

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA**

**U.O. GALLERIE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA DITTAINO – CATENANUOVA**

**ELABORATI GENERALI**

Relazione tecnica delle opere in sotterraneo

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

RS3E 50 D 07 RH GN0000 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	G. Quarzicci	Dic. 2019	A. Duzi Nulli	Dic. 2019	F. Sciarino	Dic. 2019	A. Sciotti Dicembre 2019

ITALFERR S.p.A.  
U.O. GALLERIE  
Dott. Ing. Alessandra Sciotti  
Ordine degli Ingegneri di Roma  
n° 19846

File: RS3E50D07RHGN000001A

n. Elab.: 1018

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA PM PALOMBA-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

## INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO .....	4
3	NORMATIVA E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO .....	4
4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
5	ALLEGATI.....	5
6	DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO.....	5
7	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	7
7.1	IL TRACCIATO E LE OPERE IN SOTTERRANEO.....	7
8	METODOLOGIA DI LAVORO .....	11
9	FASE CONOSCITIVA.....	13
9.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	13
9.2	ASSETTO STRUTTURALE E GEOMORFOLOGICO.....	14
9.3	INDAGINI.....	15
9.4	CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA.....	16
9.4.1	<i>Formazione di Terravecchia – Litofacies TRV</i> .....	16
9.4.2	<i>Formazione di Terravecchia – Litofacies TRVb</i> .....	24
9.4.3	<i>Formazione Argille ed Arenarie di Catenanuova – Litofacies AAC</i> .....	39
9.4.4	<i>Formazione Argille ed Arenarie di Catenanuova – Litofacies AACa</i> .....	46
9.4.5	<i>Depositi di versante e depositi alluvionali – Litofacies b2, bn1</i> .....	50
9.5	IL REGIME IDRAULICO .....	51
10	FASE DI DIAGNOSI .....	52
10.1	CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO.....	52
10.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO.....	53
10.3	DEFINIZIONE DELLE TRATTE A COMPORTAMENTO TENSIO-DEFORMATIVO OMOGENEO.....	53
11	FASE DI TERAPIA.....	55
11.1	METODOLOGIA DI SCAVO .....	55

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> RS3E	<b>LOTTO</b> 50 D 07	<b>CODIFICA</b> RH	<b>DOCUMENTO</b> GN0000 001	<b>REV.</b> A	<b>FOGLIO</b> 3 di 77

11.1.1	<i>11.1.1 Criteri di scelta del sistema di scavo</i>	55
11.1.2	<i>11.1.2 Metodo di scavo tradizionale</i>	55
11.2	<b>DEFINIZIONE DELLE SEZIONI TIPO DI AVANZAMENTO</b>	56
11.2.1	<i>11.2.1 Galleria Libertinia - Sezione C2p*</i>	56
11.2.2	<i>11.2.2 Galleria Libertinia - Sezione C2</i>	56
11.2.3	<i>11.2.3 Galleria San Filippo - Sezione C2p</i>	57
11.2.4	<i>11.2.4 Galleria San Filippo - Sezione C2</i>	58
11.2.5	<i>11.2.5 Galleria Salvatore - Sezione A2</i>	58
11.2.6	<i>11.2.6 Galleria Salvatore - Sezione B1</i>	59
11.2.7	<i>11.2.7 Galleria Salvatore - Sezione B2</i>	60
11.2.8	<i>11.2.8 Galleria Salvatore - Sezione C2</i>	60
11.2.9	<i>11.2.9 Galleria Salvatore - Sezione C2v</i>	61
11.2.10	<i>11.2.10 Galleria Salvatore - Sezione C2p</i>	62
11.3	<b>RISCHI POTENZIALI</b>	63
12	<b>FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO</b>	74
12.1	<b>CRITERI GENERALI PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO</b>	74
12.2	<b>MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA</b>	75
13	<b>CONCLUSIONI</b>	77

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

## 1 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del Progetto Definitivo delle opere in sotterraneo della tratta Dittaino - Catenanuova, nell'ambito del raddoppio ferroviario della Linea Palermo-Catania. In tale tratta il tracciato ferroviario si sviluppa parzialmente in sotterraneo, attraverso tre gallerie naturali: la galleria Libertinia, la San Filippo e la galleria Salvatore.

## 2 SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO

Scopo del documento è la descrizione delle principali soluzioni tecnico-progettuali individuate per la realizzazione delle gallerie naturali e delle relative opere accessorie. Per l'analisi degli aspetti geotecnici e strutturali si rimanda alla Relazione geotecnica e di calcolo di ciascuna opera in sotterraneo.

## 3 NORMATIVA E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO

- Rif. [1] Decreto Ministero delle Infrastrutture e Trasporti 14/01/2008, "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni";
- Rif. [2] C.S.LL.PP., Circolare n°617 del 02/02/2009, "Istruzioni per l'applicazione delle "nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al DM 14/01/2008";
- Rif. [3] Decreto Ministeriale 28/10/2005. "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie";
- Rif. [4] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell'Unione Europea – 1303/2014 - relativa alla Specifica Tecnica di Interoperabilità concernente "la sicurezza nelle gallerie ferroviarie" nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità;
- Rif. [5] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell'Unione Europea – 1300/2014 - relativa ad una Specifica Tecnica di Interoperabilità concernente le "persone a mobilità ridotta" nel sistema ferroviario transeuropeo convenzionale e ad alta velocità;
- Rif. [6] Regolamento del 18/11/2014 della Commissione dell'Unione Europea – 1299/2014 - relativa ad una Specifica Tecnica di Interoperabilità per il sottosistema "infrastruttura" del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità.
- Rif. [7] SIG, "Linee guida per la progettazione, l'appalto e la costruzione di opere in sotterraneo", 1997;
- Rif. [8] ITA, "Guidelines for the design of tunnels", 1988;
- Rif. [9] AGI, "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche", 1977.
- Rif. [10] RFI, doc RFI DTC SI MA IFS 001 C "Manuale di Progettazione delle opere civili" (21/12/2018);
- Rif. [11] RFI, doc RFI DTC SI SP IFS 001 C "Capitolato generale tecnico di Appalto delle opere civili" (21/12/2018);
- Rif. [12] ITALFERR, Specifica Tecnica PPA.0002403 "Linee guida per la progettazione geotecnica delle gallerie naturali" (Dicembre 2015).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

#### 4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Rif. [13] ITALFERR, Progetto Preliminare (2013);
- Rif. [14] ITALFERR, Progetto Definitivo (2015);
- Rif. [15] Italferr, documento RS3D00014RGMD0000001A “Dossier dati e requisiti di base” Maggio 2018;
- Rif. [16] U.O. Geologia, Gestione Terre e Bonifiche, Elaborati Specialistici;
- Rif. [17] U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità, Elaborati specialistici;
- Rif. [18] U.O. Infrastrutture Centro, Elaborati Specialistici.
- Rif. [19] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.);
- Rif. [20] Bernaud D., Benamar I., Rousset G. (1994). La “nouvelle méthode implicite” pour le calcul des tunnel dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques – Revue Francaise de Géotechnique, N° 68.
- Rif. [21] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l’étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60.
- Rif. [22] Peck R.B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. SOA Report 7<sup>th</sup> Int. Conf. SMFE Mexico City, State of the Art Volume.
- Rif. [23] NIR28: NOTA INTERREGIONALE PROT. N° ASS/PRC/05/1141 DEL 13/01/2005 “Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a edizione”
- Rif. [24] “Linea Guida n°3, Scavi in sotterraneo con metodo a piena sezione e tecnica tradizionale in terreni grisutosi”, Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome
- Rif. [25] Marinos P. & Hoek E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch, Bull. Engg. Geol. 60, 85-92.

#### 5 ALLEGATI

Non sono presenti documenti allegati.

#### 6 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

I contenuti della presente relazione sono completati dai seguenti elaborati di progetto:

- Rif. [26] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07SPGN0000001A "Caratteristiche dei materiali - Note generali" datato Dicembre 2019;
- Rif. [27] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07CLGN0100001A "GALLERIA LIBERTINIA - Relazione geotecnica e di calcolo " datato Dicembre 2019;
- Rif. [28] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07CLGA0000001A "GALLERIA LIBERTINIA - Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco" datato Dicembre 2019;
- Rif. [29] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07F6GN0100001A "GALLERIA LIBERTINIA - Profilo Geotecnico" datato Dicembre 2019;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> RS3E	<b>LOTTO</b> 50 D 07	<b>CODIFICA</b> RH	<b>DOCUMENTO</b> GN0000 001	<b>REV.</b> A	<b>FOGLIO</b> 6 di 77

- Rif. [30] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07CLGN0200001A "GALLERIA SAN FILIPPO - Relazione geotecnica e di calcolo " datato Dicembre 2019;
- Rif. [31] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07CLGA0000002A "GALLERIA SAN FILIPPO - Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco" datato Dicembre 2019;
- Rif. [32] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07F6GN0200001A "GALLERIA SAN FILIPPO - Profilo Geotecnico" datato Dicembre 2019;
- Rif. [33] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000001A "Singolo binario - Sezione tipo C2 - C2\* - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [34] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000002A "Singolo binario - Sezione tipo C2p - C2p\* - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [35] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07CLGN0300001A "GALLERIA SALVATORE - Relazione geotecnica e di calcolo " datato Dicembre 2019;
- Rif. [36] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07CLGA0000003A "GALLERIA SALVATORE - Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco" datato Dicembre 2019;
- Rif. [37] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07F6GN0300001A "GALLERIA SALVATORE - Profilo Geotecnico" datato Dicembre 2019;
- Rif. [38] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000004A "Doppio binario - Sezione tipo A2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [39] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000005A "Doppio binario - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [40] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000006A "Doppio binario - Sezione tipo B2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [41] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000007A "Doppio binario - Sezione tipo C2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [42] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000008A "Doppio binario - Sezione tipo C2v - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [43] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07BBGN0000009A "Doppio binario - Sezione tipo C2p - Carpenteria, scavo e consolidamenti" datato Dicembre 2019;
- Rif. [44] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07WAGA0000001A "MONITORAGGIO - Sezioni tipologiche opere di imbocco" datato Dicembre 2019;
- Rif. [45] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07WAGN0000001A "MONITORAGGIO - Sezioni strumentate galleria di linea singolo binario" datato Dicembre 2019;
- Rif. [46] U.O. Gallerie, documento RS3E50D07WAGN0000002A "MONITORAGGIO - Sezioni strumentate galleria di linea doppio binario" datato Dicembre 2019.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

## 7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

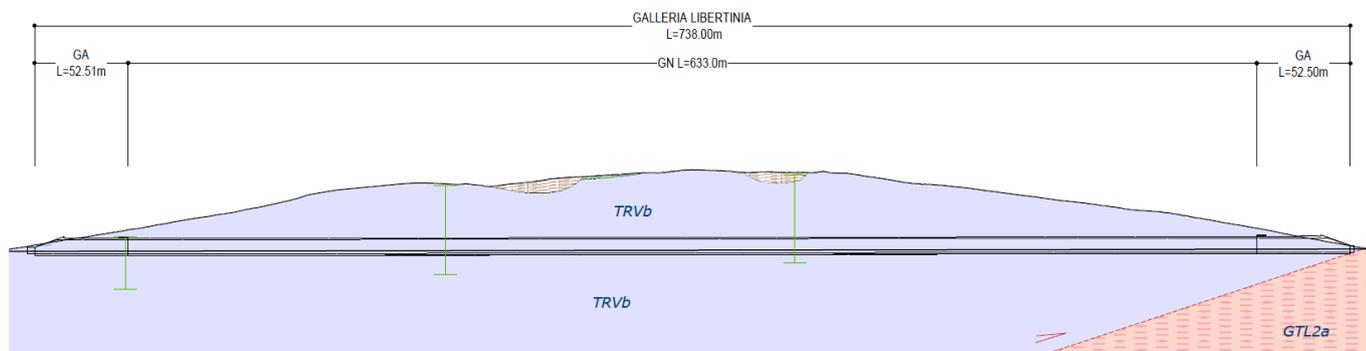
### 7.1 Il tracciato e le opere in sotterraneo

La lunghezza totale del tracciato del Lotto 5 della linea Palermo-Catania, dalla stazione di Dittaino (pk 0+000, coincidente con la pk 181+302 della linea storica Palermo Catania) alla stazione di Catenanuova inclusa (pk 14+800, coincidente con la pk 196+500 della linea storica Palermo Catania), è di circa 22 km e si sviluppa in sotterraneo per una lunghezza complessiva di circa 2,7 km, mediante tre gallerie naturali denominate Libertinia, San Filippo e Salvatore.

Le gallerie Libertinia e San Filippo sono progettate nella configurazione a singolo binario, in quanto sede della sola linea di progetto, mentre la galleria Salvatore ha configurazione a doppio binario, perché garantisce l'affiancamento della linea in progetto alla linea storica.

La velocità di tracciato del Lotto 5 è di 160 km/h; in galleria si ha una pendenza longitudinale massima pari a 11,028‰, una sopraelevazione in curva massima pari a 150 mm e raggio di curvatura minimo di 1270 m.

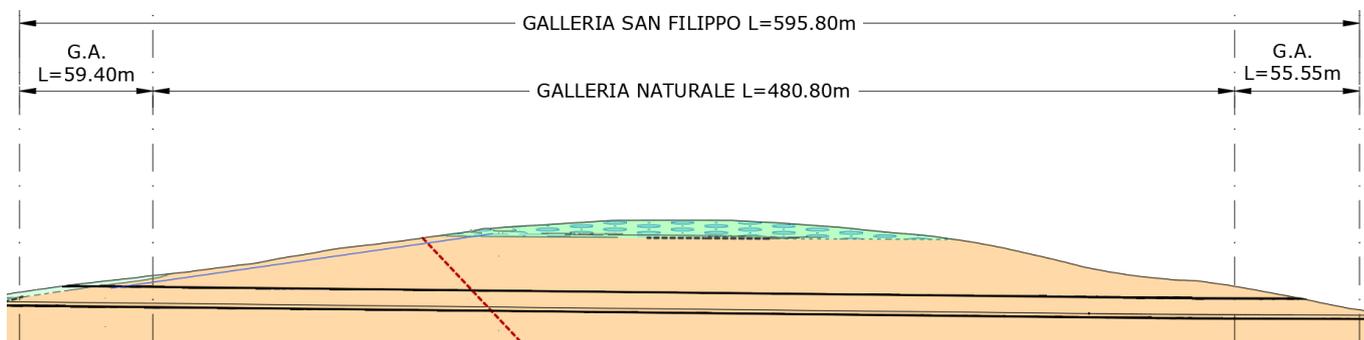
La galleria Libertinia è costituita da un tratto in naturale di 633 m di lunghezza e da due tratti in artificiale, in corrispondenza dei due imbocchi, di lunghezza pari a 52,50 m per l'imbocco lato Palermo e pari a 52,50 m per l'imbocco lato Catania. L'opera ha pertanto uno sviluppo complessivo pari a 738,0 m, dal km 7+258.5 al km 7+996. La copertura massima della galleria è pari a 38 m.



**Figura 1 - Profilo della galleria Libertinia**

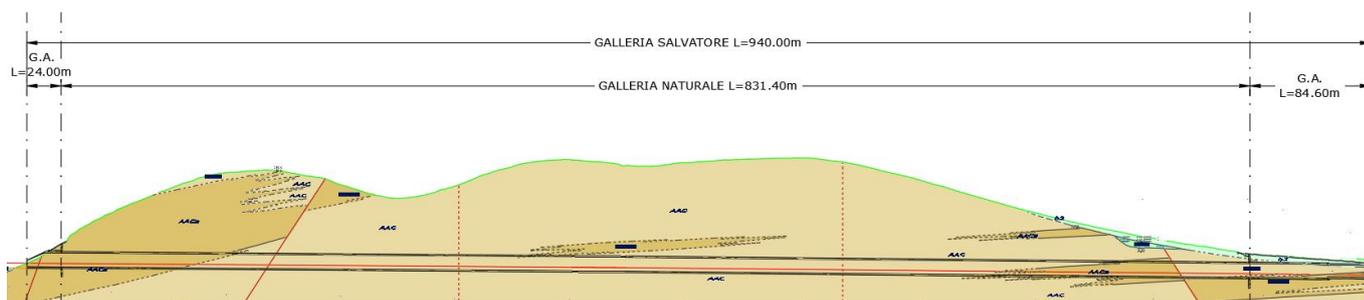
La galleria San Filippo è costituita da un tratto in naturale di 480,80 m e da due tratti in artificiale in corrispondenza dei due imbocchi, di lunghezza pari a 59,40 m per l'imbocco lato Palermo e pari a 55,55 m per l'imbocco lato Catania. L'opera ha pertanto uno sviluppo complessivo pari a 595,80 m, dal km 12+615.2 al km 13+210.9. La copertura massima della galleria è pari a 32 m.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>



**Figura 2 - Profilo della galleria San Filippo**

La galleria Salvatore è costituita da un tratto in naturale di 831,40 m di lunghezza e da due tratti in artificiale in corrispondenza dei due imbocchi di lunghezza pari a 23,9 m per l'imbocco lato Palermo e pari a 84,5 m per l'imbocco lato Catania. L'opera ha pertanto uno sviluppo complessivo pari a 940 m, dal km 11+360 al km 12+300. La copertura massima della galleria è pari a 70 m.



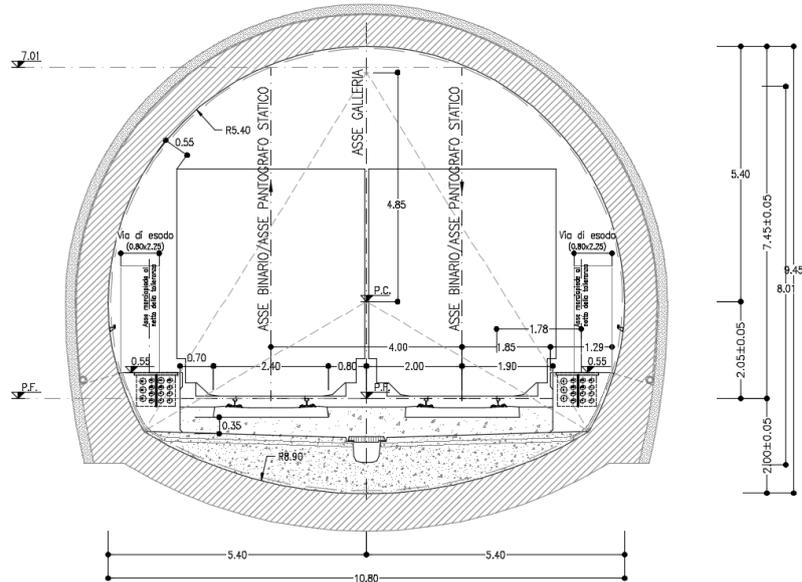
**Figura 3 - Profilo della galleria Salvatore**

In tabella 1 è riportato il riepilogo delle opere (naturali ed artificiali) in sotterraneo previste lungo la tratta e delle opere di imbocco ad esse connesse.

**Tabella 1 Progressive delle gallerie Libertinia, San Filippo e Salvatore**

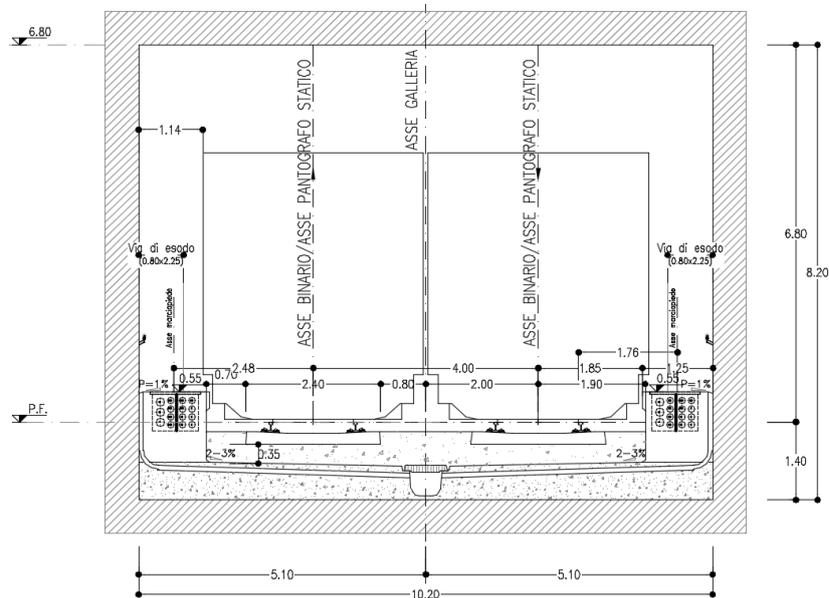
GALLERIA	Opera	pk <sub>inizio</sub>	pk <sub>fine</sub>	L <sub>parziali</sub>	L <sub>TOT</sub>
		[m]	[m]	[m]	
Libertinia	Portale + GA policentrica (GA03)	7+258.5	7+311.0	52.5	738.0
	Galleria Naturale (GN01)	7+311.0	7+944.0	633.0	
	GA policentrica+ Portale (GA04)	7+944.0	7+996.5	52.5	
San Filippo	Portale + GA policentrica (GA05)	12+615.2	12+674.6	59.4	595.8
	Galleria Naturale (GN02)	12+674.6	13+155.4	480.8	





**Figura 5** Sezione di intradosso della galleria Salvatore: galleria naturale e gallerie artificiali policentriche

Il tratto a sezione scatolare (Figura 6) ha una larghezza pari a 10,20 m e una altezza libera su piano del ferro pari a 6,80 m.



**Figura 6** - Sezione di intradosso della galleria Salvatore: galleria artificiale scatolare

Le sezioni di intradosso delle gallerie presentano un marciapiede d'esodo con andamento del ciglio variabile in funzione della quota del binario attiguo. Nello specifico, l'altezza del ciglio risulta pari a +55 cm, misurata perpendicolarmente al piano di rotolamento del binario attiguo, mentre la distanza del ciglio dal bordo interno della più vicina rotaia, misurata parallelamente al piano di rotolamento, è pari a 113 cm (Rif. [10]). Tale camminamento, presente su entrambi i lati delle gallerie per la sezione a doppio binario e sul lato destro rispetto

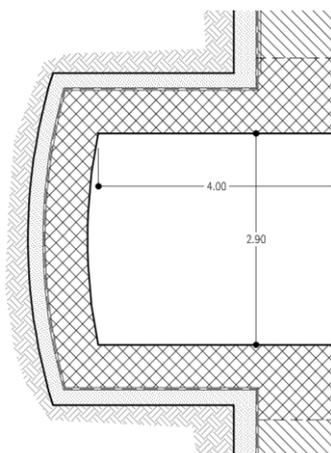
	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

alle progressive crescenti per la sezione a singolo binario, ha una larghezza non inferiore a 120 cm ed è corredato da corrimano posto sul paramento interno della galleria ad una quota di 1 m dal piano di calpestio del marciapiede.

Considerando che la massima sopraelevazione raggiunta in galleria, pari a 140 mm per Libertinia e pari a 150 mm per le restanti due, i camminamenti avranno le seguenti dimensioni limite (per la sezione a doppio binario rispettivamente per la posizione all'esterno e all'interno curva):

Secondo quanto previsto nel Manuale di Progettazione RFI (paragrafo 4.6.8 "Opere complementari") (Rif. [10]), le gallerie non sono dotate di nicchie di ricovero personale.

Non sono inoltre previste nicchie tecnologiche. Le uniche opere complementari sono presenti nella galleria Salvatore: alla pk 11+876 è presente una coppia di nicchie specializzate IS di dimensioni utili in pianta pari a 4,0 m x 2,9 m ed altezza di 2,45 m (Figura 7).



**Figura 7 - Dimensioni nicchie galleria Salvatore pk 11+876**

Ad una distanza di circa 30 m dalle nicchie specializzate IS verso Catenanuova e quindi alla pk 11+906, sono presenti i segnali PS02 e PS21, visibili da 200 m di distanza dai treni in marcia verso Catenanuova, e i segnali sussidiari posteriori, visibili dai mezzi d'opera provenienti da Catenanuova da 150 m di distanza. Per l'alloggiamento dei segnali e per garantire la visibilità indicata non sono necessarie nicchie e allarghi della sezione di intradosso della galleria.

## 8 METODOLOGIA DI LAVORO

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [19]), si è articolata nelle seguenti fasi:

1. fase conoscitiva: è finalizzata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico in cui deve essere realizzata l'opera;
2. fase di diagnosi: si esegue la valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione per la determinazione delle categorie di comportamento;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> <b>RS3E</b>	<b>LOTTO</b> <b>50 D 07</b>	<b>CODIFICA</b> <b>RH</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>GN0000 001</b>	<b>REV.</b> <b>A</b>	<b>FOGLIO</b> <b>12 di 77</b>

3. fase di terapia: sulla base dei risultati delle precedenti fasi progettuali, si individuano le modalità di scavo e gli interventi di stabilizzazione idonei (sezioni tipo) per realizzare l'opera in condizioni di sicurezza.

4. fase di verifica e messa a punto: il progetto è completato dal piano di monitoraggio da predisporre ed attuare nella fase realizzativa. Nel piano di monitoraggio sono individuati i valori delle grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d'opera per controllare la risposta deformativa dell'ammasso al procedere dello scavo, verificare la rispondenza con le previsioni progettuali e mettere a punto le soluzioni progettuali nell'ambito delle variabilità previste.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

## 9 FASE CONOSCITIVA

Nella fase conoscitiva si acquisiscono gli elementi necessari alla caratterizzazione e modellazione geologica del sito e alla caratterizzazione e modellazione geotecnica del volume significativo interessato dall'opera in sotterraneo. Nel seguito si riporta un breve inquadramento geologico e la sintesi della caratterizzazione e modellazione geotecnica.

