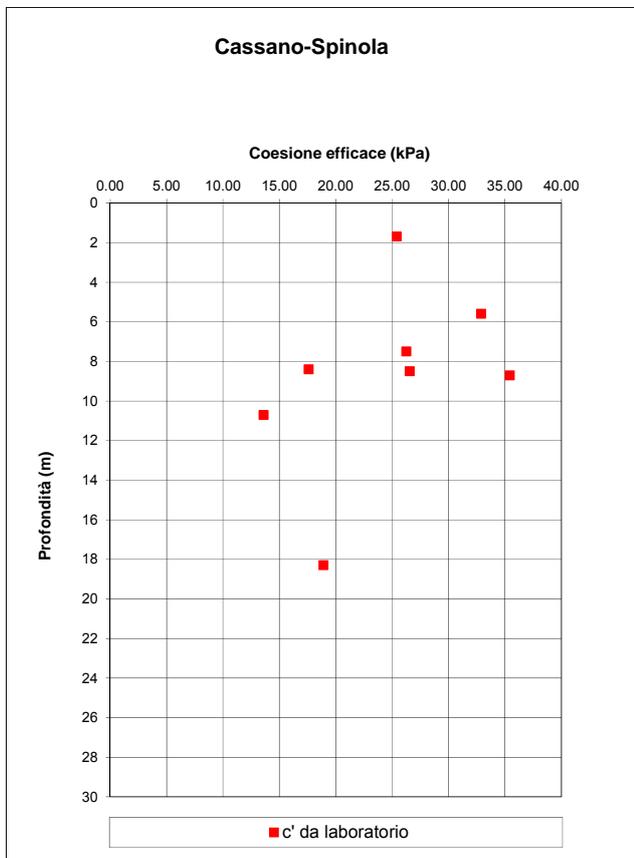
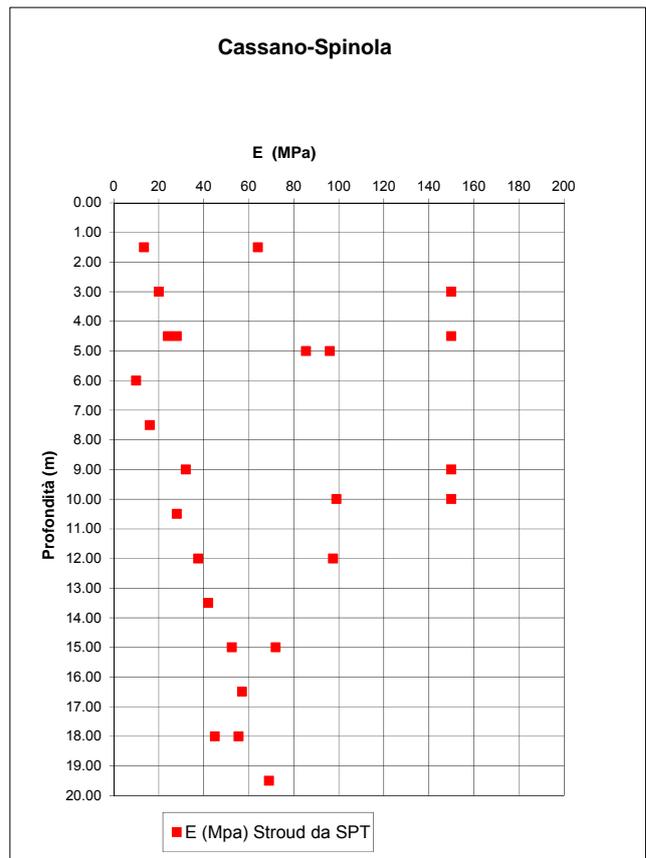
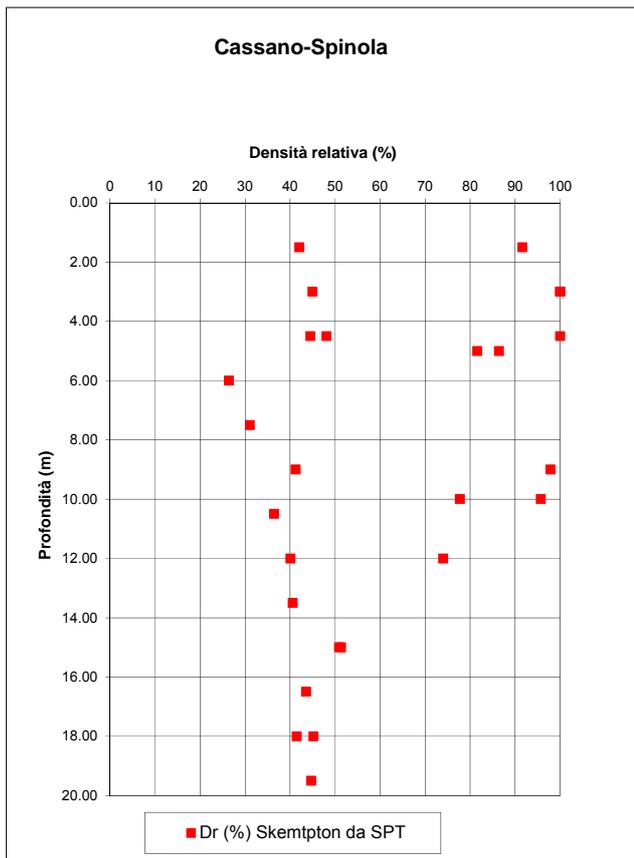


Figura 7.4 Cassano Spinola. Densità relativa, modulo elastico e coesione non drenata da SPT. Coesione efficace e coesione non drenata da prove di laboratorio.

7.2.2 Unità Sa. Marne di S. Agata Fossili

Sono marne e marne argillose di colore grigio chiaro, talora fossilifere, eterogenee più a livello strutturale che granulometrico, intercettate dagli scavi in galleria in prossimità delle due zone di imbocco. Sono materiali complessi prelevati, complice anche il disturbo arrecato in fase di carotaggio, ora come campioni rimaneggiati, ora come indisturbati, ora come litoidi (è stato classificato come litoide circa il 60% dei campioni). Dall'insieme dei dati disponibili, visionate le cassette dei sondaggi e visti anche i risultati delle indagini geofisiche, dove dalle prove sismiche a rifrazione agli imbocchi le Vs sono crescenti verso il basso da 700 m/s a 1.000 m/s, mentre dalle Masw e dalle down hole risultano valori di Vs fra 700-800 m/s, si ritiene che tali marne possano essere prevalentemente classificate come rocce tenere (weak rocks). Trattasi quindi di materiali di transizione fra terre e rocce, il cui comportamento è influenzato dallo stato tensionale; a tensioni modeste esibiscono un comportamento simile a quello di una roccia (alta rigidità, legame tensione deformazione quasi lineare, rottura fragile) ma ad alte tensioni mostrano il comportamento di un terreno (bassa rigidità, comportamento duttile, grandi deformazioni a rottura). Ciò non toglie che allo scavo potranno comunque incontrarsi zone con caratteristiche più terrose alternate in maniera irregolare ad altre con caratteristiche lapidee o pseudolapidee.

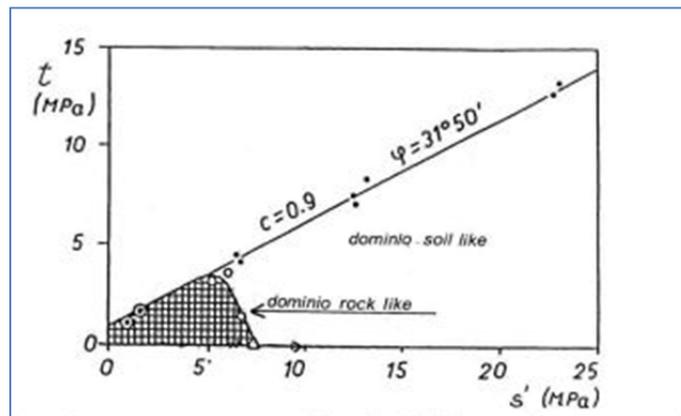


Figura 7.5 Involuppo della rottura in roccia tenera con indicazione del dominio lapideo e pulverulento (Tufo napoletano, da Pellegrino 1968)

Trattandosi di depositi torbiditici, e come tali tipicamente eterogenei, alla prevalente facies marnosa si affiancano subordinate intercalazioni conglomeratiche, arenacee, sabbiose e ghiaiose (Sar) via via più frequenti nella parte inferiore della successione e che, laddove maggiormente estese, nel profilo geologico e in quello geotecnico sono rappresentate a parte (unità Sar). Il passaggio fra una facies e l'altra non è dettato da regole geologiche certe e può avvenire in spazi anche brevi.

Laddove l'unità è affiorante o subaffiorante è spesso presente una coltre di alterazione argilloso marnosa da poco a mediamente consistente di colore marrone (indicata con la sigla Saa), riportata sul profilo geologico e geotecnico lungo il versante est della collina di S. Lorenzo, dove si sviluppano frane tipo colata ad andamento tipicamente

stagionale. Per essa non viene fornita la caratterizzazione geotecnica in quanto resta confinata in aree a monte ed esterne rispetto quelle interessate dai lavori.

Una tale variabilità ed eterogeneità è stata ben evidenziata dalla campagna d'indagine 2019, nel corso della quale praticamente tutti i sondaggi hanno parzialmente interessato questa formazione. Evidenti sono infatti le alternanze tra porzioni più marnose e porzioni più arenacee, oltre che i livelli quarziticci localmente presenti.

Lo stato di fratturazione denunciato dai sondaggi è anch'esso fortemente eterogeneo, il che in parte è dovuto alle caratteristiche intrinseche della formazione (maggiore/minore cementazione locale), in parte probabilmente accentuato dal disturbo indotto dal carotaggio. A questo si aggiunge il fatto che, come evidenziato da Hoek [4], materiali di origine molassica possono manifestare, quando esposti all'aria, fenomeni di fissilità ed una significativa perdita di struttura e resistenza, tanto maggiore quanto più prolungata è la durata dell'esposizione.

Nel complesso nel corso della campagna 2019 è stato possibile isolare numerosi campioni da sottoporre a prove di laboratorio, di cui oltre il 60% è rappresentato da campioni litoidi che sono stati sottoposti a prove di compressione semplice, Point Load Test e prove di resistenza a trazione. I restanti campioni sono stati classificati come rimaneggiati, e sono stati sottoposti principalmente a prove di classificazione granulometrica, prove di taglio diretto e triassiali, la cui valenza è limitata in relazione al disturbo arrecato al campione.

La determinazione del peso di volume, realizzata sia sui campioni rimaneggiati che su quelli litoidi, Figura 7.6, indica un peso medio di 20.5 kN/m³. La reazione all'HCL è generalmente vivace, ad eccezione di limitati orizzonti a carattere prevalentemente quarziticco.

