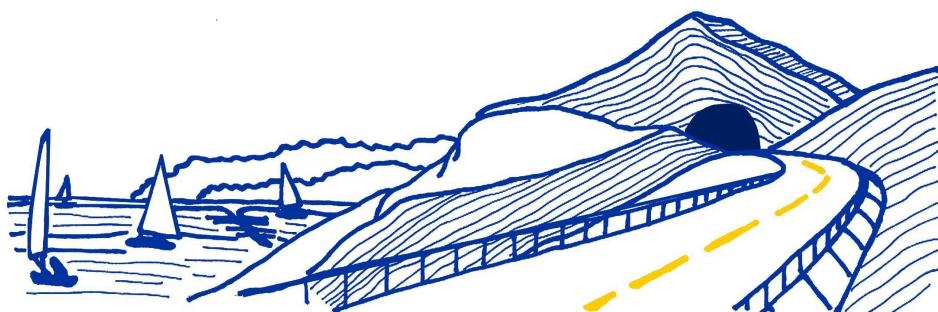


**VARIANTE ALLA S.S.1 AURELIA (AURELIA BIS)
VIABILITA' DI ACCESSO ALL' HUB PORTUALE DI LA SPEZIA
INTERCONNESSIONE TRA I CASELLI DELLA A-12 E IL PORTO DI LA SPEZIA
3° LOTTO TRA FELETTINO E IL RACCORDO AUTOSTRADALE**

PROGETTO ESECUTIVO DI STRALCIO E COMPLETAMENTO C - 3° TRATTO

PROGETTO ESECUTIVO

GE265



VISTO: IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO

RESPONSABILE
DELL'INTEGRAZIONE DELLE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

PROGETTISTA SPECIALISTA

IL COORDINATORE DELLA
SICUREZZA IN FASE DI
PROGETTAZIONE

Ing. Fabrizio CARDONE

Ing. Alessandro RODINO

Ing. Francesco CARNEVALE

Dott. Domenico TRIMBOLI

**GALLERIA NATURALE FELETTINO III
GN03 - Relazione geologica e geotecnica**

CODICE PROGETTO

NOME FILE

0000_P00GN03GEORE01_B

REVISIONE

SCALA:

PROGETTO

LIV. PROG. N. PROG.

DPGE0265 E 20

CODICE
ELAB.

P00GN03GEORE01

B

-

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
C					
B	REVISIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA ANAS	Ottobre 2021	F. Carnevale	P. Vendrame	A. Nardi
A	EMISSIONE	Aprile 2021	F. Carnevale	P. Vendrame	A. Nardi

INDICE	Pag.
1. PREMESSA	1
2. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'OPERA.....	2
3. INFORMAZIONI DISPONIBILI PER LA GALLERIA NATURALE FELETTINO III	6
3.1 Identificazione delle indagini geognostiche disponibili	6
3.2 Stratigrafie dai logs di sondaggio	8
3.3 Prove in sito ed in laboratorio disponibili.....	10
4. ANALISI CRITICA DEI DATI DISPONIBILI	13
4.1 Progetto Esecutivo	13
4.2 Fase di scavo	15
4.3 Indagini integrative 2014-2016 e Proposta di perizia n.2	16
5. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO E PROFILO GEOTECNICO	22
6. PROPOSTA DI INDAGINI INTEGRATIVE	30

1.PREMESSA

La presente Relazione viene redatta nell'ambito del Contratto applicativo per la progettazione esecutiva dell'intervento S.S. 1 "Lavori di costruzione della variante alla S.S. 1 Aurelia (Aurelia bis), viabilità di accesso all'HUB portuale di La Spezia, interconnessione tra i caselli della A 12 e il porto di La Spezia – 3° lotto tra Felettino ed il raccordo autostradale - Progetto Esecutivo di Stralcio e completamento C – 3° tratto".

Con riferimento al quadro normativo di riferimento progettuale per le strutture, si evidenzia che, per le opere progettate secondo le norme tecniche di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008, il D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»", prevede, all' Art. 2 "Ambito di applicazione e disposizioni transitorie", che *"per le opere pubbliche o di pubblica utilità in corso di esecuzione, per i contratti pubblici di lavori già affidati, nonché per i progetti definitivi o esecutivi già affidati prima della data di entrata in vigore delle norme tecniche per le costruzioni, si possono continuare ad applicare le previgenti norme tecniche per le costruzioni fino all'ultimazione dei lavori ed al collaudo statico degli stessi"*.

Pertanto, essendo l'attività da svolgere il progetto di completamento di opere già parzialmente realizzate il riferimento normativo di riferimento resteranno le Norme tecniche per le costruzioni» di cui al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008.

Le indagini geognostiche e le relative risultanze sulle quali si basa l'attuale Progetto di completamento, fanno riferimento al complesso delle indagini programmate, svolte ed analizzate nella sede progettuale costruttiva precedente.

2. INQUADRAMENTO GENERALE DELL'OPERA

Il tracciato del Lotto III, nel suo complesso, completa la tratta della variante relativa alla creazione della Viabilità di accesso all'Hub portuale di La Spezia.

Ha origine dall'imbocco galleria "Castelletti" (km. 0+047,11) che era in precedenza stata realizzata nell'ambito del Lotto II e termina collegando il Raccordo autostradale

La sezione stradale è tipo C1 con larghezza della piattaforma 10,50 m, larghezza delle corsie (una per senso di marcia) 3,75 m e larghezza delle banchine 1,50 m.

L'asse principale ha uno sviluppo complessivo di 3.933,23 m oltre ai 4 svincoli e si sviluppa per il 64% in galleria.

Immediatamente dopo l'inizio della Variante (Lato ponente), si innesta lo svincolo di "Via del Forno"; il tracciato, dopo aver sovrappassato la valle del Torrente Dorgia con il viadotto "Via del Forno" (L = 120 m), aggira il borgo di "Felettino" dove è prevista la galleria naturale "Pellizzarda" (L=927.54 m), che termina poco prima dello svincolo del "Buonviaggio", tratto nel quale è inserito il viadotto "Buonviaggio" (L=250 m). Nel Tratto successivo è presente la galleria naturale "Felettino I" (L=777.28 m), che termina nella zona dello svincolo di "San Venerio".

Da questo punto inizia la parte di tracciato denominato "Stralcio C" che sarà oggetto del Contratto attuativo da formalizzare.

Nel tratto iniziale è presente il viadotto "San Venerio II" (L=114m) e lo svincolo di San Venerio.

Il tracciato prosegue poi con tre gallerie, intervallate da due brevi tratti in sede naturale: la galleria artificiale "Felettino II" (L=191,30 m), la galleria naturale "Felettino III" (L=245 m) e la galleria naturale "Fornaci I" (L=447.34 m).

Successivamente, nel tratto terminale, sono previste le rampe dello svincolo "Melara" di collegamento col "Raccordo autostradale". Delle rampe che si dipartono dalla galleria artificiale "Fornaci II", due proseguono in galleria naturale: galleria naturale "Fornaci III" (L=86.50 m) e "Fornaci IV" (L=165 m). Successivamente le rampe si innalzano per portarsi alla quota del viadotto autostradale esistente, al quale si vanno ad affiancare con viadotti che realizzano le corsie di entrata ed uscita al Raccordo autostradale.

Lo "Stralcio C" inizia appena prima della spalla Nord del Viadotto "San Severio II", indicativamente alla Progressiva km 2+780 (ex Sez. N. 140), fino a tutto lo Svincolo Melara.

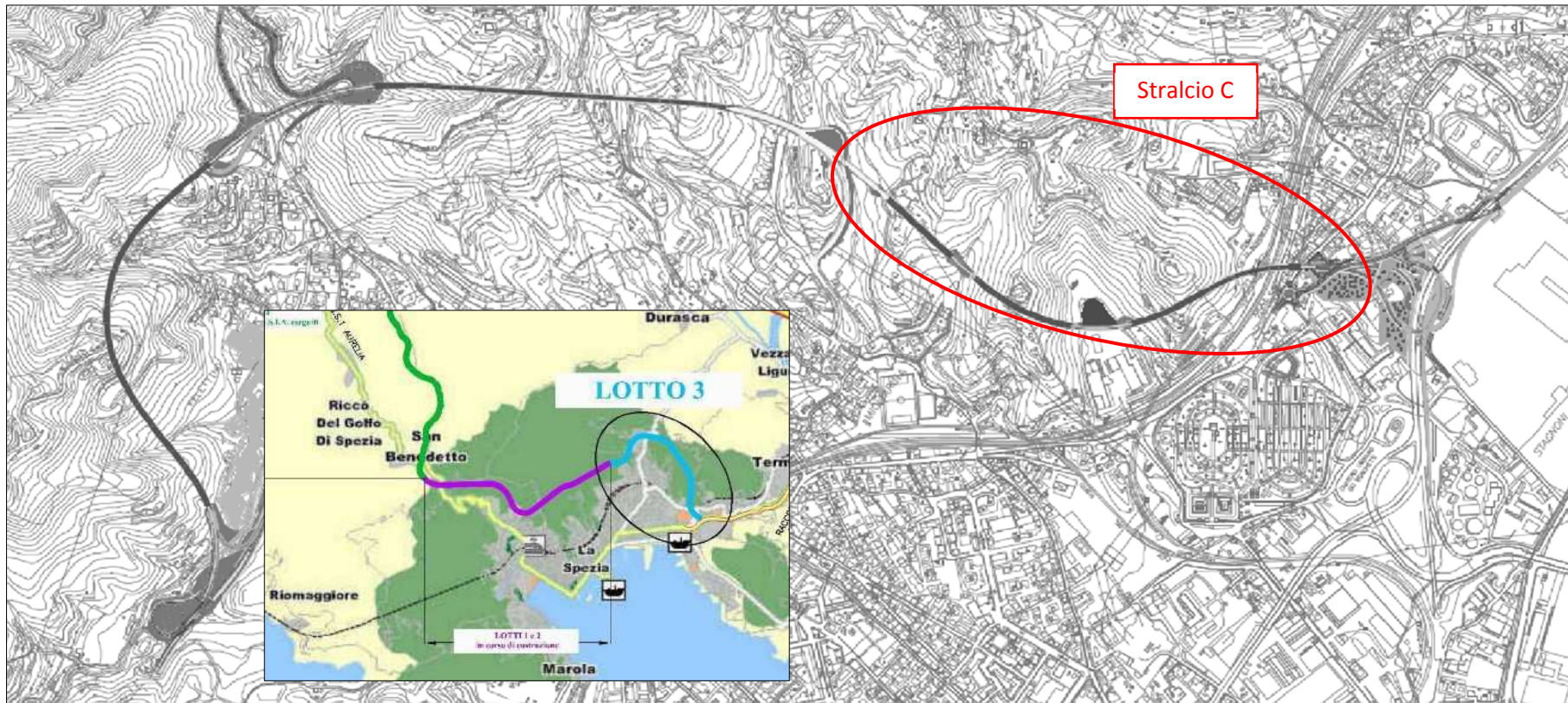


Figura 1 – Schema planimetrico Viabilità di accesso all'Hub portuale di La Spezia - 3° Lotto