### 9.1 Inquadramento geologico

L'area di studio si colloca nella porzione centro-orientale della regione Sicilia. Il tracciato di progetto interessa il territorio dei comuni di Agira, Catenanuova e Regalbuto, in provincia di Enna (EN), e quello del comune di Ramacca in provincia di Catania (CT).

Il tracciato di progetto attraversa settori di territorio posti a quote comprese tra circa 230 m s.l.m. e circa 135 m s.l.m.. Dal punto di vista morfologico, l'area di studio si caratterizza per la presenza di ampi settori pianeggianti o sub-pianeggianti, riconducibili alla piana alluvionale della media valle del Fiume Dittaino, bordati da blandi rilievi collinari con versanti generalmente poco acclivi ed estesi corrispondenti ai settori di affioramento di terreni a dominante pelitica o psammitica.

Le gallerie Libertinia e San Filippo attraversano per tutto il loro sviluppo la "Formazione di Terravecchia (TRV)" (Tortoniano inferiore - Messiniano inferiore). Questa successione sedimentaria è costituita da depositi marini di piattaforma continentale e piana fluvio-deltizia, costituiti da tre differenti litofacies rispettivamente a composizione argillo-marnosa, conglomeratico-sabbiosa e argillosa a struttura brecciata. La galleria Libertinia attraversa per tutto il suo sviluppo la litofacies argillosa a struttura brecciata (TRVb), mentre la galleria San Filippo è scavata nella litofacies argillo-marnosa (TRV).

La litofacies argillosa a struttura brecciata (TRVb) è costituita da argille, argille limose e limi argillosi, a struttura brecciata, talora scagliosa o indistinta, con a luoghi passaggi di argille marnose e argilliti.

La litofacies argillo-marnosa (TRV) è composta da argille limose e argille marnose sottilmente stratificate, con frequenti livelli millimetrici di sabbie e sabbie limose con a luoghi passaggi di marne, marne argillose e argilliti.

La galleria Salvatore attraversa le due litofacies della formazione "Argille e Arenarie glauconitiche di Catenanuova (AAC, AACa)". Questa successione sedimentaria è costituita da depositi marini in facies di scarpata, base scarpata e conoide torbida, costituiti da due differenti litofacies rispettivamente a dominante argilloso-marnosa e arenaceo-marnosa.

La litofacies argillo-marnosa è costituita da argille limose, argille limoso-marnose e argille marnose (AAC), a struttura scagliosa o indistinta, con frequenti livelli di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi, talora con rare ghiaie; a luoghi si rinvencono intercalazioni di arenarie glauconitiche, da mediamente a molto fratturate, in strati da sottili a medi, e livelli di marne argillose e argilliti, in strati irregolari localmente laminati; talora sono presenti frammenti di calcari dolomitici.

La facies arenaceo-marnosa (AACa) è formata da arenarie medio-fini da poco fratturate a molto fratturate, in strati da sottili a molto spessi, talora fino a megastrati, con inclusi di *clay chips*; in alternanza alle porzioni

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

arenacee, si rinvencono frequenti livelli di argilliti, argille marnose e marne argillose, a struttura scagliosa, in strati da sottili a medi.

Sulle pendici dei versanti attraversati dalle gallerie sono presenti depositi di versante e depositi alluvionali – b2, bn1.

I depositi di versante sono costituiti da coltri eluvio colluviali (b2). Si tratta di depositi continentali di versante e di alterazione del substrato, costituiti da una singola litofacies a composizione argilloso-limosa. Si tratta di argille limose di colore marrone chiaro, nocciola a bande grigiastre, a struttura caotica o indistinta, con abbondanti resti vegetali e frequenti ghiaie e ciottoli poligenici, da angolosi a sub-arrotondati; limi argilloso-sabbiosi a struttura caotica o indistinta, con abbondanti resti vegetali e frequenti ghiaie e ciottoli poligenici, da angolosi a sub-arrotondati e rari strati centimetrici di arenarie grigie.

I depositi alluvionali terrazzati (bn1) sono formati da sedimenti clastici pleistocenici e olocenici, di genesi detritico-colluviale, alluvionale e lacustre. Si tratta di ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolose ad arrotondate, in matrice sabbiosa e sabbioso limosa; talora sono presenti ciottoli e blocchi di arenaria da angolosi a sub-angolosi. A luoghi si rinvencono passaggi di sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi di colore grigio, oca e giallastro, a struttura indistinta o laminata, con locali ghiaie poligeniche da angolose ad arrotondate e rari blocchi angolosi.

Per una dettagliata descrizione del modello geologico si rimanda alla “Relazione geologica, geomorfologica e idrogeologica” (Rif. [16]).

## 9.2 Assetto strutturale e geomorfologico

Il contesto in cui sono inserite le opere in sotterraneo del Lotto 5 è caratterizzato da numerose faglie e sovrascorrimenti.

In particolare, in prossimità dell’imbocco lato Catania della galleria Libertinia, il contatto tettonico tra la facies brecciata del Terravecchia e i Gessi della Formazione di Cattolica è contrassegnato da un sovrascorrimento con orientazione NE-SW. Tale struttura tettonica si colloca esternamente alle opere di imbocco.

Lungo il tracciato della galleria San Filippo è presente una faglia diretta, con asse NW-SE, circa trasversale alla galleria, riconducibile al sistema di faglie che caratterizza l’area.

Il tracciato della galleria Salvatore intercetta 5 faglie ad alto angolo, pertanto è da attendersi in fase di scavo l’attraversamento di fasce con disturbo tettonico variabile, contraddistinte da un grado medio elevato di fratturazione e/o fessurazione. Sono presenti nell’area anche lineamenti tettonici con direzione parallela alla galleria, che non intercettano l’opera.

Lungo il tracciato delle gallerie non sono presenti fenomeni franosi che interferiscano con le opere in progetto. La galleria Libertinia si sviluppa a monte, a distanza significativa, di un corpo di frana quiescente. Il monitoraggio degli spostamenti effettuato con inclinometri ha confermato la stabilità dell’area interessata dalla galleria (Rif. [16]).

La galleria Salvatore a partire dall’imbocco lato Catenanuova si sviluppa all’interno di un versante costituito dalla facies arenacea della formazione “Argille e Arenarie di Catenanuova”, caratterizzato da fenomeni di crollo e distacco di blocchi di arenaria e da fenomeni deformativi viscosi della matrice argillosa all’interno.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Poiché al piede del versante corre la linea ferroviaria Sparagogna-Catenanuova, il versante è stato oggetto di un intervento di messa in sicurezza da parte di RFI.

### 9.3 Indagini

Nel corso dell'iter progettuale sino ad oggi espletato, si sono succedute 4 campagne di indagini geognostiche:

- Campagna di indagini 2013 (Progettazione Preliminare - Raddoppio ferroviario della Linea Palermo-Catania - Tratta Catenanuova-Raddusa Agira)
- Campagna di indagini 2015 (Progettazione Definitiva - Raddoppio ferroviario della Linea Palermo-Catania - Tratta Catenanuova-Raddusa Agira)
- Campagna di indagini 2018 (Progettazione Definitiva - Raddoppio ferroviario della Linea Palermo-Catania - Tratta PM Palomba-Catenanuova)
- Campagna di indagini 2019 (Progettazione Definitiva - Raddoppio ferroviario della Linea Palermo-Catania - Tratta Dittaino - Catenanuova).

Complessivamente sono state eseguite le seguenti indagini geotecniche:

- n. 63 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo; i sondaggi sono stati eseguiti per la determinazione della stratigrafia del sottosuolo e il prelievo di campioni indisturbati da sottoporre a caratterizzazione meccanica in laboratorio; n.54 sondaggi sono stati strumentati con piezometro per la misura delle pressioni interstiziali.

Per la determinazione delle caratteristiche di deformabilità degli ammassi interessati dalle sole opere in sotterraneo, anche ai fini della definizione dell'azione sismica, sono state eseguite le seguenti prove:

- n. 12 stendimenti sismici a rifrazione;
- n. 2 prove geofisiche down-hole;
- n. 9 tomografie elettriche;
- n. 17 prove MASW.

Il numero totale dei campioni analizzati nella tratta interessata dallo scavo delle gallerie e sottoposti a prove di laboratorio è di 123, di cui 68 indisturbati e 55 rimaneggiati. Sui campioni indisturbati sono state eseguite le seguenti prove meccaniche:

- n. 16 prove di taglio diretto (TD);
- n. 14 prove di compressione triassiale consolidate non drenate (CIU);
- n. 1 prova di compressione triassiale consolidata drenata (CID);
- n. 11 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU);
- n. 3 prove di compressione monoassiale;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

- n. 1 prove di compressione triassiale su provini di roccia;
- n. 26 prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL);
- n. 2 prove di colonna risonante;
- n. 5 prove edometriche di rigonfiamento impedito;
- n. 7 prove edometriche di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg.

Metodi e risultati della campagna di indagini sono esposti in dettaglio nell'elaborato di progetto "Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica" (Rif. [16]).

#### 9.4 Caratterizzazione e modellazione geotecnica

I risultati delle indagini geotecniche, in situ e di laboratorio, hanno permesso di definire il modello geotecnico rappresentativo delle condizioni stratigrafiche e delle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni/rocce interessati dall'opera in sotterraneo lungo il suo tracciato. L'ubicazione dei sondaggi ed il modello geotecnico sono rappresentati negli elaborati "Profilo geotecnico – Galleria Libertinia" (Rif. [29]), "Profilo geotecnico – Galleria San Filippo" (Rif. [32]) e "Profilo geotecnico – Galleria Salvatore" (Rif. [37]).

Le gallerie Libertinia e San Filippo e i relativi imbocchi interessano la formazione di Terravecchia, rispettivamente la litofacies argillosa con struttura brecciata (TRVb) e la litofacies argillo-limosa (TRV).

La galleria Salvatore interessa principalmente la formazione delle Argille ed Arenarie di Catenanuova: a partire dall'imbocco lato Palermo e per i successivi 94 m, la galleria attraversa la litofacies arenacea (AACa) e, a seguire, la facies pelitica (AAC). In prossimità dell'imbocco lato Catania, si rinvencono strati plurimetri di arenaria; all'imbocco lato Catania sono presenti depositi eluvio-colluviali.

Nei paragrafi che seguono si riepilogano i risultati della caratterizzazione e modellazione geotecnica per ciascuna delle formazioni interessate dallo scavo delle gallerie.

##### 9.4.1 Formazione di Terravecchia – Litofacies TRV

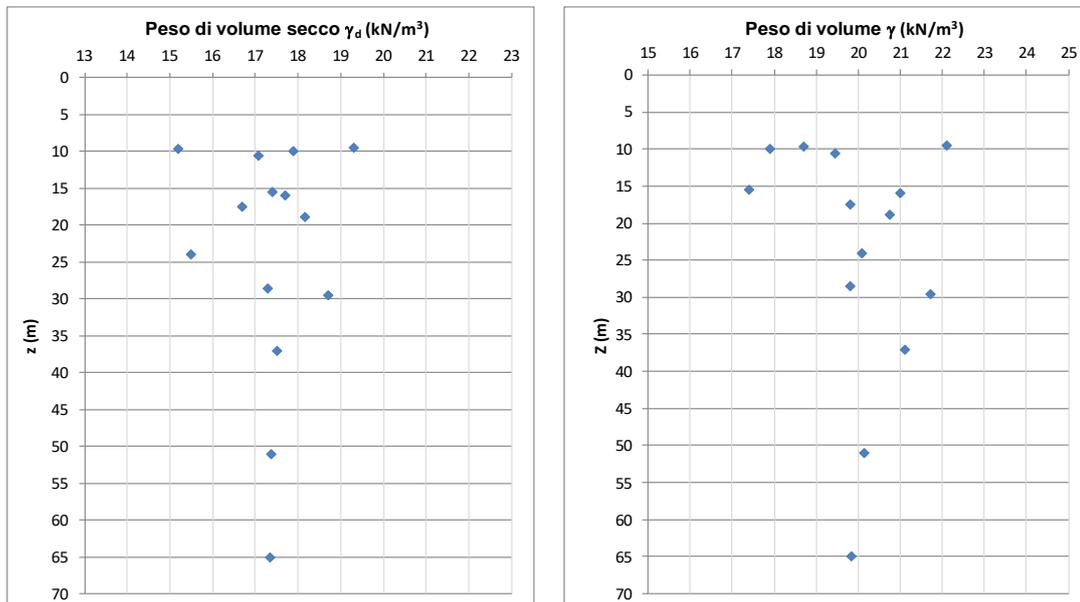
Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (49,78%) e di quella argillosa (42,72%) rispetto a quella sabbiosa (6,94%). Il terreno è classificabile come limo con argilla debolmente sabbioso (AGI, 1977).

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>



**Figura 8 - Formazione di Terravecchia – Litofacies TRV – Foro di sondaggio 5\_S1gn, tra i 15 ed i 20 m da p.c.**

Il peso dell'unità di volume varia tra 17 e 22 kN/m<sup>3</sup> mentre il peso di volume del secco è compreso tra 15 ÷ 19 kN/m<sup>3</sup> (Figura 9).



**Figura 9 - TRV – Peso dell'unità di volume secco e peso dell'unità di volume**

I limiti di Atterberg (Figura 10) sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

- Limite plastico: 18% ÷ 40%
- Limite liquido: 39% ÷ 93%
- Indice di Plasticità: 16% ÷ 64%

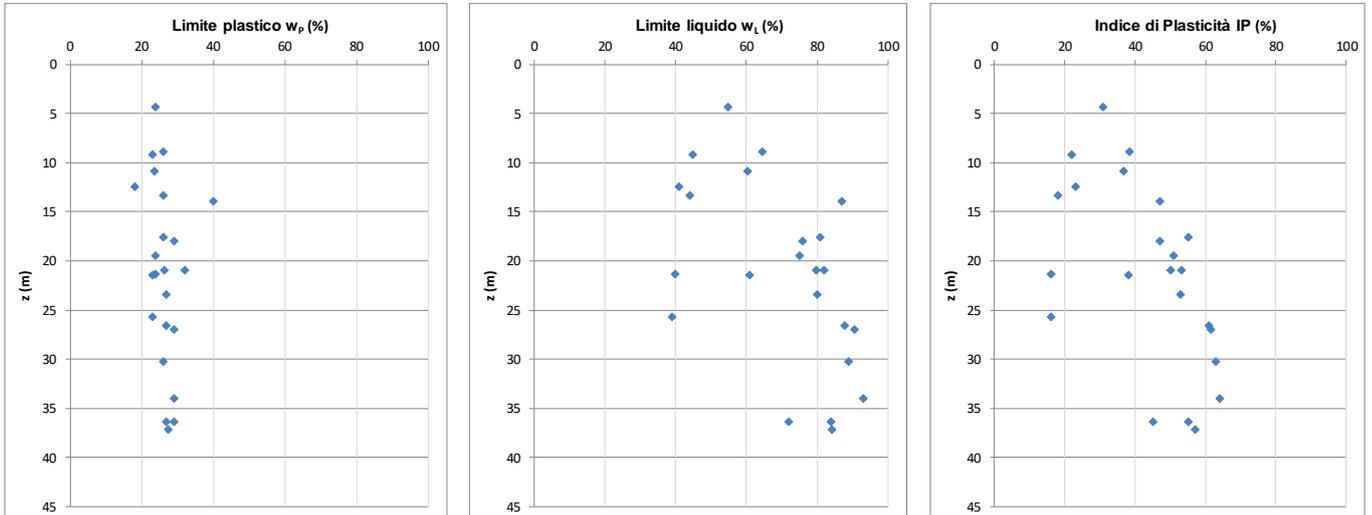


Figura 10 - TRV – Limiti di Atterberg e Indice di plasticità

Il contenuto d'acqua naturale risulta compreso tra il 11% ed il 25%, mentre l'indice di consistenza varia tra 1,04 e 1,78.

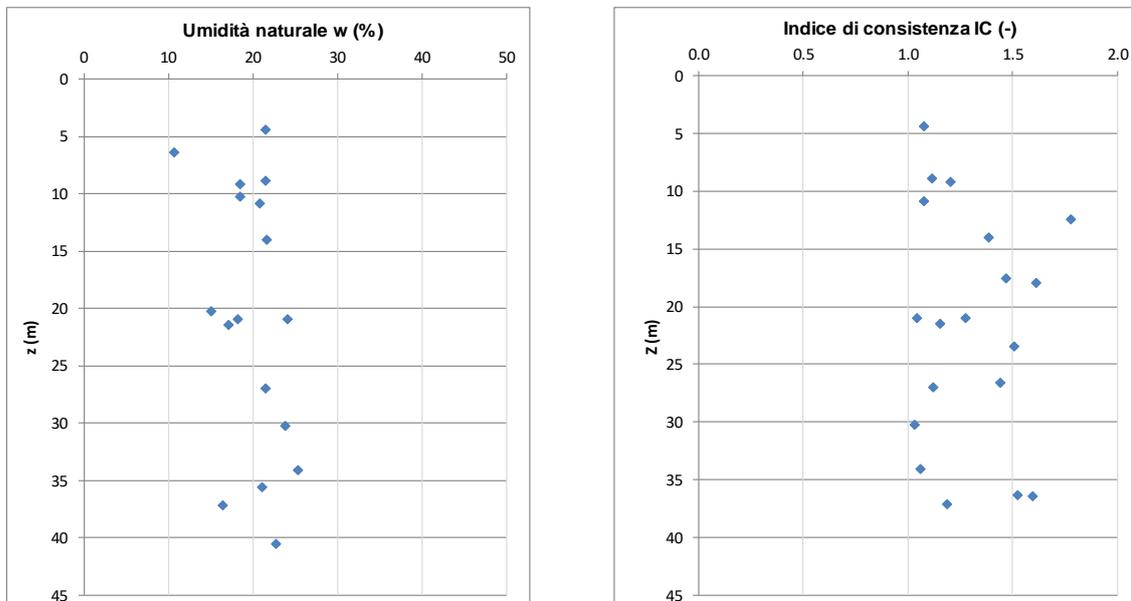
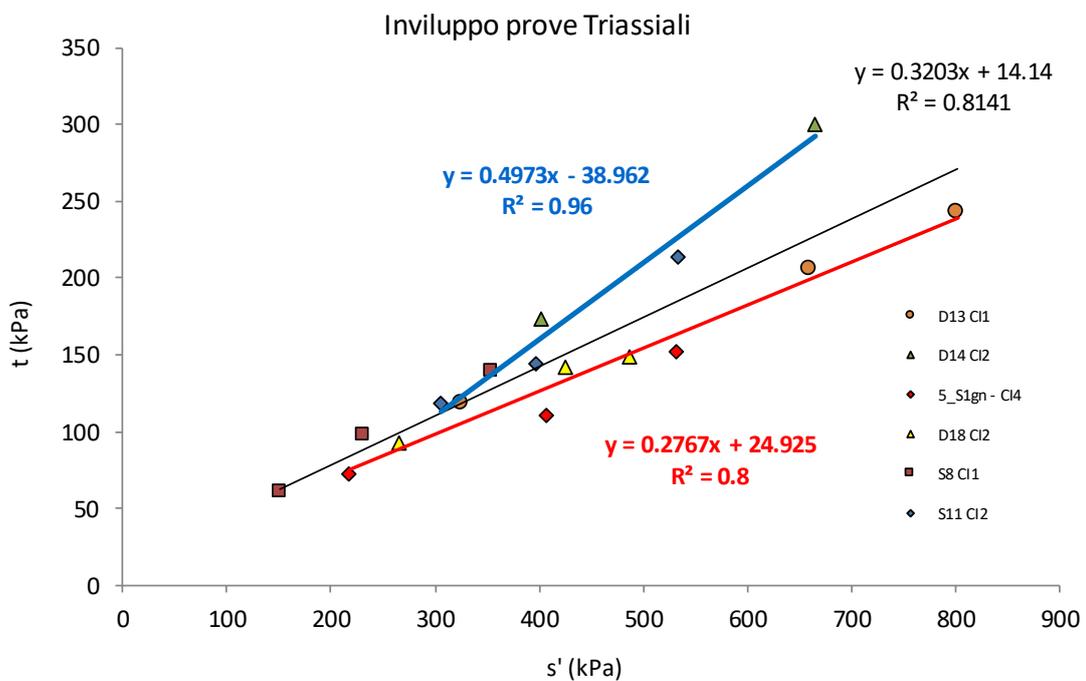


Figura 11 - TRV – Umidità naturale  $w$  e indice di consistenza IC

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

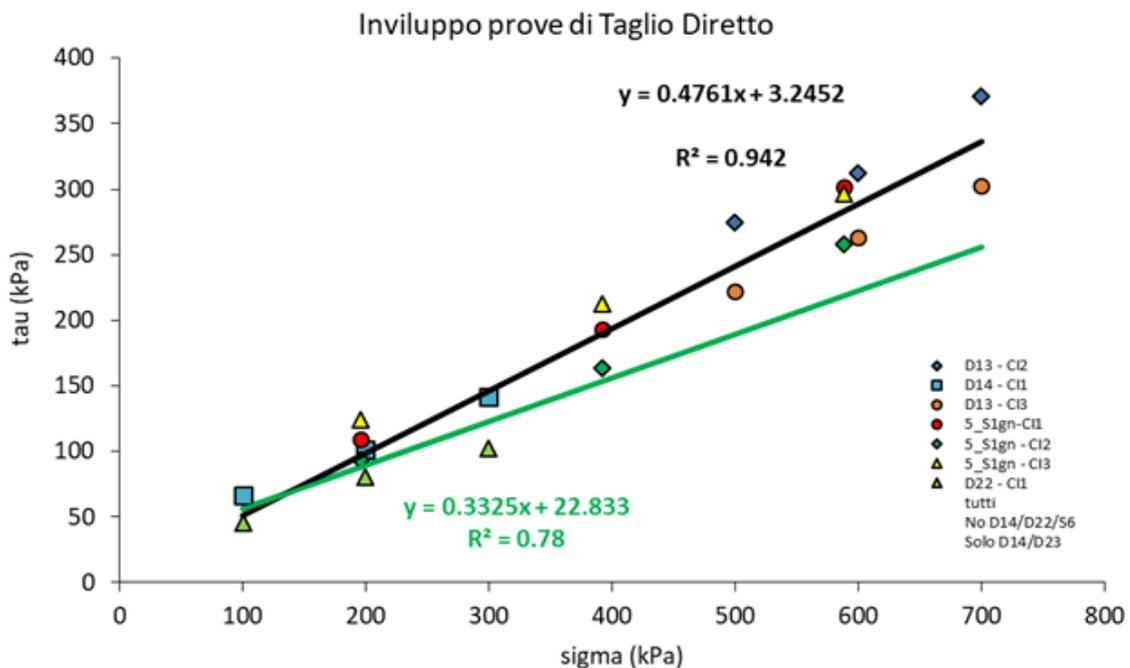
I parametri di resistenza efficaci sono stati ricavati da prove di taglio diretto e da prove di compressione triassiale consolidate isotropicamente non drenate.

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 12-Inviluppo nero) derivante dall'elaborazione di tutte prove triassiali mostra una buona correlazione e restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a circa 15 kPa ed un valore di angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $19^\circ$ . Questi valori sono utilizzati per descrivere le caratteristiche meccaniche medie del deposito. Considerando separatamente alcuni campioni (S11\_CI e D14\_CI2), che si differenziano per avere una componente sabbiosa maggiore rispetto alla media, si ottengono un valore nullo di coesione e  $24^\circ$  di angolo di resistenza al taglio (inviluppo blu). I rimanenti campioni (inviluppo rosso) confermano i valori medi di  $c'=15\text{kPa}$  e  $\phi'=19^\circ$ .



**Figura 12 - TRV – Inviluppo di resistenza delle prove triassiali**

In Figura 13 si riportano gli involuppi di resistenza delle prove di taglio diretto rappresentati nel piano di Mohr-Coulomb. Si distinguono due classi di involuppi di resistenza definiti rispettivamente da un angolo di attrito  $\phi'=25^\circ$  e da una coesione  $c'=3\text{ kPa}$  (inviluppo nero), e da un angolo d'attrito  $\phi'=18^\circ$  e da una coesione  $c'=23\text{ kPa}$  (inviluppo verde).



**Figura 13 – TRV – Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto**

I risultati dell'interpretazione delle singole prove hanno permesso di definire un intervallo di valori di coesione efficace  $c'$  compreso tra 15÷23 kPa e di angolo d'attrito  $\phi'$  compreso tra 19÷24°.