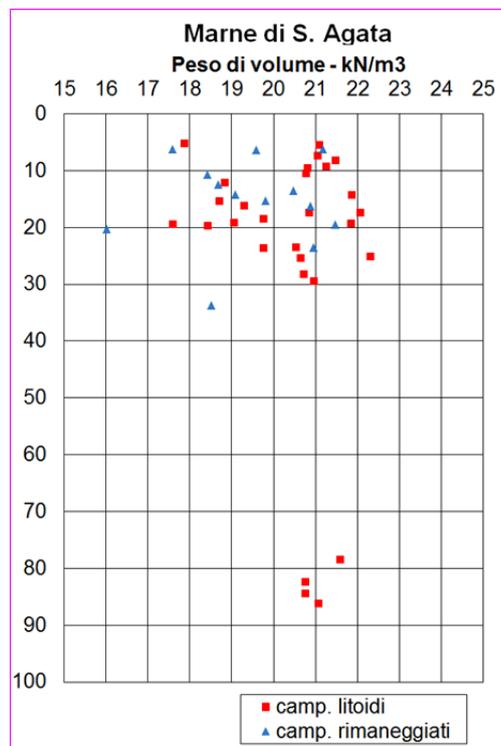


Figura 7.6 Marne di S. Agata Fossili: campioni litoidi e rimaneggiati - peso di volume

Con riferimento ai campioni rimaneggiati, sono poi disponibili numerose analisi granulometriche che mettono in luce una composizione fondamentalmente limoso argilloso sabbiosa (limo 30-50%, argilla 10-35%, sabbia 20-35%) con una subordinata frazione ghiaiosa rilevata solo localmente, determinazione dei limiti di Atterberg e prove di classificazione UNI 10006 che indicano una categoria A6 o A7, Figura 7.7. Le prove di taglio e triassiali evidenziano valori dell'angolo di attrito di 30°-35° ed una coesione efficace di 25-40 kPa, Figura 7.8. E' inoltre disponibile un campione definito come indisturbato, prelevato nel sondaggio S12 fuori tracciato, che sottoposto a prova triassiale giunge a risultati analoghi a quelli precedentemente esposti per provini rimaneggiati, a conferma del disturbo indotto dalle operazioni di carotaggio e prelievo in un tratto in cui la descrizione stratigrafica del carotaggio indica la presenza di marne sabbiose.

La coesione non drenata estrapolata dalle compressioni semplici ELL, da triassiali UU e dalle SPT, Figura 7.9, denota un materiale sovraconsolidato in superficie, che alle massime profondità indagate si presenta normalconsolidato.

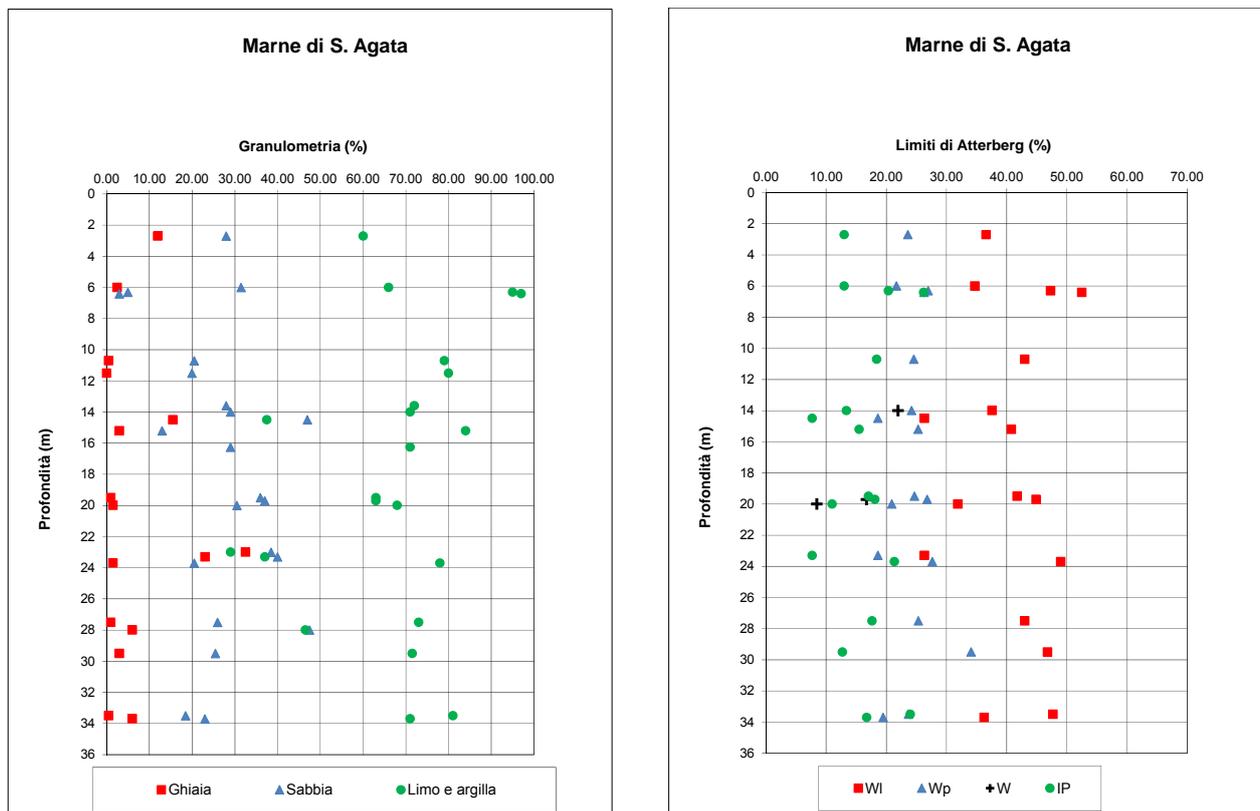


Figura 7.7 Marne di S. Agata Fossili: campioni rimaneggiati - granulometria e limiti di Atterberg

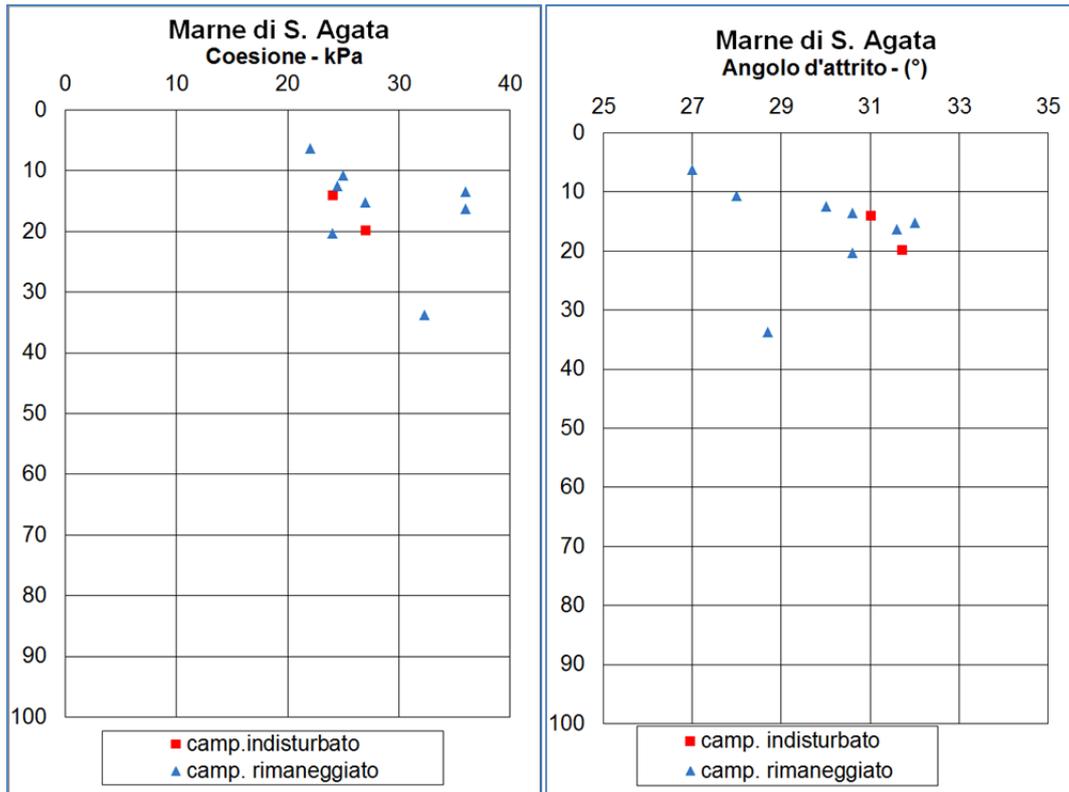


Figura 7.8 Marne di S. Agata Fossili: campioni rimaneggiati - coesione ed angolo di attrito efficace

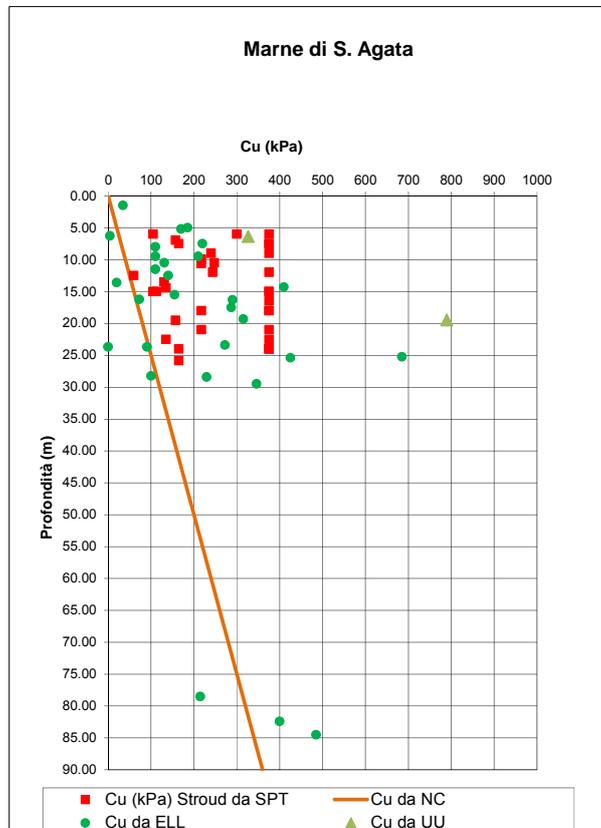


Figura 7.9 Marne di S. Agata Fossili: campioni rimaneggiati - coesione non drenata

Le prove eseguite sui campioni lapidei indicano invece uno scenario diverso, che meglio si correla ad una weak rock, ed anche ai risultati delle prove di deformabilità eseguite nei fori di sondaggio. I risultati delle prove di compressione semplice (CX) e prove Point Load (PLT) sono proposti nel seguente grafico di Figura 7.10 a sinistra. Le prove PLT forniscono in output l'indice di resistenza $I_s(50)$, che in questa sede è stato messo a confronto con la resistenza a compressione da prove CX adottando un fattore di correlazione pari a 15. L'eterogeneità strutturale di cui si è parlato in precedenza è di nuovo evidente in questi risultati, con valori di resistenza a compressione semplice variabili fra 0.6 e 13 MPa ed un valore medio di 4 MPa.