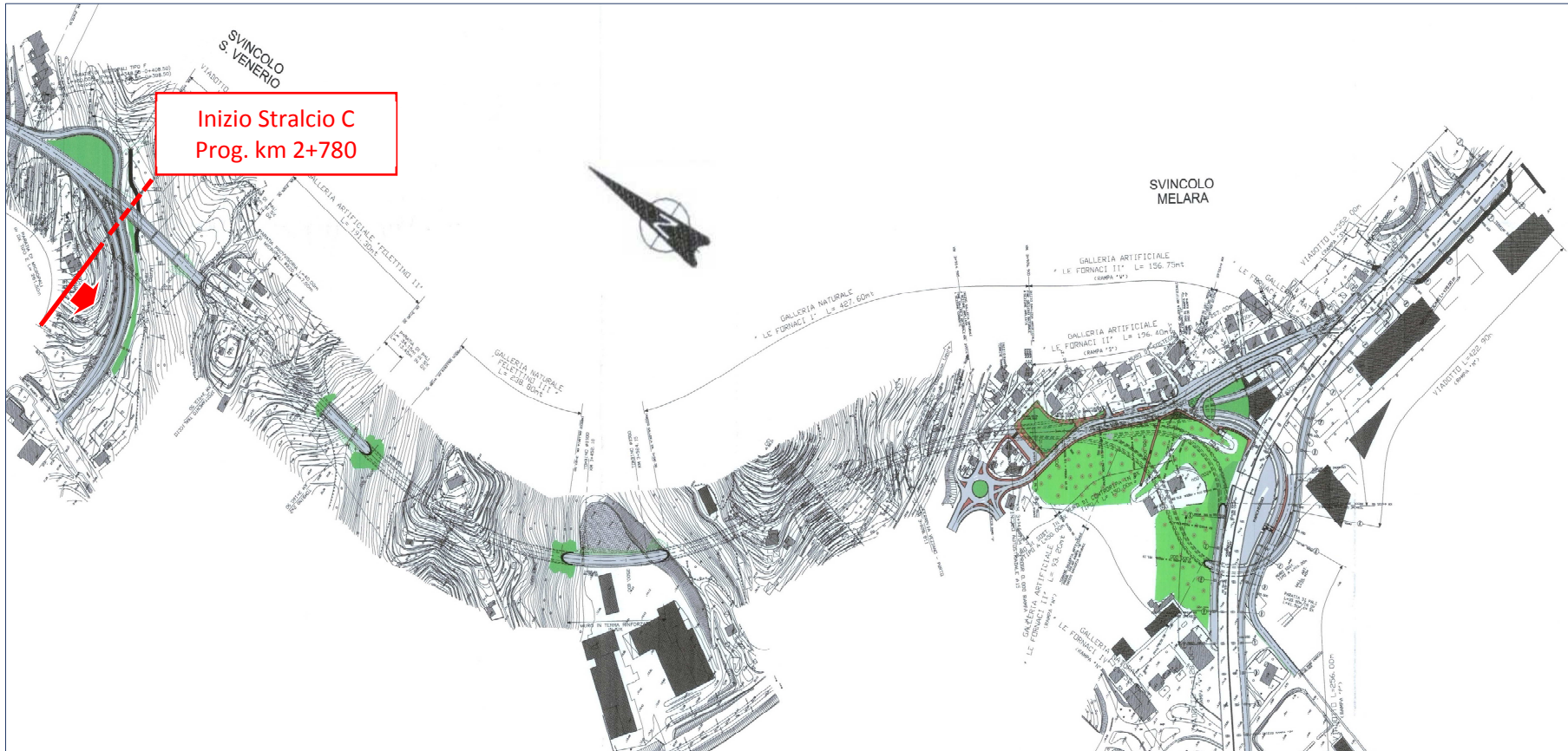


Figura 2 – Schema planimetrico dello Stralcio “C” oggetto del progetto di completamento

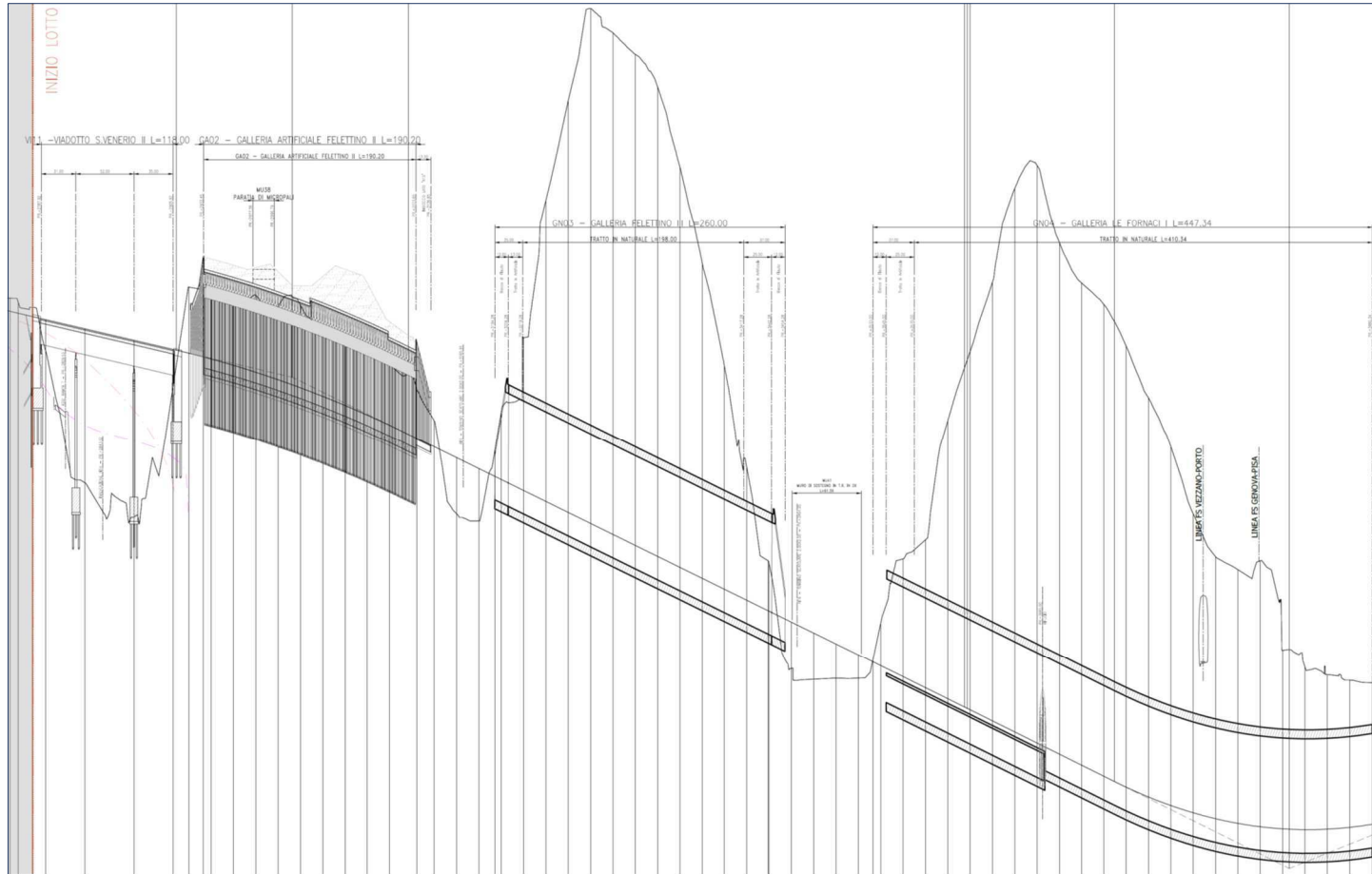


Figura 3 – Profilo longitudinale dello Stralcio “C” oggetto del progetto di completamento

3. INFORMAZIONI DISPONIBILI PER LA GALLERIA NATURALE FELETTINO III

3.1 Identificazione delle indagini geognostiche disponibili

Le indagini geognostiche eseguite per la galleria naturale Felettino III sono le seguenti:

- Inclinatorio I10, eseguito nel 2007;
- Inclinatorio I11, eseguito nel 2007;
- Inclinatorio I12, eseguito nel 2007;
- Piezometro Pz9, eseguito nel 2007;
- Piezometro Pz10, eseguito nel 2007;
- Sondaggio S27, eseguito nel 2000 e contenuto nel progetto definitivo;
- Stazione di rilievo geomeccanico 591.

Durante la perizia di variante del 2016 sono state eseguite altre indagini (9 in totale) costituite da 5 inclinometri e 4 piezometri:

- Inclinatorio F1i, realizzato a carotaggio continuo con profondità 65 metri;
- Inclinatorio F2i, realizzato a carotaggio continuo con profondità 40 metri;
- Piezometro F2p, realizzato a distruzione di nucleo con profondità 30 metri;
- Inclinatorio F3i, realizzato a carotaggio continuo con profondità 25 metri;
- Piezometro F3p, realizzato a distruzione di nucleo con profondità 15 metri;
- Inclinatorio F4i, realizzato a carotaggio continuo con profondità 55 metri;
- Piezometro F4p, realizzato a distruzione di nucleo con profondità 45 metri;
- Inclinatorio F5i, realizzato a carotaggio continuo con profondità 40 metri;
- Piezometro F5p, realizzato a distruzione di nucleo con profondità 25 metri;

Le planimetrie con le indagini eseguite sono riportate in **Figura 4** e **Figura 5**.

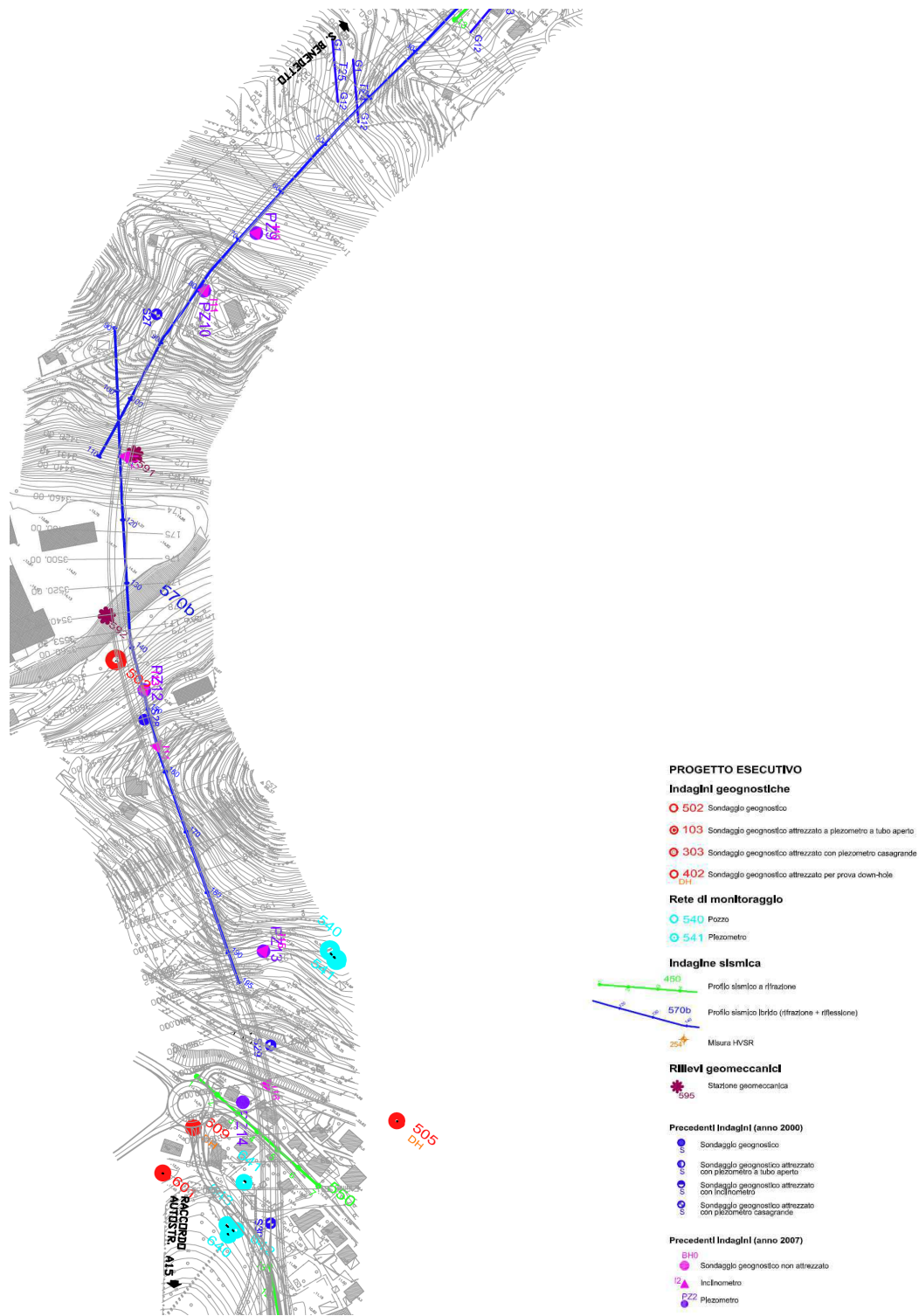


Figura 4 – Planimetria con ubicazione indagini – Progetto esecutivo del 2011 – tratto da Felettino III a Le Fornaci II

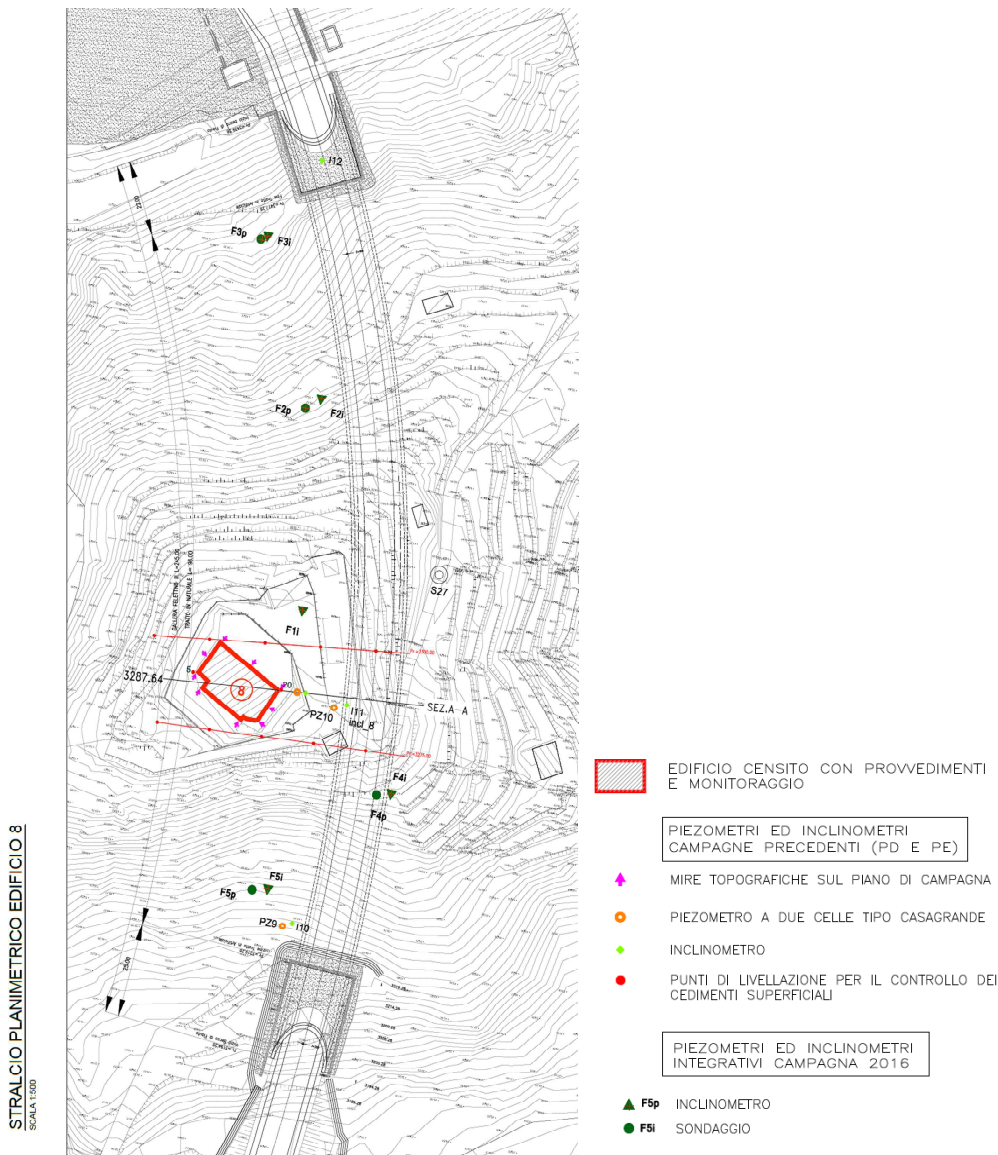


Figura 5 – Planimetria con ubicazione indagini realizzate nella perizia di variante della galleria Felettino III

3.2 Stratigrafie dai logs di sondaggio

Dal profilo geologico-geotecnico la galleria risulta nella formazione M2, ovvero nelle arenarie del Macigno che appartengono alla formazione Falda Toscana.

La descrizione della formazione del macigno è riportata nella relazione geologica è la seguente:

“deriva da un flysch dove le componenti pelitiche-siltose e, in minor misura, marnose, prevalgono su quelle arenacee. A causa degli eventi deformativi che lo hanno interessato, l’originario ammasso è stato fortemente disturbato, tanto da assumere per gran parte un aspetto caotico, che rende estremamente difficile individuarne il reale assetto giaciturale. Ciò ha favorito i processi di alterazione, molto spinta nelle porzioni a maggior contenuto

pelitico o pelitico-marnoso, tanto che la facies ha caratteristiche geotecniche che variano da quelle di un terreno vero e proprio a quelle di una “roccia debole”.

La descrizione sopra riportata è in linea con le risultanze dei sondaggi.

Si mette in evidenza come nella zona della galleria prevalga la litofacies pelitico-siltosa. Risultano, infatti, prevalenti argilliti e peliti con livelli arenacei decimetrici fortemente alterati e cataclasati.

Dall’esame del profilo altimetrico della galleria è possibile individuare la posizione della galleria in relazione alla stratigrafia dei sondaggi:

- Sondaggio S27 – cavo della galleria tra 27 e 40 metri di profondità;
- Sondaggio F1i – cavo della galleria tra 42 e 54 metri di profondità;
- Sondaggio F4i – cavo della galleria tra 29 e 41 metri di profondità;
- Sondaggio F5i – cavo della galleria tra 12.5 e 24.5 metri di profondità;
- Sondaggio F2i – cavo della galleria tra 23.5 e 35.5 metri di profondità;
- Sondaggio F3i – cavo della galleria tra 4 e 16 metri di profondità.

Si riportano nel seguito la sintesi delle descrizioni dei logs stratigrafici nel tratto interessato dalla galleria e nel tratto al di sopra della calotta per uno spessore pari a 1 diametro della galleria, ovvero 12 metri.

Tabella 1 GN Felettino III - Descrizione dei terreni attraversati nei sondaggi in relazione alla posizione del cavo della galleria

	Sondaggio				
	F5i	F4i	S27/F1i	F2i	F3i
ZONA AL DI SOPRA DELLA CALOTTA CON SPESSORE 12 METRI	Argilla limosa da tenera a mediamente consistente. Sabbia medio fine deb. limosa mod. addensata	Arenaria deb. cementata a luoghi frantumata in clasti in matrice argilloso limosa.	Arenarie medio fini (RQD=60%). Argilliti alterate costituite da frammenti angolari a pezzatura ghiaiosa.	Argilla limosa da molto consistente a dura con clasti. Argillite a struttua compatta intensament e alterata poco cementata in matrice limoso argilloso.	Argilla limosa da molto consistent e a dura.
CAVO DELLA GALLERIA	Ghiaie medio grossolana di origine argillitica in abbondant e matrice limoso-argilloso.	Clasti derivanti dalla tettonizzazione e dell'argillite immersi in matrice limosa e argilloso.	Argilliti frantumate/alterat e costituite da frammenti angolari a pezzatura ghiaiosa. Presenza di matrice fine limoso-sabbiosa.	Argillite a struttua compatta intensament e alterata poco cementata in matrice limoso argilloso	Argillite limosa deb. marnosa con clasti di arenaria.
Imbocco nord		Fronte attuale			Imbocco sud
Tratto da scavare			Tratto scavato		

3.3 Prove in sito ed in laboratorio disponibili

Sono riportati di seguito i risultati delle prove torsionali eseguite su alcuni dei campioni prelevati che hanno dato i seguenti risultati:

Tabella 2 – GN Felettino III – Risultati delle prove di taglio torsionale eseguite sui campioni prelevati

Sondaggio	Profondità (m)	Coesione residua c'_r (KPa)	Angolo di attrito residuo ϕ'_r (°)
F1i	25 ÷ 25.5	2.3	22.1
	30 ÷ 30.5	2.1	22.4
F2i	14 ÷ 14.3	2.7	22.7
	18 ÷ 18.4	0.3	24.4
F5i	5 ÷ 5.55	0.7	27.3
	10 ÷ 10.35	4.8	19
	14.6 ÷ 14.9	3.2	16.8

Tabella 3 – GN Felettino III – Risultati delle prove di laboratorio

Sondaggio	profondità	descrizione da log	Modulo pressiometrico (MPa)	Coesione non drenata (KPa)	Permeabilità (m/s)	Wn (%)	peso di volume (kN/m ³)	G (%)	S (%)	L+A (%)	LL	LP	IP	c' (Kpa)	f' (°)
Pz9	12,5	Substrato lapideo completamente alterato e frantumato.alternanza di termini arenacei e calcareo marnosi. Clasti con fi max 8-10 cm.	16	275											
	20,5	substrato lapideo completamente alterato e frantumato.alternanza di termini arenacei e calcareo marnosi. Clasti con fi max 8-10 cm.	20	395											
	13,5	substrato lapideo completamente alterato e frantumato.alternanza di termini arenacei e calcareo marnosi. Clasti con fi max 8-10 cm.			1,5E-05										

Tabella 3 – GN Felettino III – Risultati delle prove di laboratorio

Sondaggio	profondità	descrizione da log	Modulo pressiometrico (MPa)	Coesione non drenata (KPa)	Permeabilità (m/s)	Wn (%)	peso di volume (kN/m ³)	G (%)	S (%)	L+A (%)	LL	LP	IP	c' (Kpa)	φ' (°)
	23,5	substrato lapideo completamente alterato e frantumato. alternanza di termini arenacei e calcareo marnosi. Clasti con fi max 8-10 cm.			1E-05										
S27	39,35	argilliti alterate costituite da frammenti angolari a pezzatura ghiaioso grossolana in matrice fine limoso sabbiosa				11,56	21,25	14	45	41	31	14	17	6,5	35,6
	44,1	argilliti alterate costituite da frammenti angolari a pezzatura ghiaioso grossolana in matrice fine limoso sabbiosa		31,5		7,83	19,29	26	40	34	31	14	17		
	46,8	argilliti alterate costituite da frammenti angolari a pezzatura ghiaioso grossolana in matrice fine limoso sabbiosa				8	20,77	11	55	34	32	16	16	3,5	19

Dalle prove di laboratorio eseguite il peso di volume dei terreni interessati dallo scavo della galleria è pari a 20 kN/m³ con un indice plastico, IP, del 17% .

4. ANALISI CRITICA DEI DATI DISPONIBILI

4.1 Progetto Esecutivo

Le indagini eseguite in fase di PE sono consistite in n. 2 profili simici a rifrazione/riflessione, n. 1 stazione geomeccanica e rilievi geologici ed idrogeologici di superficie. Tali indagini integravano quelle eseguite nelle precedenti fasi di progettazione (2000 e 2007), costituite da n. 4 sondaggi a carotaggio continuo e n.2 a distruzione di nucleo, per l'installazione di n. 3 inclinometri e n. 2 piezometri (Figura 6).

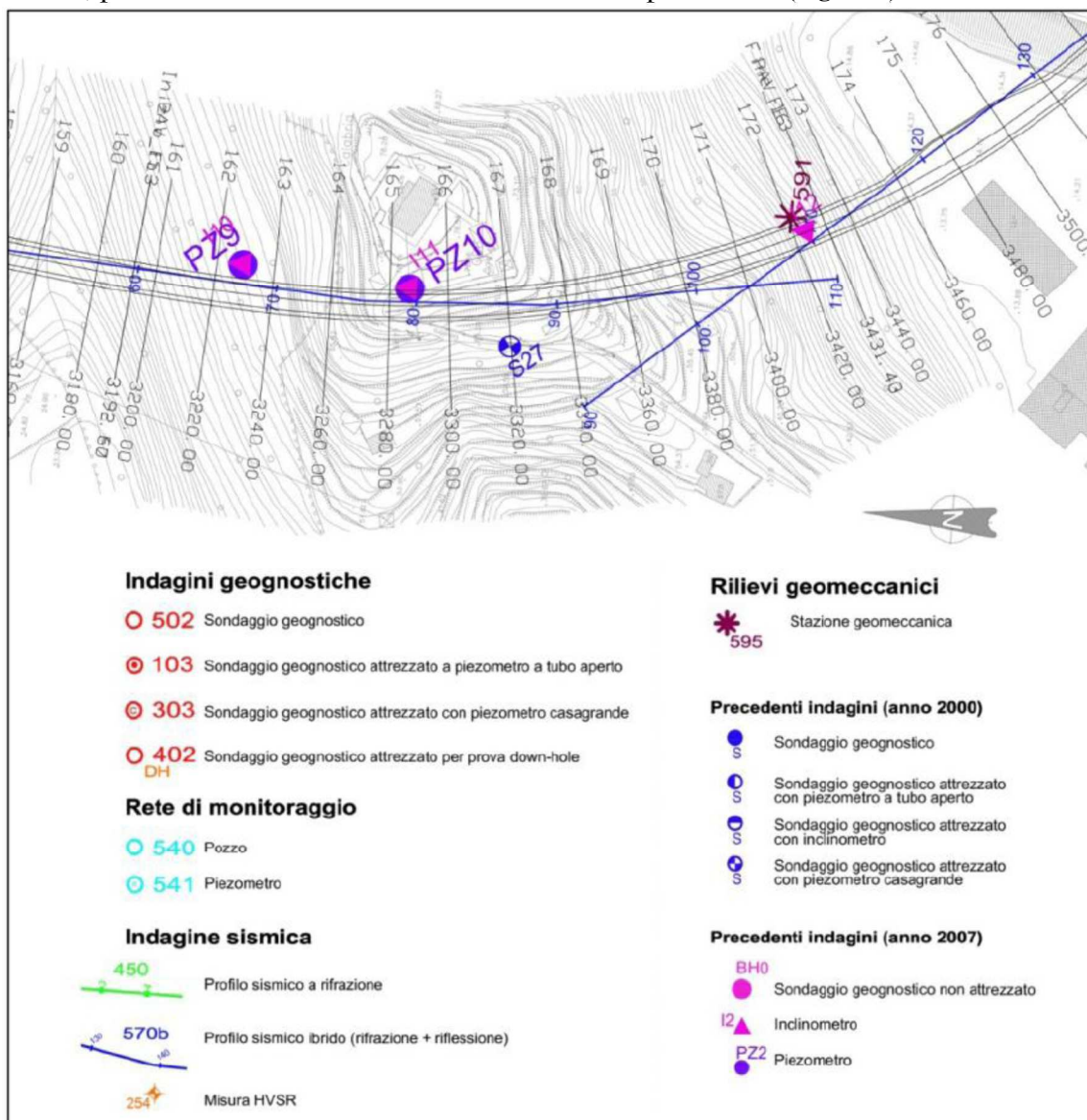


Figura 6: Stralcio della carta ubicazione indagini (T00GE00GETPU04_A).