Per quanto riguarda la valutazione della coesione non drenata  $c_u$ , si è fatto riferimento ai risultati sia delle prove in sito (pressiometriche), sia delle prove in laboratorio (ELL e TX-UU). Per la stima della coesione non drenata dalle prove pressiometriche è stata utilizzata la correlazione di Amar & Jezequel (1972):

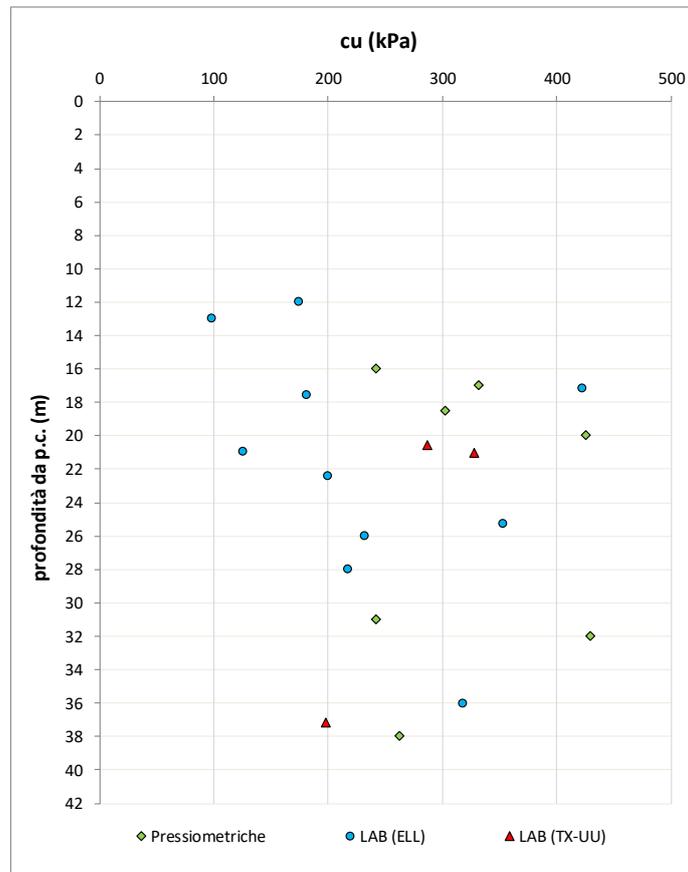
$$c_u \text{ (MPa)} = Pl^*/5.5 \quad [\text{per } Pl < 0.3 \text{ MPa}]$$

$$c_u \text{ (MPa)} = Pl^*/10 + 0.025 \quad [\text{per } Pl > 0.3 \text{ MPa}]$$

in cui  $Pl^*$  è la pressione limite corretta.

In Figura 14 sono riportati i valori di coesione non drenata ricavati dall'interpretazione delle prove.

Sulla base delle prove in sito e di laboratorio si è definito un intervallo di valori della coesione non drenata che ha come estremo inferiore 100 kPa (risultato delle prove di laboratorio) e come estremo superiore 430 kPa, (valore ottenuto da prove in sito).



**Figura 14 - TRV – Coesione non drenata**

Per la valutazione delle caratteristiche di rigidità della formazione sono state considerate le prove in sito eseguite nell'area. Per quanto riguarda le prove sismiche, a partire dalla velocità delle onde di taglio  $v_s$  misurata, sono stati calcolati il modulo di taglio  $G$  e il modulo dinamico  $E_D$  [ $G=\rho v_s^2$ ,  $E_D=2G(1+\nu')$ ]. A seguire, facendo riferimento a dati di letteratura e ai risultati delle altre prove disponibili, il modulo di Young operativo  $E'$  è stato valutato considerando il rapporto  $E_D/E'=10$ .

Per l'interpretazione delle prove pressiometriche, è stata fatta una distinzione in funzione dei dati disponibili dalle prove eseguite. In particolare, nelle prove in cui, oltre al ciclo di primo carico, è stato eseguito un ciclo di scarico – ricarico, si è assunto che il modulo di ricarico  $E_M^+$  (ricavato dalla curva di scarico-ricarico) coincida con il modulo elastico  $E'$ . Invece, per le prove in cui è stato eseguito solo il ciclo di primo carico, il modulo elastico è stato assunto pari a  $E'=E_M/\alpha$ , in cui  $E_M$  è il modulo pressiometrico ed  $\alpha$  è un coefficiente reologico che tiene conto della natura del litotipo e dei disturbi cui il terreno è sottoposto durante la perforazione. Nel caso in esame si è assunto  $\alpha=1$ , (valore ricavato dalle prove in cui è stato eseguito il ciclo di scarico e ricarico, confrontando i due moduli  $E_M$  e  $E_M^+$ ).

Per le prove dilatometriche si è fatto riferimento alla terza curva di scarico-ricarico per la determinazione del modulo del materiale indagato.

Come risultato si ottiene un andamento simulato dalla linea tratteggiata in Figura 15 che corrisponde alla retta di equazione  $E'=5z$  per  $z \leq 20$  m e  $E'=15z-200$  per  $z > 20$  m.

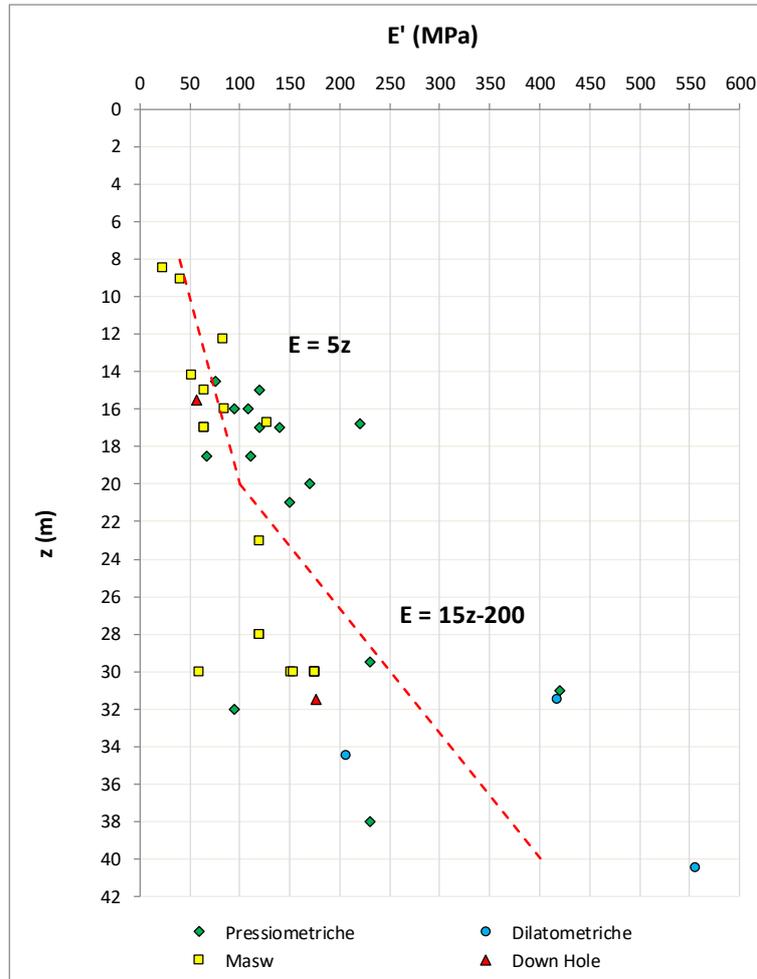


Figura 15 TRV – Andamento del modulo di Young con la profondità.

Dalle prove Lefranc, è stato possibile ricavare valori di permeabilità della formazione compresi nell'intervallo  $4.7E-9 \div 7.6E-7$  m/s.

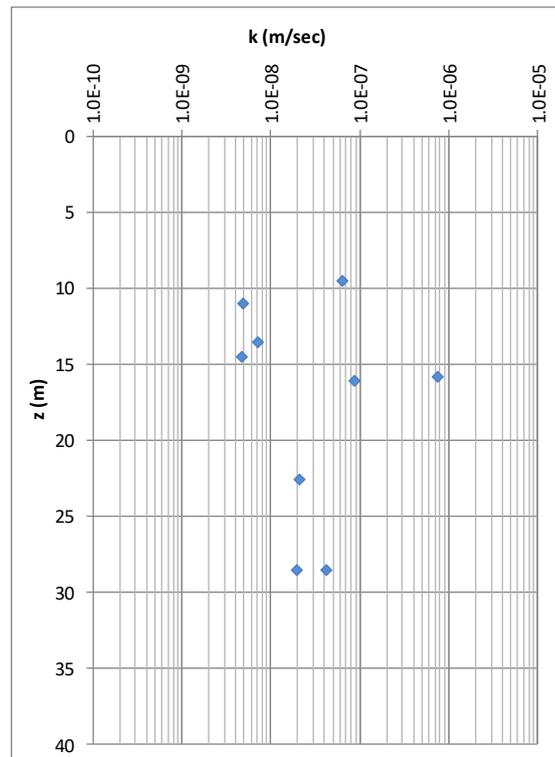


Figura 16 - TRV - Coefficiente di permeabilità.

Sono state eseguite 3 prove di rigonfiamento impedito e 1 prova di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campioni indisturbati. Per le prime, eseguite su campioni indisturbati in un intervallo di profondità compreso tra 20 m e 37 m da piano campagna, i valori di pressione tali da impedire il rigonfiamento in cella edometrica sono riportati nella Tabella 2.

Tabella 2 - TRV -Pressione di rigonfiamento secondo prove di rigonfiamento impedito

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$\sigma_R$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
5_S1gn	CI1	20,35 - 21,00	24.5
5_S1gn	CI2	26,30 - 27,00	24.5
5_S1gn	CI4	36,50 - 37,20	36.8

L'elaborazione della prova secondo il metodo Huder-Amberg restituisce un coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  pari a 0,5 (Tabella 3), valore molto bassi, di gran lunga inferiori rispetto ai valori riscontrati nella letteratura scientifica per formazioni che hanno manifestato un comportamento rigonfiante.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

**Tabella 3 - TRV - Valori di  $k_{100}$  derivante da prove Huder-Amberg**

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100}$ H-A
(-)	(-)	(m)	(kPa)
5_S1gn	CI3	33,60 - 34,10	0.5

#### 9.4.2 Formazione di Terravecchia – Litofacies TRVb

Tale formazione è attraversata solamente dalla galleria Libertinia. Si tratta di argille, argille limose e limi argillosi a struttura brecciata, talora scagliosa o indistinta, con locali passaggi di argille marnose e argilliti.



**Figura 17 - Formazione Terravecchia – Litofacies TRVb - Foro di sondaggio 5GN01, tra 25 e 30 m da p.c.**

Per la galleria Libertinia all'interno della Formazione Terravecchia (TRVb), sono stati eseguiti 3 sondaggi: 5GN01, 5GN02 e 5GN03; il primo in corrispondenza dell'imbocco lato Palermo della galleria e i restanti due in corrispondenza delle massime coperture. Da questi tre sondaggi sono stati prelevati, a profondità variabili tra 4,5 m e 46 m da piano campagna, 14 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio e 5 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica. Per tutte le verticali di indagine è stata rinvenuta la presenza consistente del membro brecciato della Formazione di Terravecchia. Per la caratterizzazione geotecnica di tale formazione è stato fatto riferimento anche ai sondaggi eseguiti nei tratti all'aperto dell'opera in progetto nonché ai sondaggi eseguiti per il vecchio tracciato di progetto poiché, in entrambi i casi, chiaramente riconducibili alla Formazione Terravecchia (TRVb).

I campioni prelevati dai sondaggi profondi 5GN02 e 5GN03, una volta aperti in laboratorio, hanno mostrato ripetutamente difficoltà nel fustellamento dei provini necessari alle prove meccaniche per la stima dei parametri

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

di resistenza efficaci, a causa della presenza di superfici di discontinuità preesistenti e di blocchetti poliedrici di materiale litoide.



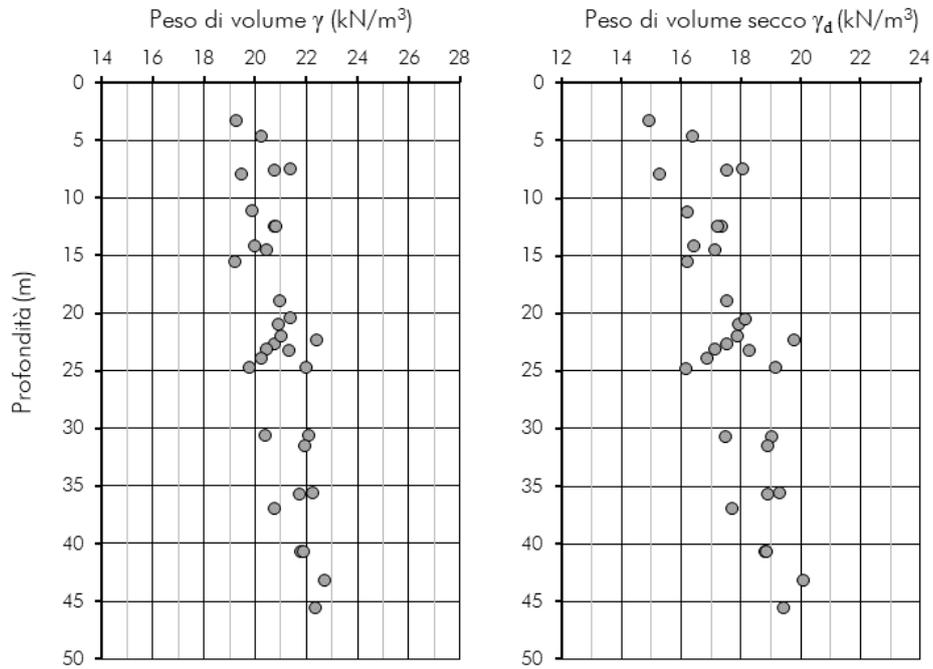
**Figura 18 Formazione Terravecchia – Litofacies TRVb - Dettaglio della struttura brecciata**

Per i campioni prelevati alle profondità maggiori, il materiale mostra in maniera sistematica una struttura assimilabile a quella di una argilla consistente o molto consistente, con grado di durezza ISRM: S5, con presenza di clasti eterometrici, prevalentemente di composizione arenacea, argillosa e siltitica. Le prove meccaniche per la determinazione della resistenza non drenata, le prove dilatometriche in foro e le prove geofisiche in sito mostrano un aumento della resistenza con la profondità.

In conclusione, l'analisi dei risultati delle prove di laboratorio sui campioni indisturbati ha consentito di tracciare un quadro complessivo, al variare della profondità, delle principali grandezze fisiche e meccaniche della formazione indagata. Laddove non è stato possibile eseguire le prove meccaniche per la stima dei parametri di resistenza drenati, a causa delle difficoltà di preparazione dei provini sopra descritte, si è un incremento della resistenza, relativamente ai valori del parametro di coesione drenata, per profondità maggiori di 20 m, dove l'ispezione visiva delle carote, i risultati delle prove meccaniche, delle prove geofisiche e delle prove dilatometriche hanno mostrato un materiale più resistente.

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente argillosa (49%) e limosa (42%) con una percentuale modesta di sabbia (7%). Il terreno è classificabile come argilla con limo debolmente sabbioso (AGI, 1977, Rif. [9]).

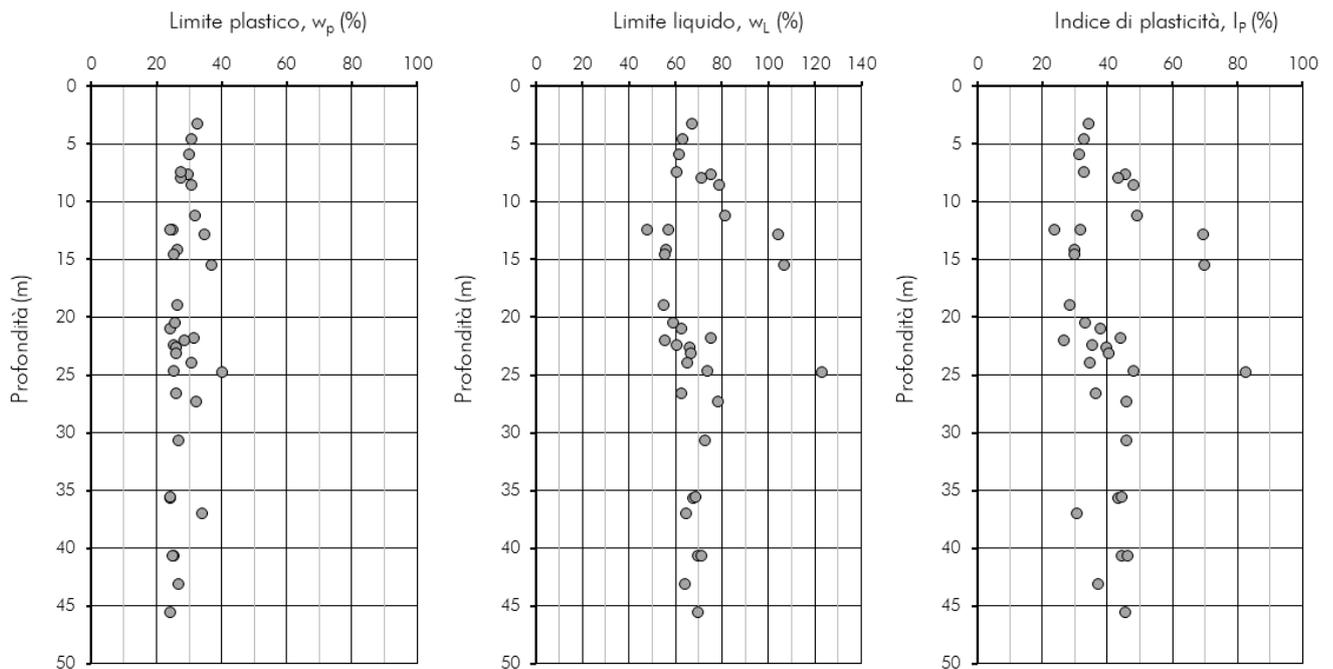
Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $19 \div 23 \text{ kN/m}^3$ , con un incremento con la profondità, mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $15 \text{ e } 20 \text{ kN/m}^3$  (Figura 19), anch'esso incrementandosi con la profondità. Il peso specifico è pressoché costante e pari a  $27 \text{ kN/m}^3$ . I valori maggiori di peso dell'unità di volume in profondità sono da attribuire ai campioni prelevati dai sondaggi 5GN02 e 5GN03.



**Figura 19 – TRVb - Peso dell'unità di volume  $\gamma$  e peso dell'unità di volume del secco  $\gamma_d$**

I limiti di Atterberg (Figura 20) sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

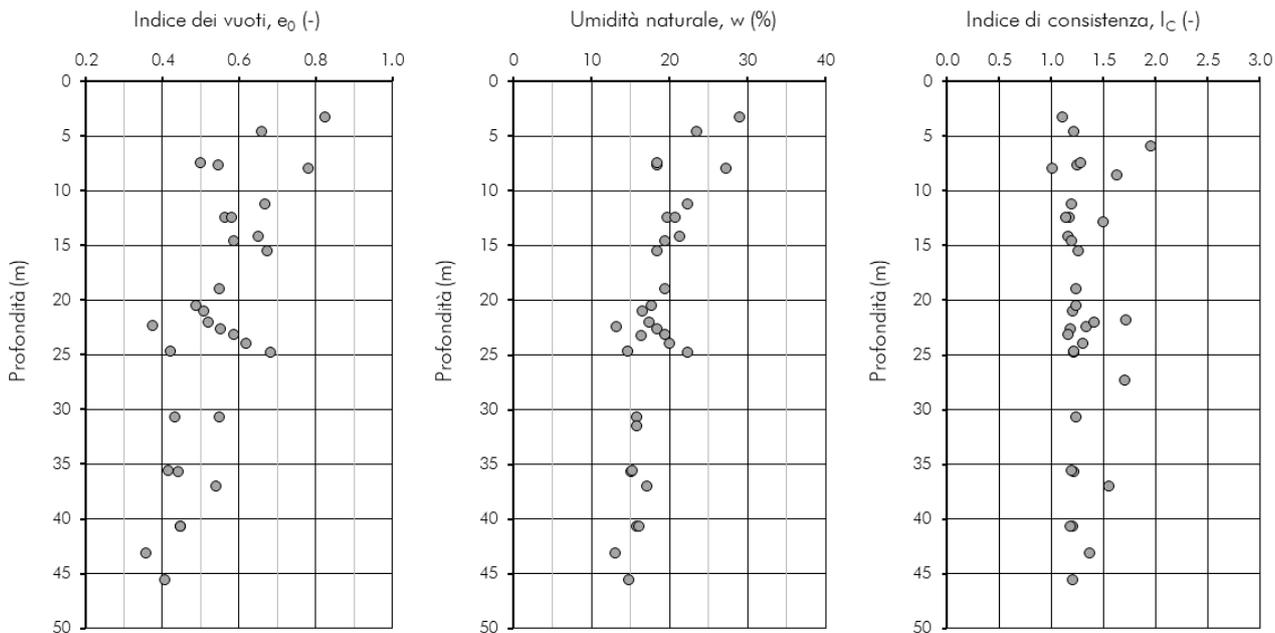
- Limite plastico,  $w_p$ : 20% ÷ 40%; Limite liquido,  $w_L$ : 50% ÷ 120%; Indice di Plasticità,  $I_p$ : 20% ÷ 80%



**Figura 20 – TRVb - Limiti di Atterberg e indice di plasticità**

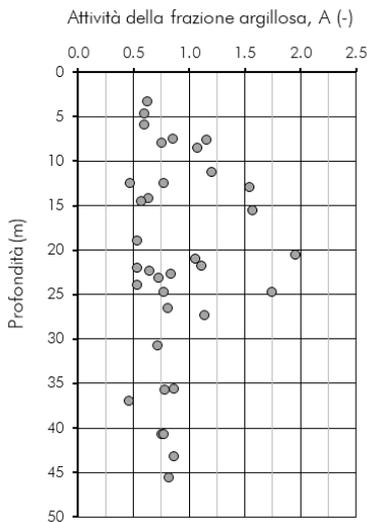
 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

L'indice dei vuoti  $e_o$  desce con la profondità con un intervallo che ha come limite superiore valori maggiori di 0,65 solamente per i campioni superficiali del sondaggio 5GN01; il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il 15% ed il 30%, con un indice di consistenza  $I_C$  variabile tra 1 e 2 (Figura 21), tipico di terreni molto consistenti.



**Figura 21 – TRVb - Indice dei vuoti, umidità naturale  $w$  e indice di consistenza  $I_c$**

La frazione argillosa è mediamente attiva con un indice di attività  $A$  medio pari a 0,9 (Figura 22).