Nel corso delle prove di compressione è stato anche possibile monitorare le deformazioni dei provini al crescere del carico, e quindi definire il correlato modulo elastico, i cui risultati in termini di modulo secante e tangente sono visibili nel grafico di Figura 7.10 a destra. Si rileva nuovamente la già citata eterogeneità, con valori dispersi dai 400 ai 4000 MPa. Il grafico riporta inoltre i risultati di alcune prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio S09 ed S10, posti nella zona interessata dalla galleria naturale. In questo caso i risultati risultano compresi tra 500 e 1000 MPa. La differenza tra i due risultati è legata al fattore di scala che caratterizza la prova, in questo senso il modulo E derivato dalle prove dilatometriche è certamente più rappresentativo del comportamento complessivo dell'ammasso roccioso alla scala delle opere. A conferma di questo, facendo riferimento alla già citata pubblicazione [4] di Hoek relativa alla caratterizzazione dei depositi sedimentari (flysch e molasse), l'autore indica la seguente relazione che lega la resistenza a compressione semplice della roccia intatta σ_{ci} ed il modulo elastico dell'ammasso roccioso:

$$E = \sigma_{ci} \cdot 200 = 4 \cdot 200 = 800 \text{ MPa}$$

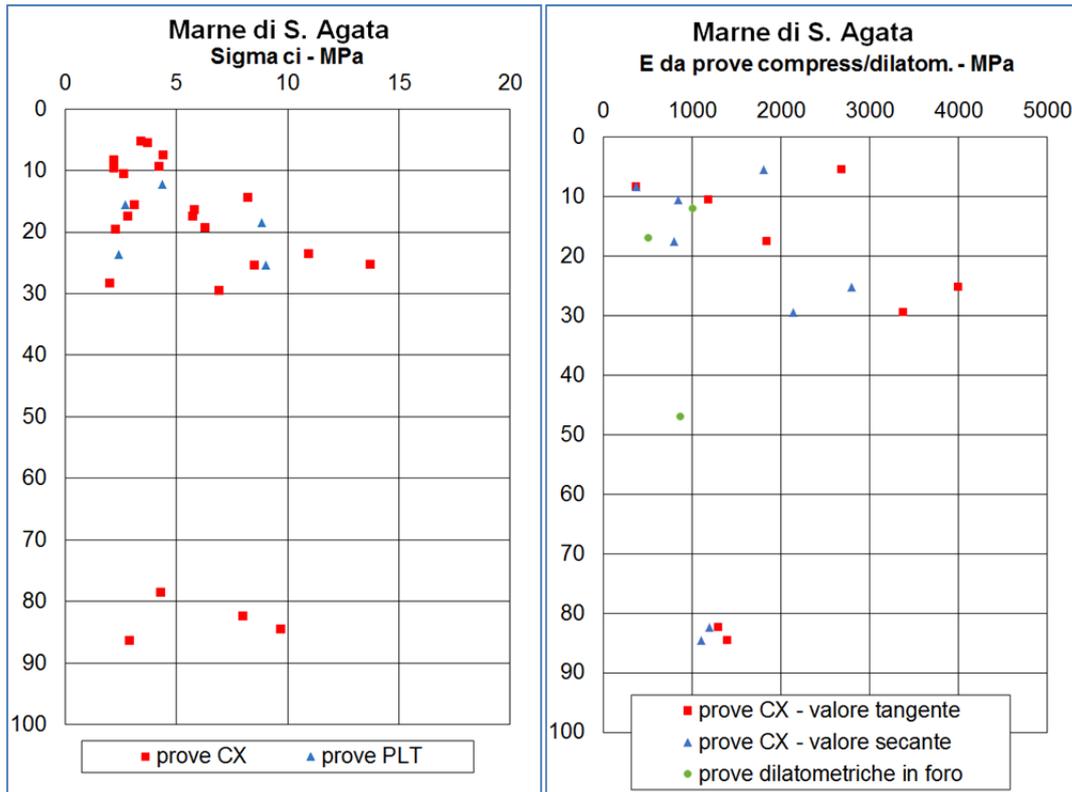


Figura 7.10 Marne di S. Agata Fossili: campioni litoidi - resistenza a compressione e modulo elastico

Per la caratterizzazione dell'unità in esame si è ritenuto adeguato riferirsi alla formazione come ad una weak rock, caratterizzata da una struttura rocciosa ben definita che si correla ad una resistenza a compressione piuttosto bassa. In questo senso le prove di laboratorio eseguite sui campioni rimaneggiati possono essere ritenute rappresentative solo di una condizione di resistenza residua, in quanto il rimaneggiamento porta ad una significativa perdita di resistenza coesiva. Questa evidenza trova conferma nei risultati delle prove dilatometriche in foro e nella visione delle carote di sondaggio che, anche in corrispondenza dei punti di prelievo dei campioni rimaneggiati, mostrano la presenza di una struttura rocciosa che a tratti subisce un rimaneggiamento più accentuato in virtù della scarsa resistenza meccanica che la caratterizza.

Ciò detto, per la caratterizzazione delle Marne di S. Agata Fossili si è fatto riferimento al criterio di Hoek & Brown (Hoek & Marinos 2000) ed alle classificazioni geomeccaniche GSI ed RMR. La caratterizzazione qui proposta cerca di descrivere in termini medi la formazione in esame. Le evidenze puntuali fornite dai sondaggi consentono invece di suddividere il tratto in cui il tracciato interessa questa formazione rocciosa in aree omogenee, che si differenziano tra loro per il grado di cementazione e di fratturazione via via atteso.

La classificazione di Bieniawski, riepilogata in Figura 7.12, consente di determinare i seguenti indici di classificazione dell'ammasso:

- $RMR = R1 + R2 + R3 + R4 + R5 + R6$

- $RMR89 = R1 + R2 + R3 + R4 + R5$, escludendo il termine $R6$ relativo all'orientazione dei giunti rispetto alla direzione di avanzamento
- $RMR'89 = R1 + R2 + R3 + R4 + 15$, posto $R5$ pari a 15 per una condizione idraulica asciutta

Nel seguito si farà riferimento ai soli indici di Bieniawski $RMR89$ ed $RMR'89$, escludendo cioè l' RMR che tiene conto dell'orientazione dei giunti, vista la natura degli ammassi rocciosi coinvolti per i quali si ritiene poco rappresentativo il parametro $R6$. In ogni caso, considerando un avanzamento da ovest verso est., in una condizione di sostanziale franapoggio rispetto alla stratificazione, per ciascun valore di $RMR89$ è possibile risalire al corrispondente RMR semplicemente sottraendo 5 punti.

Per quanto riguarda invece l'indice GSI - Geological Strength Index -, il suo valore può essere ottenuto a partire dall' $RMR'89$ mediante la correlazione $GSI = RMR'89 - 5$ oppure utilizzando gli abachi realizzati da Hoek e specifici per le rocce sedimentarie, rif. [4], si veda a riguardo la seguente Figura 7.11, che riporta nella parte superiore l'abaco valido per ammassi rocciosi confinati in profondità, nella parte inferiore quello per ammassi superficiali, che si caratterizzano per un comportamento maggiormente fissile. Nel caso in esame, dal momento che tutte le opere in progetto interessano la formazione di S. Agata con coperture ridotte, si può fare riferimento all'abaco per ammassi fissili superficiali.

Sulla base delle caratteristiche medie del materiale dedotte dalle prove di laboratorio e dalle osservazioni effettuate sulle cassette (l'unità stratigrafica non affiora) alla formazione delle Marne di S. Agata Fossili ricadenti nell'area in studio sono stati attribuiti i parametri di $RMR'89$, $RMR89$, GSI riepilogati nelle seguenti Tabella 7.1, valori di lower bound, e Tabella 7.2, valori di upper bound. Il sondaggio di riferimento è S06, che interessa la galleria lato Ovest e ben descrive le diffuse intercalazioni di marne sabbiose con livelli arenacei, conglomeratici e a tratti sabbiosi caratterizzanti la porzione più superficiale della formazione in esame, Figura 7.13. La differenza tra le due tabelle proposte è relativa al solo indice RQD , il cui valore atteso cresce leggermente con la profondità da un intervallo di 10-30% per la porzione superficiale agli imbocchi fino a 25-40% nel tratto immediatamente successivo. Discorso diverso vale invece per il tratto centrale della galleria naturale, dove non sono disponibili indagini dirette ma solo una tomografia elettrica che ha indicato una riduzione locale di resistività, interpretata come una locale riduzione dell'indice RQD a valori compresi tra 20 e 30%, in analogia alle zone adiacenti alle aree di imbocco. In definitiva la caratterizzazione di lower bound è stata adottata per gli imbocchi e la parte centrale della galleria entro le marne di S. Agata, mentre i valori di upper bound sono ritenuti rappresentativi delle zone a media copertura entro la stessa formazione rocciosa.

Questa stessa formazione è stata intercettata anche da altri sondaggi lungo il tracciato, quali per esempio S08 e S09, che hanno rilevato a maggiori profondità orizzonti più omogenei di marne grigie caratterizzate da RQD elevati (50-80%), in tratti in cui però le opere in progetto risultano all'interno della sottostante Formazione di Lequio (parte centrale e lato Est della galleria naturale).

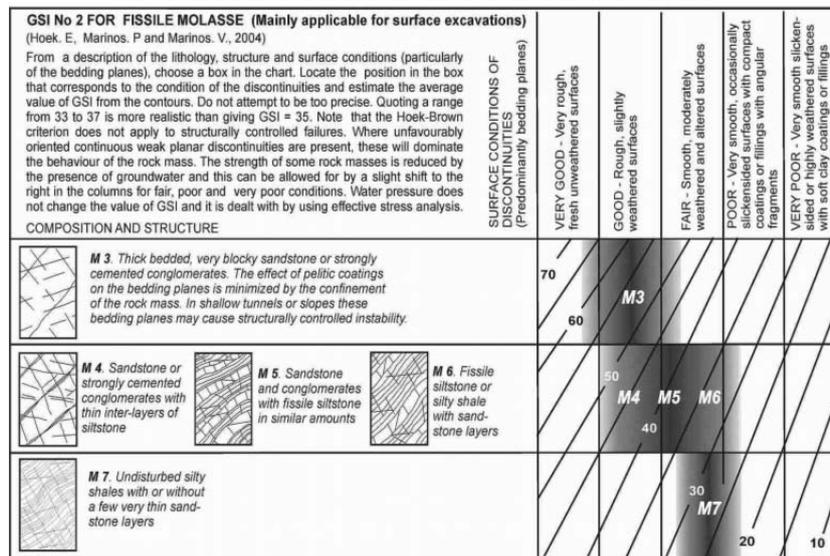
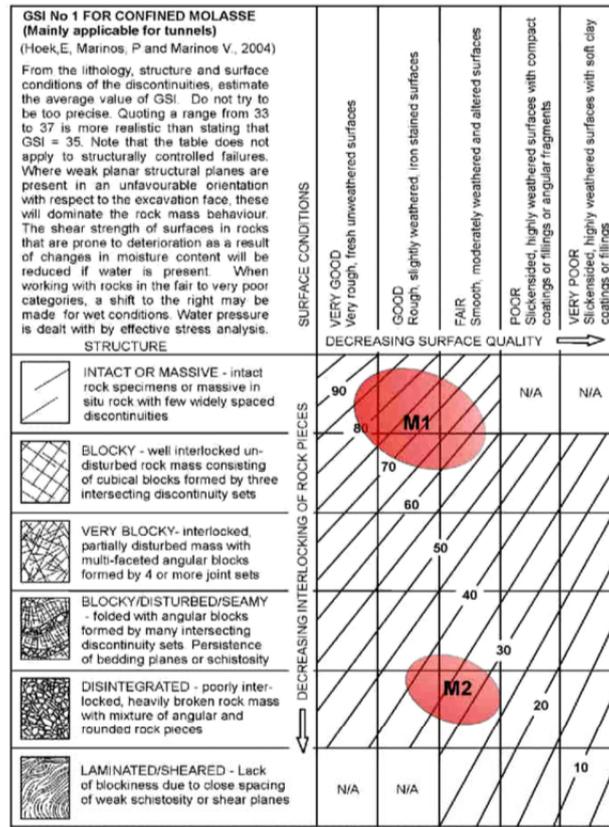