Come riportato nella Relazione Geologica (T00-GE00-GEO-RE01-A), sulla base di tali indagini si prevedeva che lo scavo della galleria sarebbe interamente avvenuto nella formazione delle arenarie del Macigno, con facies tipica costituita da un'alternanza di

livelli da centimetrici a decimetrici di arenarie con materiali più fini. Si individuavano porzioni di roccia allentata ed intensamente fratturata in corrispondenza delle zone di imbocco, ed un assetto strutturale del versante, ricostruito dalle giaciture, che sembrava evidenziare una grossolana struttura monoclinale con pendenze medie degli strati di 10-20°. Dalle indagini geofisiche venne ricostruito l'assetto in profondità, caratterizzato dalla presenza di blande strutture plicative sinformi ed antiformali con inclinazioni limitate delle strutture.

Per quanto riguarda l'assetto geomorfologico vennero individuate due frane quiescenti ubicate ai lati dell'imbocco sud della galleria ed una in corrispondenza dell'imbocco Nord (Figura 7).

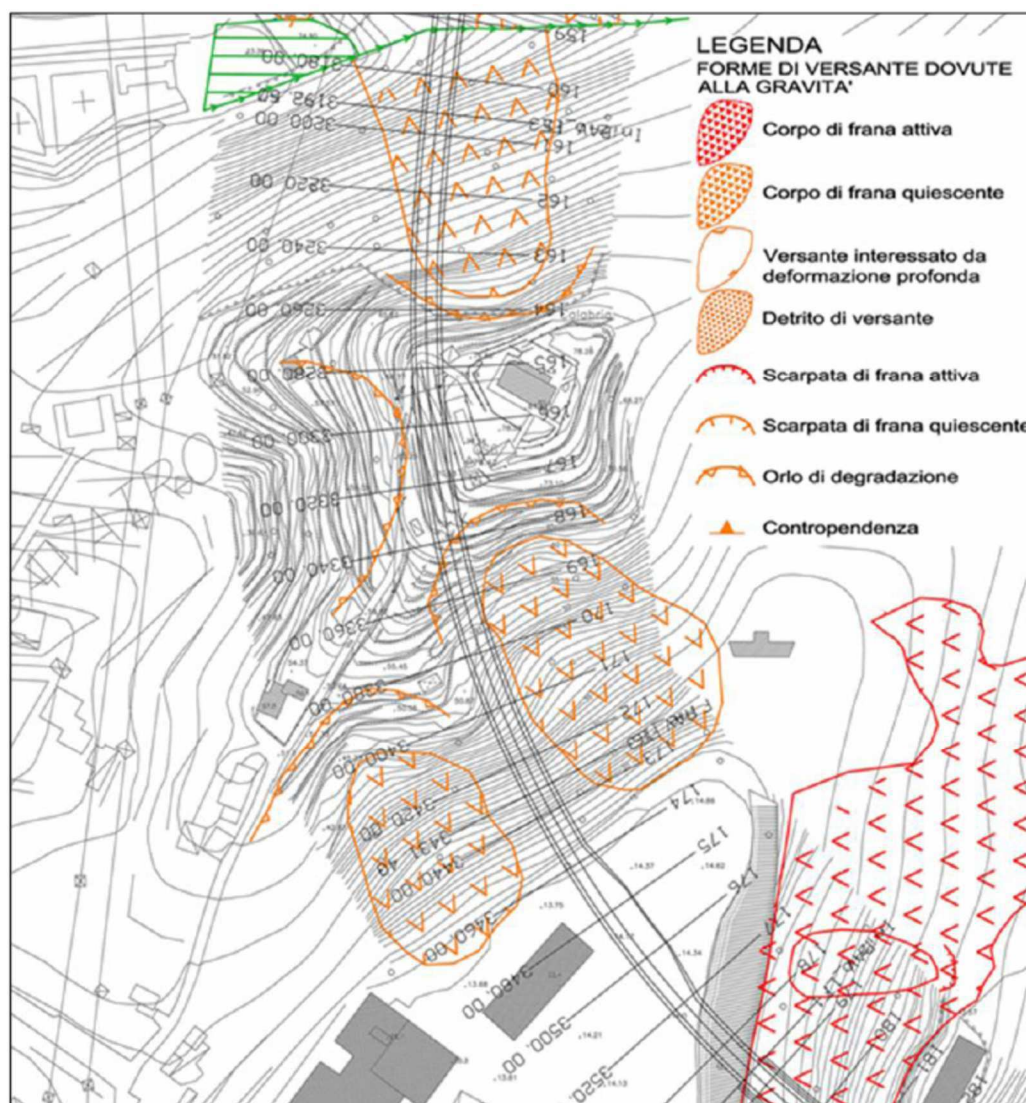


Figura 7: Stralcio della Carta geomorfologica (T00GE00GEOCG14_A).

Relativamente all'assetto idrogeologico, veniva individuata una falda idrica associata al versante ed alla rete del drenaggio superficiale in coincidenza dell'imbocco nord, e si ipotizzava che la stessa, localmente, potesse essere in comunicazione con la sottostante

falda idrica di base.

La successione ricostruita dalle indagini effettuate, ed in particolare dalle risultanze delle analisi sismiche, suddivideva il Macigno in tre facies:

- M1 – Superficiale di alterazione;
- M2 – Roccia allentata;
- M3 – Roccia compatta.

Come riportato nel profilo geomeccanico (**Figura 8**), lo scavo della galleria era previsto prevalentemente all'interno della facies M3, costituita da roccia compatta, anche se con valori di RQD tipici di un ammasso fratturato (45÷50%).

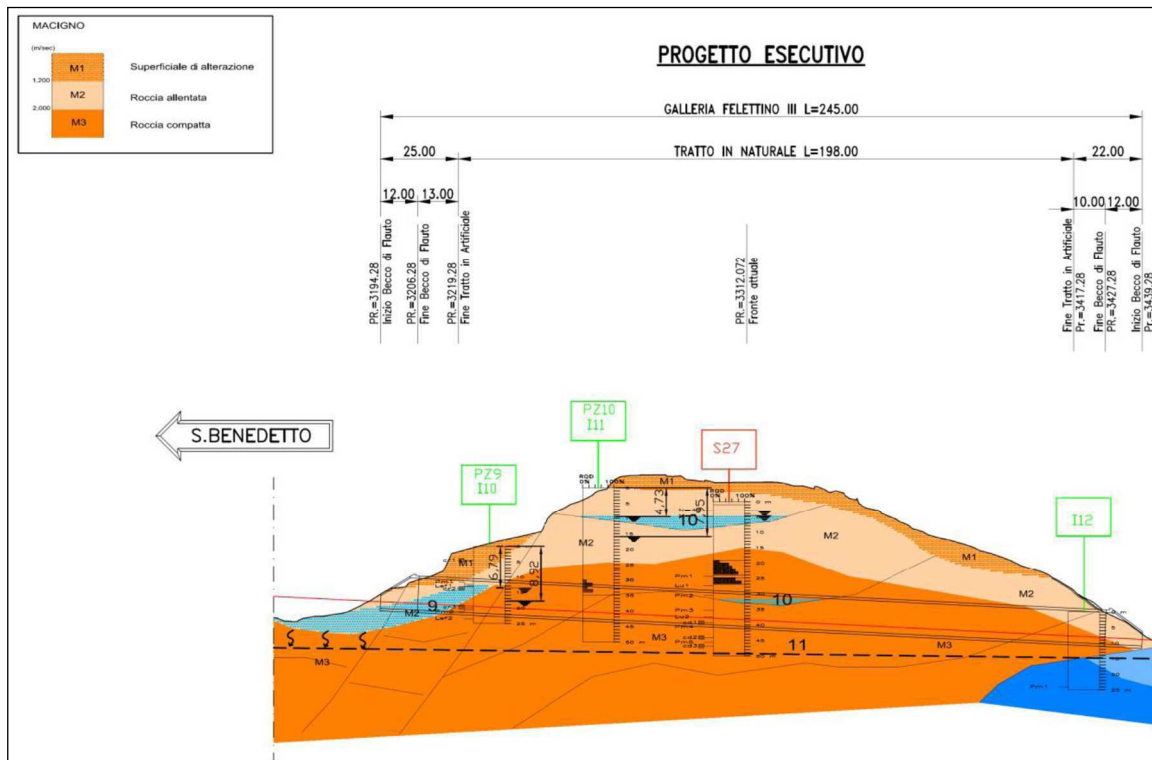


Figura 8: Stralcio del profilo geomeccanico del PE.

Dai documenti a disposizione non è stato possibile capire come sia stato ottenuto tale valore del parametro RQD, dato che nelle stratigrafie dei sondaggi risulta calcolato unicamente nell'intervallo 19.1÷27.0 m di profondità (RQD da 0 a 90%).

Inoltre, vi è discrepanza tra quanto riportato nella stratigrafia del sondaggio a carotaggio continuo I12 ed il profilo geomeccanico: dalla stratigrafia risulterebbe che da -11.8 m sino ai -35.0 m del fondo foro vi sia un ammasso roccioso di natura prevalentemente arenacea, molto fratturato ed alterato, che dalla descrizione sembrerebbe corrispondere al Macigno, mentre nel profilo geologico e geomeccanico è riportata la formazione del Calcarea cavernoso.

4.2 Fase di scavo

Durante l'esecuzione del tratto già scavato (105 m a partire dall'imbocco Sud) è risultato

che la qualità dell'ammasso era decisamente peggiore rispetto a quanto previsto, per la maggior parte, infatti, aveva un aspetto ed un comportamento terrigeno. In fase di scavo si sono avuti rilasci al contorno ed una risposta deformativa molto elevata, con cedimenti e convergenze del cavo fino a 30 cm. Inoltre si è innescato un fenomeno gravitativo lungo il versante sud del rilievo, esteso dalla sommità sino al suo piede, dove imbocca la galleria. Rianalizzando sia le stratigrafie dei sondaggi eseguiti per il PE e per le precedenti fasi progettuali, sia i rilievi dei fronti effettuati in fase di scavo, è possibile presumere che l'ammasso in questione sia costituito da più litofacies del Macigno. Oltre a quella più tipica, arenaceo-siltitica ("litofacies delle Arenarie Zonate"), dove peraltro il rapporto arenite/pelite è generalmente compreso tra 1/3 e 1/10, dovrebbe essere presente anche la marnoso-siltosa (segnalati inclusi e blocchi di marne calcaree nella descrizione del fronte alla progr. 3+320 km). L'ammasso, inoltre, risulta fortemente disturbato da fenomeni deformativi sia duttili che fragili, ed alterato. L'alterazione è molto spinta nelle porzioni a maggior contenuto pelitico o pelitico-marnoso, che hanno risentito maggiormente degli stress deformativi in quanto facies più deboli rispetto a quelle più arenacee. Ciò comporta che l'intero ammasso entro cui si sviluppa la galleria ha caratteristiche geotecniche che variano da quelle di un terreno vero e proprio a quelle di una "roccia debole".

4.3 Indagini integrative 2014-2016 e Proposta di perizia n.2

A seguito delle problematiche emerse durante lo scavo della galleria, a partire dal Settembre 2014 sono state avviate una serie di rilievi ed indagini, consistenti in:

- sopralluoghi e analisi dei dissesti;
- rilievi geologici e geomorfologici;
- analisi fotointerpretative;
- n.5 sondaggi geognostici a carotaggio continuo per l'installazione di inclinometri,
- n.4 sondaggi a distruzione per l'installazione di piezometri;
- n.7 prove di taglio torsionali su campioni prelevati con le perforazioni;
- misure inclinometriche e piezometriche
- prove con martinetti piatti nel rivestimento della galleria

Per quanto riguarda la morfologia del rilievo entro cui è previsto il completamento dello scavo della galleria, viene evidenziata l'asimmetria per controllo strutturale dato dall'assetto monoclinale della stratificazione, con un versante nord, dove gli strati sono a reggipoggio, maggiormente acclive di quello sud, che presenta una pendenza media pari all'incirca a quella degli strati (20°). Si evidenzia comunque che tale assetto trova riscontro solo su base morfologica e su un esiguo affioramento, poiché il substrato si presenta molto tettonizzato e destrutturato, tanto che è estremamente difficile individuarne il reale assetto giaciturale. Ciò è confermato dall'analisi dei rilievi al fronte della galleria, dove l'ammasso roccioso assume un aspetto terrigeno.

Dall'analisi delle stratigrafie dei sondaggi integrativi viene confermato che, rispetto a quanto previsto dal PE, il rilievo è costituito da un flysch marnoso-arenaceo, molto alterato

e fratturato, con prevalenza della litofacies pelitico-siltosa, costituita da argilliti e argilliti siltose in strati da centimetrici a decimetrici.

Sempre basandosi essenzialmente sulla morfologia, sono individuate delle faglie ad andamento pressoché verticale, che smembrano l'ammasso roccioso, controllando la forma del rilievo, romboidale, della sommità.

È confermata la presenza di almeno 3 corpi di frana superficiali, evidenziati da altrettante nicchie di forma arcuata, come riportato anche nel PE (Figura 7) e nella cartografia PAI (Figura 9).

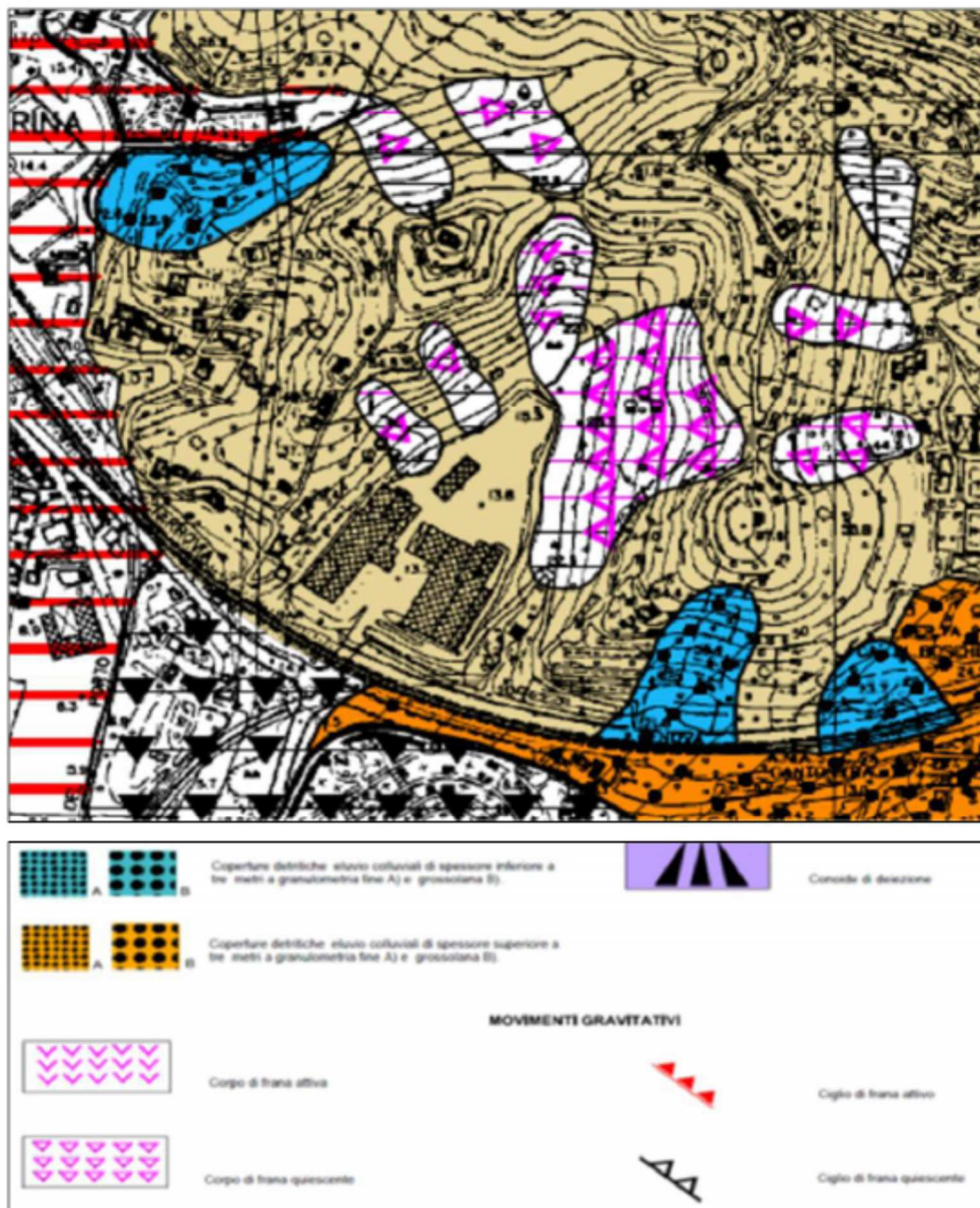


Figura 9: Stralcio della cartografia PAI (Piano Stralcio di Bacino Ambito 20 La Spezia).

Viene segnalato che il piede di tali fenomeni è caratterizzato, per quanto riguarda il versante sud, dallo scavo operato in passato dall'attività estrattiva connessa con la

produzione di laterizi e, per quanto attiene il versante nord, da una accentuata incisione valliva.

Nel corso dei rilievi in situ sono stati anche riscontrati dissesti nei rivestimenti in spritz beton delle paratie (berlinesi) all'imbocco sud della galleria, in particolare nel fianco est, caratterizzato anche da venute d'acqua significative.

Nella tabella seguente sono riportati i risultati delle prove di taglio torsionali effettuate:

SOND. N.	CAMP. N.	PROF. (m)	Cr (KPa)	Φ_r (°)
F1i	B	25,0-25,5	2,30	22,1
F1i	C	30,0-30,5	2,10	22,4
F2I	C	14,0-14,3	2,70	22,7
F2i	D	18,0-18,4	0,30	24,4
F5I	1	5,0-5,55	0,70	27,3
F5i	2	10,0-10,35	4,80	19,0
F5i	3	14,6-14,9	3,20	16,8
VALORE MEDIO				22,1

Tabella 4: Risultati delle prove di taglio torsionali.

Per quanto riguarda l'andamento della falda, si riporta che i dati piezometrici ne mostrano un andamento che segue sostanzialmente la morfologia del rilievo, con i maggiori livelli ed escursioni al piede del versante sud (**Figura 10** - Piezometro F3p), dove si convoglierebbero maggiormente le acque di infiltrazione conformemente alla giacitura degli strati a franapoggio rispetto al pendio.

Sulla base dell'analisi di tutti i dati raccolti e disponibili sono state realizzate delle sezioni interpretative di entrambi i versanti del rilievo (**Figura 11**). Ipotizzando una geometria sia del fenomeno gravitativo innescato dallo scavo della galleria lungo il versante sud, sia della frana superficiale quiescente presente sul versante nord, sono state eseguite delle analisi di stabilità (**Figura 12** e **Figura 13**). In entrambi i casi è stata utilizzata una resistenza mobilitata espressa in termini di angolo di attrito residuo pari a 22° (dato medio derivante dalle prove di taglio torsionali). Per quanto riguarda il fenomeno gravitativo lungo il versante sud, l'analisi è stata eseguita considerando le condizioni idrauliche più gravose misurate, ed ha fornito un fattore di sicurezza pari a 1,14 (**Figura 12**). L'analisi condotta sulla frana del versante nord, invece, è stata effettuata in assenza di falda (anche se nella relazione si dichiara che anche in questo caso si sono considerate le condizioni idrauliche più gravose), ed ha fornito un fattore di sicurezza pari a 1,10 (**Figura 13**).

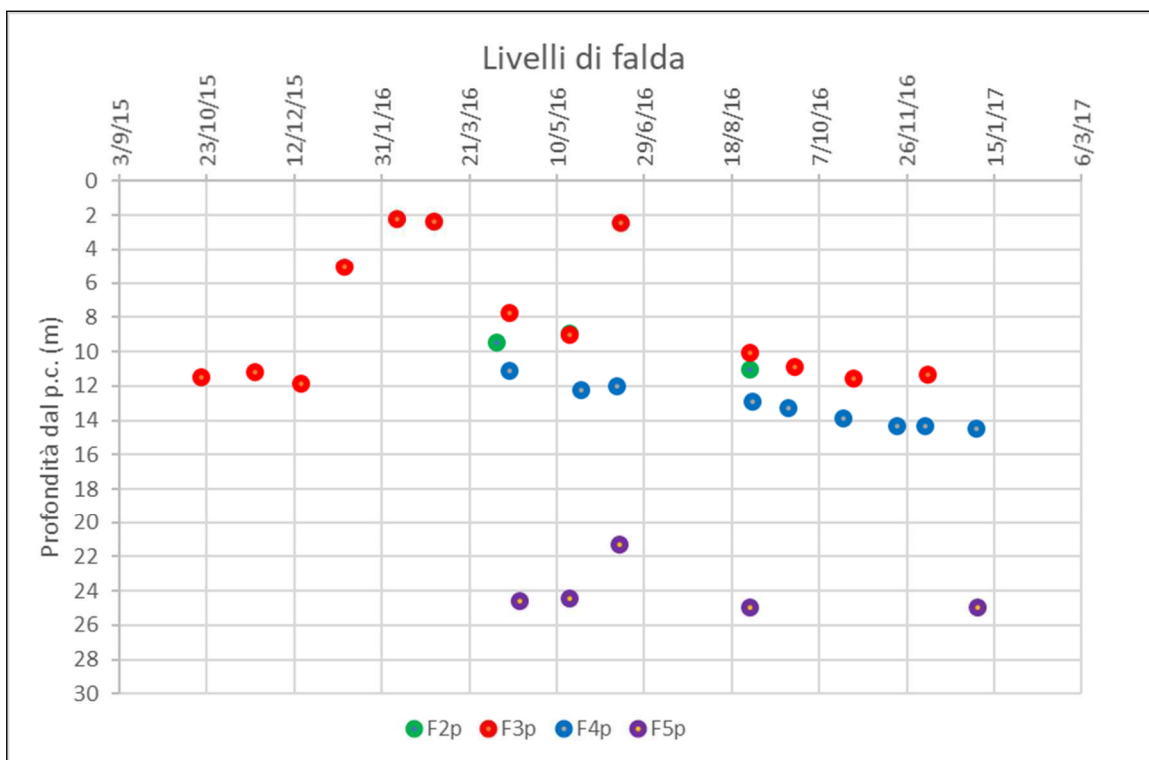


Figura 10: Livelli di falda nei piezometri installati durante le indagini integrative del 2015.

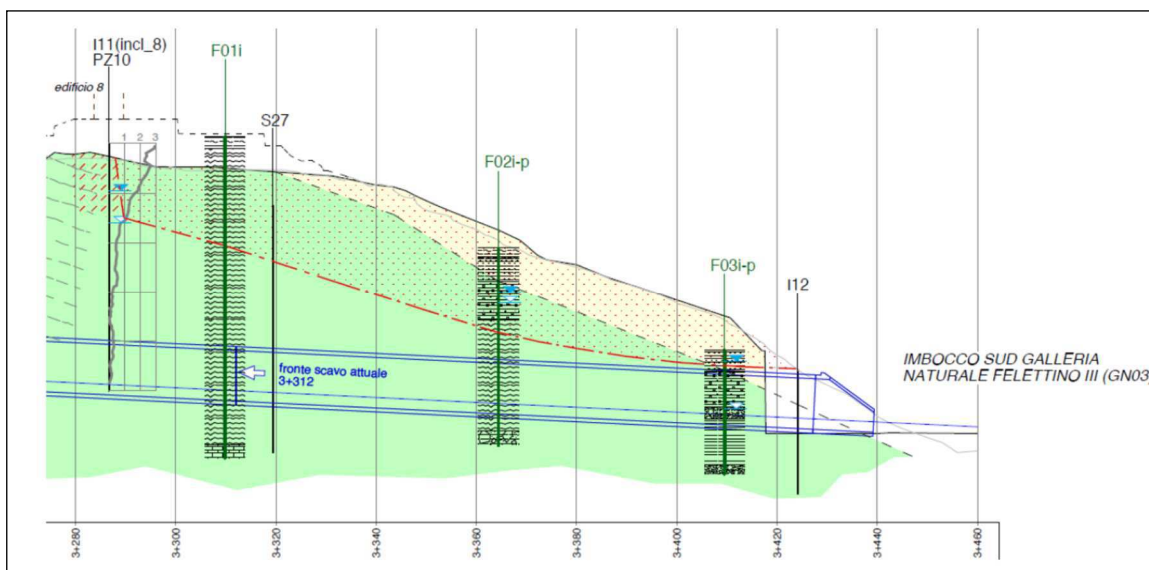


Figura 11: Stralcio del profilo geologico con la geometria della superficie di scorrimento lungo strato del versante sud.

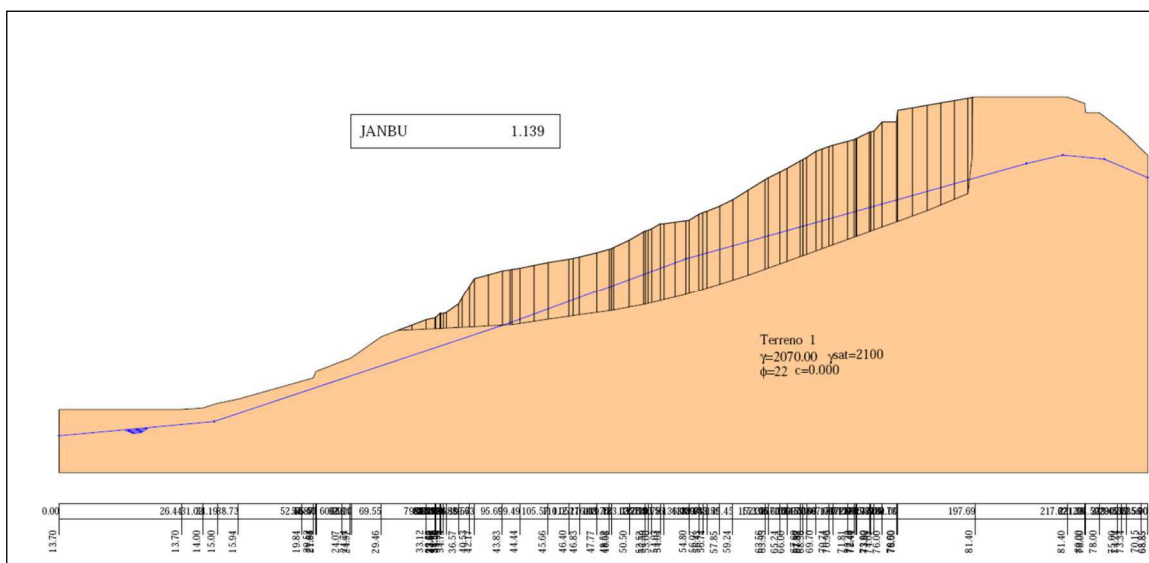


Figura 12: Verifica di stabilità lungo il versante sud.

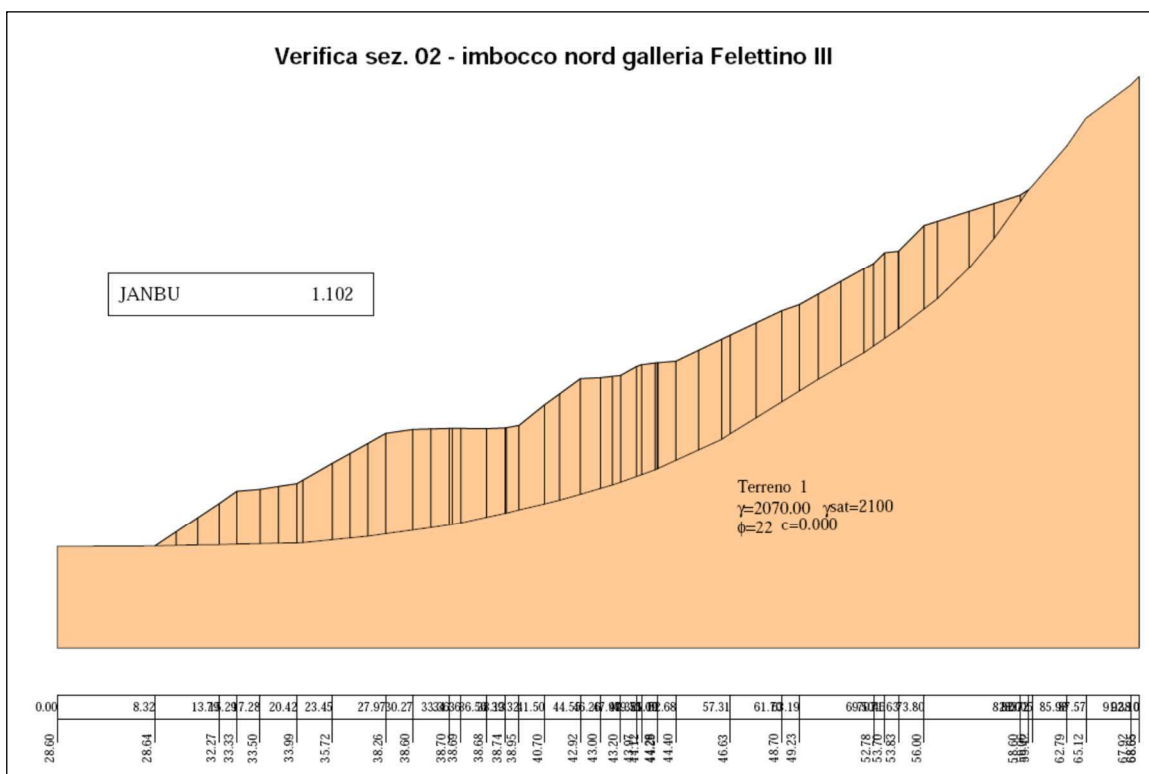


Figura 13: Verifica di stabilità lungo il versante nord.

Nell'ambito della PVT n.2, sulla base di quanto emerso dal tratto già scavato e dalle indagini integrative svolte, viene aggiornato il profilo geomeccanico. Su tale profilo, tuttavia, non è riportata la superficie di scivolamento che interessa il versante sud e risulterebbe passante per la testa della berlinese di imbocco (che si presenta localmente lesionata). La presenza della formazione del Calcare cavernoso ad una

profondità limitata al di sotto dell'imbocco sud sembra essere confermata dalla stratigrafia del sondaggio F3i, è quindi probabile che quella del sondaggio I12, eseguito nel 2007, non sia corretta (riportava una successione arenacea simile a quella del Macigno tra -11.8 m e -35.0 m).

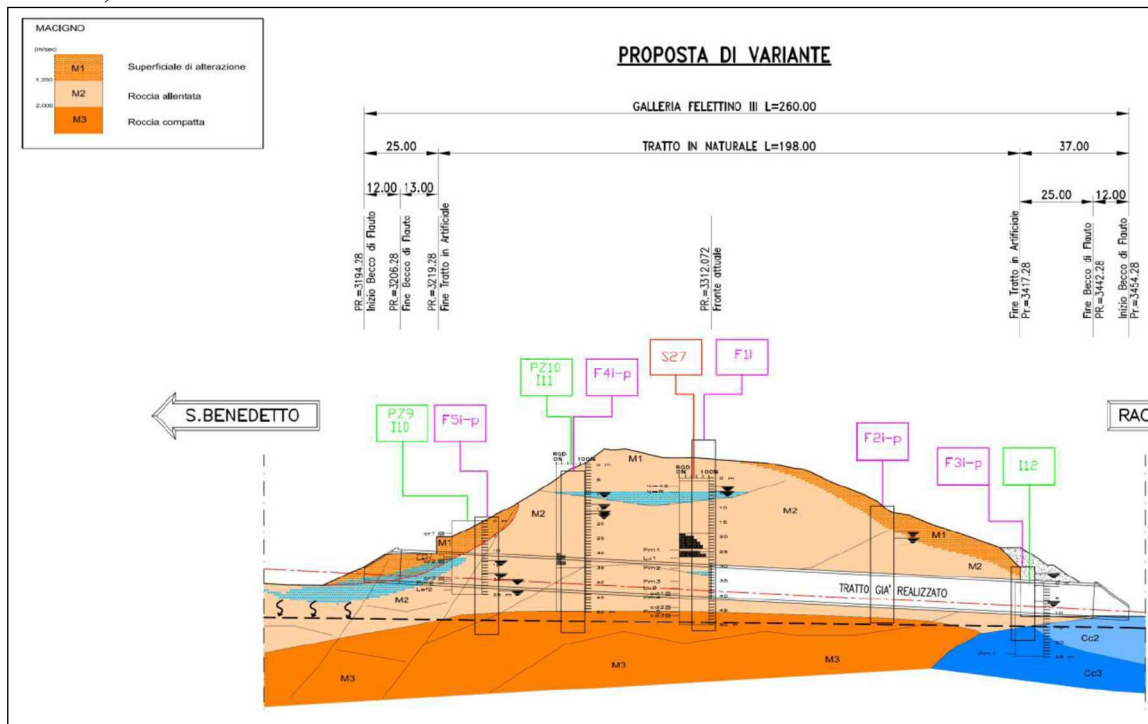


Figura 14: Stralcio del profilo geomeccanico del PPE n.2.

Dal nuovo profilo proposto sia il tratto di galleria da scavare che quello già realizzato si sviluppano interamente in quella che nel PE veniva indicata come facies M2 (Roccia allentata) del Macigno. Soltanto l'imbocco nord interessa la facies indicata M1 (Superficiale di alterazione) che, in realtà, in tale zona è costituita da un corpo di frana classificata come quiescente.

5. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO E PROFILO GEOTECNICO

Dall'analisi della documentazione a disposizione si ritiene valido, nei suoi aspetti generali, il modello geologico di riferimento che prevede sia il tratto di galleria da scavare, sia quello già realizzato, nella facies M2 della formazione del Macigno. Solo in corrispondenza dell'imbocco nord la galleria interesserà, per poche decine di metri, un corpo di frana classificata come quiescente.

Le principali modifiche apportate per quanto riguarda l'assetto geologico consistono nell'aggiunta della superficie di scivolamento che interessa il versante sud e nella modifica della tipologia di contatto tra il Macigno ed il Calcere Cavernoso, che da stratigrafico diviene tettonico (Figura 15).

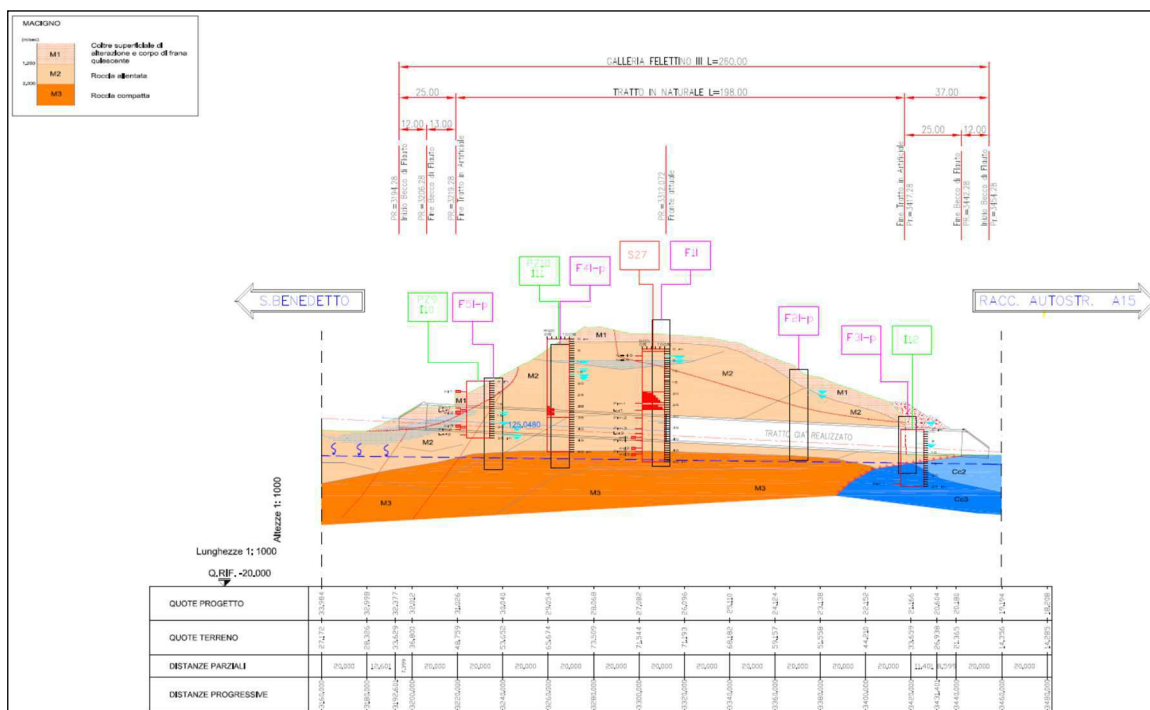


Figura 15: Stralcio del profilo geologico proposto.

Quest'ultima modifica deriva dal fatto che, sulla base anche di quanto riscontrato con i sondaggi geognostici e con i rilievi dei fronti di scavo lungo il tracciato della variante (in particolare nel tratto interessato dallo scavo della galleria naturale Fornaci I), si ritiene che la formazione denominata Calcere Cavernoso sia in realtà costituita prevalentemente da litofacies di origine tettonica. Già nella letteratura geologica più recente (Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 – Foglio 248 La Spezia, Abbate E. *et al.*, 2005), nell'area in esame il Calcere Cavernoso non viene considerato come una formazione della Falda Toscana, ma attribuito alle "Brecce tettoniche interposte tra la Falda Toscana e la Successione Metamorfica di Punta Bianca". Tali litofacies sono interpretate come un orizzonte cataclastico formatosi a spese delle unità inferiori della Successione Toscana ("dolomie di

Coregna” e “*membro dei calcari e marne di M.S.Croce*” della Formazione di La Spezia”). Per renderne agevole il confronto, nel modello geologico non è stata modificata la suddivisione utilizzata nelle precedenti fasi progettuali delle facies (M1, M2 ed M3) che costituiscono il rilievo entro cui si sviluppa la galleria Felettino III. Tuttavia se ne ridefinisce la loro tipologia/natura:

- M1 (descritta come facies “superficiale di alterazione”): da un punto di vista strettamente geologico non si tratta di una vera e propria facies del Macigno, ma della coltre eluviale che lo ricopre, e comprende anche il corpo di frana quiescente del versante nord, entro cui è posto l’imbocco della galleria;
- M2 (descritta come facies “Roccia allentata”): deriva da un flysch dove le componenti pelitiche-siltose e, in minor misura, marnose, prevalgono su quelle arenacee. A causa degli eventi deformativi che lo hanno interessato, l’originario ammasso è stato fortemente disturbato, tanto da assumere per gran parte un aspetto caotico, che rende estremamente difficile individuarne il reale assetto giaciturale. Ciò ha favorito i processi di alterazione, molto spinta nelle porzioni a maggior contenuto pelitico o pelitico-marnoso, tanto che la facies ha caratteristiche geotecniche che variano da quelle di un terreno vero e proprio a quelle di una “roccia debole”;
- M3 (descritta come facies “Roccia compatta”): è sempre costituita dallo stesso flysch da cui si è originata la facies precedente ma, molto probabilmente, ha un maggior contenuto della componente arenacea, più resistente nei confronti degli stress deformativi, ed ha subito una minore alterazione, quindi ha mantenuto un aspetto che ne consente il riconoscimento della struttura ed un comportamento più litoide.

Nella fincatura del profilo geologico la dizione “Zone tettonizzate” è stata sostituita con “Zone in frana quiescente” per indicare il tratto in cui lo scavo della galleria interesserà il dissesto presente.

Sono inoltre state modificate le condizioni idrauliche attese e le problematiche in fase di scavo nell’attraversamento della frana quiescente. I dati a disposizione non sono sufficienti per definire in dettaglio l’assetto idrogeologico di tale tratto. Nella documentazione consultata, solo in quella del PE si riporta la presenza di una falda idrica, di entità definita “media”, associata al versante ed alla rete del drenaggio superficiale che, localmente, potrebbe essere in comunicazione con la sottostante falda idrica di base. Nella stratigrafia del sondaggio PZ9 (eseguito nel 2007) è riportato che il materiale attraversato risultava saturo a partire da -14 m di profondità dal boccaforo, mentre le letture piezometriche disponibili sono riportate nella tabella seguente.

Periodi di monitoraggio					
Marz. '06 ÷ Apr.'07		Magg. '07 ÷ Dic. '07		Ott. '08 ÷ Dic. '08	
Profondità falda (da testa foro posto a 52,00 m slm)					
min [m]	max [m]	min [m]	max [m]	min [m]	max [m]
16,60	13,58	16,12	15,03	18,05	17,84

Tabella 5: Misure piezometriche relative al sondaggio PZ9.

Da tali misure risulterebbe che, a fronte di una quota di progetto della galleria compresa tra 30 e 31 m slm, il livello della falda potrebbe variare tra 34 e 38 m slm.

Le indagini integrative svolte non consentono di ricostruire il quadro idrogeologico in maniera certa, poiché le misure piezometriche effettuate nel sondaggio F5p (n.5 letture - **Figura 10**), posizionato ad una quota leggermente superiore a quella del PZ9, coprono un periodo temporale limitato (aprile 2016÷gennaio 2017). Tali misure indicavano un livello di falda variabile da -21,3 m ad oltre -25 m (profondità del foro) dal piano campagna, ovvero a quote sia di poco superiori che di poco inferiori a quelle del piano di scavo. Per definire in maniera più dettagliata l'assetto idrogeologico sarebbe necessaria una ripresa delle misure nei due piezometri esistenti, al fine di verificare l'effettiva oscillazione della falda.

In sede di perizia di variante è stata eseguita una back-analysis sulla formazione M2 e sono risultati i seguenti parametri di resistenza e deformabilità degli ammassi rocciosi:

Parametro	Da Back-analysis
Coesione efficace di picco = c'_p (kPa)	65
Angolo di attrito di picco = ϕ'_p (°)	30
Coesione efficace residua = c'_r (kPa)	52
Angolo di attrito residuo = ϕ'_r (°)	24
Modulo elastico = E (MPa)	250

Tabella 6: Parametri geotecnici da back-analysis in perizia di variante.

In sede di perizia si conclude che gli spostamenti calcolati con i parametri ora richiamati hanno una buona rispondenza con le misure e quindi si possono considerare rappresentativi di quelli effettivamente presenti in sito. Le analisi condotte in fase di perizia di variante sono state allegate alla relazione geotecnica generale (T00GE00GETRE07_B) cui si rimanda.

Dalle informazioni riportate in precedenza è possibile fare ulteriori considerazioni circa la caratterizzazione geotecnica delle formazioni interessate dagli scavi della galleria.

Si rappresentano di seguito in forma grafica le sintesi dei risultati delle prove eseguite.

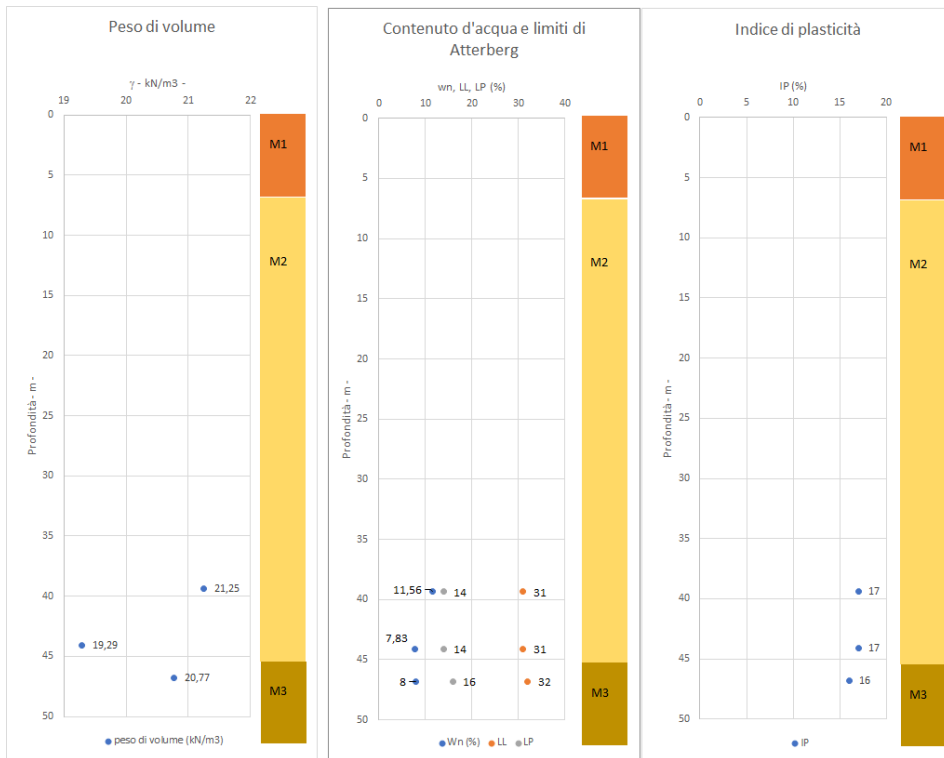


Figura 16 Galleria Naturale Felettino III – Sintesi delle prove eseguite 1/2

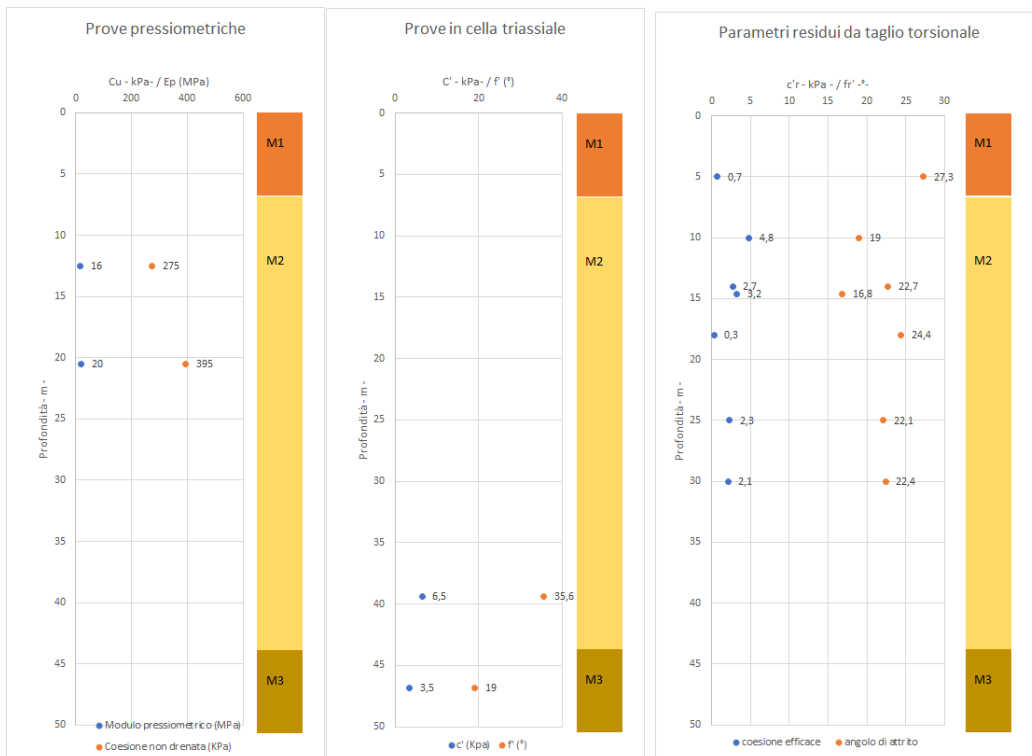


Figura 17 Galleria Naturale Felettino III – Sintesi delle prove eseguite 2/2

Sulla base dei dati sintetizzati nella **Figura 16** e nella **Figura 17** si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il contenuto d'acqua è sempre inferiore al limite plastico, il che testimonia terreni fortemente consolidati;
- Il basso contenuto d'acqua si riflette su valori del peso di volume che sono attorno ai 20 kN/m³;
- La plasticità dei terreni è nell'ordine del 17% quindi medio-bassa.
- Il limite liquido è pari al 31-32% cui corrisponde un valore di angolo di attrito residuo di 22°, vedasi **Figura 18**;
- Il valore di angolo residuo ricavabile dalla plasticità è ben in linea con quello ricavato in laboratorio dalle prove di taglio torsionali (valori mediamente pari a 22-24°). La coesione residua è pari a 2 kPa;
- Le prove pressiometriche restituiscono valori di coesione non drenata mediamente pari a 300 kPa e modulo pressiometrico pari a 20 MPa;
- Le prove triassiali in tensioni efficaci riportano una coesione di 5 kPa ed un angolo di attrito di 30°.

Tali valori, specialmente, la coesione appaiono essere non in linea con la sovraconsolidazione dei terreni e con il valore di coesione non drenata ricavato dai pressimetri che certamente testano il terreno in una condizione a minor disturbo rispetto i campioni prelevati in cassetta.

Si ritiene che il disturbo indotto dal carotaggio possa aver dato luogo a campioni disturbati che hanno perso parte della loro struttura originaria e conseguentemente parte della resistenza. I valori restituiti dalle prove triassiali appaiono essere inferiori alle condizioni indisturbate e più prossimi alle condizioni residue dove la resistenza data dalla struttura viene completamente persa.

La **Figura 19** mostra come per un indice di plasticità del 17% la coesione efficace risulta essere pari a 50-60 kPa, mentre l'angolo di attrito risulti essere 26°.

In sintesi, si ritiene che i risultati provenienti dalle prove di laboratorio tendano a sottostimare considerevolmente l'effettiva resistenza dell'ammasso e questo perché le azioni legate al carotaggio hanno alterato se non completamente distrutto la struttura originaria del materiale.

Per questo si ritiene che maggior peso debba essere dato ai risultati del modello di back analysis realizzato in sede di perizia di variante i cui risultati sono riportati nella **Tabella 6**.

Volendo confrontare quanto emerge dalle prove di laboratorio, integrate sulla base delle informazioni di letteratura in funzione della plasticità dei terreni, con i risultati del modello di back analysis si ottiene quanto riportato sotto:

Tabella 7 Facies M2 – confronto tra parametri da back-analysis eseguita in perizia di variante e risultati delle prove di laboratorio		
Parametro	Da Back-analysis	Da laboratorio
Coesione efficace di picco = c'_p (kPa)	65	60

Tabella 7 Facies M2 – confronto tra parametri da back-analysis eseguita in perizia di variante e risultati delle prove di laboratorio

Parametro	Da Back-analysis	Da laboratorio
Angolo di attrito di picco = ϕ'_p (°)	30	26
Coesione efficace residua = c'_r (kPa)	52	2
Angolo di attrito residuo = ϕ'_r (°)	24	24
Modulo elastico = E (MPa)	250	180 (*)

(*) = modulo elastico assunto pari a 600 x cu

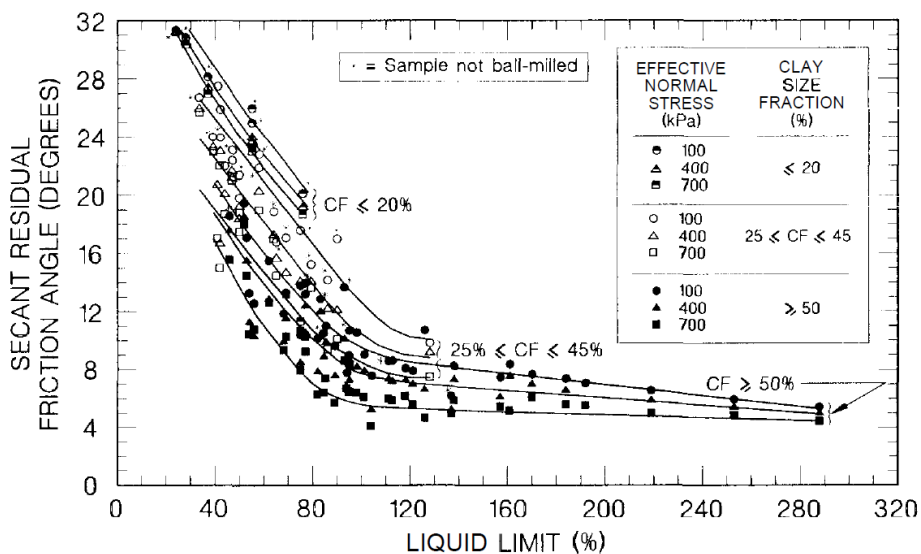


Figura 18 Legame tra angolo di attrito residuo e limite liquido al variare del contenuto di argilla e dello sforzo di confinamento

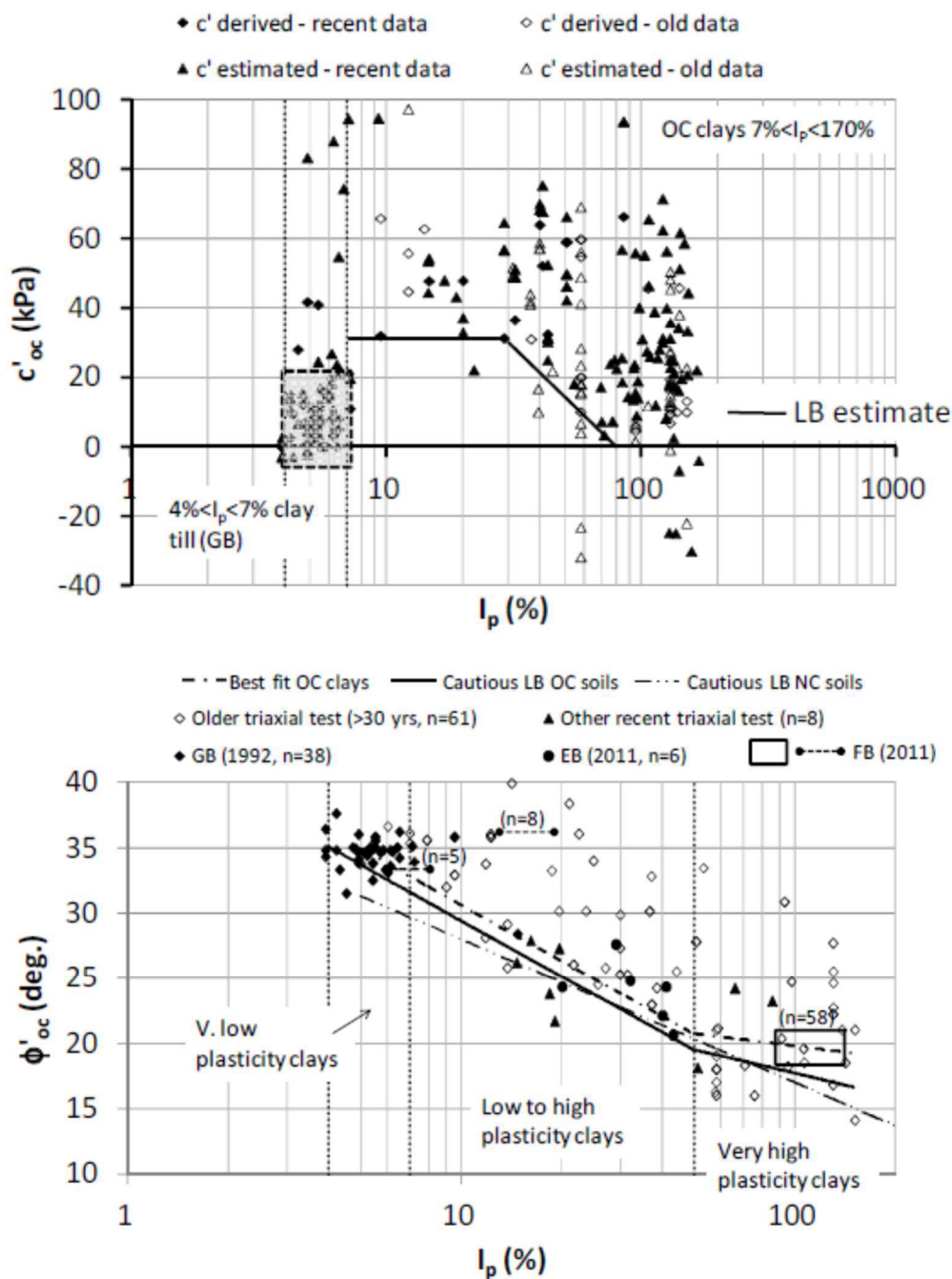


Figura 19 Legame tra plasticità e parametri di resistenza in tensioni efficaci per terreni sovraconsolidati

Per la facies M1 sono anche disponibili alcuni dati provenienti da pocket eseguiti che vengono riportati nella Figura 20:

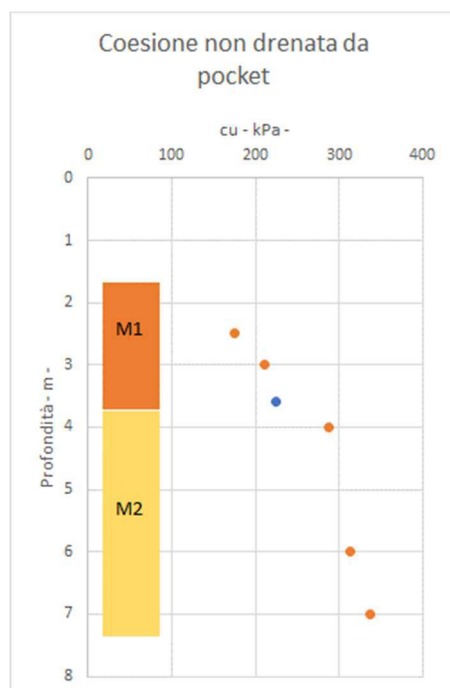


Figura 20 Formazione M1 – dati da pocket

La coesione non drenata risulta pari a 200 kPa, considerando un modulo pari a 200 volte la coesione non drenata si ottiene un valore di 40 MPa.

I terreni, visti i valori di coesione misurati e le profondità di interesse, risultano essere fortemente sovraconsolidati, pertanto anche per la coesione efficace si possono assumere valori tra 10 kPa e 20 kPa.

Si hanno informazioni solo sull'angolo residuo che risulta essere pari a 27°.

In conclusione, quindi, si considerano i seguenti parametri geotecnici

Facies	γ	c'	ϕ'	E
M1	19÷20 KN/m ³	10÷20 KPa	25÷28°	40 MPa

La tabella che segue riporta le informazioni finali di sintesi sulla caratterizzazione dei terreni interessati dagli scavi per la galleria naturale Felettino III.

Tabella 8 – GN Flettino III - Tabella di caratterizzazione geotecnica delle formazioni interessate dagli scavi						
Facies	γ kN/m ³	c'_r kPa	ϕ'_r °	c'_p kPa	ϕ'_p °	E MPa
M1	19	0	27	10	25	40
M2	20	52	24	65	30	250

6. PROPOSTA DI INDAGINI INTEGRATIVE

Data la delicatezza del contesto, si ritiene importante che l'avanzamento dello scavo della galleria sia anticipato da un sondaggio esplorativo suborizzontale da eseguirsi a carotaggio continuo.

In considerazione che la ripresa dello scavo avverrà dall'attuale fronte sud in direzione S. Benedetto, e ammontando il tratto da scavare ad una lunghezza di circa 120m, il tratto in completamento potrà essere coperto, a partire appunto dal fronte sud, con la realizzazione di 6 sondaggi di lunghezza pari a 20m ciascuno, predittivi del successivo avanzamento del fronte.

Questa modalità esplorativa dovrebbe inoltre anticipare la caratterizzazione del tratto terminale, in corrispondenza dell'imbocco nord, che risulta inserito all'interno di un corpo di frana quiescente (litofacies M1) il cui dettaglio è mostrato in **Figura 21**. In questo caso il sondaggio esplorativo può contribuire a meglio definire sia lo spessore del corpo della frana quiescente riconosciuta, sia l'effettiva entità delle condizioni idrauliche che risulterebbero gravare in corrispondenza dell'imbocco nord del cavo.

I sondaggi, eseguiti a carotaggio continuo, potranno prevedere il prelievo di n° 6 campioni indisturbati (da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico) e 4 prove pressiometriche di tipo *Menard*.

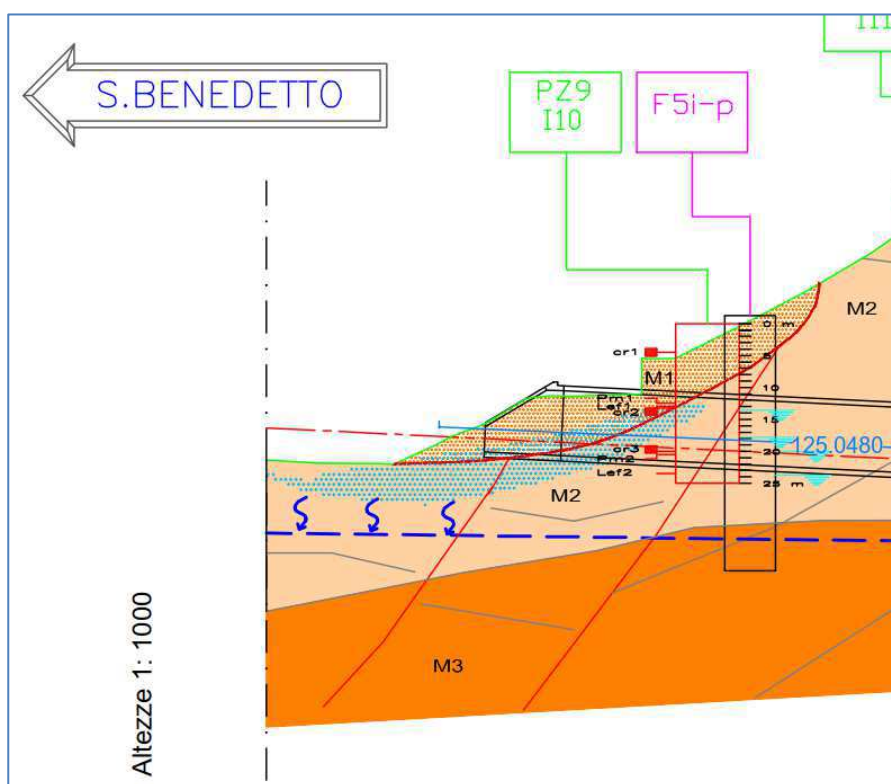


Figura 21 – Frana quiescente segnalata in corrispondenza dell'imbocco nord.

Si ritiene altresì di particolare importanza che, in adeguato anticipo sull'inizio lavori,

vengano riprese le misure inclinometriche e piezometriche sulle verticali strumentate esistenti. Qualora la strumentazione non risultasse più agibile ne sarà necessaria la reinstallazione in corrispondenza quanto più prossima a quella esistente.