**Figura 22 – TRVb - Attività della frazione argillosa  $A$**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Si riportano nella tabella 4 i valori numerici, relativi ad ogni campione, delle caratteristiche fisiche delle Formazione Terravecchia:

**Tabella 4 – TRVb - Caratteristiche fisiche**

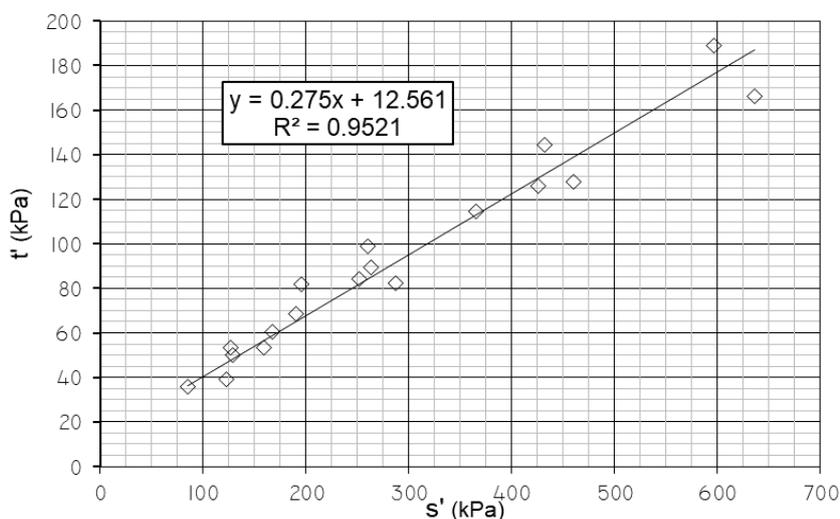
Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$\gamma$	$\gamma_d$	$w_p$	$w_L$	$I_p$	w	$I_c$	A
(-)	(-)	(m)	( $kNm^3$ )	( $kNm^3$ )	(%)	(%)	(%)	(%)	(-)	(-)
5GN01	CI1	4.7	20.3	16.4	31	64	33	24	1.2	0.6
5GN01	CR1	5.9			30	62	31		2.0	0.6
5GN01	CI2	7.7	20.8	17.6	30	76	46	18	1.3	1.2
5GN01	CR2	8.6			31	79	48		1.6	1.1
5GN01	CI3	11.2	19.9	16.2	32	81	49	22	1.2	1.2
5GN01	CR3	12.9			35	105	70		1.5	1.5
5GN01	CI4	15.6	19.2	16.2	37	107	70	18	1.3	1.6
5GN01	CR4	21.8			32	76	44		1.7	1.1
5GN01	CI5	24.8	19.8	16.2	40	123	83	22	1.2	1.7
5GN01	CR5	27.3			32	78	46		1.7	1.1
5GN02	CI4	24.7	22.0	19.2	26	74	48	15	1.2	0.8
5GN02	CI5	30.7	22.1	19.1	27	73	46	16	1.2	0.7
5GN02	CI6	35.7	21.8	18.9	25	68	44	15	1.2	0.8
5GN02	CI7	40.7	21.8	18.9	25	70	44	16	1.2	0.8
5GN03	CI1	30.7	20.4	17.5						
5GN03	CI2	35.6	22.3	19.3	24	69	45	15	1.2	0.9
5GN03	CI3	40.7	21.9	18.9	25	71	46	16	1.2	0.8
5GN03	CI4	43.2	22.7	20.1	27	64	37	13	1.4	0.9
5GN03	CI5	45.6	22.4	19.5	25	70	46	15	1.2	0.8

5S04	CI1	8.0	19.5	15.3	28	71	44	27	1.0	0.8
5S04	CI2	12.5	20.8	17.4	25	57	32	20	1.2	0.8
5S04	CI3	21.0	21.0	18.0	25	63	38	17	1.2	1.1
5S04	CR1	19.0	21.0	17.6	27	55	29	20	1.2	0.5
5S04	CR2	22.4	22.4	19.8	25	61	36	13	1.3	0.6
5SF7IN	CI3	14.2	20.0	16.5	27	56	30	21	1.2	0.6
5SF7IN	CI4	26.6			26	63	37			0.8
5SF3IN	CI3	14.6	20.5	17.2	26	56	30	20	1.2	0.6
5SF4IN	CI3	22.7	20.8	17.5	26	66	40	19	1.2	0.8
5SF5IN	CI3	23.2	20.5	17.2	26	67	41	20	1.2	0.7
5S05	CI2	12.5	20.8	17.2	24	48	24	21	1.1	0.5
5S05	CI3	20.5	21.4	18.2	26	59	33	18	1.2	2.0
5S05	CR3	22.0	21.0	17.9	29	56	27	18	1.4	0.5
5S3vi	CI2	24.0	20.3	16.9	31	65	35	20	1.3	0.5
5S3vi	CI3	37.0	20.8	17.7	34	65	31	17	1.6	0.5
5_SV15	CI 1	3.3	19.3	14.9	33	67	35	29	1.1	0.6
5_SV15	CI 2	7.5	21.4	18.1	28	61	33	18	1.3	0.9
5_SV15	CI 3	23.3	21.3	18.3				17		
5_SV15	CI 4	31.6	21.9	18.9				16		

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

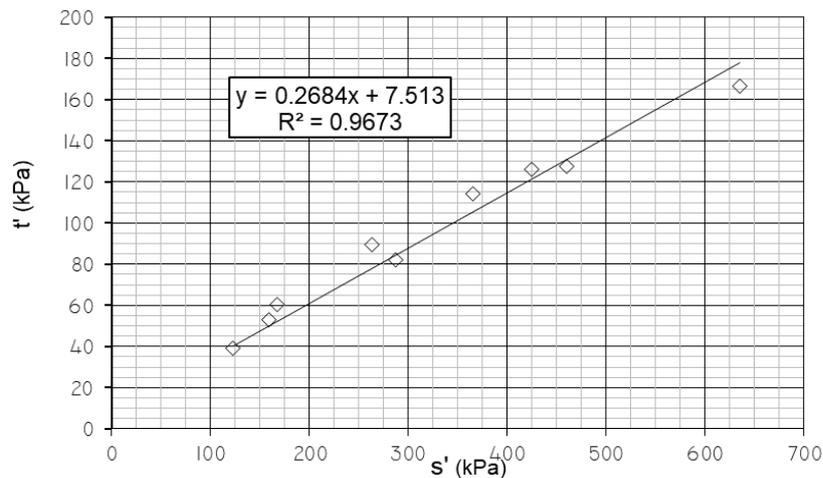
Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state eseguite 4 prove di taglio diretto, 6 prove di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU), 5 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU) e 11 prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 24) derivante dall'elaborazione delle prove triassiali CIU condotte sui campioni dei sondaggi 5GN01, 5SV15 e 5S04 mostra una buona correlazione e restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a 13 kPa e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $16^\circ$ . I risultati si riferiscono a campioni prelevati a profondità variabili tra 3,5 e 25 m da piano campagna.



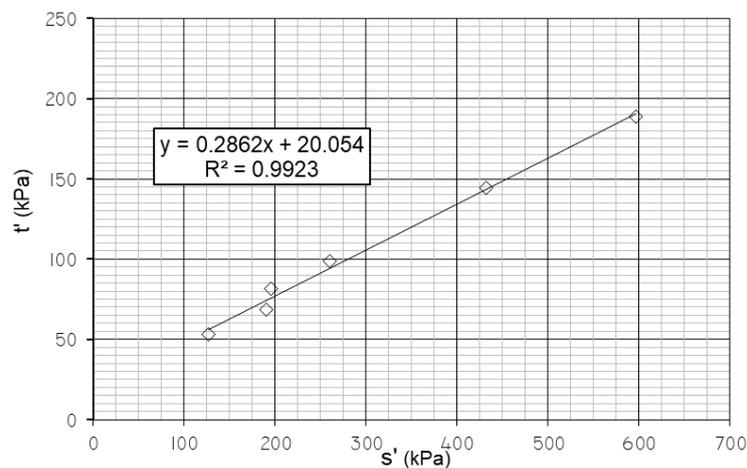
**Figura 23 – TRVb - Involuppo di resistenza delle prove triassiali**

Si analizza tuttavia singolarmente l'involuppo di resistenza dovuto ai soli campioni del sondaggio 5GN01, ritenuto significativo per le zone di imbocco e per le tratte di galleria in prossimità dell'imbocco. Nello specifico, l'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 24) derivante dall'elaborazione delle prove triassiali CIU condotte sui campioni del sondaggio 5GN01 mostra una buona correlazione e restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a circa 8 kPa e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $16^\circ$ . I risultati si riferiscono a campioni prelevati a profondità variabili tra 4,5 e 25 m da piano campagna.



**Figura 24 – TRVb - Involuppo di resistenza delle prove triassiali del sondaggio 5GN01**

Per la tratta a maggiori coperture si fa invece riferimento all'involuppo di resistenza ricavato dalle prove eseguite sui campioni indisturbati del sondaggio 5S04, che restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a circa 20 kPa e di resistenza al taglio  $\varphi'$  pari a circa  $16^\circ$  (Figura 25). Da tale involucro sono stati esclusi i campioni del sondaggio 5GN01, ritenuti significati delle zone di imbocco, i quali evidenziano valori di indice dei vuoti elevati (magiori di 0,65).



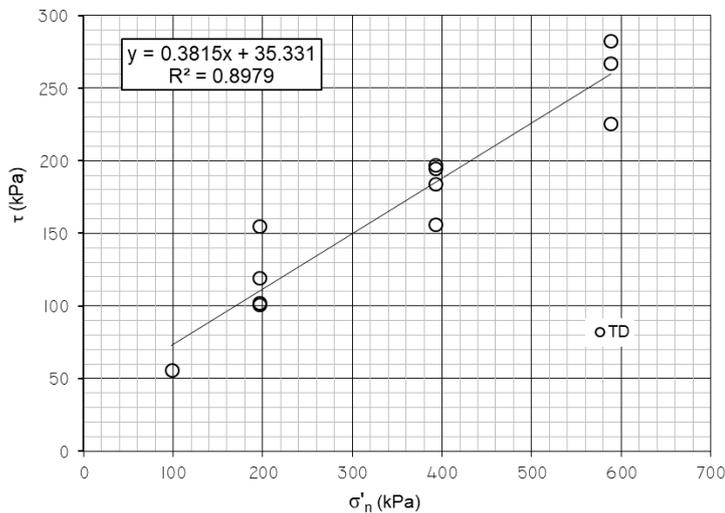
**Figura 25 – TRVb - Involuppo di resistenza delle prove triassiali del sondaggio 5S04**

L'aumento della coesione drenata si evince anche dalla prova di compressione triassiale consolidata non drenata sul campione CI6 del sondaggio 4SD26 eseguito nel lotto adiacente (4b) all'interno della medesima formazione (TRVb) a 30 m di profondità che mostra un involucro di resistenza con valori di coesione  $c'$  pari a 24 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\varphi' = 17^\circ$ .

Le 4 prove di taglio diretto eseguite sui campioni dei sondaggi 5GN01, 5GN03, 5SF4IN e 5SF7IN evidenziano un involucro di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 26) con valori dei parametri di resistenza con

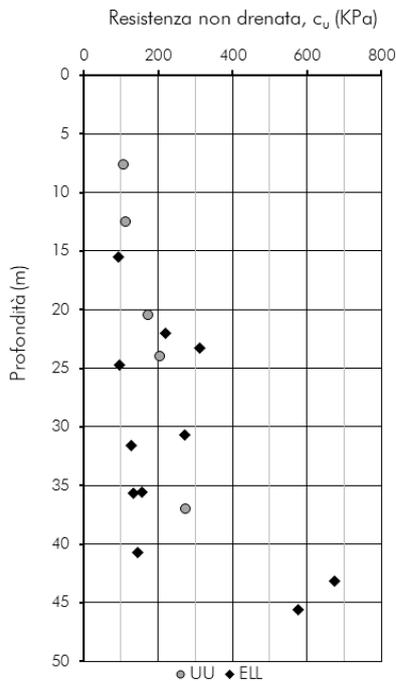
 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

coesione  $c'$  pari a 35 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a 21°. Le profondità di prelievo dei 4 campioni variano tra 15 e 31 m da piano campagna.



**Figura 26 – TRVb - Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)**

I valori della resistenza non drenata  $c_u$  ricavati dalle prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU) e di compressione ad espansione laterale libera (ELL) mostrano complessivamente un incremento con la profondità, con i valori maggiori (580 e 680 kPa) per le prove più profonde (Figura 28):



**Figura 27 – TRVb - Prove TX non consolidate non drenate (UU) e prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL)**

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

Di seguito la tabella riassuntiva, con i valori numerici, delle prove di taglio diretto, di compressione triassiale consolidata non drenata e non consolidata non drenata e di espansione laterale libera relative ad ogni campione:

**Tabella 5 – TRVb - Valori numerici delle prove TD, TX, UU e ELL relative ad ogni campione**

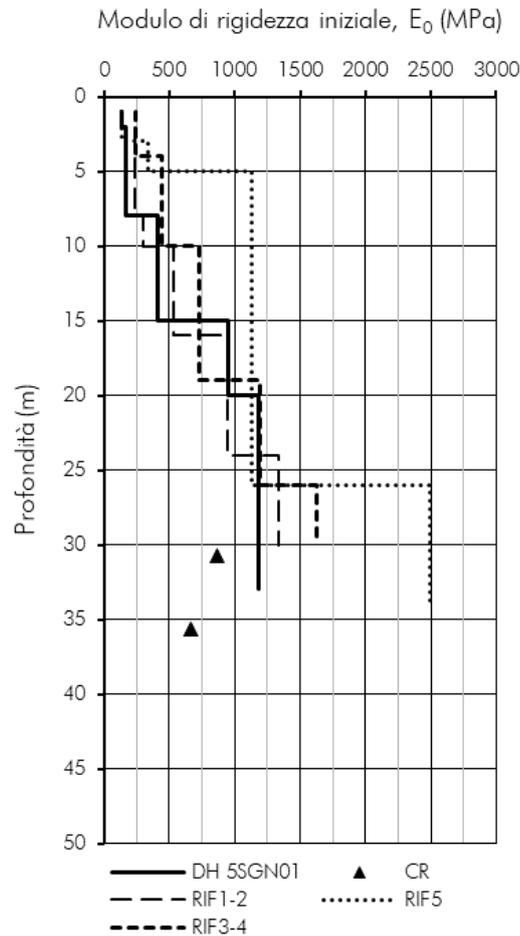
Prove di taglio diretto				
Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$\sigma'_n$	$\tau$
(-)	(-)	(m)	(kPa)	(kPa)
5GN01	CI4	15.6	196.1	101.9
			392.3	197.2
			588.4	225.8
5GN03	CI1	30.7	196.1	155.0
			392.3	194.5
			588.4	282.6
5SF7IN	CI3	14.2	98.1	56.1
			196.1	100.8
			392.3	184.2
5SF4IN	CI3	22.7	196.1	119.4
			392.3	156.3
			588.4	266.9

Prove di compressione triassiale							
Prova	Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$\sigma'_1$	$\sigma'_3$	s'	t'
(-)	(-)	(-)	(m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)
CIU	5GN01	CI 1	4.7	161	83	122	39
				213	106	159	53
				480	251	366	114
CIU	5GN01	CI 3	11.2	228	107	168	61
				352	174	263	89
				551	299	425	126
CIU	5GN01	CI 5	24.8	369	205	287	82
				588	333	460	128
				802	469	636	166
CIU	5SV15	CI 1	3.3	122	50	86	36
				179	79	129	50
				336	168	252	84
CIU	5S04	CI 1	8.0	180	74	127	53
				277	114	195	82
				359	161	260	99
CIU	5S04	CI 3	21.0	259	122	190	69
				576	287	431	144
				785	407	596	189

Sondaggio	Prova	Campione	Profondità da p.c.	$c_U$
(-)	(-)	(-)	(m)	(kPa)
5GN01	UU	CI2	7.7	107.5
5GN01	ELL	CI4	15.6	94.0
5GN02	ELL	CI4	24.7	95.1
5GN02	ELL	CI5	30.7	272.2
5GN02	ELL	CI6	35.7	131.8
5GN02	ELL	CI7	40.7	145.6
5GN03	ELL	CI2	35.6	156.4
5GN03	ELL	CI4	43.2	675.4
5GN03	ELL	CI5	45.6	577.5
5S05	UU	CI2	12.5	114.2
5S05	UU	CI3	20.5	174.5
5S3vi	UU	CI2	24.0	205.5
5S3vi	UU	CI3	37.0	273.7
5S05	ELL	CR3	22.0	219.0
5SV15	ELL	CI 3	23.3	310.2
5SV15	ELL	CI 4	31.6	126.2

Per determinare il modulo di rigidezza iniziale della formazione TRVb si è fatto riferimento alle prove geofisiche di sito (una prova down-hole eseguita in corrispondenza del sondaggio 5GN01 e 3 prove di sismica a rifrazione in prossimità dei due imbocchi della galleria e nella zona di massime coperture (Rif. [16])) e 2 prove di colonna risonante (su un campione indisturbato del sondaggio 5GN02 e un campione indisturbato del sondaggio 5GN03).

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>



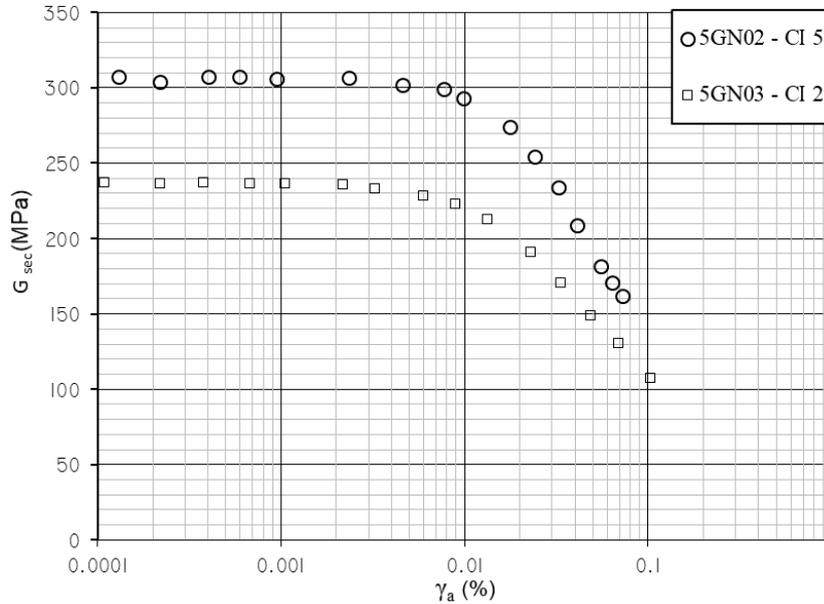
**Figura 28 – TRVb - Modulo di rigidità iniziale da prove geofisiche e prove di colonna risonante**

Le prove geofisiche riportano valori coerenti tra di loro ed evidenziano un incremento della rigidità con la profondità; i risultati delle prove di laboratorio forniscono valori di rigidità paragonabili alle prove geofisiche. Di seguito si riportano le curve di decadimento del modulo di taglio e dello smorzamento (Figura 29), ottenute dalle prove di colonna risonante, dalle quali a partire dal modulo di taglio iniziale si è ricavato il corrispondente modulo di rigidità  $E_0$ .

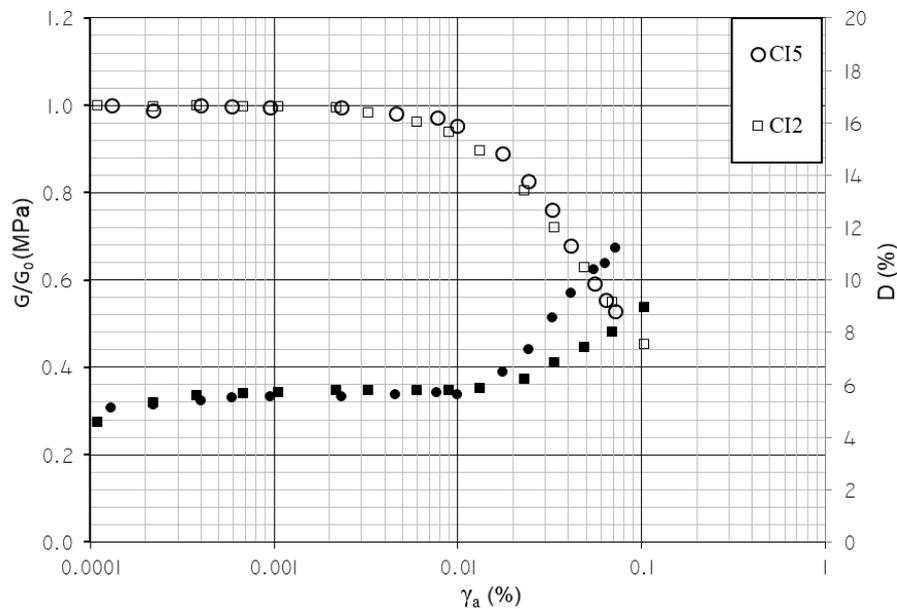
**Tabella 6 – TRVb -Risultati prove di colonna risonante**

PROVE DI COLONNA RISONANTE			
Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$E_0$
(-)	(-)	(m)	(MPa)
5GN02	CI5	30.7	861
5GN03	CI2	35.6	664

Prove di Colonna Risonante - TRVb



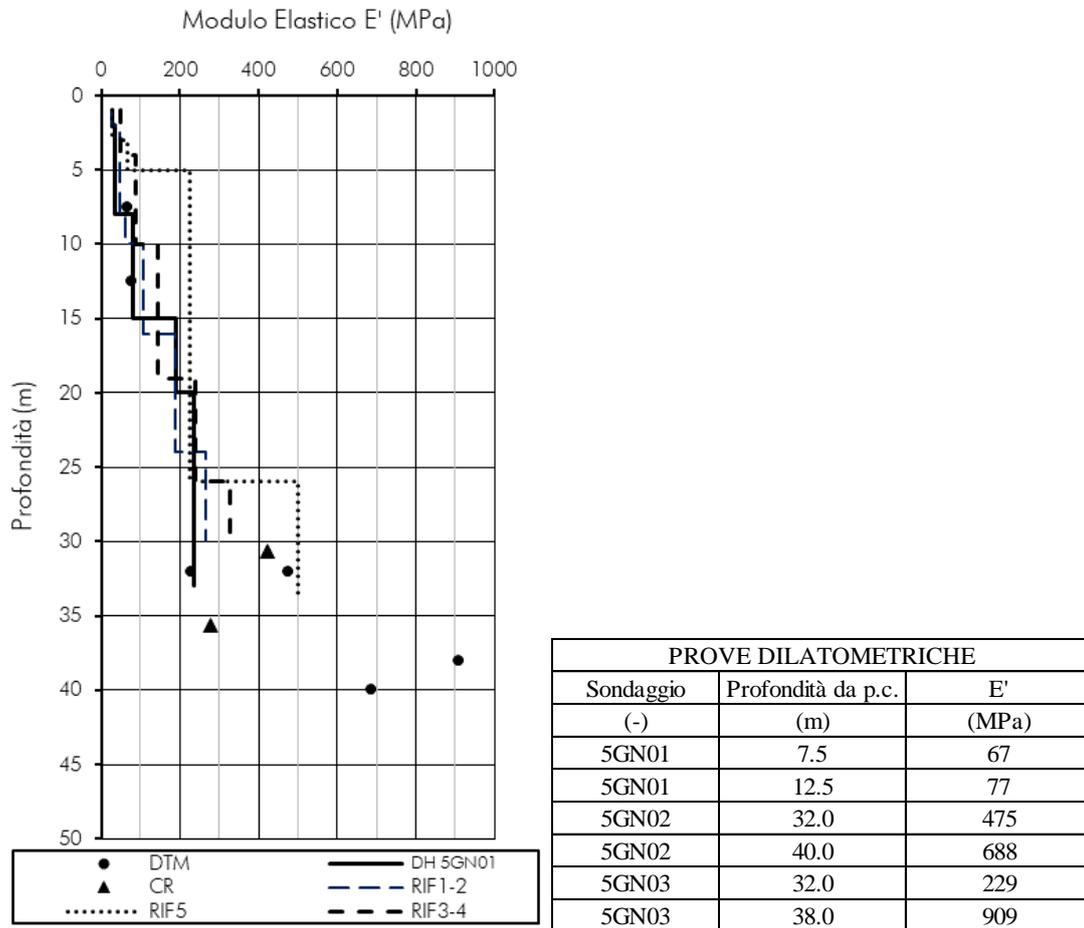
Prove di Colonna Risonante - TRVb



**Figura 29 – TRVb - Curve di decadimento da prove di colonna risonante**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione TRVb, sono stati utilizzati i risultati delle prove geofisiche e delle prove di colonna risonante. Attraverso queste ultime è infatti possibile ricavare il rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza di un livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria. Come confronto sui valori operativi si è fatto inoltre riferimento a 6 prove dilatometriche eseguite nei tre fori di sondaggio. Le diverse prove evidenziano valori confrontabili tra loro e mostrano un incremento della rigidezza con la profondità, con i valori più elevati ricavati dalle prove eseguite a profondità maggiori di 30 m

da piano campagna. L'intervallo di valori ricavato per il modulo di elasticità operativo  $E'$  all'interno del volume significativo dello scavo della galleria nella formazione del TVRb è pari a  $70 \div 900$  MPa (Figura 30).



**Figura 30: modulo di deformabilità operativo da prove geofisiche, prove dilatometriche e di colonna risonante**

Sono state eseguite 1 prova di rigonfiamento impedito e 5 prove di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campioni indisturbati. Per la prima, eseguita a profondità di 45,6 da piano campagna nel foro di sondaggio 5GN02, il valore di pressione tale da impedire il rigonfiamento in cella edometrica è pari a 232,8 kPa.

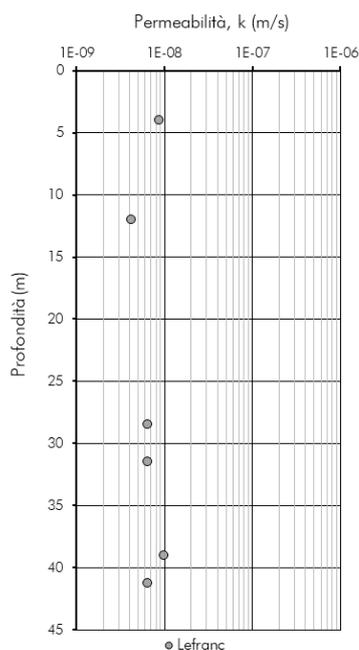
L'elaborazione delle prove secondo il metodo Huder-Amberg restituisce valori di coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  modesti e riassunti nella Tabella 7.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

**Tabella 7 – TRVb - Valori di  $k_{100}$  derivante da prove Huder-Amberg**

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100 \text{ H-A}}$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
5 GN01	CI3	11.2	1.4
5 GN01	CI4	15.6	3.9
5 GN01	CI5	24.8	2.4
5GN02	CI7	40.7	3.7
5GN03	CI5	45.6	2.7

Sono state eseguite un totale di 6 prove di permeabilità di tipo Lefranc nei fori di sondaggio a profondità variabili tra 4 e 41 m da p.c., all'interno del volume significativo dell'opera in progetto nella Formazione TRVb. Complessivamente dalle prove si ottiene un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $10^{-9}$  e  $10^{-8}$  m/s (Figura 31).



Prova	Sondaggio	Profondità da p.c.	k
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lefranc	5 GN01	4.0	8.69E-09
Lefranc	5 GN01	12.0	4.17E-09
Lefranc	5 GN02	28.5	6.41E-09
Lefranc	5 GN02	39.0	9.85E-09
Lefranc	5 GN03	31.5	6.36E-09
Lefranc	5 GN03	41.3	6.45E-09

**Figura 31 – TRVb - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc**

Complessivamente la Formazione Terravecchia (TRVb) mostra caratteristiche fisiche e meccaniche più o meno costanti con la profondità fino a circa 20-25 m da piano campagna. Oltre tale profondità si evince un passaggio verso un materiale più competente come evidenziato sia dalle caratteristiche di rigidità (prove geofisiche e prove dilatometriche), che dalle caratteristiche di resistenza (prove triassiali non consolidate non drenate e prove di compressione ad espansione laterale libera). Questi risultati sono in linea con quanto osservato dal recupero delle perforazioni dei sondaggi 5GN02 e 5GN03, in cui si è riscontrato un materiale argilloso molto consistente, e con grado di durezza ISRM: S5.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

In sintesi, la caratterizzazione geotecnica condotta sulla base delle indagini e delle prove descritte ha permesso la definizione dei seguenti intervalli di valori rappresentativi dei principali parametri geotecnici per l'Unità TRVb:

**Tabella 8 – TRVb – Riepilogo parametri geotecnici**

Unità	Coperture	$\gamma$	TD		TX		$E'$	k
			$c'$	$\varphi'$	$c'$	$\varphi'$		
(-)	(m)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(MPa)	(m/s)
TRVb	5 ÷ 20	19 ÷ 21	35	21	8	16	70 ÷ 200	$10^{-9} \div 10^{-8}$
TRVb	> 20	20 ÷ 23			20	16	200 ÷ 900	$10^{-9} \div 10^{-8}$

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

### 9.4.3 Formazione Argille ed Arenarie di Catenanuova – Litofacies AAC

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (53,45%) e di quella argillosa (28,1%) rispetto a quella sabbiosa (14,58%). Il terreno è classificabile come limo con argilla debolmente sabbioso (AGI, 1977).