Figura 7.11 Abacchi per la valutazione del GSI per ammassi sedimentari di scarsa resistenza (flysch e molasse)

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Joint water press)/(Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angle of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions									
Discontinuity length (persistence)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (aperture)			None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided		
Rating			6	5	3	1	0		
Infilling (gouge)			None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	4	2	2	0		
Weathering			Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed		
Ratings			6	5	3	1	0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING**									
Strike perpendicular to tunnel axis				Strike parallel to tunnel axis					
Drive with dip - Dip 45 - 90°		Drive with dip - Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°			
Very favourable		Favourable		Very unfavourable		Fair			
Drive against dip - Dip 45-90°		Drive against dip - Dip 20-45°		Dip 0-20 - Irrespective of strike°					
Fair		Unfavourable		Fair					

Figura 7.12 Classificazione di Bieniawski con punteggio di attribuzione ai vari parametri e distinzione delle classi

Marne di S. Agata Fossili (rif. sondaggio S06)			
Parametro		Valore	Rating
R1	Resistenza roccia intatta	1-5 MPa	1
R2	RQD	10-30%	3
R3	Spaziatura discontinuità	80-200 mm	8
R4	Condizioni giunti	Poco continui, accostati, lisci, moderatamente alterati	12
R5	Condizione idraulica	Stillicidio	4
RMR89 (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)			28
RMR'89 (R1 + R2 + R3 + R4 + 15)			39
GSI			34

Tabella 7.1 Marne di S. Agata Fossili: classificazione geomeccanica di lower bound

Marne di S. Agata Fossili (rif. sondaggio S06)			
Parametro		Valore	Rating
R1	Resistenza roccia intatta	1-5 MPa	1
R2	RQD	25-40%	6
R3	Spaziatura discontinuità	80-200 mm	8
R4	Condizioni giunti	Poco continui, accostati, lisci, moderatamente alterati	12
R5	Condizione idraulica	Stillicidio	4
RMR89 (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)			31
RMR'89 (R1 + R2 + R3 + R4 + 15)			42
GSI			37

Tabella 7.2 Marne di S. Agata Fossili: classificazione geomeccanica di upper bound



Figura 7.13 Sondaggio S06 tra 10 e 20 m, all'altezza della galleria naturale

Se ne deduce un **GSI compreso tra 30 e 40** ed un **RMR89 di 28-31** a cui compete, secondo Bieniawski, una classe IV scadente. Con riferimento all'abaco di Figura 7.11, la categoria che meglio descrive le condizioni medie dell'ammasso marnoso è infatti quella denominata M5.

Quanto sopra premesso per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso si è fatto riferimento al criterio di rottura di Hoek-Brown che può essere genericamente espresso sulla base della seguente espressione:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Con:

σ_1 e σ_3 = sforzi efficaci principali rispettivamente minimo e massimo a rottura;

m_b , s ed a = costanti dell'ammasso, dove $s = 1$ per roccia intatta (matrice);

σ_{ci} = resistenza a compressione della roccia intatta.

I parametri costitutivi "s", "a" ed " m_b " che caratterizzano l'ammasso roccioso possono essere ricavati sulla base dell'indice empirico GSI. Le correlazioni di riferimento sono quelle indicate da Hoek et al. nella riformulazione dell'inviluppo del 2002 ovvero:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

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

Con:

m_i = parametro empirico che definisce l'inclinazione dell'inviluppo della roccia intatta e dipende dalla litologia.

D = parametro di danneggiamento dell'ammasso funzione del metodo di scavo; varia fra 0 (roccia non disturbata) e 1 (roccia molto disturbata).

Il modulo di deformazione dell'ammasso roccioso può essere ricavato dalla formulazione proposta da Hoek in [4]:

$$E = 200 \cdot \sigma_{ci}$$

Dato che molti programmi di calcolo richiedono l'introduzione dei parametri di resistenza del terreno secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, è possibile derivare l'angolo d'attrito e la coesione equivalente dell'ammasso roccioso per linearizzazione dell'inviluppo di Hoek-Brown nell'intorno della tensione litostatica " σ_{3max} " (con " $\sigma_{3n} = \sigma_{3max}/\sigma_{ci}$ "):

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

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

Quanto sopra premesso si riepilogano i valori di ingresso adottati per il calcolo della resistenza dell'ammasso:

- $\gamma = 20.5 \text{ KN/m}^3$
- $\sigma_{ci} = 4 \text{ MPa}$ che rappresenta il valore medio ricavato dalle prove di compressione semplice
- $m_i = 7$ che è il valore suggerito da Hoek per ammassi marnosi
- $D = 0.20$ riferito ad un ammasso moderatamente danneggiato dalle operazioni di scavo.

Considerando una profondità media dell'opera di 20 m da p.c., rappresentativa dei tratti di galleria prossimi agli imbocchi, ed un indice GSI medio variabile tra 30 (assunto prudentemente come valore inferiore del range al posto di 34) e 37, dalla risoluzione delle formulazioni proposte si ottengono i seguenti parametri di caratterizzazione alla copertura, Figura 7.14 e Figura 7.15:

h = 20m	GSI = 30	GSI = 37
coesione efficace - kPa	38	45
angolo d'attrito (°)	32	34
modulo elastico (MPa)	500	800

Per la sezione in zona d'imbocco considerando una copertura di 10 m ed il GSI minimo nell'ambito del range considerato (30) si ottengono i seguenti parametri di Figura 7.16:

h = 10m	GSI = 30
coesione efficace - kPa	25
angolo d'attrito (°)	37
modulo elastico (MPa)	500

Nel tratto centrale della galleria naturale la copertura raggiunge invece i 90m con un GSI medio di 34-35, a cui si associano i seguenti parametri di caratterizzazione, Figura 7.17:

h = 90m	GSI = 34-35
coesione efficace - kPa	104
angolo d'attrito (°)	23
modulo elastico (MPa)	700

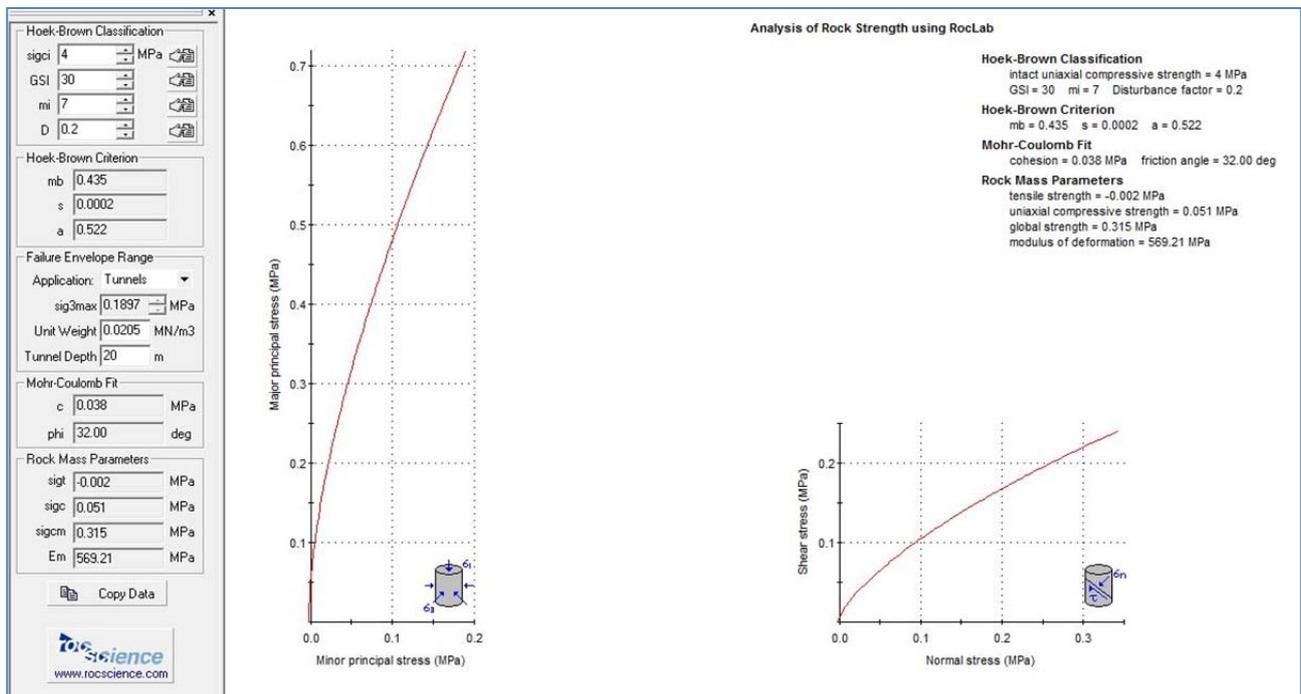


Figura 7.14 Marne di S. Agata Fossili: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb per copertura 20m – lower bound

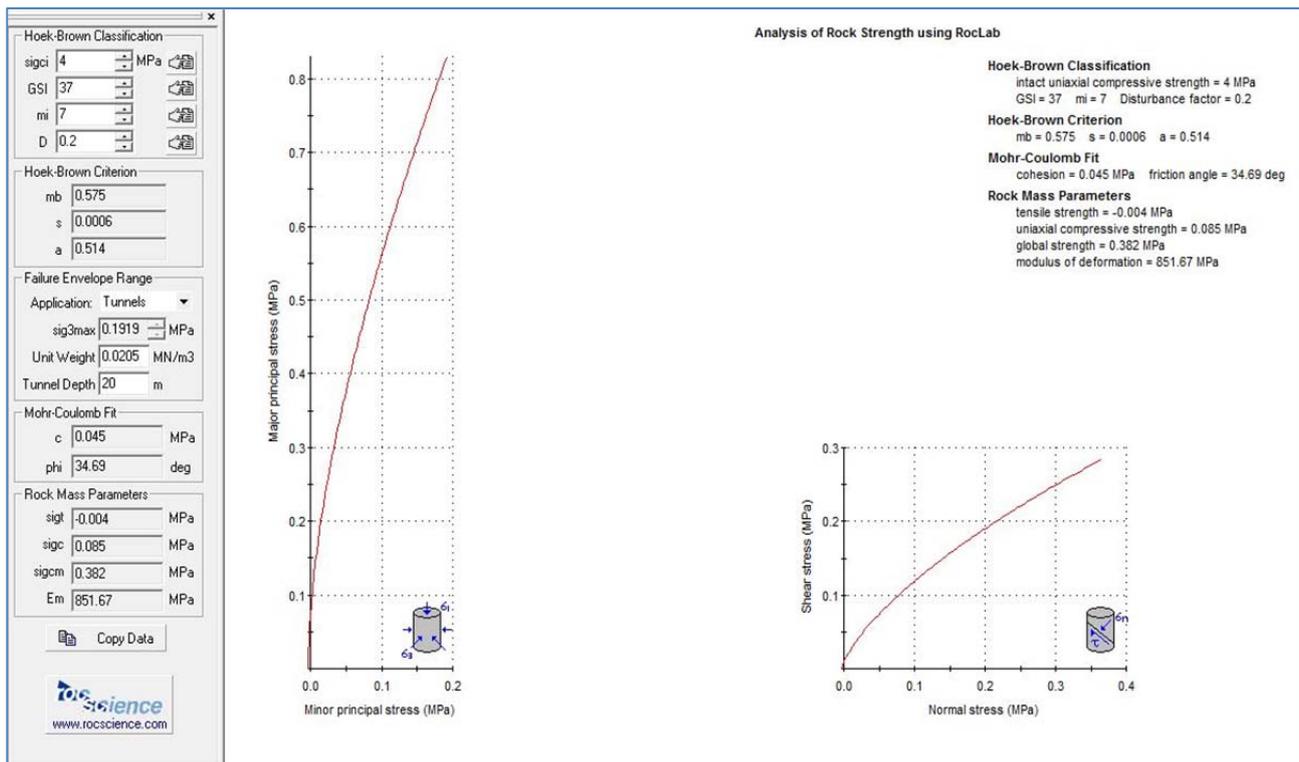


Figura 7.15 Marne di S. Agata Fossili: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb per copertura 20m – upper bound