Figura 32 Formazione di Catenanuova – Litofacies AAC – Foro di sondaggio 5\_S3gn, tra i 55 ed i 60 m da p.c.

Il peso dell'unità di volume varia tra 19 e 22 kN/m<sup>3</sup>; mentre il peso di volume del secco è compreso tra 14 e 19 kN/m<sup>3</sup> (Figura 9).

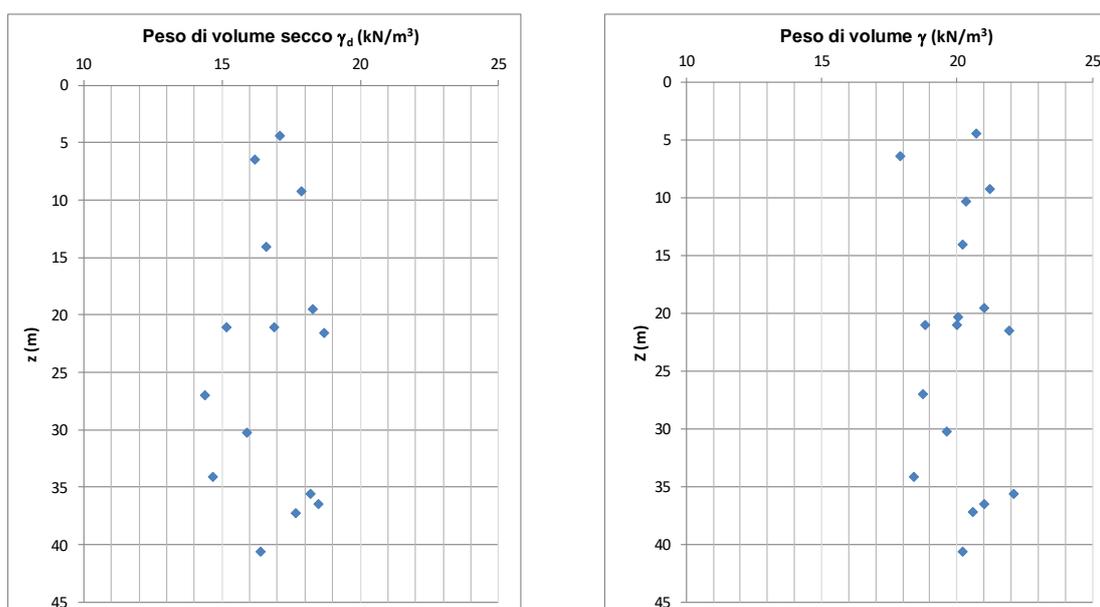
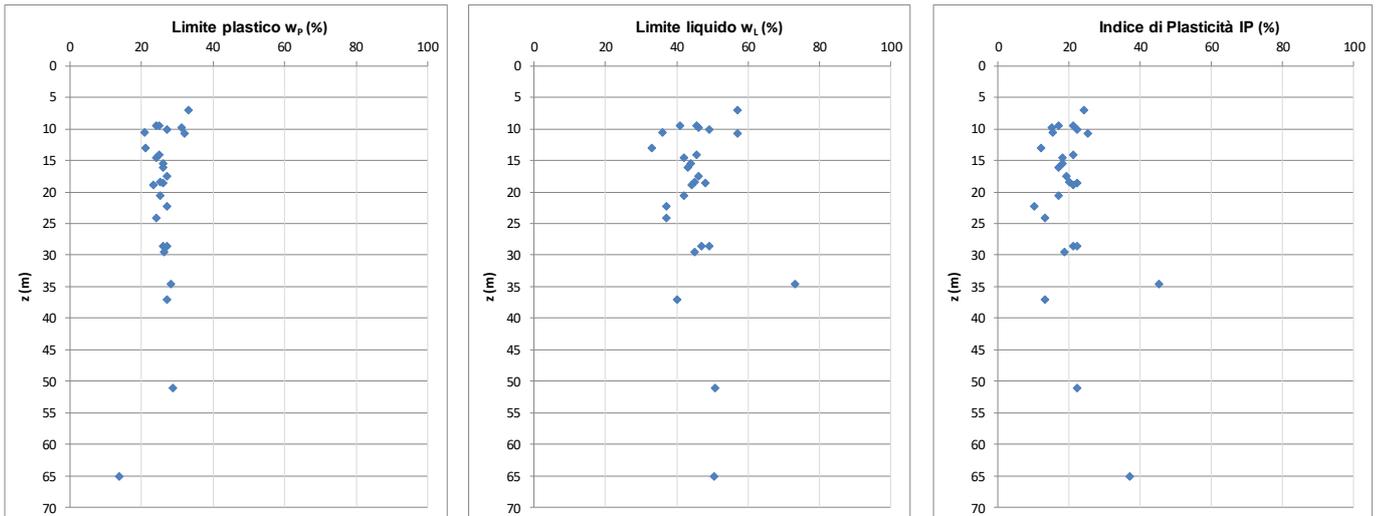


Figura 33 - AAC – Peso dell'unità di volume secco e peso dell'unità di volume

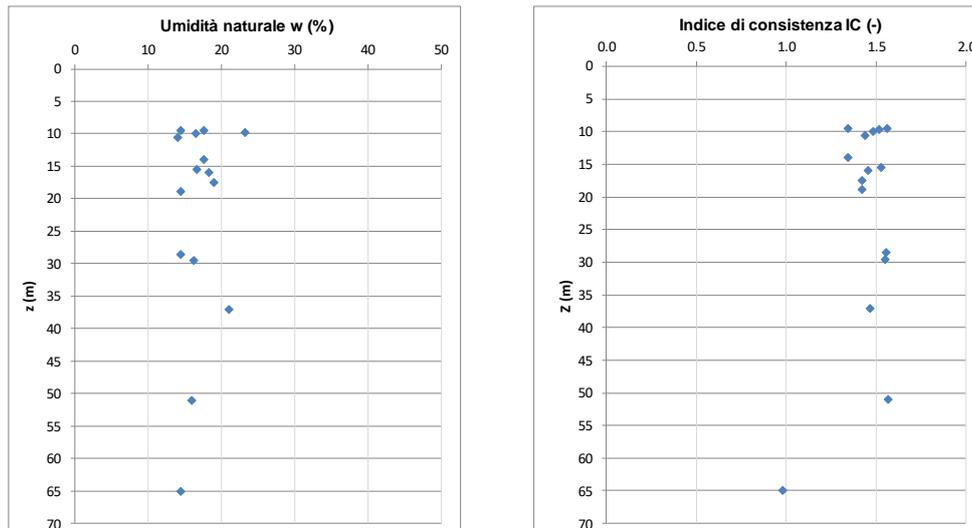
I limiti di Atterberg (Figura 10). sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

- Limite plastico: 13% ÷ 33%
- Limite liquido: 33% ÷ 73%
- Indice di Plasticità: 10% ÷ 45%



**Figura 34 - AAC – Limiti di Atterberg e Indice di plasticità**

Il contenuto d'acqua naturale risulta compreso tra il 14% ed il 23%, mentre l'indice di consistenza varia tra 0,98 e 1,6.

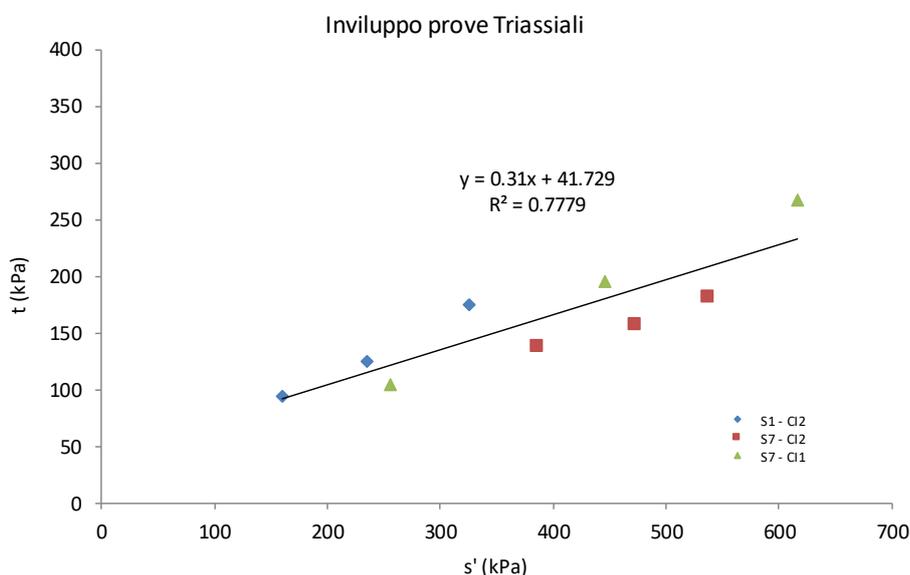


**Figura 35 - AAC – Umidità naturale w e indice di consistenza IC**

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

I parametri di resistenza al taglio in tensioni efficaci sono stati ricavati da prove di taglio diretto, da prove di compressione triassiale consolidate isotropicamente drenate e non drenate. Si sottolinea che la difficoltà di campionamento di questo materiale, riscontrata nelle differenti campagne di indagini, ha comportato che il numero di campioni idonei per le prove triassiali sia inferiore rispetto a quello dei campioni prodotti per le prove di taglio diretto.

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 12) derivante dall'elaborazione delle prove triassiali restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a circa 40 kPa ed un valore di angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $18^\circ$ .



**Figura 36 - AAC – Involuppo di resistenza delle prove triassiali**

In Figura 13 si riportano gli involuppi di resistenza delle prove di taglio diretto rappresentati nel piano di Mohr-Coulomb. Si distinguono due classi di involuppi di resistenza definiti rispettivamente da una coesione efficace  $c'=37,5$  kPa e da un angolo di attrito  $\phi'=29^\circ$  (involuppo rosso), e da una coesione efficace  $c'=23$  kPa e un angolo d'attrito  $\phi'=15^\circ$  (involuppo verde).

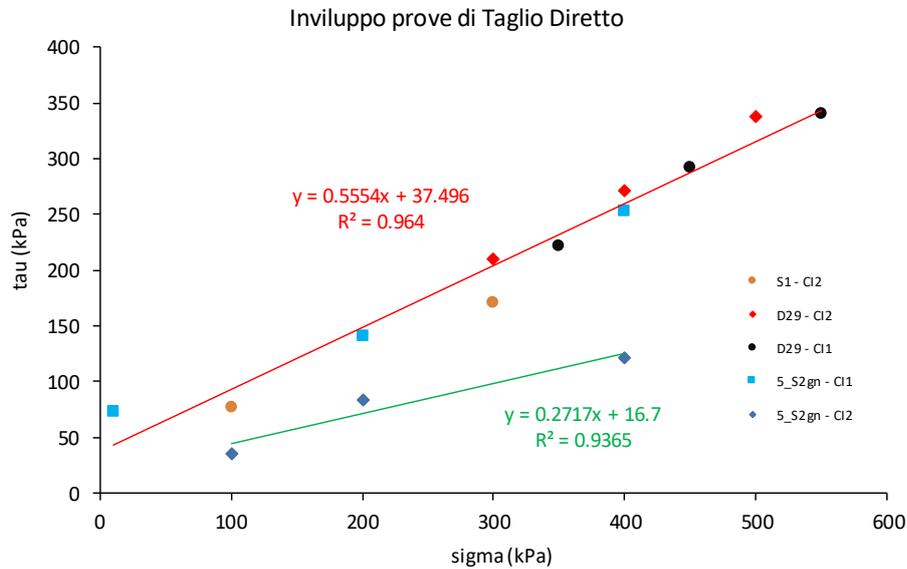


Figura 37 – AAC – Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto

I risultati dell'interpretazione delle singole prove hanno permesso di determinare un intervallo di valori di  $\varphi'$  compreso tra  $18 \div 30^\circ$  e di  $c'$  compreso tra  $17 \div 40$  kPa

Per quanto riguarda la valutazione della coesione non drenata  $c_u$ , si è fatto riferimento ai risultati sia delle prove in sito (pressiometriche, prove con pocket penetrometer), sia delle prove in laboratorio. Per la stima della coesione non drenata dalle prove pressiometriche è stata utilizzata la correlazione di Amar Jezequel:

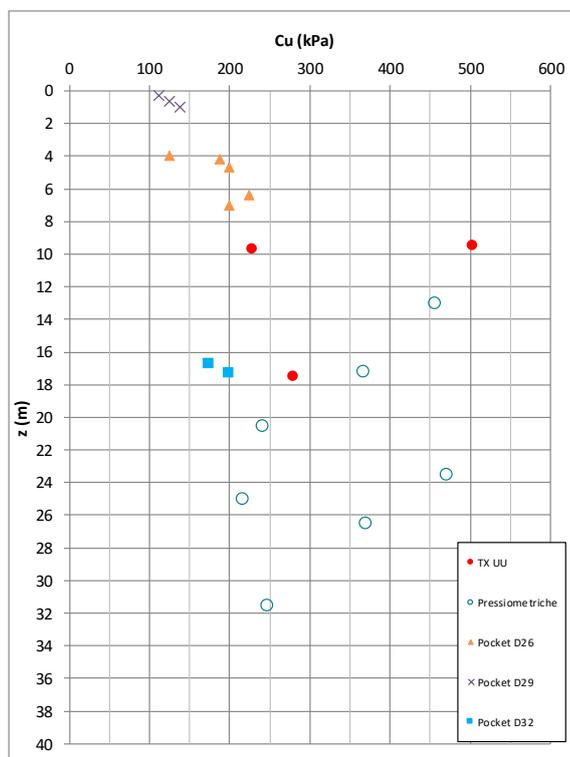
$$c_u \text{ (MPa)} = PI^*/5.5 \quad [\text{per } PI < 0.3 \text{ MPa}]$$

$$c_u \text{ (MPa)} = PI^*/10 + 0.025 \quad [\text{per } PI > 0.3 \text{ MPa}]$$

in cui  $PI^*$  è la pressione limite corretta.

In Figura 14 sono riportati i valori di coesione non drenata ricavati dall'interpretazione delle prove.

I bassi valori di coesione non drenata ottenuti dall'interpretazione di due delle tre prove di penetrometro pocket eseguite fino a profondità di 7 m da p.c., sono ritenuti poco rappresentativi. Si è definito un intervallo di valori con un estremo inferiore pari a 175 kPa, ottenuto da prove di penetrometro pocket su campioni profondi, e un estremo superiore pari a 500 kPa, valore ottenuto da prove di laboratorio.



**Figura 38 - AAC – Coesione non drenata**

Per la valutazione delle caratteristiche di rigidezza della formazione sono state considerate le prove in sito eseguite nell'area. Per quanto riguarda le prove sismiche, a partire dalla velocità delle onde di taglio  $v_s$  misurata, sono stati calcolati il modulo di taglio  $G$  e il modulo dinamico  $E_D$  [ $G=\rho v_s^2$ ,  $E_D=2G(1+\nu')$ ]. A seguire, facendo riferimento a dati di letteratura e ai risultati delle altre prove disponibili, il modulo di Young operativo  $E'$  è stato valutato considerando il rapporto  $E_D/E'=10$ .

Per l'interpretazione delle prove pressiometriche, è stata fatta una distinzione in funzione dei dati disponibili dalle prove eseguite. In particolare, nelle prove in cui, oltre al ciclo di primo carico, è stato eseguito un ciclo di scarico – ricarico, si è assunto che il modulo di ricarico  $E_M^+$  (ricavato dalla curva di scarico-ricarico) coincida con il modulo elastico  $E'$ . Invece, per le prove in cui è stato eseguito solo il ciclo di primo carico, il modulo elastico è stato assunto pari a  $E'=E_M/\alpha$ , in cui  $E_M$  è il modulo pressiometrico ed  $\alpha$  è un coefficiente reologico che tiene conto della natura del litotipo e dei disturbi cui il terreno è sottoposto durante la perforazione. Nel caso in esame si è assunto  $\alpha=0.61$ , (valore ricavato dalle prove in cui è stato eseguito il ciclo di scarico e ricarico, confrontando i due moduli  $E_M$  e  $E_M^+$ ).

Per le prove dilatometriche si è fatto riferimento alla terza curva di scarico-ricarico per la determinazione del modulo del materiale indagato. È proprio la dilatometrica più profonda che definisce l'andamento del modulo  $E'$  con la profondità, dato che restituisce comunque un valore concorde con altri più superficiali derivanti sia da prove dilatometriche che pressiometriche.

Come risultato si ottiene un andamento simulato dalla linea tratteggiata in Figura 15 che corrisponde alla retta di equazione  $E'=11z + 62$ .

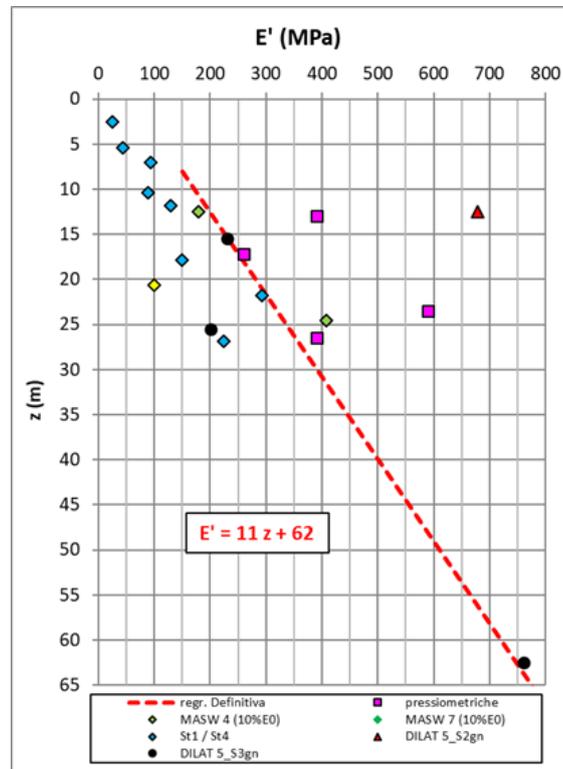


Figura 39 - AAC – Andamento del modulo di Young con la profondità.

Infine, dalle prove Lefranc, è stato possibile ricavare un'indicazione sulla permeabilità della formazione che varia nell'intervallo  $4.6E-09 \div 2.0E-07$  m/s.

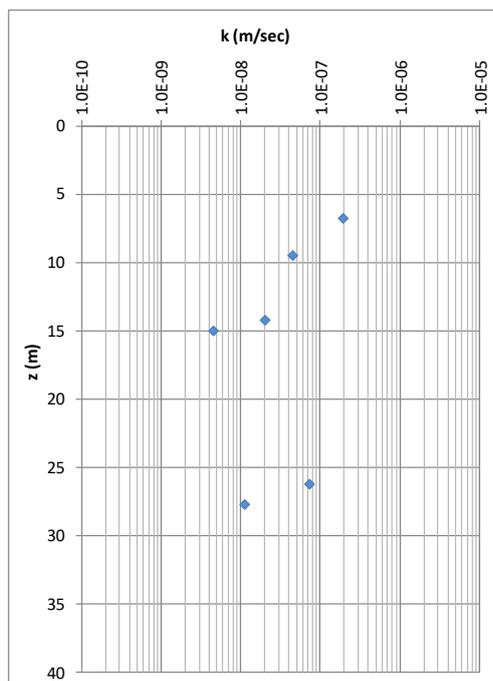


Figura 40 - AAC - Coefficiente di permeabilità.

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Sono state eseguite 2 prove di rigonfiamento impedito e 1 prova di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campioni indisturbati. Per le prime, eseguite su campioni indisturbati alle profondità di 19 m e 51 m da piano campagna, i valori di pressione tali da impedire il rigonfiamento in cella edometrica sono riportati nella Tabella 9.

**Tabella 9 – AACa - Pressione di rigonfiamento secondo prove di rigonfiamento impedito**

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$\sigma_R$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
5_S2gn	CI2	18,80 - 19,50	49.0
5_S3gn	CI5	51,00 - 51,70	61.3

L'elaborazione della prova secondo il metodo Huder-Amberg restituisce un coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  pari a 0,6 (Tabella 10), valore significativamente inferiore rispetto a quanto riscontrato in letteratura per formazioni che hanno manifestato un comportamento rigonfiante.

**Tabella 10 – AACa - Valori di  $k_{100}$  derivante da prove Huder-Amberg**

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100 \text{ H-A}}$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
5_S2gn	CI2	18,80 - 19,50	0.6

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

#### 9.4.4 Formazione Argille ed Arenarie di Catenanuova – Litofacies AACa

La litofacies AACa è composta prevalentemente da arenarie. Di seguito è descritta la caratterizzazione di tale formazione rocciosa, interessata da diffusi elementi tettonici nell'area delle opere in progetto e intercalazioni pelitiche.



Figura 41 Formazione di Catenanuova – Litofacies AACa – Foro di sondaggio 5\_S3gn, tra i 35 ed i 40 m da p.c.

Il peso dell'unità di volume è variabile tra 21 ÷ 25 kN/m<sup>3</sup> (Figura 42).

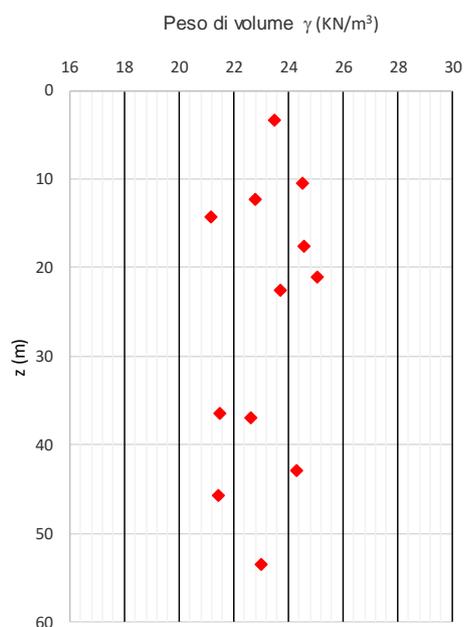
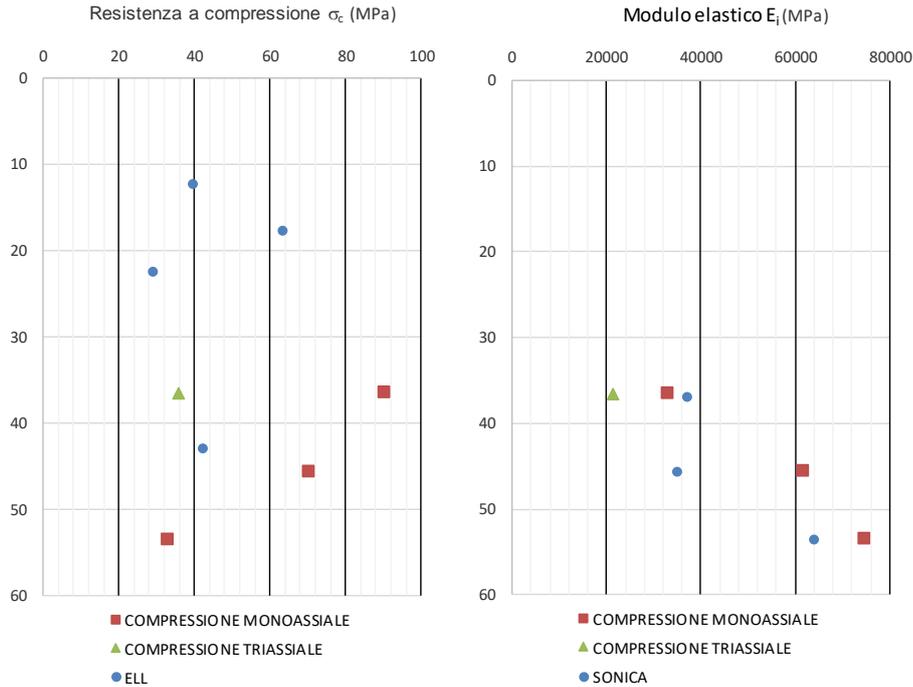


Figura 42 – AACa - Peso dell'unità di volume

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

Per la definizione dei valori di resistenza a compressione della matrice rocciosa si dispone sia di prove di compressione monoassiale che triassiale ed espansioni laterali libere. Si sono ottenuti valori compresi nel range 30 ÷ 90 MPa (Figura 43). Dall'interpretazione delle stesse prove si ricava l'intervallo di valori del modulo elastico della matrice rocciosa. L'intervallo che si considera è 21 ÷ 74.5 GPa.



**Figura 43- AACa - Resistenza a compressione e modulo elastico della matrice rocciosa**

Il valore dell'indice di qualità della roccia GSI è stato determinato dal sondaggio 5\_S3gn, che ha consentito di definire un intervallo dell'indice GSI pari a 35 ÷ 50.