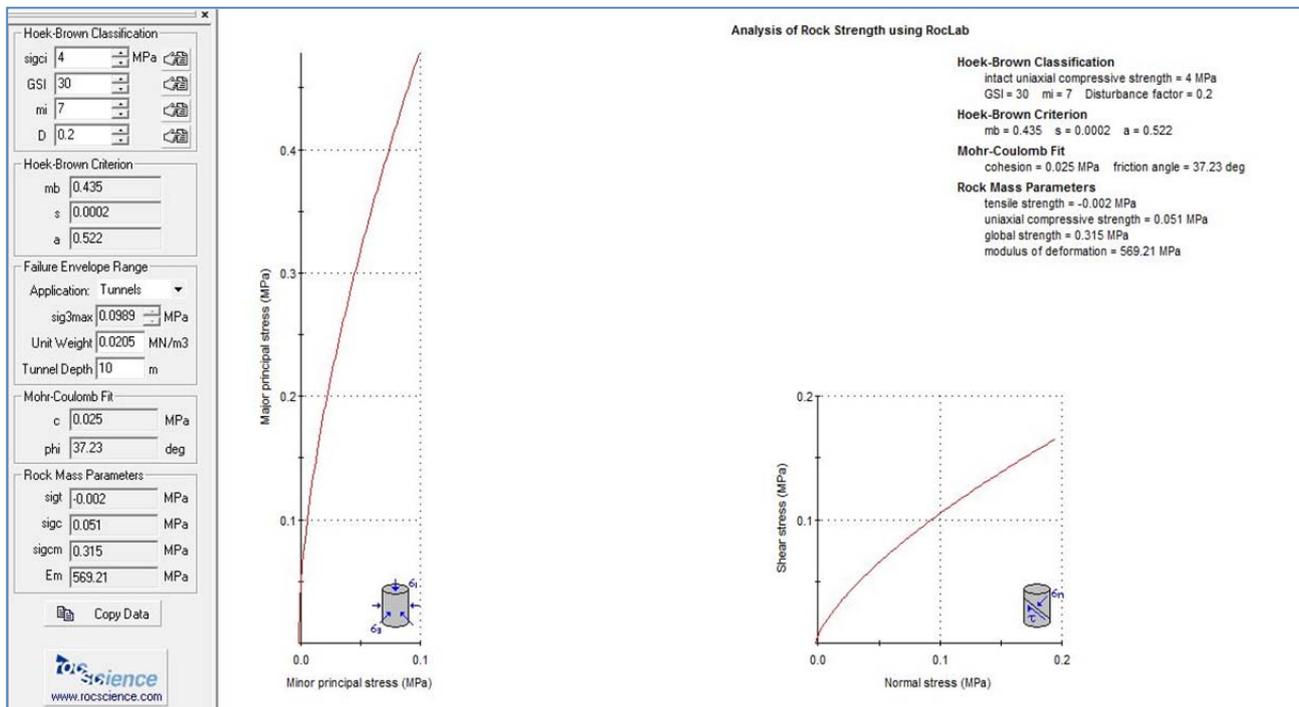


Figura 7.16 Marne di S. Agata Fossili: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb in corrispondenza della sezione di imbocco con copertura 10m e GSI = 30

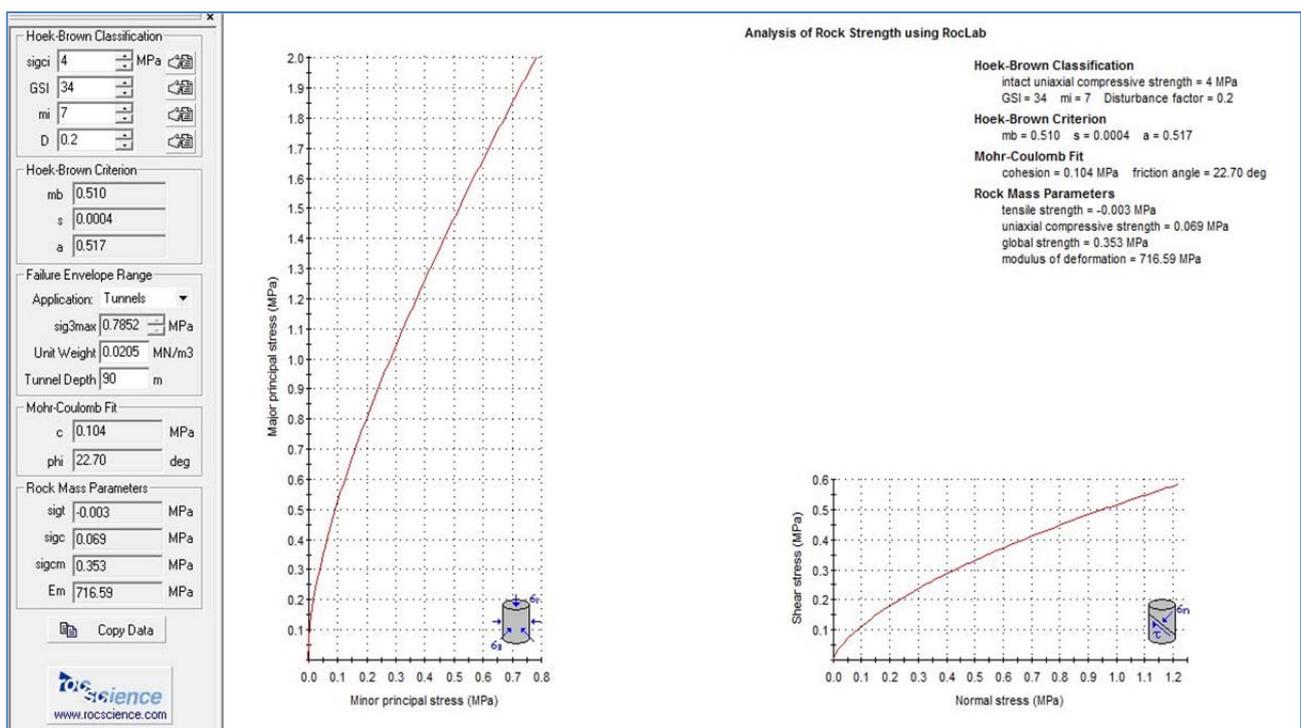


Figura 7.17 Marne di S. Agata Fossili: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb per copertura 90m

7.2.3 Unità L. Formazione di Lequio

Sono arenarie variamente cementate di colore grigio con subordinate intercalazioni di marne, marne calcaree, conglomerati, calcari e quarziti, intercettate dagli scavi in galleria naturale nelle tratte a maggiori profondità. Come l'unità di S. Agata e al di là del grado di disturbo arrecato in fase di carotaggio, si tratta di ammassi strutturalmente complessi classificabili nel campo delle rocce tenere

Lo stato di fratturazione denunciato dai sondaggi è abbastanza eterogeneo, il che in parte è dovuto alle caratteristiche intrinseche della formazione (maggiore/minore cementazione locale), in parte accentuato dal disturbo indotto dal carotaggio. Dalle evidenze geognostiche risulta la presenza di potenti strati caratterizzati da un indice RQD medio o elevato, che si intervallano a livelli in cui la maggiore friabilità porta ad una notevole riduzione di RQD. Non si esclude inoltre la possibilità che nell'unità vi siano componenti/fasce a coesione più bassa se non nulla.

Nel complesso nel corso della campagna 2019 è stato possibile isolare numerosi campioni da sottoporre a prove di laboratorio, di cui oltre il 75% è rappresentato da campioni litoidi che sono stati sottoposti a prove di compressione semplice e prove di resistenza a trazione. I restanti campioni sono stati classificati come rimaneggiati, e sono stati sottoposti principalmente a prove di classificazione granulometrica, prove di taglio diretto e triassiali, la cui valenza è limitata in relazione al disturbo arrecato al campione.

La determinazione del peso di volume, realizzata sia sui campioni rimaneggiati che su quelli litoidi, Figura 7.18, indica un peso medio di 21 kN/m³. La reazione all'HCL è generalmente vivace, ad eccezione di limitati orizzonti a carattere prevalentemente quarzítico.

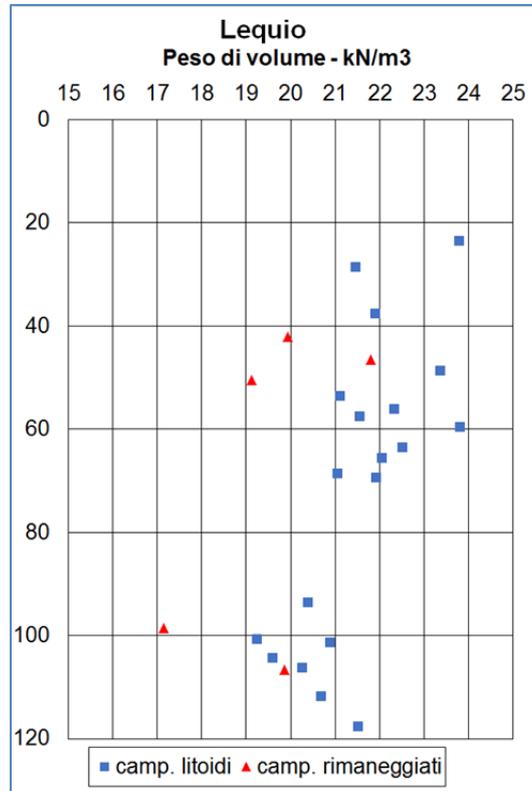


Figura 7.18 Formazione di Lequio: campioni rimaneggiati e litoidi - peso di volume

Con riferimento ai campioni rimaneggiati, sono poi disponibili numerose analisi granulometriche che mettono in luce una composizione prevalentemente sabbioso limoso argillosa, a tratti ghiaiosa (sabbia 30-60%, limo 20-540%, argilla 10%, ghiaia 0-25%), determinazione dei limiti di Atterberg e prove di classificazione UNI 10006 che indicano una categoria prevalente A4, subordinatamente A2 o A7, Figura 7.20. Le prove di taglio e triassiali, Figura 7.21, evidenziano valori dell'angolo di attrito di 35°-36° ed una coesione efficace di 10-20 kPa, che si ritengono poco rappresentativi per un materiale che dalle cassette risulta lapideo o pseudolapideo. A titolo di esempio la fotografia seguente in Figura 7.19 ritrae lo spezzone di carota da cui si è ricavato il campione CR1 del sondaggio S08, la cui prova di taglio diretto ha restituito angolo d'attrito 36° e coesione efficace 12 kPa. Il confronto tra la visione della carota, caratterizzata da una struttura lapidea, per quanto di scarsa resistenza meccanica, ed i risultati della prova di taglio testimoniano chiaramente il disturbo che è stato arrecato al provino all'atto di inserirlo nella scatola di taglio.



Figura 7.19 Stralcio foto cassetta sondaggio S8 dove fra 98-99 m è stato prelevato il CR1

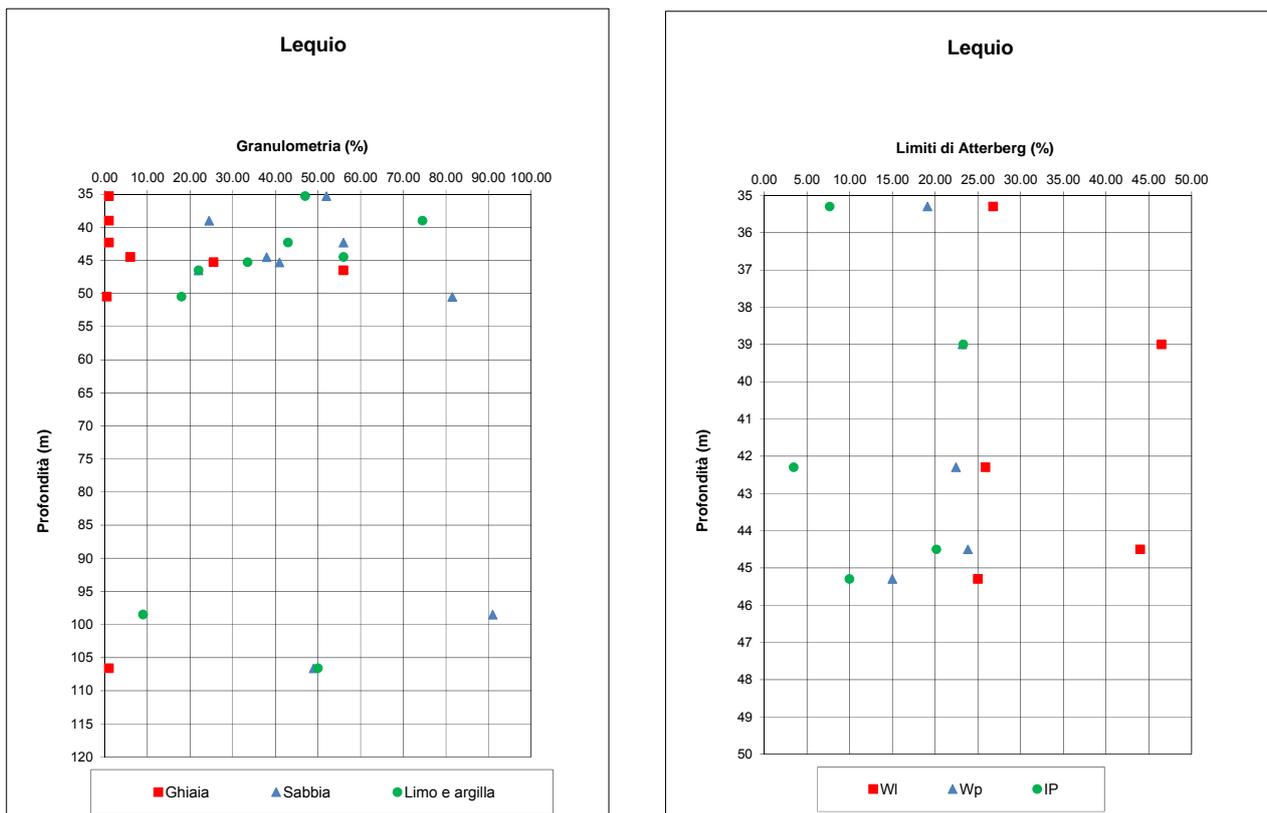


Figura 7.20 Formazione di Lequio: campioni rimaneggiati - granulometrie e limiti di Atterberg

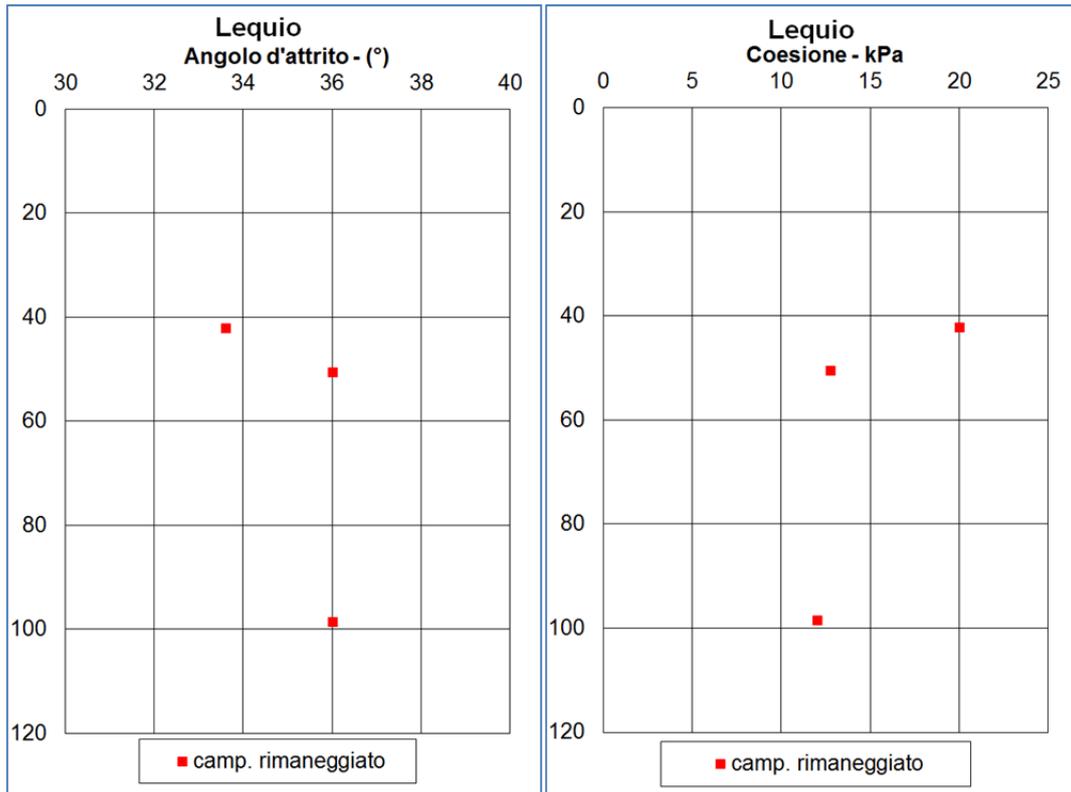


Figura 7.21 Formazione di Lequio: campioni rimaneggiati - coesione e angolo di attrito efficace

Le prove eseguite sui campioni lapidei indicano invece uno scenario diverso che meglio si correla ad una weak rock ed ai risultati delle prove di deformabilità eseguite nei fori di sondaggio. Le prove di compressione semplice (CX) e trazione (TX) sono proposti nei seguenti grafici di Figura 7.22. L'eterogeneità strutturale che caratterizza anche questa formazione rocciosa è evidente in questi risultati, con valori di resistenza a compressione semplice variabili fra 2 e 10 MPa, un valore medio di 5.5 MPa ed una resistenza a trazione di 0.25 MPa.

L'unica prova triassiale in roccia, condotta con pressioni di confinamento elevate (2-4-6 MPa) riporta un angolo d'attrito di 45° e coesione di ben 11.6 MPa, valori ritenuti eccessivamente elevati alla scala delle opere.

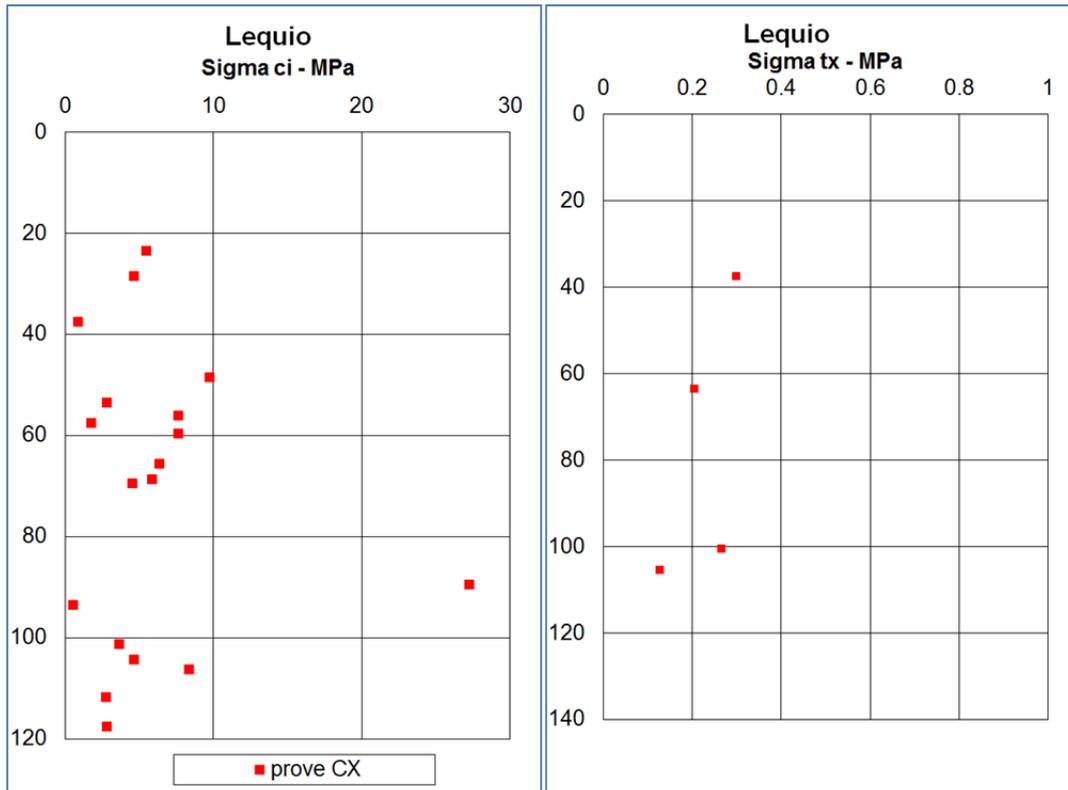


Figura 7.22 Formazione di Lequio: campioni litoidi - resistenza a compressione e trazione

Nel corso delle prove di compressione è stato anche possibile monitorare le deformazioni dei provini al crescere del carico, e quindi definire il correlato modulo elastico, i cui risultati in termini di modulo secante e tangente sono visibili nel grafico di Figura 7.24. Si rileva nuovamente la già citata eterogeneità, con valori dispersi dai 400 ai 2400 MPa. Il grafico riporta inoltre i risultati di alcune prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio S07, S08 ed S09, posti nella zona interessata dalla galleria naturale. In questo caso i risultati risultano compresi tra 1000 e 2400 MPa, ad eccezione di una prova che ha fornito un valore di 15 MPa che è probabilmente dovuto alla mancata tenuta del packer, visto l'aspetto litoide della carota nella zona di prova, si veda a riguardo la seguente Figura 7.23.