Per definire il passaggio dalla scala del materiale roccioso a quella dell'ammasso è stata considerata inoltre la trattazione di Marinos e Hoek Rif. [25] per formazioni strutturalmente complesse.

GSI FOR HETEROGENEOUS ROCK MASSES SUCH AS FLYSCH (Marinos.P and Hoek. E, 2000)		SURFACE CONDITIONS OF DISCONTINUITIES (Predominantly bedding planes)	VERY GOOD - Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD - Rough, slightly weathered surfaces	FAIR - Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR - Very smooth, occasionally slickensided surfaces with compact coatings or fillings with angular fragments	VERY POOR - Very smooth slickensided or highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
COMPOSITION AND STRUCTURE							
	<b>A. Thick bedded, very blocky sandstone</b> The effect of pelitic coatings on the bedding planes is minimized by the confinement of the rock mass. In shallow tunnels or slopes these bedding planes may cause structurally controlled instability.		70	60	<b>A</b>		
	<b>B. Sandstone with thin inter-layers of siltstone</b>			50	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
	<b>D. Siltstone or silty shale with sandstone layers</b>			40			<b>E</b>
C, D, E and G - may be more or less folded than illustrated but this does not change the strength. Tectonic deformation, faulting and loss of continuity moves these categories to F and H.						30	<b>F</b>
	<b>G. Undisturbed silty or clayey shale with or without a few very thin sandstone layers</b>					20	<b>H</b>
						10	

→ : Means deformation after tectonic disturbance

Suggested proportions of parameters  $\sigma_{ci}$  and  $m_i$  for estimating rock mass properties for flysch

Flysch type (see Table 3)	Proportions of values for each rock type to be included in rock mass property determination
A and B	Use values for sandstone beds
C	Reduce sandstone values by 20% and use full values for siltstone
D	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
E	Reduce sandstone values by 40% and use full values for siltstone
F	Reduce sandstone values by 60% and use full values for siltstone
G	Use values for siltstone or shale
H	Use values for siltstone or shale

Il materiale oggetto di studio può essere associato alla categoria C/E. In via cautelativa, le caratteristiche di resistenza sono quindi state ridotte del 40%, ottenendo  $\sigma_c = 18 \div 54$  MPa e  $E_i = 12.6 \div 44.7$  GPa.

Le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso sono state espresse attraverso il criterio generalizzato proposto da Hoek e Brown (1988). In questo modello, la curva intrinseca che fornisce le condizioni di rottura dell'ammasso è data dall'espressione:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

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

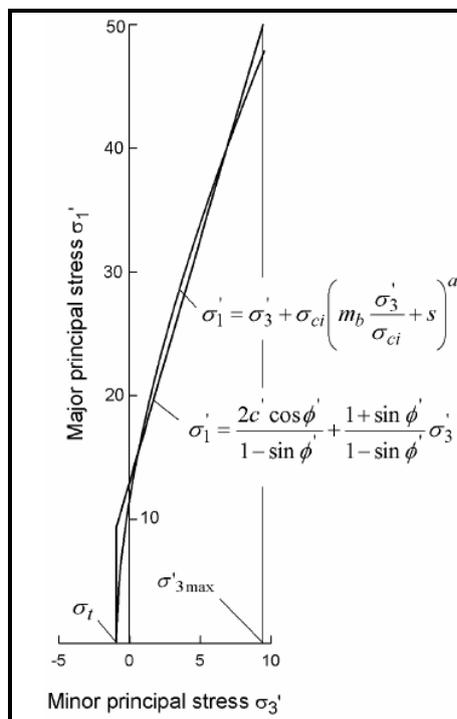
dove:

$\sigma'_1$  tensione principale efficace maggiore a rottura;

$\sigma'_3$  tensione principale efficace minore a rottura;

$\sigma_c$  resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

La resistenza al taglio è stata poi espressa con il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, interpolando con una retta la curva intrinseca di Hoek-Brown. ridefinita nel piano tensione tangenziale ( $\tau$ ) - tensione normale ( $\sigma'_n$ ). In questo modo sono stati definiti i parametri coesione  $c'$  e angolo di attrito  $\phi'$ .

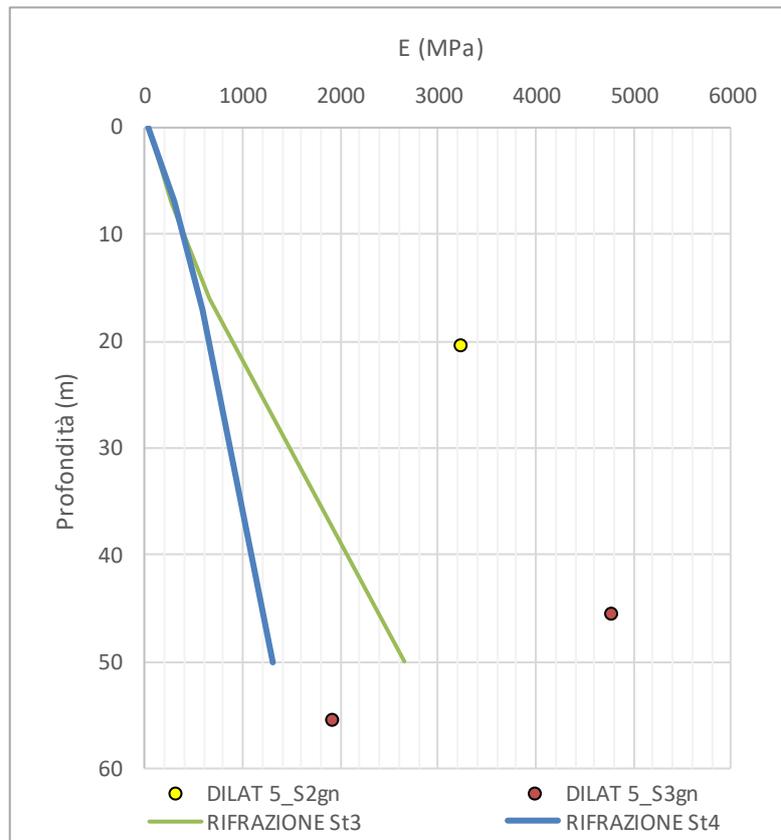


**Figura 44 – AACa - Interpolazione della curva intrinseca di Hoek e Brown: retta di rottura di Mohr-Coulomb**

Considerando una media degli intervalli dei parametri sopra citati e i valori massimi degli stessi intervalli, si ottengono le seguenti coppie di valori dei parametri di resistenza, che individuano il range di progetto:

- $c' = 350$  kPa,  $\phi' = 55^\circ$ ;
- $c' = 190$  kPa,  $\phi' = 41^\circ$ ;

Per quanto concerne le caratteristiche di deformabilità, si hanno a disposizione tre prove dilatometriche e due stendimenti a rifrazione St3 e St4.



**Figura 45 – AACa - Andamento del modulo elastico con la profondità**

Come per la litofacies argillosa, il modulo di Young  $E'$  è stato valutato considerando il rapporto  $E_D/E' = 10$  ( $E_D$ =modulo dinamico), in funzione del livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria.

L'intervallo che si ottiene è pari a  $300 \div 4700$  MPa, con il valore di estremo inferiore valido per le basse profondità e con l'estremo superiore valido per le profondità di interesse dell'opera in sotterraneo.

#### 9.4.5 Depositi di versante e depositi alluvionali – Litofacies b2, bn1

I depositi di versante e i depositi alluvionali non sono attraversati dalle opere in sotterraneo, ma possono presentarsi in calotta nella tratta prossima all'imbocco lato Catania. La caratterizzazione meccanica si basa su un numero limitato di evidenze sperimentali, che hanno fornito comunque valori congruenti con tipologia e stato di addensamento/consistenza del terreno. I parametri di resistenza al taglio in termini di coesione efficace ( $c'$ ) possono variare da 0 a 15 kPa, l'angolo di attrito da  $17^\circ$  a  $24^\circ$ . La permeabilità è stata valutata tramite prove in sito di tipo Lefranc nell'ambito della campagna geotecnica 2018 – 2019.

Per i terreni b2, caratterizzati dalla prevalenza di terreni coesivi, si fa riferimento ai sondaggi 5\_S04 e 5\_S11; il grado di permeabilità ottenuto è molto basso, con valori di permeabilità  $k$  che sono prossimi a  $10^{-8}$  m/s.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Per i terreni *bnI*, caratterizzati dalla prevalenza di terreni incoerenti a grana grossa con matrice fina, si fa riferimento ai sondaggi 5\_S07, 5\_SV3N, 5\_SV5N, 5\_S8vi e 5\_S14; in questo caso è stato ottenuto un grado di permeabilità da basso a medio, con valori di permeabilità  $k$  compresi tra  $10^{-6}$  e  $10^{-4}$  m/s.

## 9.5 Il regime idraulico

### *Galleria Libertinia*

Il regime delle pressioni interstiziali è stato accertato tramite piezometri Casagrande installati nella verticale di indagine 5\_GN1 e nel sondaggio 5\_GN2. Il monitoraggio è stato eseguito a partire da Settembre 2019 con cadenza mensile. Nell'arco temporale suddetto, i livelli piezometrici misurati a quota cavo si sono mantenuti stabili, al di sopra della calotta della galleria. Per il dettaglio delle quote dei livelli piezometrici lungo la galleria si rimanda all'elaborato "Profilo geotecnico – Galleria Libertinia" (Rif. [29]).

### *Galleria San Filippo*

Il regime delle pressioni interstiziali è stato accertato tramite piezometri installati sia nella verticale di indagine D14 (piezometro a tubo aperto) che nei fori di sondaggio D13, 5\_Sgnpz e 5\_S1gn (cella Casagrande). Il monitoraggio è stato eseguito da Maggio 2015 a Dicembre 2015 per il piezometro D13, da Maggio 2015 a Ottobre 2015 per il D14 e per i restanti due da Ottobre 2018 fino a Ottobre 2019. Nei periodi di osservazione suddetti, i livelli piezometrici si sono mantenuti stabili, sempre al di sopra della calotta della galleria. Per il dettaglio delle quote dei livelli piezometrici lungo la galleria si rimanda all'elaborato "Profilo geotecnico – Galleria San Filippo" (Rif. [32]).

### *Galleria Salvatore*

Il regime delle pressioni interstiziali è stato accertato tramite il piezometro installato nella verticale di indagine S2 (piezometro a tubo aperto) e quelli installati nei fori di sondaggio 5\_S1gn e 5\_S2gn (cella Casagrande). Il monitoraggio è stato eseguito da Novembre 2014 per il piezometro S2 e, per i restanti due, da Ottobre 2018 fino a Ottobre 2019. Nell'arco temporale suddetto i livelli piezometrici misurati a quota cavo si sono mantenuti stabili, sempre al di sopra della calotta della galleria, ad eccezione della zona prossima all'imbocco lato Palermo, dove il livello piezometrico riscontrato dalla strumentazione installata si colloca al di sotto dell'arco rovescio. Per il dettaglio delle quote dei livelli piezometrici lungo la galleria si rimanda all'elaborato "Profilo geotecnico – Galleria Salvatore" (Rif. [37]).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

## 10 FASE DI DIAGNOSI

Nella fase di diagnosi, sulla base del modello geotecnico scaturito dagli studi e dalle indagini effettuati nella fase conoscitiva, si procede alla previsione della risposta tensio-deformativa dell'ammasso allo scavo, in assenza di interventi di stabilizzazione. La valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo è condotta con riferimento alle tre categorie di comportamento fondamentali individuate nel metodo ADECO-RS (Rif. [19]), di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

### 10.1 Classi di comportamento del fronte di scavo

Secondo l'approccio ADECO-RS (Rif. [19]) la previsione dell'evoluzione dello stato tensionale a seguito dell'apertura di una galleria è possibile attraverso l'analisi dei fenomeni deformativi, che forniscono indicazioni sul comportamento della cavità nei riguardi della stabilità a breve e a lungo termine. Dati sperimentali e analisi teoriche hanno dimostrato che il comportamento della cavità è significativamente condizionato, oltre che dalle caratteristiche geometriche della galleria stessa e dai carichi litostatici, anche dalle caratteristiche di resistenza e di rigidità del nucleo d'avanzamento, inteso come il volume di terreno a monte del fronte di scavo. Se il nucleo non è costituito da materiale sufficientemente rigido e resistente da mantenere in campo elastico il proprio comportamento tensio-deformativo, si sviluppano fenomeni deformativi e plasticizzazioni rilevanti in avanzamento, a cui consegue l'evoluzione verso condizioni di instabilità del fronte e del cavo. Se, invece, il comportamento del nucleo d'avanzamento si mantiene in campo elastico, il nucleo stesso svolge un'azione di precontenimento del cavo, che si mantiene a sua volta in condizioni elastiche, conservando le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato e quindi configurazioni di stabilità.

Sulla base di tali considerazioni, il comportamento del nucleo-fronte di scavo, al quale è legato quello della cavità, può essere sostanzialmente ricondotto alle seguenti tre categorie:

#### Categoria A: nucleo-fronte stabile

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità non supera le caratteristiche di resistenza dell'ammasso; in tal caso le deformazioni sono prevalentemente elastiche, di piccola entità e tendono ad esaurirsi rapidamente con la distanza dal fronte. Il fronte di scavo e il cavo sono stabili e quindi non si rendono necessari interventi preventivi di stabilizzazione, se non localizzati e in misura ridotta. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

#### Categoria B: nucleo-fronte stabile a breve termine

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui lo stato tensionale nel terreno al fronte e al contorno della cavità, a seguito delle operazioni di scavo, raggiunge la resistenza dell'ammasso. I fenomeni deformativi sono di tipo elasto-plastico, di maggiore entità rispetto al caso precedente. Nell'ammasso può prodursi una eventuale riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri residui. La risposta tensio-deformativa può essere opportunamente controllata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso perché mantenga un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano interventi, lo stato tensio-deformativo può

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

evolvere verso situazioni di instabilità del cavo in fase di realizzazione. Il rivestimento definitivo costituisce il margine di sicurezza per la stabilità a lungo termine.

### Categoria C: nucleo-fronte instabile

Tale categoria corrisponde alla condizione in cui, superata la resistenza del terreno, i fenomeni deformativi evolvono molto rapidamente in campo plastico, producendo la progressiva instabilità del fronte di scavo e un incremento dell'estensione della zona dell'ammasso decompressa e plasticizzata al contorno della cavità, con rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche del materiale. L'espansione della fascia di materiale decompresso al contorno del cavo deve essere contenuta prima dell'arrivo del fronte di scavo, mediante interventi di preconsolidamento in avanzamento, che consentono di creare artificialmente l'effetto arco per far evolvere la risposta tensio-deformativa verso configurazioni di stabilità.

## **10.2 Determinazione delle categorie di comportamento**

Per la determinazione delle categorie di comportamento sono stati utilizzati principalmente due metodi di analisi:

- il metodo delle linee caratteristiche (o convergenza-confinamento); tale metodo consente l'analisi 3D semplificata dello scavo di gallerie in relazione alle proprietà meccaniche dell'ammasso attraversato, alle caratteristiche geometriche dell'opera, agli interventi previsti di precontenimento e contenimento, e all'installazione dei rivestimenti provvisori e definitivi. Nella fase di diagnosi, poiché la finalità è la valutazione del comportamento deformativo dell'ammasso in assenza di interventi di stabilizzazione, le analisi consistono nella valutazione della sola curva caratteristica del fronte (e del cavo) senza considerare l'interazione con i sostegni.
- i metodi di analisi della stabilità del fronte all'equilibrio limite.

## **10.3 Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo**

Sulla base dei risultati delle analisi sopra descritte, esaminati in modo critico tenendo conto dell'affidabilità dei dati di ingresso in termini di parametri di ammasso (rigidezza e resistenza), delle condizioni idrauliche al contorno, di eventuali variabilità attese lungo il tracciato della galleria e di possibili conseguenze per comportamenti imprevisti, è stato possibile concludere che:

- per le gallerie Libertinia e San Filippo, entrambe realizzate nella formazione di Terravecchia, si prevede una categoria di comportamento instabile, quindi di tipo C, per l'intero sviluppo dell'opera;
- per la galleria Salvatore:
  - nel tratto interessato dalla litofacies arenacea AACa delle Argille di Catenanuova, è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria A (stabile);

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> <b>RS3E</b>	<b>LOTTO</b> <b>50 D 07</b>	<b>CODIFICA</b> <b>RH</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>GN0000 001</b>	<b>REV.</b> <b>A</b>	<b>FOGLIO</b> <b>54 di 77</b>

- si prevede una categoria di comportamento prevalentemente di tipo C, quindi instabile, per le tratte di scavo che interessano la litofacies pelitica;
- per il tratto a basse coperture, dove alla scala del fronte coesistono entrambe le litofacies, è prevista una categoria di comportamento B.

Le previsioni di comportamento lungo il tracciato della galleria sono illustrate in forma sintetica nel “Profilo geotecnico – Galleria Libertinia” (Rif. [29]), “Profilo geotecnico – Galleria San Filippo” (Rif. [32]) e nel “Profilo geotecnico – Galleria Salvatore” (Rif. [37]).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

## 11 FASE DI TERAPIA

Nel presente capitolo sono definiti gli interventi necessari per garantire la stabilità del cavo a breve e a lungo termine, in accordo con le indicazioni provenienti dalla fase conoscitiva e dall'analisi del comportamento deformativo allo scavo (fase di diagnosi). Sono, quindi, descritte le caratteristiche principali delle sezioni tipo di avanzamento, il loro campo di applicazione e la successione delle fasi esecutive; i dettagli delle sezioni di scavo e consolidamento sono illustrati nei pertinenti elaborati progettuali.

### 11.1 Metodologia di scavo

#### 11.1.1 Criteri di scelta del sistema di scavo

In considerazione della lunghezza delle gallerie in progetto e dei contesti geotecnici attraversati, il metodo di scavo tradizionale a piena sezione è stato considerato adeguato alla realizzazione delle opere in sotterraneo.

#### 11.1.2 Metodo di scavo tradizionale

Per tutte e tre le gallerie è prevista l'adozione dello scavo a piena sezione.

Per gran parte dello sviluppo delle tre gallerie, si attraversano formazioni di natura argillosa; pertanto le soluzioni di scavo e consolidamento più ricorrenti prevedono interventi di precontenimento del fronte e al contorno.

Gli interventi di preconsolidamento al contorno, costituiti da VTR cementati in foro con miscele espansive, controllano, in combinazione con gli interventi al fronte, le deformazioni di estrusione e le pre-convergenze, e quindi l'estensione della zona plastica al contorno del cavo.

Gli interventi di preconsolidamento del fronte consistono nell'installazione in avanzamento di elementi strutturali in VTR, integralmente connessi ai terreni attraversati mediante cementazione. L'intervento agisce prevalentemente riducendo le deformazioni plastiche dei terreni nel nucleo e, allo stesso tempo, l'estrusione del nucleo verso la galleria già scavata. Inoltre, si ha un contenimento dello spostamento radiale della parete della galleria in prossimità del fronte di scavo, consentendo di controllare l'estensione della fascia plastica.

Interventi di presostegno (con l'inserimento di tubi metallici resistenti sul profilo della galleria in corrispondenza della calotta ed in avanzamento rispetto al fronte) sono previsti per la realizzazione delle sezioni di attacco di tutte e tre le gallerie. Nella galleria Salvatore sono previsti anche in presenza della litofacies arenacea, quando questa si presenta con elevato grado di fratturazione, e nelle zone a basse coperture.

Per ciascuna sezione tipo è previsto lo scavo per sfondi successivi di limitata lunghezza, con l'installazione di un rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton fibrorinforzato e centine metalliche. Il getto dei rivestimenti definitivi di arco rovescio e calotta segue a breve distanza dal fronte.

A tergo dei rivestimenti definitivi di calotta si pone in opera l'impermeabilizzazione, costituita da uno strato di geotessuto e da una guaina in PVC. Al piede dell'impermeabilizzazione, su ciascun piedritto, si dispone un tubo microfessurato di presidio per eventuale drenaggio delle acque presenti nelle formazioni attraversate.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Nei paragrafi a seguire si riporta una sintetica descrizione delle sezioni tipo definite, che trovano completa rappresentazione negli elaborati grafici di progetto. Per la distribuzione delle tratte di applicazione delle diverse sezioni tipo si rimanda invece al “Profilo geotecnico – Galleria Libertinia” (Rif. [29]), “Profilo geotecnico – Galleria San Filippo” (Rif. [32]) e nel “Profilo geotecnico – Galleria Salvatore” (Rif. [37]).

## 11.2 Definizione delle sezioni tipo di avanzamento

### 11.2.1 Galleria Libertinia - Sezione C2p\*

La sezione C2p\* prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 8 m, e l’impiego della centina puntone come rivestimento provvisorio in arco rovescio. Ne è prevista l’applicazione come sezione prevalente per tutto lo sviluppo della galleria, dato il comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C) e l’entità dei fenomeni deformativi che impongono la messa in opera del rivestimento di prima fase per l’intero profilo di scavo.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2p\*, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 25 VTR, L=24 m (sovrapposizione minima pari a 16 m) cementati in foro con miscele cementizie. L’incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 43 VTR, L=20 m (sovrapposizione minima 10 m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina. L’incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 8 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e centina singola HEB240 con passo  $1m \pm 20\%$  anche in arco rovescio.;
- arco rovescio (spessore 1.0 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,9 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 11.2.2 Galleria Libertinia - Sezione C2

La sezione C2 prevede interventi di preconsolidamento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 10m; ne è prevista l’applicazione laddove la formazione del Terravecchia (TVR) presenti caratteristiche meccaniche nell’estremo superiore del campo di valori individuati nella caratterizzazione geotecnica (cfr. § 9.4)

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

e i fenomeni deformativi misurati in fase di scavo siano al di sotto dei valori attesi della sezione C2p\*. Pertanto è definita, per tutto lo sviluppo della galleria, come sezione eventuale.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 25 VTR, L=18m (sovrapposizione minima 8 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 41VTR, L=15m (sovrapposizione minima 5m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10m;
- priverivestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e centine HEB200 con passo 1m  $\pm 20\%$ ;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,80 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 11.2.3 Galleria San Filippo - Sezione C2p

La sezione C2p prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 10 m, e l'impiego della centina puntone come rivestimento provvisorio in arco rovescio. Ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente per tutto lo sviluppo della galleria, dato il comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C) e l'entità dei fenomeni deformativi che impongono la messa in opera del rivestimento di prima fase per l'intero profilo di scavo.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2p, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 35 VTR, L=24 m (sovrapposizione minima 14 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- preconsolidamento al contorno realizzato mediante 43 VTR, L=20 m (sovrapposizione minima 10 m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10 m;
- priverivestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e centina singola HEB240 con passo 1 m  $\pm$  20% anche in arco rovescio.;
- arco rovescio (spessore 1 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,90 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

#### 11.2.4 Galleria San Filippo - Sezione C2

La sezione C2 prevede interventi di preconsolidamento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 8.0 m; ne è prevista l'applicazione laddove la formazione del Terravecchia (TRV) presenti caratteristiche meccaniche nell'estremo superiore del campo di valori individuati nella caratterizzazione geotecnica (cfr. § 9.3) e i fenomeni deformativi misurati in fase di scavo siano al di sotto dei valori attesi della sezione C2p. E' definita, per tutto lo sviluppo della galleria, come sezione eventuale.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 35 VTR, L=20m (sovrapposizione minima 12 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm$ 20%;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 41 VTR, L=15 m (sovrapposizione minima 8 m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm$ 20%;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 8 m;
- priverivestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,80 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

#### 11.2.5 Galleria Salvatore - Sezione A2

La Sezione A2 prevede interventi di contenimento del cavo tramite centine e spritz-beton e bullonatura radiale; può essere impiegata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte stabile (categoria A). Ne è prevista

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

l'applicazione come sezione prevalente nei tratti all'interno delle Argille ed Arenarie di Catenanuova dove la facies arenacea risulta prevalente, con GSI pari a 50 (valore massimo del range individuato) a cui può essere associato un grado di fratturazione medio, comunque tale da rendere necessario l'utilizzo di sostegni puntuali.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione A2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- scavo a piena sezione per singoli sfondi di dimensioni massime 2,40 m;
- chiodatura radiale mediante 14/15 chiodi ad ancoraggio continuo Ø24 disposti in raggiere alternate, lunghezza 6,00 m, interasse longitudinale 1,20 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1,20 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,80 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,70 cm) gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.