Figura 7.23 Stralcio foto cassetta sondaggio S8 dove a 85 m è stata eseguita la prova dilatometrica con risultato anomalo

Facendo riferimento soprattutto alle prove dilatometriche che si ritengono più rappresentative del comportamento complessivo dell'ammasso roccioso alla scala delle opere, si associa all'ammasso roccioso un modulo elastico di 1200 MPa, valore che trova conferma anche applicando la relazione che lega la resistenza a compressione semplice della roccia intatta σ_{ci} ed il modulo elastico dell'ammasso roccioso contenuta nella già citata pubblicazione [4] di Hoek:

$$E = \sigma_{ci} \cdot 200 = 5.5 \cdot 200 = 1100 \text{ MPa}$$

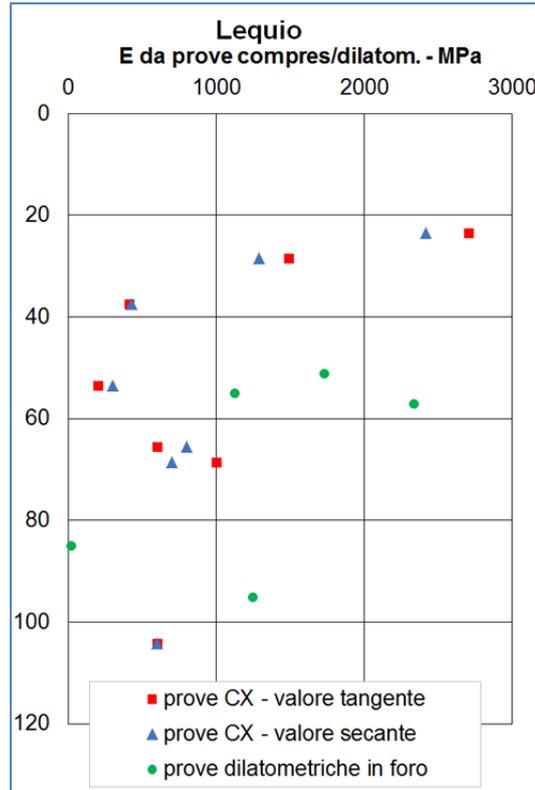


Figura 7.24 Formazione di Lequio: modulo elastico derivante dalle prove di compressione semplice e dalle prove dilatometriche

Come per le marne di S. Agata Fossili ai fini della caratterizzazione geotecnica, vista la natura prevalentemente lapidea delle carote provenienti dai sondaggi, i risultati delle prove dilatometriche in foro e la sostanziale stabilità di tutti i fori di sondaggio, si è trattata la formazione come un ammasso roccioso, descrivendola mediante le classificazioni geomeccaniche precedentemente richiamate.

Sulla base della ricostruzione stratigrafica del tracciato, la formazione di Lequio viene raggiunta dalle opere in progetto nella parte centrale ed orientale della galleria naturale.

In particolare i sondaggi di riferimento per la valutazione delle caratteristiche medie della formazione sono S07, S08 ed S09, che interessano la galleria nella parte centrale. Nel dettaglio i sondaggi S08 ed S09 sono del tutto compatibili tra loro, indicando valori di RQD medio-elevati ed una natura prettamente arenacea ben cementata, Figura 7.25. In corrispondenza di S07 all'altezza della galleria si rilevano invece intercalazioni di arenarie e marne sabbiose caratterizzate da locali abbassamenti dell'RQD dovuti ad una notevole variabilità del grado di cementazione, Figura 7.26.

Sulla base di queste evidenze alla Formazione di Lequio sono stati attribuiti i parametri di RMR'89, RMR89, GSI riepilogati nelle seguenti Tabella 7.3 e Tabella 7.4. La prima tabella descrive una classificazione di upper bound definita sulla base dei sondaggi S08 ed S09, mentre la seconda tabella descrive una condizione di lower bound

definita con riferimento ad S07 ed un aumento dello stato fessurativo/riduzione della cementazione dell'ammasso roccioso.

In linea generale la caratterizzazione di lower bound è stata adottata sul lato ovest della galleria, in corrispondenza del sondaggio S07, che ha denunciato un grado di cementazione a tratti limitato, mentre quella di upper bound trova impiego sul lato est della galleria, dove sia il sondaggio S08 che S09 hanno mostrato condizioni più favorevoli.

Nel complesso, si perviene ad un **GSI compreso tra 35 e 50** ed un **RMR89 compreso tra 32 (lower bound) e 43** (upper bound) a cui compete, secondo Bieniawski, generalmente una classe IV scadente che per i valori più elevati di RMR giunge fino alla classe III mediocre. Con riferimento all'abaco di Figura 7.11, la categoria che meglio descrive le condizioni medie dell'ammasso marnoso è infatti quella denominata M3-M4.

Arenarie di Lequio (rif. sondaggio S08)			
Parametro		Valore	Rating
R1	Resistenza roccia intatta	5-6 MPa	2
R2	RQD	40-70%	7 - 10
R3	Spaziatura discontinuità	200-600 mm	10
R4	Condizioni giunti	Poco continui, accostati, debolm.scabri, poco alterati	17
R5	Condizione idraulica	Stillicidio	4
RMR89 (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)			40 - 43
RMR'89 (R1 + R2 + R3 + R4 + 15)			51 - 54
GSI			46 - 49

Tabella 7.3 Formazione di Lequio: classificazioni geomeccaniche – upper bound

Arenarie di Lequio (rif. sondaggio S07)			
Parametro		Valore	Rating
R1	Resistenza roccia intatta	5-6 MPa	2
R2	RQD	30-40%	4
R3	Spaziatura discontinuità	80-200 mm	8
R4	Condizioni giunti	Poco continui, apertura millimetrica, lisci, alterati	14
R5	Condizione idraulica	Stillicidio	4
RMR89 (R1 + R2 + R3 + R4 + R5)			32
RMR'89 (R1 + R2 + R3 + R4 + 15)			43
GSI			38

Tabella 7.4 Formazione di Lequio: classificazioni geomeccaniche – lower bound

Per quanto esposto ai fini della caratterizzazione di Hoek-Brown si riepilogano i valori di ingresso adottati per il calcolo della resistenza media dell'ammasso:

- $\gamma = 21 \text{ KN/m}^3$ come risulta dalle prove di laboratorio
- $\sigma_{ci} = 5.5 \text{ MPa}$ che rappresenta il valore medio ricavato dalle prove di compressione semplice
- $m_i = 13$ che è il valore suggerito da Hoek per terreni arenacei
- $D = 0.2$ ammasso moderatamente danneggiato dalle operazioni di scavo.



Figura 7.25 Sondaggio S08 tra 110 e 120 m, all'altezza della galleria naturale



Figura 7.26 Sondaggio S07 tra 50 e 60 m, all'altezza della galleria naturale

Con riferimento al tratto lato ovest in cui la galleria interessa la formazione di Lequio, adottando la classificazione di lower bound come derivata dalle evidenze del sondaggio S07 e considerando una profondità media dell'opera di 50 m, si ottengono i seguenti parametri di caratterizzazione alla copertura, Figura 7.27:

h = 50m	GSI = 38
coesione efficace - kPa	110
angolo d'attrito (°)	35
modulo elastico (MPa)	900

Nel tratto est della galleria naturale si adotta invece la classificazione di upper bound, in presenza di una copertura litostatica media di 90m, con un GSI variabile tra 46 e 49, a cui si associano i seguenti parametri di caratterizzazione, Figura 7.28 e Figura 7.29:

h = 90m	GSI = 46	GSI = 49
coesione efficace - kPa	180	200
angolo d'attrito (°)	33	34
modulo elastico (MPa)	1000	1100

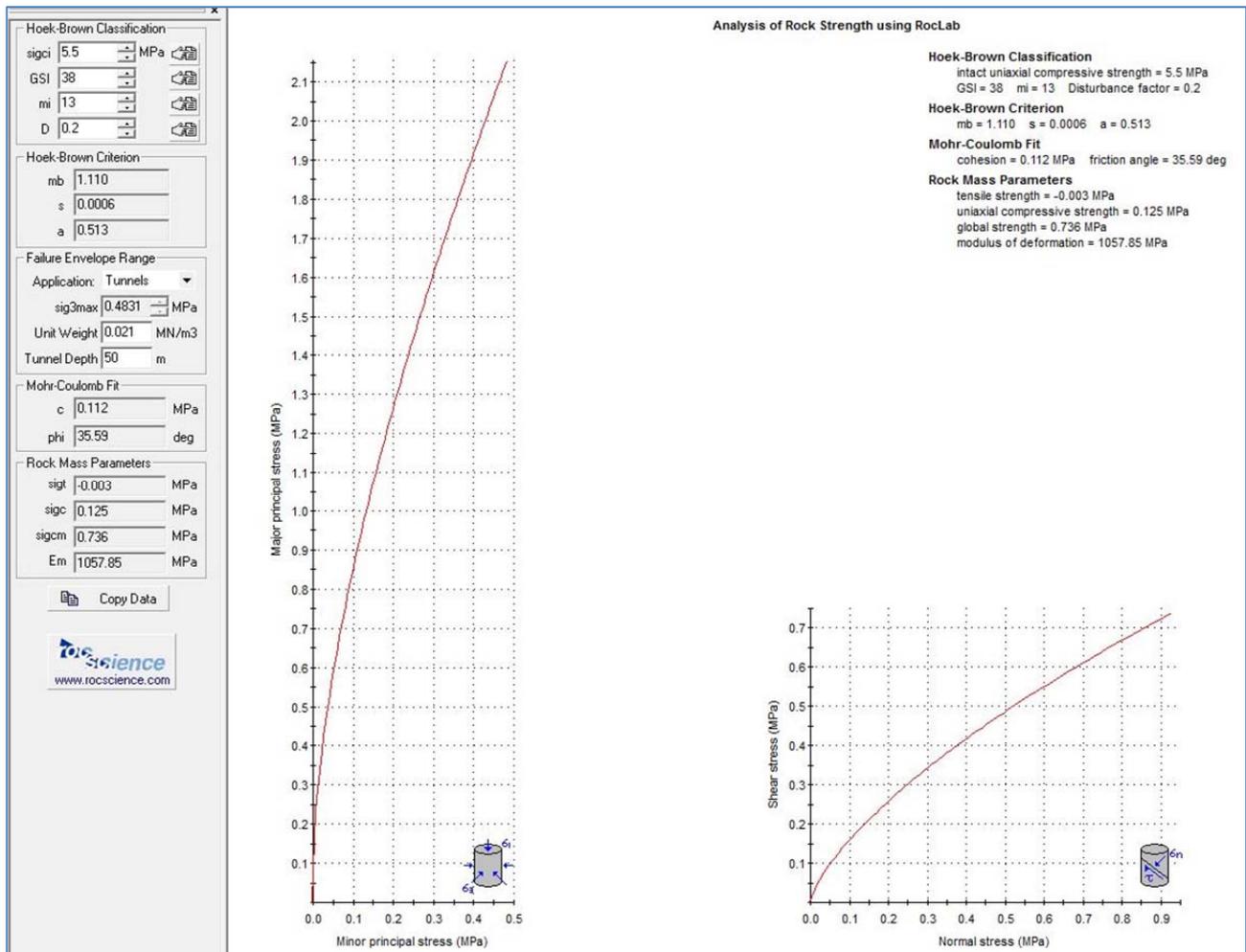


Figura 7.27 Formazione di Lequio: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb per copertura 50m – valori di lower bound

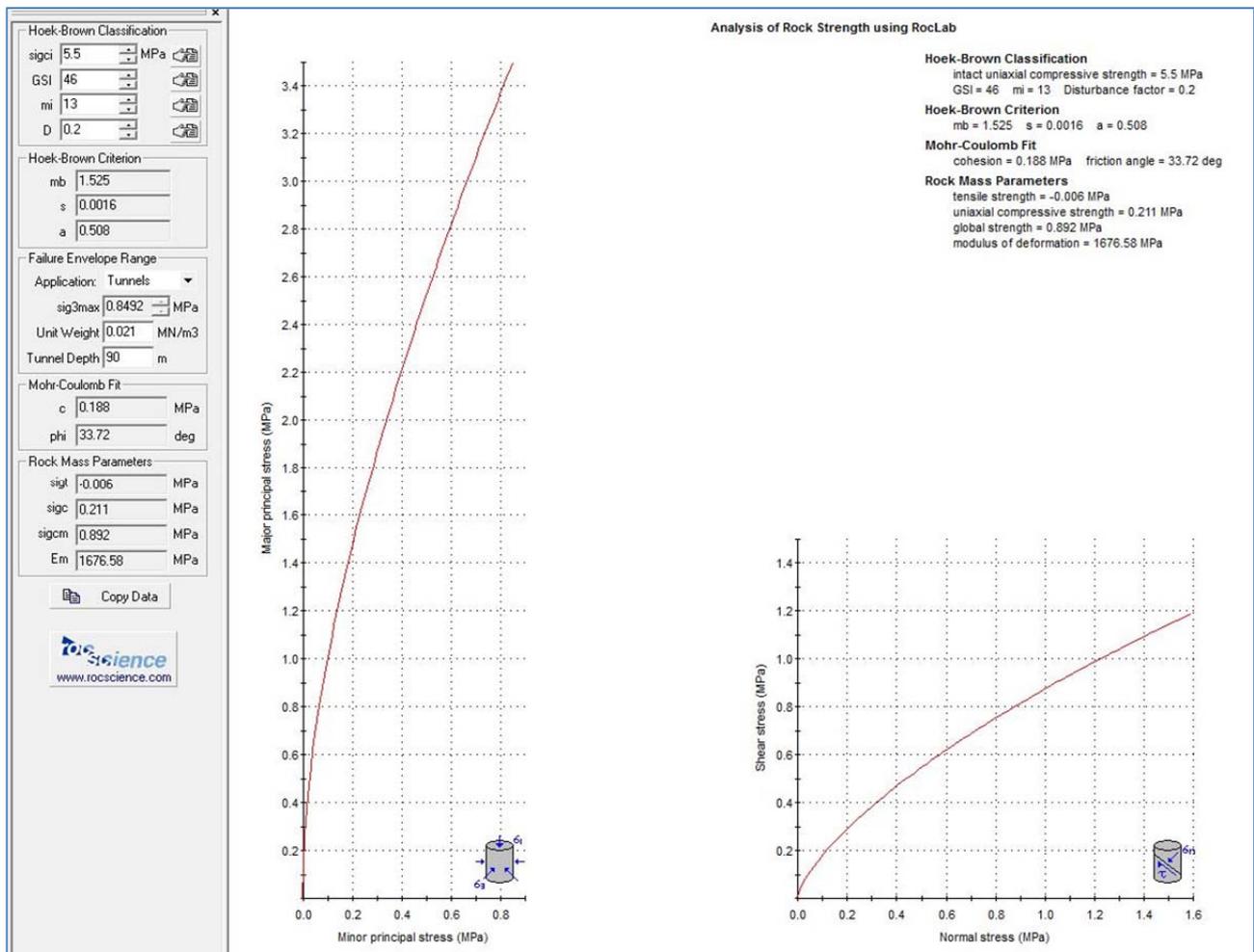


Figura 7.28 Formazione di Lequio: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb per copertura 90m – valori di upper bound con GSI 46

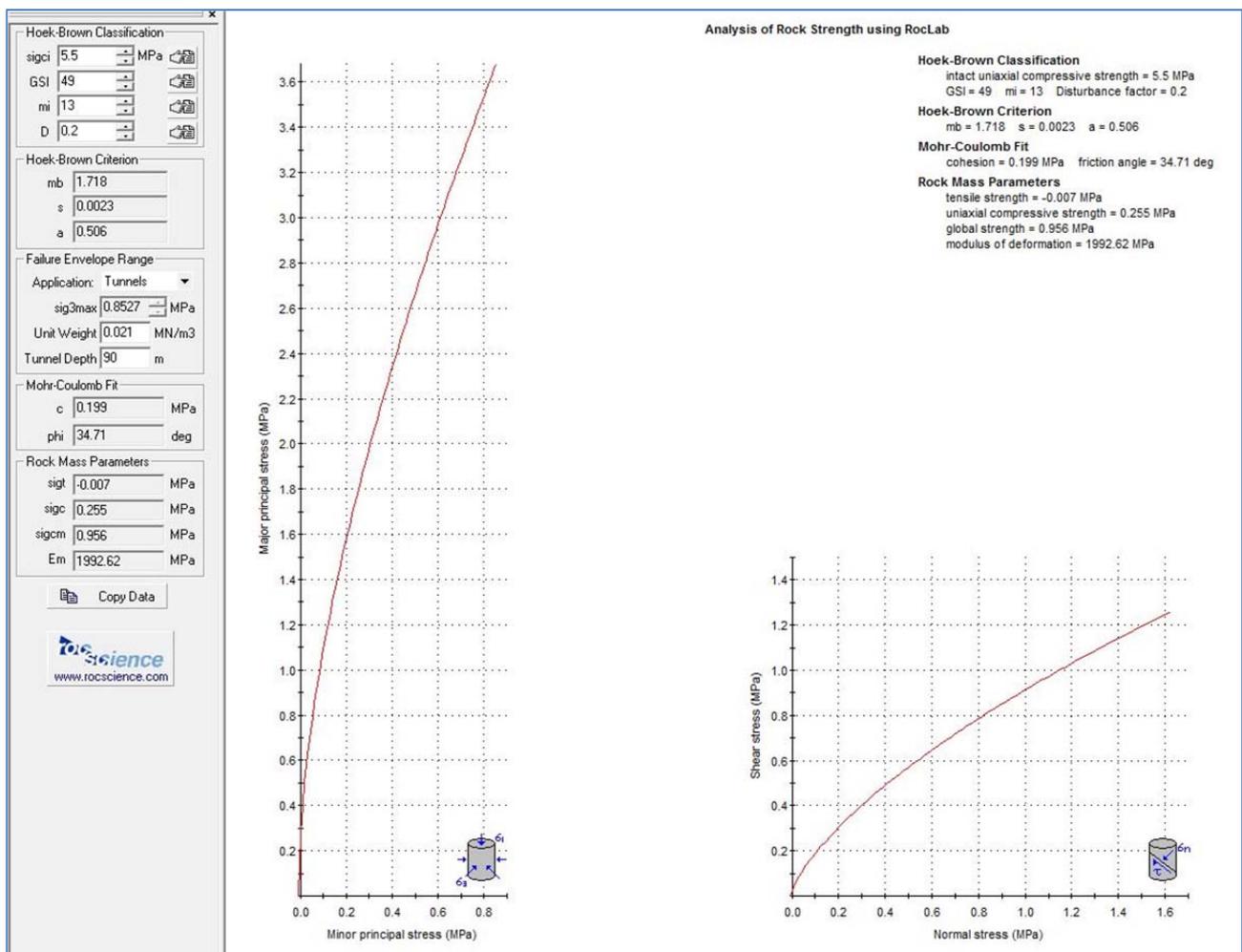


Figura 7.29 Formazione di Lequio: caratterizzazione secondo il criterio di Hoek-Brown e Mohr-Coulomb per copertura 90m – valori di upper bound con GSI 49

8 PREVISIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DEI MATERIALI INTERESSATI DAGLI SCAVI

8.1 GALLERIA NATURALE

La seguente tabella riassume, per le diverse tratte individuate lungo la galleria, il litotipo atteso, la copertura litostatica media, la classe geomeccanica prevista ed i relativi parametri geotecnici:

Tratto		Copertura - m	GSI	m_i	σ_{ci} - MPa	Inviluppo di Hoek-Brown		Inviluppo di Mohr-Coulomb		E - MPa	ν
da	a					m_b	s	c - kPa	ϕ - (°)		
Imbocco Ovest	1250	5-10	30 (30-35) *	7	4	0.44	2.40e-4	25	37	500	0.25
1250	1450	10-35	37 (30-40)	7	4	0.57	5.53e-4	50	33	800	0.25
1450	1800	35-85	38 (35-45)	13	5.5	1.11	6.23e-4	100	34	900	0.20
1800	1910	85-100	35 (30-38)	7	4	0.51	3.87e-4	100	21	700	0.25
1910	2250	55-110	49 (45-55)	13	5.5	1.72	2.31e-3	150	33	1100	0.20
2250	2400	30-55	46 (40-50)	13	5.5	1.53	1.61e-3	130	34	1000	0.20
2400	Imbocco Est	5-30	30 (30-40) *	7	4	0.44	2.40e-4	38	32	500	0.25

* fronte misto con la possibile presenza di materiale sciolto nella porzione superiore del fronte

8.2 AREE DI IMBOCCO

L'area interessata dall'imbocco Ovest della galleria naturale vede la presenza di uno strato di materiale sciolto di spessore compreso fra 8 e 10m, sulla base delle risultanze dei sondaggi S3 ed S4, ed al di sotto le marne di S. Agata a medio-elevata fratturazione (RQD=15-30%). Il materiale sciolto è ascrivibile alla formazione di Cassano-Spinola (Cs).

La limitata pendenza del versante rende necessaria la realizzazione di estesi scavi in trincea o sbancamenti necessari per raggiungere la progressiva di inizio del tratto in naturale. Queste zone di scavo verranno successivamente ritombate, previa realizzazione di una galleria artificiale di lunghezza prossima ai 60m.

L'area interessata dall'imbocco Est della galleria naturale vede la presenza di uno strato di materiale sciolto di tipo alluvionale (Ab) di spessore compreso fra 8 e 10m, sulla base delle risultanze del sondaggio S10, ed al di sotto le marne di S. Agata a media fratturazione (RQD=30-40%).

Analogamente al lato Ovest, anche da questa parte è prevista la realizzazione di oltre 55m di galleria artificiale.

Per i materiali sciolti che interesseranno la porzione superiore degli scavi agli imbocchi, stante la presenza di acclerate condizioni di pericolosità geomorfologica che, seppur evitando le perimetrazioni di frana cartografate, possono essere ricondotte a condizioni prossime all'equilibrio limite, si adotteranno parametri di resistenza residui dedotti da alcune back analysis e da specifiche prove di laboratorio. Tali parametri saranno estesi, cautelativamente, per l'intero sviluppo delle coltri sino al tetto del sottostante substrato marnoso. Il monitoraggio inclinometrico condotto durante l'arco di tempo intercorrente fra la progettazione definitiva e quella esecutiva permetterà di verificare gli spessori effettivamente coinvolti da eventuali dissesti, definendo così la potenza dello strato a cui è necessario associare i parametri di resistenza residua.

Nel dettaglio per la Formazione di Cassano Spinola all'imbocco Ovest i parametri residui da adottare sono:

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 0 \text{ kPa}$$

$$\phi = 19^\circ$$

$$E = 15 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.30$$

Analogamente per le alluvioni terrazzate all'imbocco Est:

$$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 0 \text{ kPa}$$

$$\phi = 19^\circ$$

$$E = 15 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.30$$