### 11.2.6 Galleria Salvatore - Sezione B1

La Sezione B1 è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e presostegno al contorno, con campi di avanzamento da 8,5 m; ne è prevista l'applicazione nella formazione delle Argille e Arenarie di Catenanuova nelle tratte caratterizzate da transizione litologica tra le due litofacies, e nelle tratte in cui le arenarie sono caratterizzate da GSI pari a 35 (limite inferiore del range individuato), a cui può essere associato un grado di fratturazione elevato.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B1, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 30 elementi strutturali in VTR, L=14.5 m (sovrapposizione minima 60 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm$ 20%; la distribuzione degli elementi in VTR potrà essere adattata in corso d'opera per interessare la sola porzione pelitica del fronte o per prevenire distacchi localizzati;
- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 33 tubi in acciaio, L=12 m (sovrapposizione minima 3,5 m, interasse 0,4 m);
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 8,5 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

- calotta in calcestruzzo armato (spessore variabile da 0,50 m a 1,15 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

### 11.2.7 Galleria Salvatore - Sezione B2

La sezione B2 è prevista come sezione eventuale nell'attraversamento delle Argille e Arenarie di Catenanuova nella litofacies argillosa, in presenza di scenari favorevoli, quindi dove si riscontri un materiale con buone caratteristiche meccaniche (cfr. § 9.4), tali da consentire un comportamento del nucleo-fronte stabile a breve termine (categoria B) e dove i fenomeni deformativi misurati in fase di scavo siano al di sotto dei valori attesi della sezione C2.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione B2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 50 elementi strutturali in VTR, L=20m (sovrapposizione minima 8m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 12 m;
- priverivestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1 m  $\pm 20\%$ ;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,80 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

### 11.2.8 Galleria Salvatore - Sezione C2

La sezione C2 prevede interventi di preconsolidamento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 10 m; ne è prevista l'applicazione come sezione prevalente in tutta la porzione di galleria che attraversa la litofacies pelitica della formazione delle Argille ed Arenarie di Catenanuova avente caratteristiche meccaniche tali da restituire un comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C), con copertura medio-alta.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 50 VTR, L=20.0 m (sovrapposizione minima 10.0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> RS3E	<b>LOTTO</b> 50 D 07	<b>CODIFICA</b> RH	<b>DOCUMENTO</b> GN0000 001	<b>REV.</b> A	<b>FOGLIO</b> 61 di 77

- preconsolidamento al contorno realizzato mediante 51 VTR, L=16.0 m (sovrapposizione minima 6.0 m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 8+8 elementi strutturali in VTR al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 30 cm di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN200 con passo 1.00 m  $\pm 20\%$ ;
- arco rovescio (spessore 1 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,90 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 11.2.9 Galleria Salvatore - Sezione C2v

La Sezione C2v è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno e interventi di presostegno al contorno, con campi di avanzamento da 8,5 m. Ne è prevista l'applicazione nel caso in cui all'interno della facies argillosa (AAC) si attraversino strati di materiale arenaceo e nelle zone tettonizzate. Se ne prevede l'utilizzo anche nella tratta a bassa copertura in prossimità dell'imboccato lato Catania.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2v, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 50 VTR, L=20.0 m (sovrapposizione minima 11.5 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- preconsolidamento al contorno realizzato mediante 51 VTR, L=17 m (sovrapposizione minima 8.5 m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 8+8 elementi strutturali in VTR al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ . La cementazione dei VTR al contorno potrà avvenire con miscele cementizie nel caso specifico in cui si riscontrino materiale alleuvionale in calotta in prossimità dell'imbocco lato Catania;
- presostegno al contorno (entro un angolo di  $120^\circ$  in calotta) realizzato mediante 34 tubi in acciaio valvolati, L=14.0 m (sovrapposizione minima 5.5 m, interasse 0.4 m);
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1.00 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 8.5m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 30 cm di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN200 con passo 1.00 m  $\pm 20\%$ ;
- arco rovescio (spessore 100 cm) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

- calotta in calcestruzzo armato (spessore variabile da 60 cm a 135 cm) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 11.2.10 Galleria Salvatore - Sezione C2p

La Sezione C2p prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 12 m e l'impiego della centina puntone come rivestimento provvisorio in arco rovescio. Ne è prevista l'applicazione come sezione eventuale nelle tratte in cui la galleria attraversa le Argille ed Arenarie di Catenanuova nella litofacies pelitica nella litofacies, in presenza di scenari sfavorevoli, quindi dove si riscontri un materiale con caratteristiche meccaniche all'estremo inferiore dell'intervallo individuato (cfr. paragrafo 9.3) con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C) e laddove i fenomeni deformativi misurati in fase di scavo siano al di sopra dei valori attesi della sezione C2.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2p, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 50 VTR, L=24.0 m (sovrapposizione minima 12.0 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- preconsolidamento al contorno realizzato mediante 51 VTR, L=24.0 m (sovrapposizione minima 12.0 m) cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 8+8 elementi strutturali in VTR al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1.00 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 12.0 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 30 cm di spritz-beton fibrorinforzato e centina singola HEB240 con passo 1.00 m  $\pm 20\%$ . Chiusura dell'arco rovescio provvisorio con centina puntone HEB240 con passo 1.00 m  $\pm 20\%$  e spritz-beton fibrorinforzato spessore 30 cm;
- arco rovescio (spessore 110 cm) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 0.5 diametri;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 100 cm) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 2 diametri.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

### 11.3 Rischi potenziali

Sono di seguito descritte le principali criticità, legate al contesto geologico, idrogeologico, geotecnico e ambientale, che potrebbero avere ripercussioni sulla fase realizzativa delle gallerie, e le conseguenti azione di mitigazione previste in progetto, che riassumono quanto illustrato nei precedenti paragrafi relativi alle sezioni di avanzamento. La mappatura dei diversi rischi è illustrata nell’elaborato Profilo geotecnico – Galleria Libertinia” (Rif. [29]), “Profilo geotecnico – Galleria San Filippo” (Rif. [32]) e nel “Profilo geotecnico – Galleria Salvatore” (Rif. [37]).

#### *Instabilità del fronte*

Potenziali rischi di instabilità del fronte e del cavo possono interessare sia la galleria Libertinia che la galleria San Filippo per il loro intero sviluppo date le basse coperture che le caratterizzano e la galleria Salvatore nell’attraversamento di zone fratturate e tettonizzate. In condizioni di bassa copertura, l’avanzamento avverrà con l’esecuzione di interventi di preconsolidamento al fronte e al contorno in grado di controllare lo sviluppo dei fenomeni deformativi indotti dallo scavo e prevenire lo sviluppo di eventuali meccanismi di collasso. Per l’attraversamento della zona tettonizzata della galleria Salvatore è inoltre prevista l’adozione di interventi di presostegno, abbinati ad interventi di consolidamento al fronte e/o al contorno, in relazione al grado di fratturazione.

#### *Presenza di blocchi*

La galleria Salvatore attraversa la formazione delle Argille e Arenarie di Catenanuova. Tale formazione nella facies argillosa è caratterizzata, come accertato da analisi fotointerpretative, rilievi di campo e prospezioni simiche, dalla possibile presenza di blocchi di arenarie. Nello scavo in tradizionale la presenza di blocchi non comporta particolare criticità in relazione alla flessibilità del sistema di avanzamento che può essere rapidamente adattato alle puntuali variazioni delle condizioni del fronte; sono inoltre previste soluzioni progettuali con sistemi di presostegno al contorno.

#### *Transizione litologica*

Nelle Argille ed Arenarie di Catenanuova, la litofacies pelitica (AAC) presenta intercalazioni arenacee, mentre la litofacies arenacea (AACa) sono presenti passaggi di argilliti e argille marnose. Pertanto, in fase di scavo nella galleria Salvatore sono possibili transizioni rapide e non prevedibili o fronti misti, con litologie aventi caratteristiche molto diverse. Le transizioni litologiche non comportano particolare criticità: la flessibilità caratteristica del sistema di avanzamento in tradizionale permetterà l’adozione delle soluzioni previste in progetto che consentono di adattarsi e di gestire l’eterogeneità dei materiali al fronte.

#### *Fenomeni deformativi*

La formazione di Terravecchia nella litofacies argillo-limoso (TRV) (galleria S. Filippo) e la formazione di Catenanuova nella facies pelitica (AAC) (galleria Salvatore) presentano caratteristiche meccaniche tali da rendere possibile lo sviluppo di convergenze elevate durante la fase di scavo, che sono controllate con l’adozione di interventi di precontenimento al fronte e al contorno e con l’installazione della centina puntone in arco rovescio. Le due formazioni suddette non presentano spiccate caratteristiche rigonfianti (cfr. §9.4).

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

Per ciò che concerne la litofacies argillosa con struttura brecciata (TRVb) della formazione di Terravecchia le evidenze sperimentali mostrano una leggera tendenza a rigonfiamento delle argille con struttura brecciata. Tale fenomeno è stato tenuto in conto nel dimensionamento dei rivestimenti definitivi.

### *Venute d'acqua in galleria e carichi idraulici elevati*

Il potenziale rischio di venute d'acqua concentrate e con portate significative in galleria in fase di scavo dipende dalla conducibilità idraulica dei materiali attraversati e dal carico idraulico. Tale rischio è stato stimato nullo/basso per gran parte dello sviluppo delle gallerie, dato che si attraversano prevalentemente formazioni argillose con permeabilità molto bassa ( $k < 10^{-8}$  m/s), fatta eccezione per la tratta di scavo nella litofacies arenacea delle Argille di Catenanuova, dove il rischio è stato considerato basso/medio, dato che l'ammasso presenta in tali zone permeabilità maggiori ( $k < 10^{-6}$  m/s). Sono comunque previsti drenaggi al fronte per la fase di scavo, per consentire l'avanzamento in sicurezza.

### *Esposizione ambientale e attacco chimico*

Per la valutazione della classe di esposizione del calcestruzzo impiegato per i rivestimenti definitivi delle opere in sotterraneo, sono state eseguite prove per la determinazione della concentrazione degli eventuali agenti aggressivi presenti nelle acque e nei terreni, facendo riferimento alla UNI-EN 206-2016, che definisce gli intervalli di concentrazione dei composti aggressivi (ad es. ione solfato  $SO_4^-$  nei terreni e nelle acque, ione ammonio  $NH_4^+$  e ione magnesio  $Mg^{++}$  nelle acque, presenza di  $CO_2$  aggressiva nelle acque e ambiente acido ( $ph \leq 6.5$ )) ai quali riferirsi per la determinazione della classe di esposizione (Figura 46).

Table 2 — Limiting values for exposure classes for chemical attack from natural soil and ground water

Chemical characteristic	Reference test method	XA1	XA2	XA3
<b>Ground water</b>				
$SO_4^{2-}$ mg/l	EN 196-2	$\geq 200$ and $\leq 600$	$> 600$ and $\leq 3\,000$	$> 3\,000$ and $\leq 6\,000$
pH	ISO 4316	$\leq 6,5$ and $\geq 5,5$	$< 5,5$ and $\geq 4,5$	$< 4,5$ and $\geq 4,0$
$CO_2$ mg/l aggressive	EN 13577	$\geq 15$ and $\leq 40$	$> 40$ and $\leq 100$	$> 100$ up to saturation
$NH_4^+$ mg/l	ISO 7150-1	$\geq 15$ and $\leq 30$	$> 30$ and $\leq 60$	$> 60$ and $\leq 100$
$Mg^{2+}$ mg/l	EN ISO 7980	$\geq 300$ and $\leq 1\,000$	$> 1\,000$ and $\leq 3\,000$	$> 3\,000$ up to saturation
<b>Soil</b>				
$SO_4^{2-}$ mg/kg <sup>a</sup> total	EN 196-2 <sup>b</sup>	$\geq 2\,000$ and $\leq 3\,000^c$	$> 3\,000^c$ and $\leq 12\,000$	$> 12\,000$ and $\leq 24\,000$
Acidity according to Baumann Gully ml/kg	prEN 16502	$> 200$	Not encountered in practice	
<sup>a</sup> Clay soils with a permeability below $10^{-5}$ m/s may be moved into a lower class. <sup>b</sup> The test method prescribes the extraction of $SO_4^{2-}$ by hydrochloric acid; alternatively, water extraction may be used, if experience is available in the place of use of the concrete. <sup>c</sup> The 3 000 mg/kg limit shall be reduced to 2 000 mg/kg, where there is a risk of accumulation of sulfate ions in the concrete due to drying and wetting cycles or capillary suction.				

Figura 46 – Prospetto 2 della UNI-EN 206 del 2016

Per la Galleria Libertinia i risultati delle analisi di laboratorio (Tabella 11 e Tabella 12) forniscono concentrazioni dei composti aggressivi corrispondenti a classi di esposizione ambientale da debolmente aggressive (XA1) a aggressive (XA2).

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

**Tabella 11 Risultati delle analisi chimiche per la verifica dell'aggressività sul calcestruzzo (analisi dei terreni)**

Sondaggio	Profondità	SO4	Classe Di Esposizione
	(m)	[mg/Kg]	
5_GN01	7.5	3272	XA2
5_GN01	15.3	2631	XA1
5_GN01	24.4	739	XA1
5_GN03	35.3	3961	XA2
5_GN03	42.8	3807	XA2

**Tabella 12 Risultati delle analisi chimiche per la verifica dell'aggressività sul calcestruzzo (analisi delle acque)**

Parametro	Metodo di riferimento	Unità di misura	5_GN01	
			Risultato	Classe di Esposizione
pH	ISO 4316	unità di pH	7.8	XA1
Solfati	EN 196-2	mg/L	2995	XA2
Magnesio	ISO 7150-1	mg/L	136	XA1
Azoto ammoniacale	EN ISO 7980	mg/L	<0.1	XA1
CO2 aggressiva	EN 13577	mg(CO <sub>2</sub> )/L	<0.2	XA1

Pertanto, per la galleria Libertinia si prevedono condizioni di esposizione di classe XA2. Per il dettaglio delle classi di esposizione previste lungo il tracciato si rimanda ai "Profilo geotecnico – Galleria Libertinia" (Rif. [29]).

Per la Galleria San Filippo i risultati delle analisi di laboratorio (Tabella 13 e Tabella 14) forniscono concentrazioni dei composti aggressivi corrispondenti a classi di esposizione ambientale da debolmente aggressive (XA1) a aggressive (XA3).

**Tabella 13 Risultati delle analisi chimiche per la verifica dell'aggressività sul calcestruzzo (analisi dei terreni)**

Sondaggio	Profondità	SO4	Classe Di Esposizione
	(m)	[mg/Kg]	
5_S1gn	23	1199	XA1
5_S1gn	33	739	XA1

**Tabella 14 Risultati delle analisi chimiche per la verifica dell'aggressività sul calcestruzzo (analisi delle acque)**

Parametro	Metodo di riferimento	Unità di misura	5_Sgnpz		5_S1gn	
			Risultato	Classe di Esposizione	Risultato	Classe di Esposizione
pH	ISO 4316	unità di pH	6.8	XA1	7.5	XA1
Solfati	EN 196-2	mg/L	3039	XA3	2017	XA2

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Magnesio	ISO 7150-1	mg/L	222	XA1	144	XA1
Azoto ammoniacale	EN ISO 7980	mg/L	<0.1	XA1	<0.1	XA1
CO2 aggressiva	EN 13577	mg(CO <sub>2</sub> )/L	<0.2	XA1	<0.2	XA1

Pertanto, per la galleria San Filippo si prevedono condizioni di esposizione di classe XA3. Per il dettaglio delle classi di esposizione previste lungo il tracciato si rimanda ai “Profilo geotecnico – Galleria San Filippo” (Rif. [32]).

Per la Galleria Salvatore risultati delle analisi di laboratorio (Tabella 15 e Tabella 16) forniscono concentrazioni dei composti aggressivi corrispondenti a classi di esposizione ambientale da debolmente aggressive (XA1) a moderatamente aggressive (XA2).

**Tabella 15 Risultati delle analisi chimiche per la verifica dell’aggressività sul calcestruzzo (analisi dei terreni)**

Sondaggio	Profondità	SO4	Classe Di Esposizione
	(m)	[mg/Kg]	
5_S2gn	18	5735	XA2
5_S2gn	28	3306	XA2
5_S3gn	65	2504	XA1
5_S3gn	75	1942	XA1

**Tabella 16 Risultati delle analisi chimiche per la verifica dell’aggressività sul calcestruzzo (analisi delle acque)**

Parametro	Metodo di riferimento	Unità di misura	5_S2gn		5_S3gn	
			Risultato	Classe di Esposizione	Risultato	Classe di Esposizione
pH	ISO 4316	unità di pH	7.8	XA1	8.9	XA1
Solfati	EN 196-2	mg/L	1514	XA2	1372	XA2
Magnesio	ISO 7150-1	mg/L	94.9	XA1	80.6	XA1
Azoto ammoniacale	EN ISO 7980	mg/L	<0.1	XA1	<0.1	XA1
CO2 aggressiva	EN 13577	mg(CO <sub>2</sub> )/L	<0.2	XA1	<0.2	XA1

Pertanto, per la galleria Salvatore si prevedono condizioni di esposizione di classe XA2. Per il dettaglio delle classi di esposizione previste lungo il tracciato si rimanda ai “Profilo geotecnico – Galleria Salvatore” (Rif. [37]).

Il rischio di attacco chimico è gestito con l’adozione dei provvedimenti previsti dalle norme UNI-EN 206, UNI 11104, UNI 11417-1 e UNI 9156. In particolare, si riportano di seguito (Figura 47) le indicazioni della UNI 11104, che definisce le misure preventive da adottare in termini di massimo rapporto acqua/cemento (a/c), minima classe di resistenza e minimo contenuto in cemento (kg/m<sup>3</sup>). Per le classi di esposizione XA1, XA2 e

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

XA3 è inoltre da prevedere l'impiego di cementi resistente ai solfati secondo le indicazioni della UNI 11417. Per i dettagli si rimanda all'elaborato "Caratteristiche dei materiali".

UNI 11104:2016	Valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo																		
	Nessun rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotte dalla carbonatazione				Corrosione delle armature indotte da cloruri						Attacchi da cicli di gelo/disgelo				Ambiente aggressivo per attacco chimico			
						Acqua di mare			Cloruri provenienti da altre fonti										
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
Massimo rapporto a/c	-	0,60		0,55	0,50	0,50	0,45		0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45		0,55	0,50	0,45	
Minima classe di resistenza	C12/15	C25/30	C30/37	C32/40	C32/40	C35/45			C30/37	C32/40	C35/45	C32/40	C25/30	C30/37	C30/37	C32/40	C32/40	C35/45	
Minimo contenuto in cemento (kg/m <sup>3</sup> )	-	300		320	340	340	360		320	340	360	320	340	360		320	340	360	
Contenuto minimo in aria (%)												b)	4,0 a)						
Altri requisiti							E' richiesto l'utilizzo di cementi resistenti all'acqua di mare a secondo UNI 9156						E' richiesto l'utilizzo di aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo				In caso di esposizione a terreno o acqua del terreno contenente solfati nei limiti del prospetto 2 della all'acqua di mare adeguata resistenza al UNI EN 206:2014, è richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati. c)		

a) Quando il calcestruzzo non contiene aria inglobata, le sue prestazioni devono essere verificate rispetto ad un calcestruzzo aerato per il quale è provata la resistenza al gelo/disgelo, da determinarsi secondo UNI CENrS 12390 -9, UNI CENrR 15177 0 UNI 7087 per la relativa classe di esposizione. 11 valore minima di aria inglobata del 4% può ritenersi adeguato per calcestruzzi specificati con b) Dupper >20mm; per Dupper inferiori il limite minima andrà opportunamente aumentato (ad esempio 5% per Dupper tra 12 mm e 16 mm). Qualora si ritenga opportuno impiegare calcestruzzo aerato anche in classe di esposizione XF1 si adottano le specifiche di composizione prescritte per le classi XF2 e XF3.  
c) Cementi resistenti ai solfati sono definiti dalla UNI EN 197-1 e su base nazionale dalla UNI 9156. La UNI9156 classifica i cementi resistenti ai solfati in tre classi: moderata, alta e altissima resistenza soffiata. La classe di resistenza soffiata del cemento deve essere prescelta in relazione alla classe di esposizione del calcestruzzo secondo il criterio di corrispondenza della UNI 11417-1.  
d) Quando si applica il concetto di valore k il rapporto massimo a/c e il contenuto minima di cemento sono calcolati in conformità al punto 5.2.2.

Figura 47 – Classe di esposizione secondo la UNI 11104-2016

### Presenza di corpi in frana in superficie

L'imbocco lato Palermo della Galleria Salvatore ricade in corrispondenza della parte bassa di un versante interessato da crolli puntuali di ridotte dimensioni. Si tratta di crolli connessi con il distacco di blocchi fratturati e massi di arenaria della formazione AACa con dimensioni generalmente inferiori a 1 m (Rif. [16]).

Sono previste operazioni di disaggio e interventi di stabilizzazione dei blocchi intsbabili consistenti in: chiodatura dei blocchi, strato di spritz-beton armato con rete elettrosaldata.

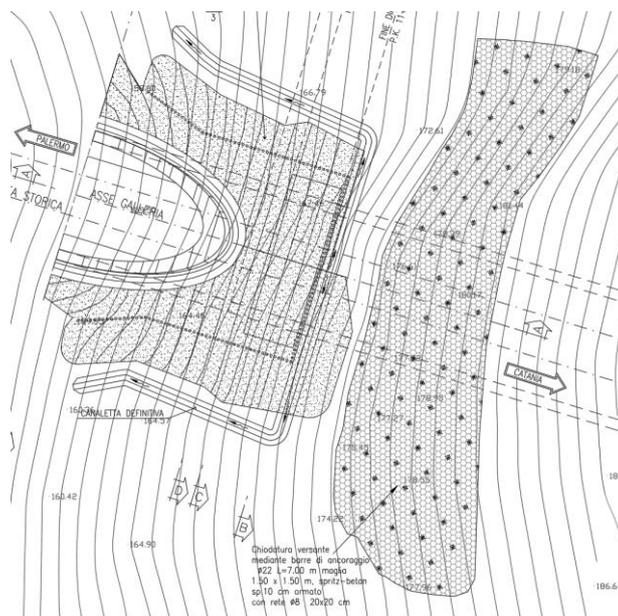


Figura 48 Galleria Salvatore – Imbocco lato Palermo – Intervento di consolidamento del versante

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

La galleria Salvatore attraversa un rilievo di modeste dimensioni che, ad una distanza compresa tra i 100 e 150 m dall'imbocco lato Catenanuova, è caratterizzato dalla presenza di un versante al cui piede corre a mezza costa la linea storica della tratta Sparagogna-Catenanuova (km 193+000/400). Le analisi fotointerpretative e i rilievi di campo condotti hanno evidenziato, per il versante in questione, la presenza di crolli puntuali e fenomeni di deformazioni visco-plastiche molto lente (Rif. [16]). I fenomeni di crollo puntuali sono dovuti al distacco di porzioni di blocchi fratturati e massi di arenaria che si rinvergono inglobati nella matrice argillosa della formazione AAC affiorante nella zona, mentre le deformazioni visco-plastiche caratterizzano la matrice argillosa della stessa formazione.

Il versante è stato oggetto di un intervento di messa in sicurezza da parte di RFI atto a mitigare il rischio di naturali crolli che potrebbero interessare la linea storica che corre a mezza costa al piede del versante.



**Figura 49 – Versante linea storica km 193+000/400 tratta Sparagogna-Catenanuova**

I fenomeni di crollo puntuali e le deformazioni visco-plastiche della matrice argillosa non interferiscono con le opere della linea ferroviaria in progetto. La galleria Salvatore dista dal versante soggetto ai fenomeni precedentemente descritti circa 45÷67 m in corrispondenza delle sezioni maggiormente rappresentative (Figura 50, Figura 51 Figura 52 e Figura 53), quindi sia in termini di rapporti geometrici, sia in funzione della natura geotecnica della formazione attraversata, della metodologia di scavo prevista e delle sezioni di scavo e consolidamenti adottate, si è verificato che non esiste interazione reciproca deformativa tra lo scavo della galleria Salvatore e il versante.

Ad ogni modo è necessario prevedere l'adozione di metodi di scavo a basso impatto e un monitoraggio vibrazionale durante la fase di realizzazione della galleria. E' inoltre previsto un sistema di monitoraggio geotecnico (Rif. [44]) costituito da un assestometro e un inclinometro, di lunghezza 40 m, atti al controllo delle deformazioni indotte dallo scavo della galleria naturale e dell'area di influenza dello scavo stesso.

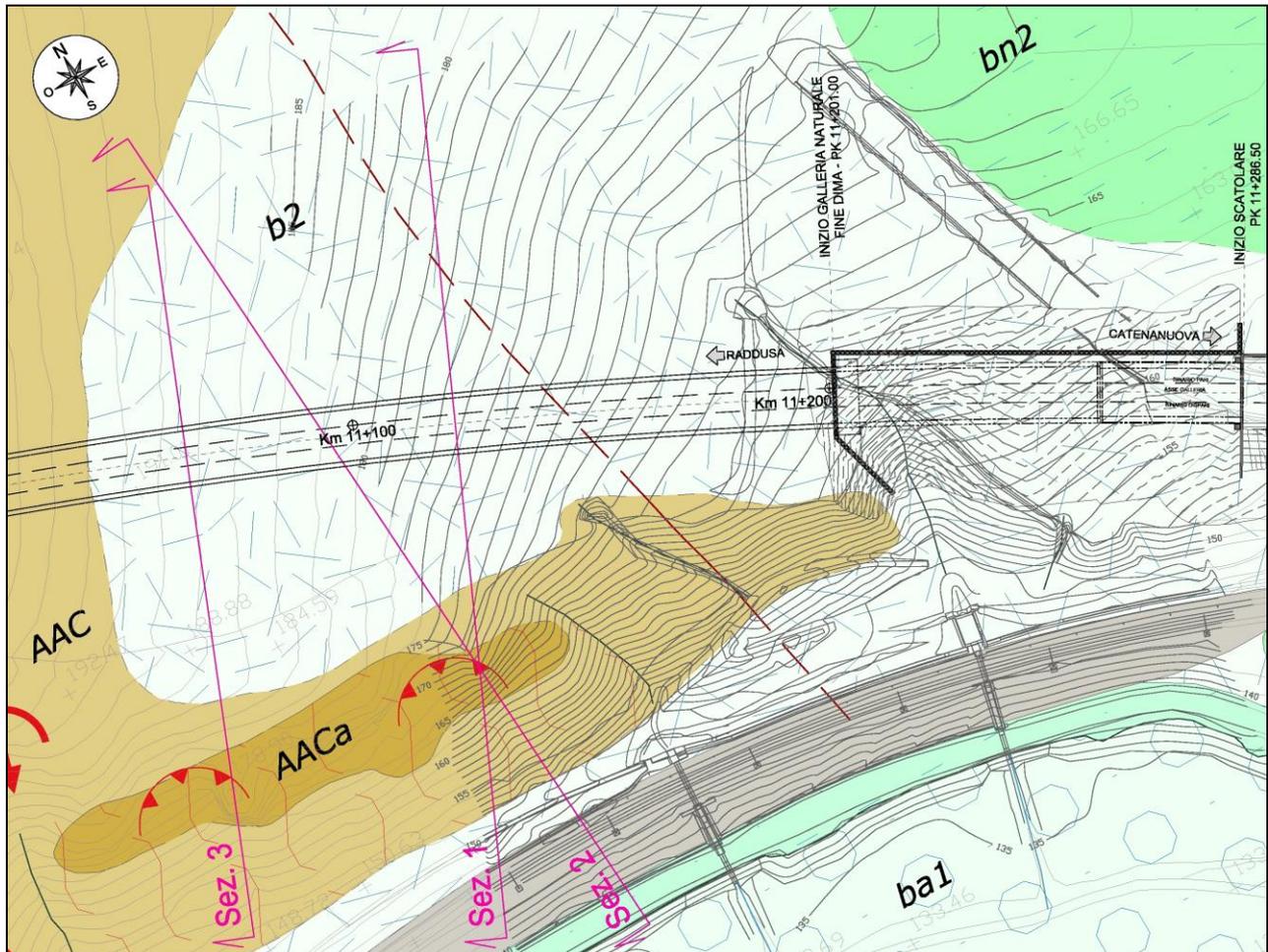
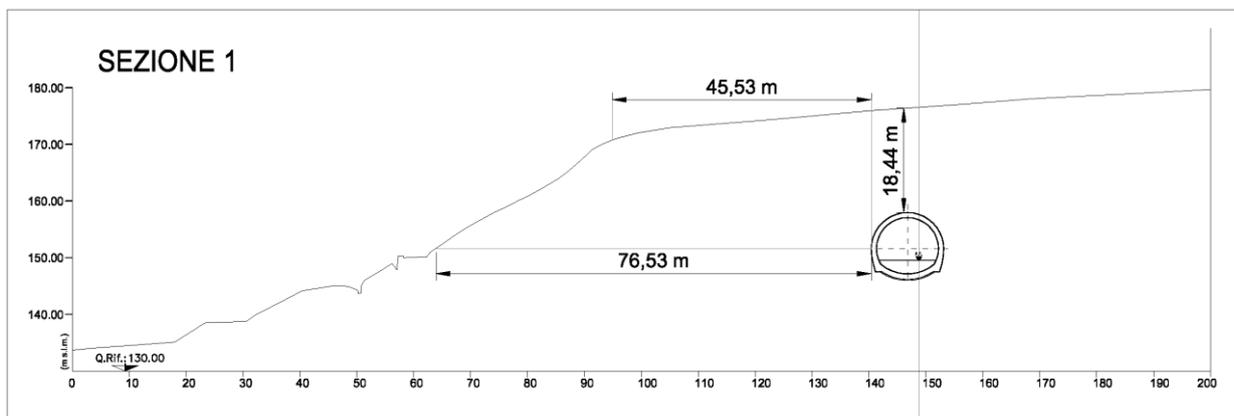


Figura 50 Versante linea storica km 193+000/400 - Inquadramento planimetrico



	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

Figura 51 Versante linea storica km 193+000/400 e Galleria Salvatore- Sezione trasversale 1

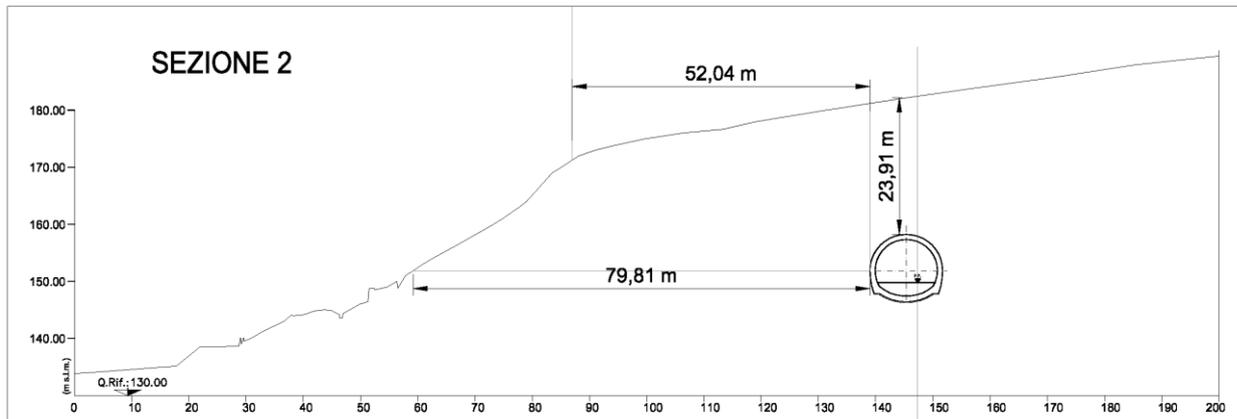


Figura 52 Versante linea storica km 193+000/400 e Galleria Salvatore- Sezione trasversale 2

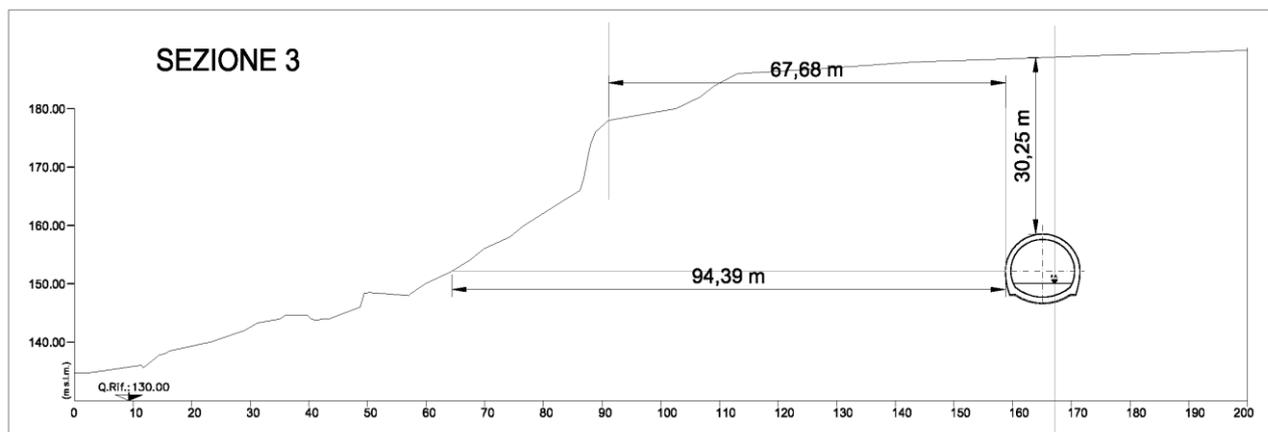


Figura 53 Versante linea storica km 193+000/400 e Galleria Salvatore- Sezione trasversale 3

### Presenza di gas

Alla luce delle formazioni attraversate dalle gallerie in progetto, è stata affrontata la problematica inerente la possibilità di intercettare gas naturali nel corso delle fasi di scavo delle opere in sotterraneo.

Preliminarmente, è stata condotta un'analisi bibliografica e storica volta a verificare, in relazione alle differenti unità geologiche individuate e direttamente interessate dal progetto, l'eventuale presenza di termini geologici favorevoli alla presenza di gas. In funzione delle formazioni attraversate, l'analisi è stata rivolta alla presenza in particolare di gas metano (CH<sub>4</sub>), inodore, incolore e privo di sapore, di estrema mobilità e facilmente infiammabile.

La letteratura specialistica indica che, anche a poca distanza dalle tre opere, sono presenti sinclinali ed anticlinali, geo-strutture che possono essere ricondotte a potenziali trappole metanifere. A pochi km dalle tre

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

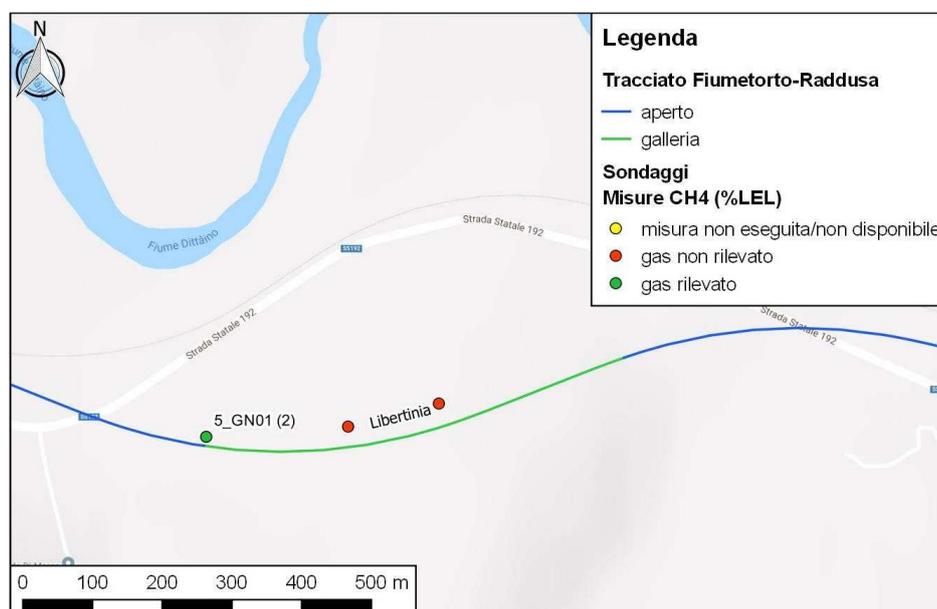
gallerie ed in un contesto geo-strutturale analogo, sono numerosi i segni della presenza del metano nel sottosuolo:

- numerose manifestazioni spontanee di metano, in superficie (Maccalube, pozzi d'acqua, ecc.);
- miniere di zolfo in cui si è rilevata presenza di metano;
- la galleria idraulica Lago Ancipa durante la cui costruzione l'innesco di grisù ha determinato la morte di tredici lavoratori;
- i campi gas di Gagliano e Bronte – S. Nicola, all'interno dei quali ben 46 pozzi attualmente erogano gas, ed il permesso di ricerca Paternò;
- diversi pozzi con mineralizzazioni a gas fuori dai campi gas principali, distribuiti un po' dovunque, alcuni produttivi ed altri che, pur se industrialmente sterili, hanno fatto registrare gas in tracce.

Sono state quindi condotte indagini di approfondimento, quali:

- rilievi di gas a bocca foro durante la perforazione dei sondaggi;
- monitoraggio dell'aria mediante analizzatore di gas a bocca foro in corrispondenza delle verticali di sondaggio.

Per la galleria Libertinia è stato rilevato gas a boccaforo di uno (5\_GN01) dei sondaggi realizzati lungo il tracciato (Figura 54) e a pochi km dalla galleria, in un contesto geologico analogo, si incontrano innumerevoli evidenze della presenza di idrocarburi nel sottosuolo.



**Figura 54 Galleria Libertinia: ubicazione dei sondaggi in cui si è rilevata presenza di metano**

Per la galleria San Filippo è stato rilevato gas a boccaforo di uno (D14) dei sondaggi realizzati lungo il tracciato (Figura 55) e l'emissione di metano è stata registrata nell'attraversamento di livelli sabbiosi intercalati a livelli impermeabili.

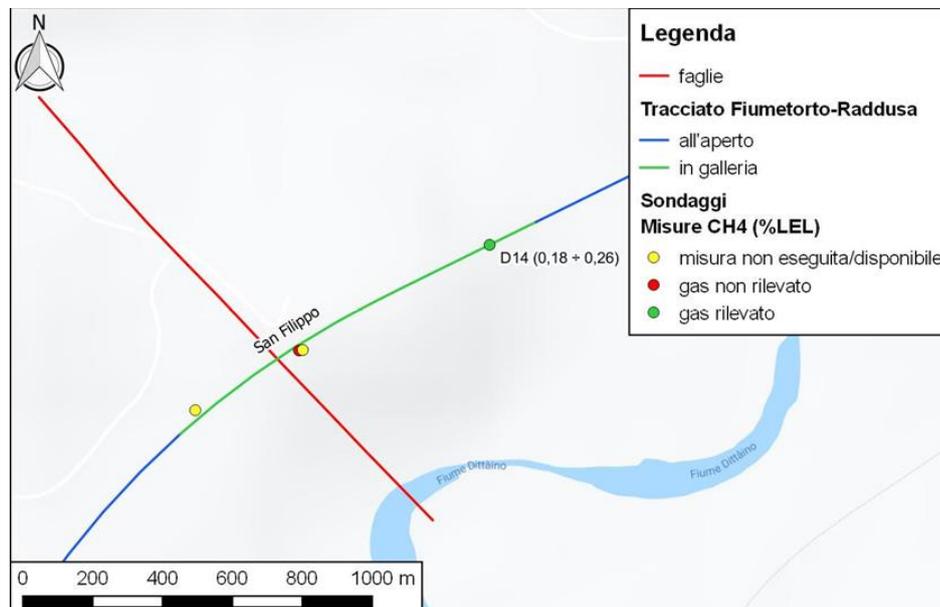


Figura 55 Galleria San Filippo: ubicazione dei sondaggi in cui si è rilevata presenza di metano

Per la galleria Salvatore le stratigrafie dei sondaggi lungo il tracciato mostrano alternanze di livelli impermeabili (argille limose) e livelli permeabili (arenarie e marne argillose fratturate). Questi ultimi possono rappresentare potenziali trappole metanifere, se sovrastati da copertura impermeabili, considerata anche la struttura a falde piegate che caratterizza il sottosuolo. Le arenarie sono talora tettonizzate, brecciate, con superfici traslucide sui piani di rottura. Inoltre, sono presenti 5 faglie lungo il tracciato ed altre circostanti, con orientazione parallela alla galleria (Figura 56).

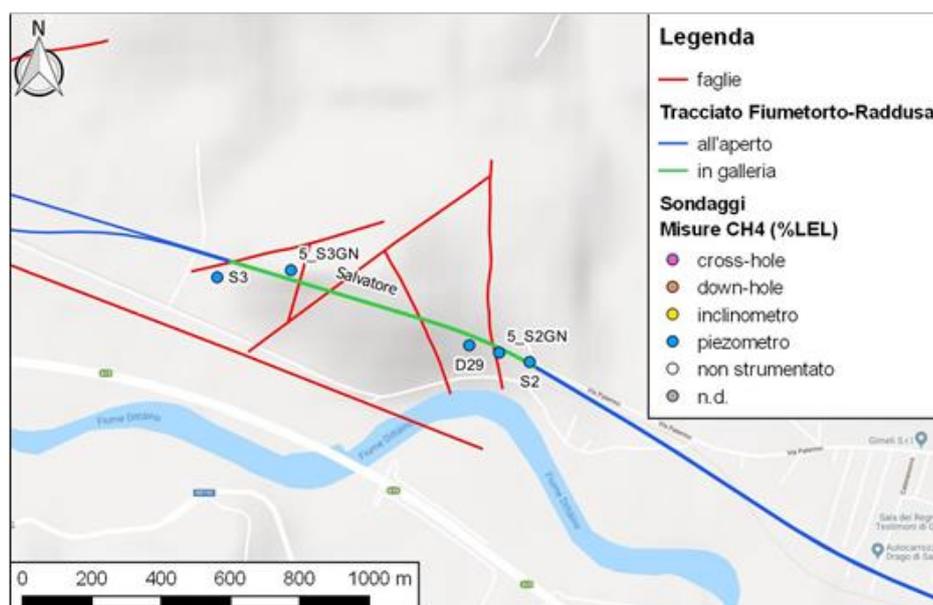


Figura 56 Galleria Salvatore: ubicazione dei sondaggi e sistema di faglie

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO <b>50 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN0000 001</b>	REV. <b>A</b>

Un valido strumento che può essere utilizzato per l'approccio al problema legato alla presenza di gas in galleria è rappresentato dal documento “Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a edizione”, recentemente aggiornato come “Linea Guida n°3, Scavi in sotterraneo con metodo a piena sezione e tecnica tradizionale in terreni grisutosi” (Rif. [23] e Rif. [24]).

In queste linee guida l'eventualità di rinvenire metano in galleria è differenziata in diverse classi, in base al numero ed al peso attribuito ai parametri che concorrono a caratterizzare la formazione interessata dallo scavo della galleria. In funzione dei risultati derivanti dall'analisi bibliografica e storica e dalle indagini di approfondimento, è stato possibile associare, quindi, a tutte e tre le gallerie del lotto in oggetto una classe di rischio gas 2.

**Tabella 17 – Classe di rischio gas di appartenenza**

<b>classe</b> <b>2</b>	Gallerie/tratti per le quali le indagini bibliografiche, storiche (storicità delle manifestazioni spontanee e degli interventi industriali per la produzione di idrocarburi, dei fenomeni registrati nell'esecuzione di altre opere) e le indagini sperimentali di superficie e profonde (sondaggi, pozzi, cunicoli, indagini geofisiche, ecc.), fanno ritenere che, a causa della realizzazione degli scavi, siano probabili afflussi significativi di grisù in galleria in corrispondenza di strutture geologiche, tecnicamente note come potenziali trappole di idrocarburi (anticlinali, fasce di intensa fratturazione in corrispondenza delle zone di accavallamento tettonico, ecc.). Attraversando le trappole, o comunque a causa del collegamento idraulico con esse realizzato a seguito dello scavo, sono da attendersi flussi di grisù continui oppure discontinui ma con frequenza tale da non farli ritenere un evento eccezionale.
---------------------------	--

Per le misure di sicurezza da adottare in fase di scavo e per gli interventi atti a mitigare il rischio di presenza di gas nella fase di realizzazione delle gallerie, si rimanda al Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> RS3E	<b>LOTTO</b> 50 D 07	<b>CODIFICA</b> RH	<b>DOCUMENTO</b> GN0000 001	<b>REV.</b> A	<b>FOGLIO</b> 74 di 77

## 12 FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO

### 12.1 Criteri generali per l'applicazione delle sezioni tipo

Sono di seguito illustrati i criteri che dovranno essere adottati in corso d'opera per l'applicazione delle sezioni tipo e la gestione delle variabilità, nell'ambito delle previsioni del progetto, che sono sintetizzate nei valori attesi delle grandezze caratteristiche. Per i valori attesi dei fenomeni deformativi al fronte, al cavo e al piano campagna (ove pertinente), si rimanda alle specifiche relazioni di calcolo delle gallerie naturali (Rif. [27], Rif. [30], Rif. [35]).

In corso d'opera, i rilievi del fronte e i dati di monitoraggio della risposta deformativa del fronte e del cavo, correlati alle fasi di avanzamento, sono confrontati con le previsioni progettuali (i valori attesi) per consentire la verifica e la messa a punto del progetto con i criteri di seguito descritti:

1. Le condizioni geologiche e geotecniche rilevabili al fronte corrispondono con lo scenario prevalente previsto in progetto e la risposta deformativa rientra nel campo dei valori attesi: la previsione progettuale è confermata, si procede con la sezione tipo prevalente prevista per la tratta.
2. La risposta deformativa non rientra nel campo di accettabilità dei valori soglia, rispetto ai valori attesi, definito in progetto: la sezione tipo prevalente prevista per la tratta è ottimizzata secondo le definite variabilità, che consistono in: aumento/diminuzione ( $\pm 20\%$ ) degli interventi di preconsolidamento, diminuzione/aumento dell'interasse delle centine ( $\pm 20\%$  del passo medio), diminuzione/aumento delle distanze del rivestimento definitivo dal fronte di scavo.
3. Le condizioni geologiche e geotecniche osservate sono differenti da quelle ipotizzate come scenario prevalente e la risposta deformativa non rientra nel campo di accettabilità definito in progetto: si passa ad una diversa sezione tipo, tra quelle definite in progetto come "sezioni eventuali" per quella tratta.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
	RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO	COMMESSA RS3E	LOTTO 50 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN0000 001	REV. A

## 12.2 Monitoraggio in corso d'opera

Nella fase realizzativa dovrà essere posto in opera un adeguato programma di monitoraggio, volto a verificare gli effetti indotti dalla realizzazione degli imbocchi ed in particolare delle gallerie naturali, in considerazione delle sezioni di scavo e consolidamento previste, ottimizzandole nell'ambito delle variabilità indicata in progetto.

Con riferimento, quindi, alla realizzazione degli imbocchi, in sintesi il programma di monitoraggio dovrà prevedere:

- monitoraggio piezometrico per la misura della variazione della quota di falda nelle aree prospicienti alle paratie di imbocco;
- monitoraggio inclinometrico per la misura degli spostamenti orizzontali delle paratie e del terreno limitrofo;
- monitoraggio degli spostamenti delle paratie mediante mire ottiche disposte sull'opera di sostegno;
- monitoraggio delle sollecitazioni indotte dallo scavo sui tiranti mediante celle di carico;

Con riferimento alle tratte di galleria naturale, realizzate con metodo di scavo tradizionale, il programma di monitoraggio dovrà prevedere:

- il rilievo analitico e speditivo del fronte di scavo;
- il controllo della convergenza del cavo, mediante installazione di stazioni di convergenza con mire ottiche;
- il controllo dell'estrusione del fronte, mediante installazione di estrusometri in avanzamento, dove previsto;
- il controllo delle deformazioni al contorno del cavo attraverso gli estensimetri multibase;
- il monitoraggio dello stato tensionale nel rivestimento di prima fase mediante celle di carico, celle di pressione e *strain-gauges*;
- il monitoraggio dello stato tensionale nel rivestimento definitivo mediante barrette estensimetriche;
- il controllo dei cedimenti del piano campagna mediante installazione di capisaldi su sezioni di livellazione topografica;
- il controllo degli spostamenti e delle deformazioni indotte dallo scavo della galleria al piano campagna mediante installazione di assesimetri e inclinometri.

Per i dettagli, la definizione delle progressive e delle frequenze di monitoraggio si rimanda agli elaborati specialistici allegati al progetto.

Il sistema di monitoraggio dovrà essere predisposto in modo tale da garantire l'esame tempestivo e continuativo dei dati rilevati e la trasmissione sistematica dei dati e delle elaborazioni, avendo precedentemente definito ed assegnato le responsabilità per la lettura, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati di monitoraggio, nonché per la loro distribuzione.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> <b>RS3E</b>	<b>LOTTO</b> <b>50 D 07</b>	<b>CODIFICA</b> <b>RH</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>GN0000 001</b>	<b>REV.</b> <b>A</b>	<b>FOGLIO</b> <b>76 di 77</b>

Le grandezze individuate come rappresentative dovranno essere rilevate e controllate con un sistema di misura che abbia un grado di precisione compatibile con i valori attesi per le grandezze sopra dette, in modo da poter essere confrontati con le previsioni progettuali (i valori attesi) al fine di consentire la verifica e la messa a punto del progetto, e la gestione delle variabilità previste.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA-CATANIA-PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA</b> <b>TRATTA DITTAINO-CATENANUOVA</b>					
<b>RELAZIONE TECNICA DELLE OPERE IN SOTTERRANEO</b>	<b>COMMESSA</b> RS3E	<b>LOTTO</b> 50 D 07	<b>CODIFICA</b> RH	<b>DOCUMENTO</b> GN0000 001	<b>REV.</b> A	<b>FOGLIO</b> 77 di 77

### 13 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse alla realizzazione delle gallerie Libertinia, San Filippo e Salvatore della tratta Dittaino - Catenanuova, nell'ambito del raddoppio ferroviario della Linea Palermo-Catania.

La progettazione delle opere in sotterraneo è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [19]), articolandosi nelle seguenti fasi:

- Fase conoscitiva (cap. 9): questa fase è stata dedicata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico di inserimento in cui sarà realizzata la galleria, considerati anche i dati relativi alle precedenti fasi progettuali, ed ha portato alla definizione del modello geotecnico di sottosuolo utilizzato per le successive fasi del progetto.
- Fase di diagnosi (cap. 10): in questa fase è stata eseguita la valutazione della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo in assenza di interventi di stabilizzazione, per la determinazione delle categorie di comportamento; sulla base delle analisi condotte, lungo il tracciato della galleria il comportamento del fronte allo scavo risulta sia di tipo stabile o stabile a breve termine (categorie A e B) sia di tipo instabile (categoria C).
- Fase di terapia (cap. 11): si prevede di realizzare lo scavo sia con metodo meccanizzato che con metodo tradizionale. Entrambe le soluzioni progettuali sono state analizzate verificandone adeguatezza ed efficacia in tutte le fasi costruttive previste ed in condizioni di esercizio.

Il progetto è completato dal piano di monitoraggio (§ 12.1) da predisporre ed attuare nella fase realizzativa, nel quale sono individuati i valori delle grandezze fisiche a cui riferirsi in corso d'opera per controllare la risposta deformativa dell'ammasso e della galleria al procedere dello scavo e verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali.