

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA**

**U.O. GALLERIE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA NUOVA ENNA – DITTAINO (LOTTO 4B)**

**ELABORATI GENERALI**

Relazione tecnica delle opere in sotterraneo

SCALA:

-

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

RS3V 40 D 07 RH GN0000 001 C

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	G. Quarzicci	Dic. 2019	R.Pizzol	Dic. 2019	F. Sparacino	Dic. 2019	A.Sciotti U.O. GALLERIE Aut. Ing. Alessandro Sciotti Ordine degli Ingegneri Roma n° 19848
B	Emissione Esecutiva	G. Quarzicci	Gen. 2020	R.Pizzol	Gen. 2020	F. Sparacino	Gen. 2020	
C	Emissione Esecutiva	G. Quarzicci	Aprile 2020	R.Pizzol	Aprile 2020	F. Sparacino	Aprile 2020	

## INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	SCOPO DEL DOCUMENTO .....	4
3	NORMATIVE E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO .....	5
4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	5
5	ALLEGATI.....	6
6	DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO.....	6
7	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	7
7.1	IL TRACCIATO E LE OPERE IN SOTTERRANEO .....	7
7.1.1	<i>Opere di imbocco.....</i>	12
7.1.2	<i>Opere per la sicurezza in galleria.....</i>	13
7.1.3	<i>Opere tecnologiche.....</i>	15
8	METODOLOGIA DI LAVORO .....	19
9	FASE CONOSCITIVA.....	20
9.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	20
9.2	ASSETTO STRUTTURALE E GEOMORFOLOGICO .....	21
9.3	INDAGINI GEOTECNICHE.....	22
9.4	CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA.....	23
9.4.1	<i>Formazione di Terravecchia – litofacies TRV .....</i>	23
9.4.2	<i>Formazione di Terravecchia – litofacies TRVa .....</i>	36
9.4.3	<i>Formazione di Terravecchia – Litofacies TRVb.....</i>	42
9.4.4	<i>Formazione delle Sabbie di Cozzo Campana (MS2) .....</i>	48
9.4.5	<i>Argille Varicolori Inferiori (AVF) .....</i>	53
9.4.6	<i>Flysch Numidico – membro di Monte Salici (FYN3/FYN3a).....</i>	61

10	FASE DI DIAGNOSI .....	71
10.1	CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO .....	71
10.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO .....	72
10.2.1	DEFINIZIONE DELLE TRATTE A COMPORTAMENTO TENSIO-DEFORMATIVO OMOGENEO .....	72
11	FASE DI TERAPIA.....	74
11.1	DEFINIZIONE DEL METODO DI SCAVO .....	74
11.2	METODO DI SCAVO TRADIZIONALE .....	74
11.2.1	<i>Sistema di impermeabilizzazione</i> .....	79
11.3	METODO DI SCAVO MECCANIZZATO.....	80
11.4	RISCHI POTENZIALI .....	83
12	FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO .....	91
12.1	SCAVO TRADIZIONALE .....	91
12.2	SCAVO MECCANIZZATO .....	91
12.3	MONITORAGGIO IN CORSO D’OPERA .....	92
13	CONCLUSIONI .....	94

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

## 1 PREMESSA

La presente relazione tecnica è parte integrante del progetto definitivo del Nuovo Itinerario Palermo – Catania, tratta Nuova Enna – Dittaino (Lotto 4b), compresa tra la Stazione di Nuova Enna (inclusa) e la stazione di Dittaino (inclusa), dal km 0+315 al km 14+935 (coincidente con la pk 172+871 circa della linea storica Palermo Catania).

## 2 SCOPO 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 alle specifiche Relazioni geotecniche e di calcolo di ciascuna opera in sotterraneo.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. C

### 3 NORMATIVE E SPECIFICHE TECNICHE DI RIFERIMENTO

- Rif. [1] Decreto Ministero delle Infrastrutture e Trasporti 17/01/2018, “Aggiornamento delle Nuove norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Rif. [2] C.S.LL.PP., Circolare n°7 del 21/01/2019, “Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al DM 14/01/2018”.
- 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 SP IFS 001 C “Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili” (21/12/2018);
- Rif. [11] RFI, doc RFI DTC SI MA IFS 001 C “Manuale di Progettazione delle opere civili” (21/12/2018);
- Rif. [12] ITALFERR, Specifica Tecnica PPA.0002403 “Linee guida per la progettazione geotecnica delle gallerie naturali” (Dicembre 2015).

### 4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- Rif. [13] Italferr, Progetto Preliminare - Dicembre 2018;
- Rif. [14] Italferr – RS3D00014RGMD0000001A, Dossier dati e requisiti di base - Maggio 2018.
- Rif. [15] U.O. Geologia – doc. RS3V40D69RGGE0001001A “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica” [Dicembre 2019];
- Rif. [16] U.O. Gallerie, doc. RS3V40D07RHGN0000001A “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo”;
- Rif. [17] U.O. Sicurezza, manutenzione e interoperabilità - “Elaborati specialistici”;
- Rif. [18] U.O. Gallerie, doc. RS3V40D07CLGA0100001A “Relazione geotecnica e di calcolo delle opere di imbocco”
- Rif. [19] U.O. Gallerie, doc RS3V40D07F5GN0100001A “Profilo geotecnico – Galleria Nuova Enna”;

- Rif. [20] U.O. Gallerie, doc RS3V40D07F5GN0200001A “Profilo geotecnico – Galleria Sicani”;
- Rif. [21] U.O. Gallerie, doc RS3V40D07F5GN0300001A “Profilo geotecnico – Galleria Dittaino”;
- Rif. [22] U.O. Gallerie, doc RS3V40D07F5GN0400001A “Profilo geotecnico – Finestra Dittaino”;
- Rif. [23] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.).
- Rif. [24] Marinos P. & Hoek E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch, Bull. Engg. Geol. 60, 85-92.
- Rif. [25] NIR n°28: Nota Interregionale del 13/01/2005 “Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a edizione”
- Rif. [26] Linea Guida “Grisù”. Scavi in sotterraneo con metodo a piena sezione e tecnica tradizionale in terreni grisutosi (luglio 2014).
- Rif. [27] NIR n°44: Nota Interregionale del 28/05/2012 “Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù TBM”,
- Rif. [28] Linea Guida “Grisù – TBM”. Scavo meccanizzato di grande sezione con TBM – EPB in terreni grisutosi. (maggio 2015).

## 5 ALLEGATI

Non sono presenti allegati.

## 6 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

I contenuti della presente relazione sono illustrati negli elaborati grafici specialistici di progetto.

## 7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

### 7.1 Il tracciato e le opere in sotterraneo

La lunghezza totale del tracciato della tratta Nuova Enna - Dittaino è pari a circa 14936 m, di cui circa 8557 m si sviluppano in sotterraneo mediante tre gallerie naturali denominate: Nuova Enna, Sicani, Dittaino.

Le tre gallerie sono progettate nella configurazione a singolo binario, con velocità massima di tracciato pari a 200 km/h (Rif. [14]); la pendenza longitudinale massima dei tratti in galleria è pari al 18 ‰, la sopraelevazione massima è pari a 160 mm ed il raggio di curvatura minimo è pari a 1000 m.

La galleria Nuova Enna è costituita da un tratto in galleria naturale di 861 m e da due tratti in galleria artificiale, di lunghezza pari a 42,50 m per l'imbocco lato Palermo e pari a 62,50 m per l'imbocco lato Catania. L'opera interessa pertanto un tratto di lunghezza complessiva pari a 966 m, dalla progressiva di tracciato km 1+638,80 al km 2+604,80 (riferite al binario dispari). Partendo dall'imbocco lato Palermo, posto ad una quota di 458,75 m s.l.m., il tracciato procede in discesa con pendenza pari al 18 ‰, fino all'imbocco lato Catania, dove la quota del piano ferro è pari a 433 m. La copertura massima della galleria è di circa 90 metri, in corrispondenza della progressiva km 2+150. Nella Figura 1 è rappresentato il profilo longitudinale della galleria.

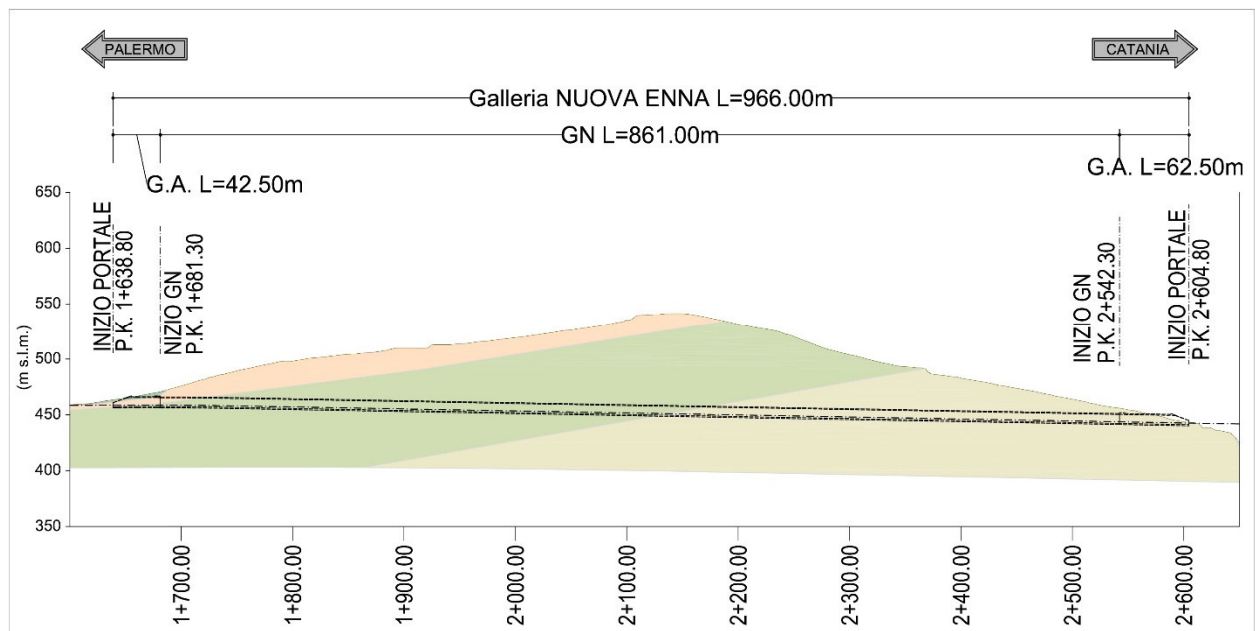
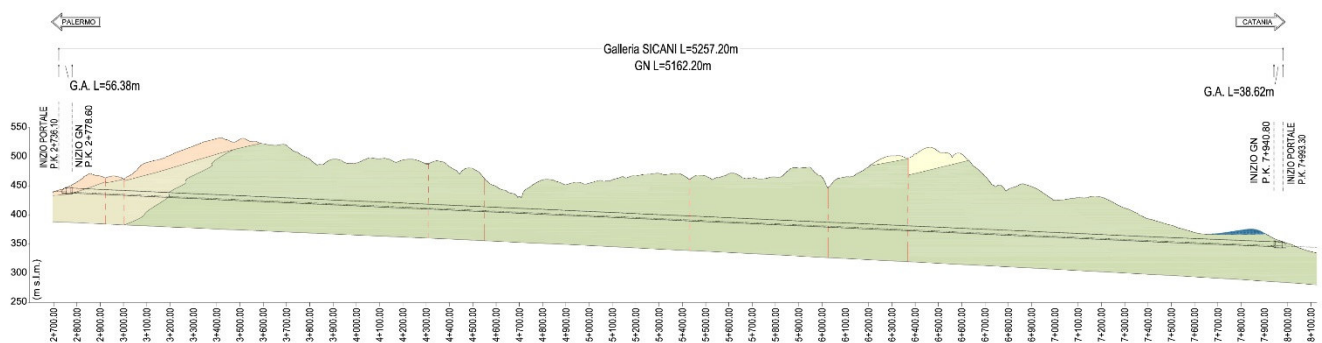


Figura 1 - Profilo galleria Nuova Enna

La galleria Sicani (Figura 2) presenta un tratto in naturale di lunghezza pari a 5162 m e due tratti in artificiale di lunghezza rispettivamente pari a 42,50 m all’imbocco lato Palermo e pari a 52,50 m all’imbocco lato Catania. L’opera interessa pertanto un tratto di lunghezza complessiva pari a circa 5257,20 m dal km 2+736,10 al km 7+993,30. Partendo dall’imbocco lato Palermo, posto ad una quota di 439,48 m s.l.m. il tracciato procede verso Catania in discesa con pendenza del 18‰; l’imbocco lato Catania presenta quota del piano ferro a 347,81 m.s.l.m. La copertura massima è di circa 135 metri.

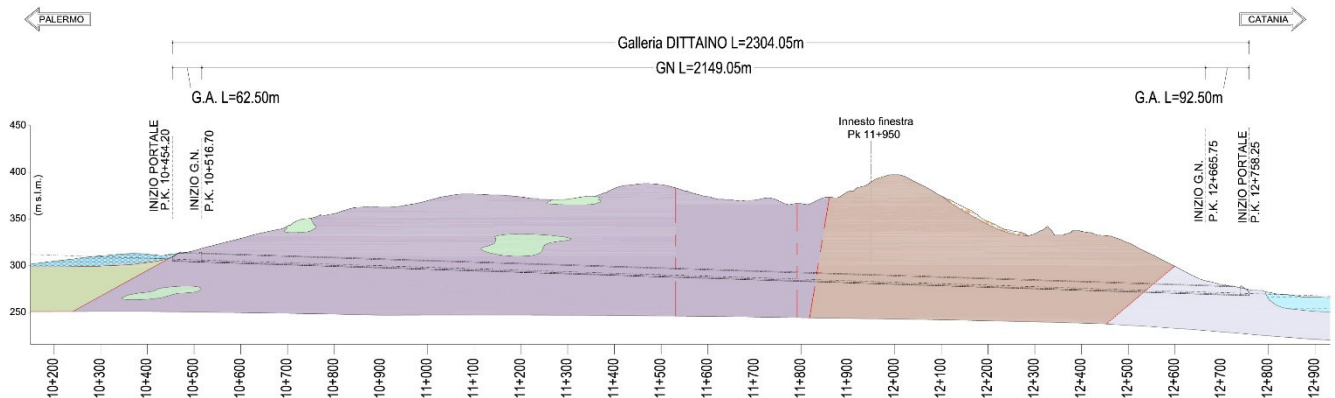
La galleria Sicani è affiancata da un cunicolo di sicurezza che presenta le stesse dimensioni geometriche della galleria di linea; il cunicolo si sviluppa parallelamente al tracciato di progetto, con interasse tra le due gallerie che varia da un minimo di 15 m all’imbocco lato Palermo fino ad un massimo di 40 m circa alla progressiva di tracciato 4+600,00, riducendosi di nuovo a circa 26 m all’imbocco lato Catania.



**Figura 2 - Profilo galleria Sicani**

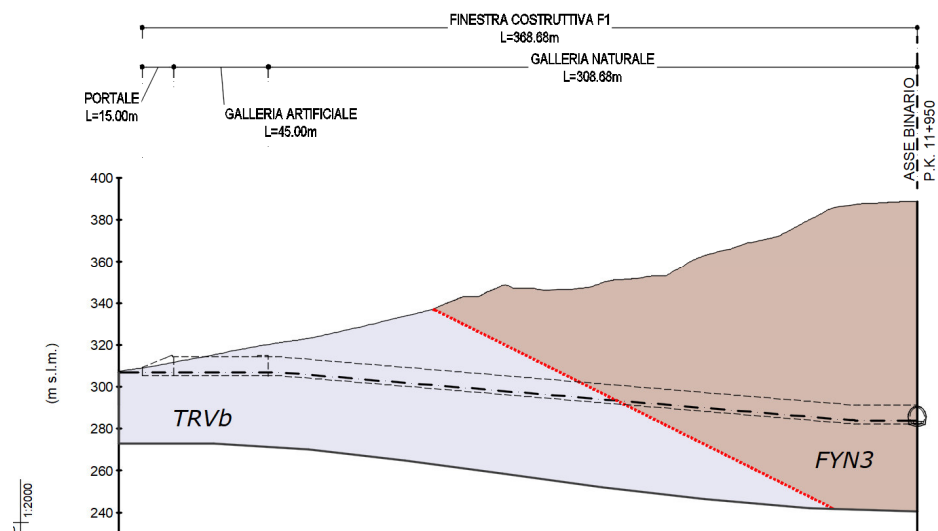
La galleria Dittaino (Figura 3) è costituita da un tratto in naturale di 2149,05 m di lunghezza e da due tratti in galleria artificiale agli imbocchi, di lunghezza pari a 62,50 m per l’imbocco lato Palermo e pari a 92,50 m per l’imbocco lato Catania. L’opera interessa pertanto un tratto di lunghezza complessiva pari a circa 2304,05 m tra le progressive di tracciato km 10+454,20 e km 12+758,25. Partendo dall’imbocco lato Palermo, posto ad una quota pari a 306,28 m s.l.m., il tracciato procede verso Catania in discesa con pendenza del 16‰; l’imbocco lato Catania è posizionato alla progressiva di tracciato km 12+758,25 con quota del piano ferro pari a 271,9 m.s.l.m. La copertura massima è di circa 110 metri. Nella Figura 3 è rappresentato il profilo longitudinale della galleria.





**Figura 3 - Profilo galleria Dittaino**

E' prevista una finestra costruttiva denominata Finestra Dittaino (Figura 4), che si innesta sulla galleria Dittaino in corrispondenza della progressiva km 11+950. La finestra ha una lunghezza complessiva di circa 368,70 m; la galleria artificiale di imbocco si sviluppa per 60 metri, mentre la galleria naturale ha lunghezza pari a 308,70 m. La copertura massima è di circa 110 metri.



**Figura 4 - Profilo finestra Dittaino.**

Lo sviluppo complessivo delle opere in sotterraneo, considerando anche le opere per la sicurezza in galleria, è pari a circa 14728 m.

In tabella sono riportate le progressive delle opere in sotterraneo previste lungo la tratta e delle opere di imbocco ad esse connesse.

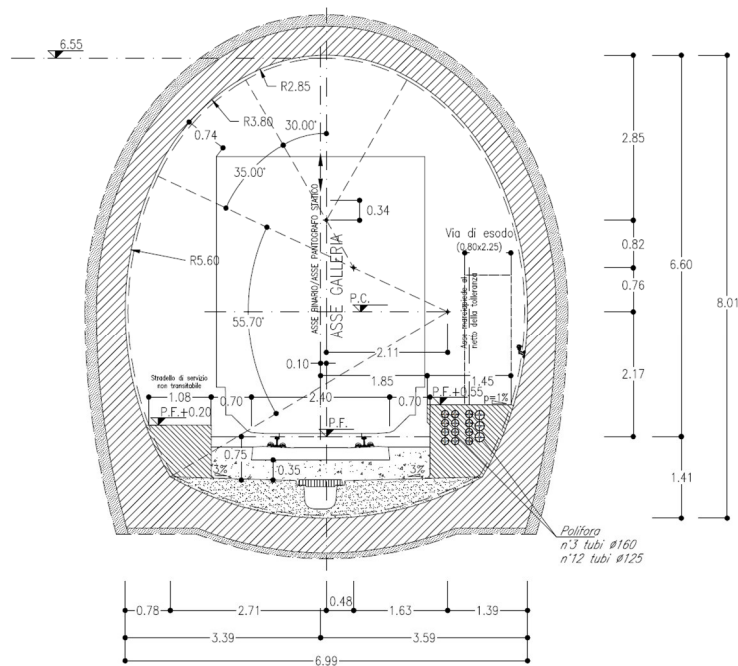
**Tabella 1 Progressive delle gallerie Nuova Enna, Sicani , Dittaino.**

GALLERIA	Opera	$pk_{\text{inizio}}$	$pk_{\text{fine}}$	$L_{\text{parziale}}$	$L_{\text{TOT}}$
		[m]	[m]	[m]	[m]
Nuova Enna	Galleria artificiale (GA02)	1+638,80	1+681,30	42,50	996,00
	Galleria Naturale (GN01)	1+681,30	2+542,30	861,00	
	Galleria artificiale (GA03)	2+542,30	2+604,80	62,50	
Sicani	Galleria artificiale (GA04)	2+736,10	2+778,60	42,50	5257,20
	Galleria Naturale (GN02)	2+778,60	7+940,80	5162,20	
	Galleria artificiale (GA05)	7+940,80	7+993,30	52,50	
Cunicolo di Sicurezza Galleria Sicani	Galleria artificiale (GA06)	2+736,10	2+778,60	42,50	5303,26
	Galleria Naturale (GN03)	2+778,60	7+940,80	5208,26	
	Galleria artificiale (GA07)	7+940,80	7+993,30	52,50	
Dittaino	Galleria artificiale (GA08)	10+454,20	10+516,70	62,50	2304,05
	Galleria Naturale (GN04)	10+516,70	12+665,75	2149,05	
	Galleria artificiale (GA09)	12+665,75	12+758,28	92,50	
Cunicolo parallelo Dittaino	Galleria artificiale (GA08)	---	---	66,00	499,30
	Galleria Naturale (GN05)	---	---	433,30	
Finestra Dittaino	Galleria artificiale (GA08)			60,00	368,70
	Galleria Naturale (GN05)			308,70	

Le gallerie sono progettate per consentire il transito del Gabarit C (PMO n°5) (Rif. [14]).

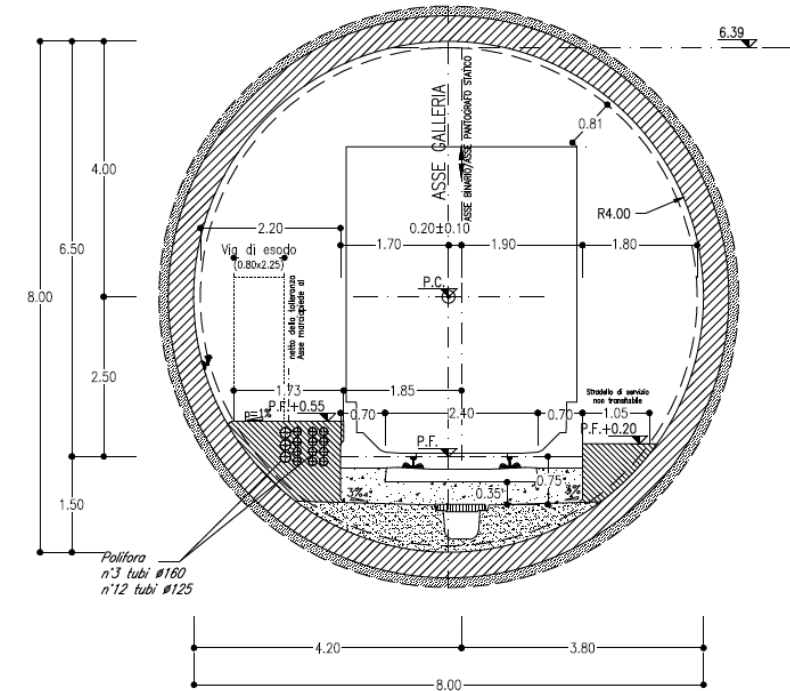
Le sezioni geometrico-funzionali previste sono in accordo con le sezioni tipo del Manuale di Progettazione RFI (Rif. [11]) idonee al transito del Gabarit C (PMO n°5) e velocità di progetto sino 200 km/h. Al suo interno è previsto l'alloggiamento dell'armamento tradizionale con traverse tipo "RFI-240" poggiate su ballast ed elettrificazione a c.c. a 3 kV (Rif. [14]).

In particolare, per la sezione di intradosso delle gallerie Nuova Enna e Dittaino, previste con metodo di scavo tradizionale, si è fatto riferimento alle Tavole 23, 24, 25 del Manuale di Progettazione RFI, (Rif. [11]): la sezione policentrica (Figura 5) presenta raggio di calotta pari a 3,8 metri ed area libera pari a circa 38 m<sup>2</sup>.



**Figura 5 – Galleria Nuova Enna e galleria Dittaino - sezione corrente;  $160 < v \leq 200$  km/h**

Per la Galleria Sicani, prevista in scavo meccanizzato, si è fatto riferimento alle Tavole 38, 39, 40 del Manuale di Progettazione RFI (Rif. [11]): la sezione (Figura 6) ha raggio pari a 4,00 m ed area libera di poco superiore a 43 m<sup>2</sup>.



**Figura 6 - Galleria Sicani – sezione corrente**

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. [11])

Tale camminamento, presente solo su un lato, ha una larghezza non inferiore a 120 cm ed è corredato da corrimano posto sul paramento interno della galleria ad una quota di 1m dal piano di calpestio del marciapiede.

### 7.1.1 Opere di imbocco

Gli imbocchi delle Gallerie Nuova Enna, Sicani, Dittaino e della Finestra costruttiva Dittaino prevedono la realizzazione di paratie provvisorie per il sostegno degli scavi realizzate con pali di grande diametro e vincolate con più ordini di tiranti.

In fase definitiva, per il completamento delle opere in sotterraneo è prevista, per ogni imbocco, la realizzazione di una galleria artificiale policentrica e di un portale a becco di flauto; le aree comprese tra i tratti in galleria artificiale e le paratie di pali verranno quindi interrato con idonei materiali di riempimento al fine di ripristinare le quote del terreno naturale precedenti alla realizzazione dell'opera.

### 7.1.2 Opere per la sicurezza in galleria

Le opere per la sicurezza sono state progettate in accordo a quanto previsto dalla Specifica Tecnica di Interoperabilità STI-SRT 2014 “Safety in Railway Tunnels” (Rif. [4] , Rif. [17]).

Per la Galleria Nuova Enna, che ha lunghezza complessiva di 996 m, non sono necessarie uscite/accessi di emergenza.

La Galleria Sicani, che presenta lunghezza pari a 5257 m, deve essere dotata di uscite/accessi di emergenza ogni 1000 m, in accordo alla STI-SRT 2014 (Rif. [4]). Per soddisfare tale requisito si prevede la realizzazione, in affiancamento alla galleria di linea, di un cunicolo di emergenza, di lunghezza complessiva pari 5303 m circa; il cunicolo si sviluppa parallelamente alla galleria di linea, con interasse tra le due gallerie che varia da un minimo di 15 m all’imbocco lato Palermo fino ad un massimo di 40 m circa alla progressiva di tracciato pk 4+600, riducendosi di nuovo a circa 26 m all’imbocco lato Catania.

Il cunicolo di esodo è collegato alla galleria di linea tramite cunicoli trasversali ad interdistanza di 1000m. I cunicoli trasversali di esodo sono 5, di cui 1 con dimensioni adeguate a consentire l’accesso a mezzi di soccorso. Una zona filtro all’innesto tra galleria di linea e ciascun collegamento trasversale impedisce l’ingresso dei fumi di un eventuale incendio nella galleria di linea.

La sezione trasversale del cunicolo ha le stesse dimensioni della galleria di linea: raggio di intradosso pari a 4,00 m (metodo di scavo meccanizzato); tale dimensione garantisce all’interno del cunicolo il transito e l’incrocio dei mezzi di soccorso. L’allestimento interno del cunicolo prevede la realizzazione di un piano stradale portato alla quota del camminamento dei by-pass di esodo tramite un riempimento costituito da materiale idoneo per rilevati stradali (Figura 7).

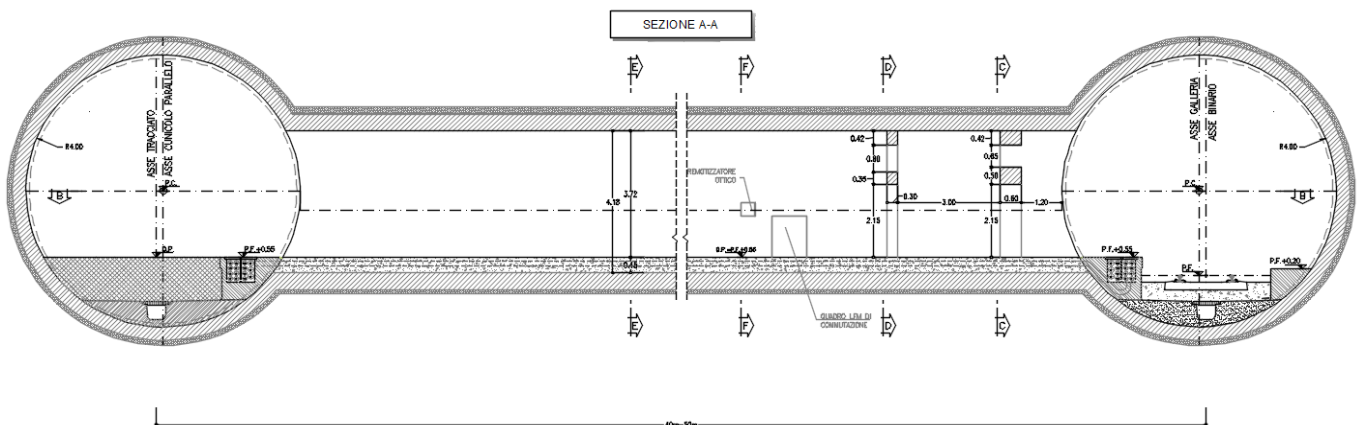
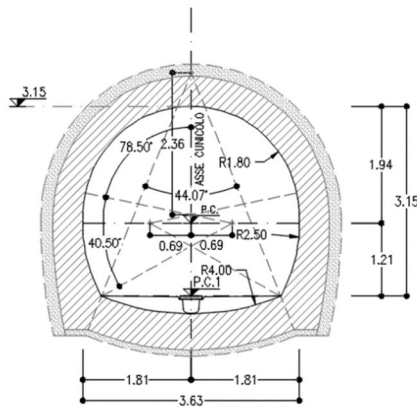


Figura 7 - Galleria Sicani – Sezione del by pass di esodo e cunicolo di emergenza carrabile.

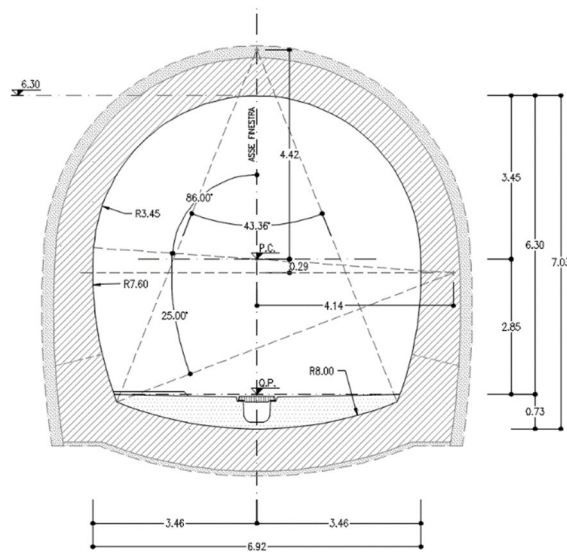
La Galleria Dittaino, di lunghezza pari a 2304,05 m, deve essere dotata di accessi/uscite di emergenza ogni 1000 m, in accordo alla STI-SRT 2014 (Rif. [4]). Il requisito è soddisfatto mediante la realizzazione di due

accessi/uscite di emergenza, che si innestano sulla galleria di linea rispettivamente alle progressive km 10+950 e km 11+950. Il primo accesso/uscita pedonale è configurato come un cunicolo che si sviluppa parallelamente alla galleria di linea, con uscita all'aperto in adiacenza all'imbocco lato Palermo della galleria, dove è ubicato il piazzale di emergenza. Nella Figura 8 è riportata la sezione di intradosso del cunicolo pedonale.



**Figura 8 - Galleria Dittaino –Cunicolo pedonale**

Il secondo accesso/uscita di emergenza è rappresentato dalla finestra costruttiva della Galleria Dittaino, che in fase definitiva assolverà alla funzione di accesso/uscita pedonale, con piazzale di emergenza ubicato in prossimità dell'imbocco della finestra stessa. Nella Figura 9 è riportata la sezione di intradosso dell'accesso/uscita.



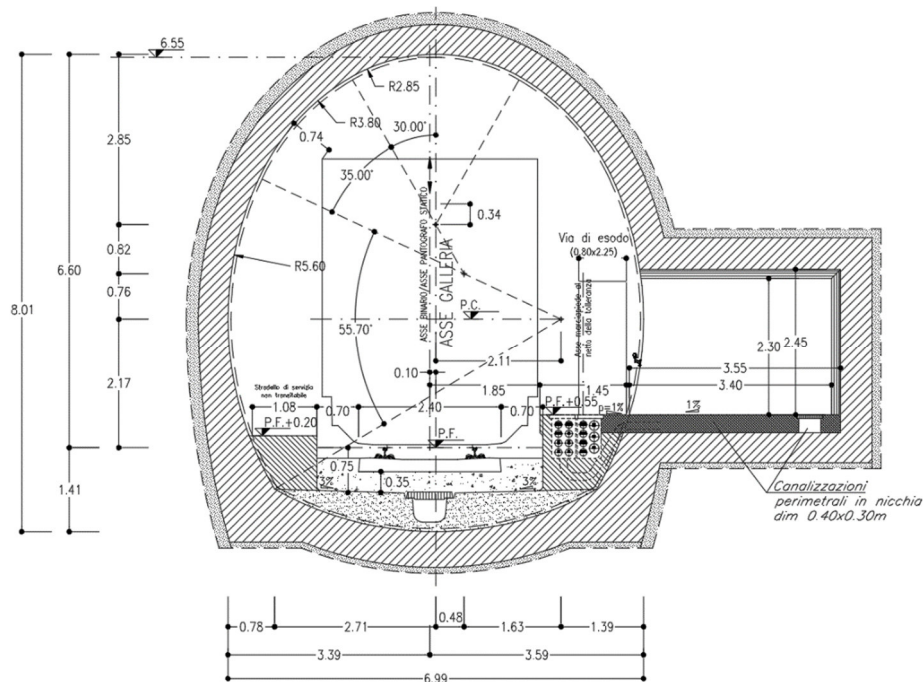
**Figura 9 – Finestra Dittaino**

### 7.1.3 Opere tecnologiche

In accordo al Manuale di Progettazione RFI (Rif. [10]), le gallerie non sono dotate di nicchie di ricovero personale. Tutte le gallerie sono dotate di nicchie luce e forza motrice (LFM) di dimensioni (P 3,40m x L 2,80 mx H 2,30m) ad interasse di 250 m (vedi Figura 10 e Figura 11).

Sono inoltre presenti le seguenti nicchie specializzate per impianti tecnologici, la cui posizione è riportata negli specifici elaborati di progetto:

- Tipo TE (P 3,40 m x L 2,80 mx H 2,80 m)
- Tipo TLC (P 5,60 m x L 2,80 x H 2,80 m)
- Tipo IS (P 3,95 m x L 2,80 m x H 2,80 m)
- Tipo MT (P 10,00 m x L 5,00 mx H 2,35 m)



**Figura 10 – Gallerie Nuova Enna e Dittaino - - Sezione in corrispondenza delle nicchie LFM**

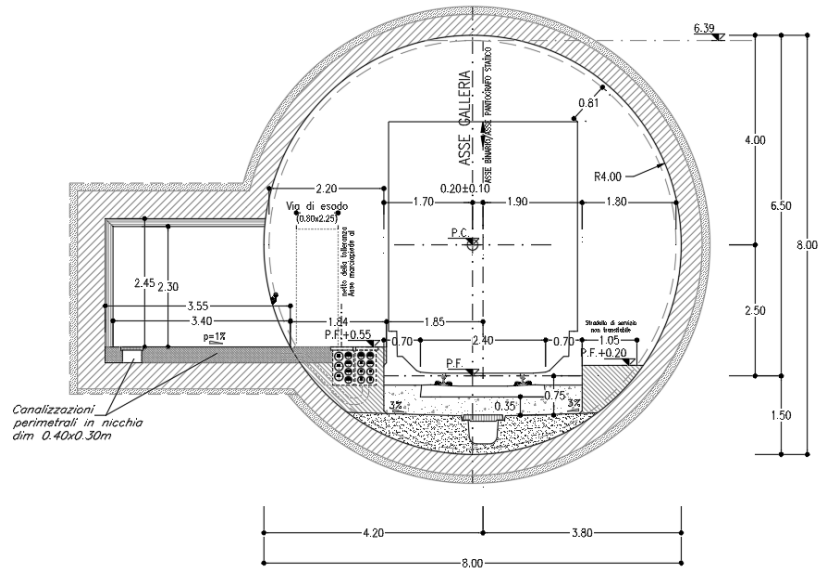


Figura 11 - Galleria Sicani – Sezione in corrispondenza delle nicchie LFM ogni 250m

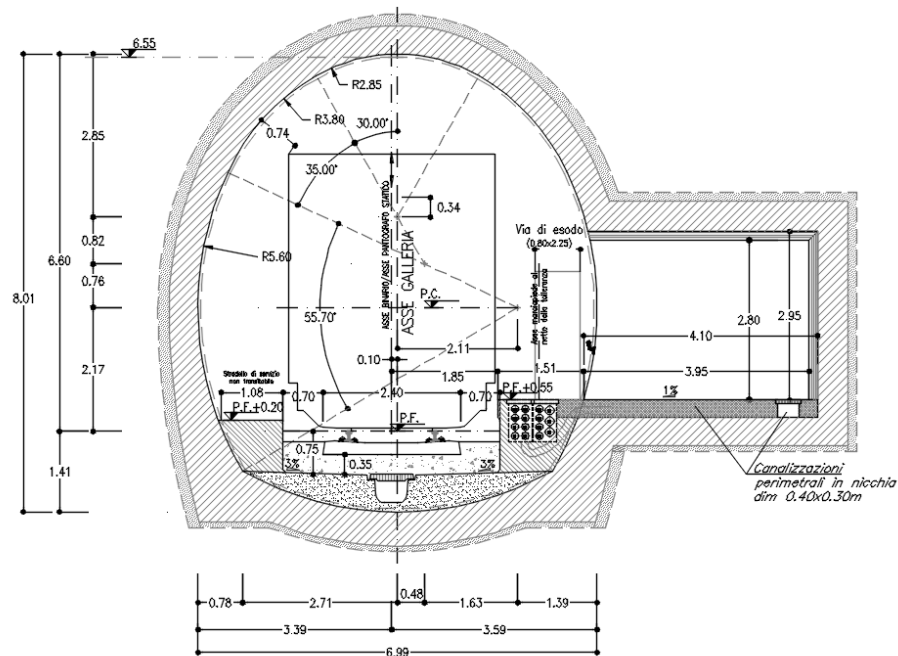
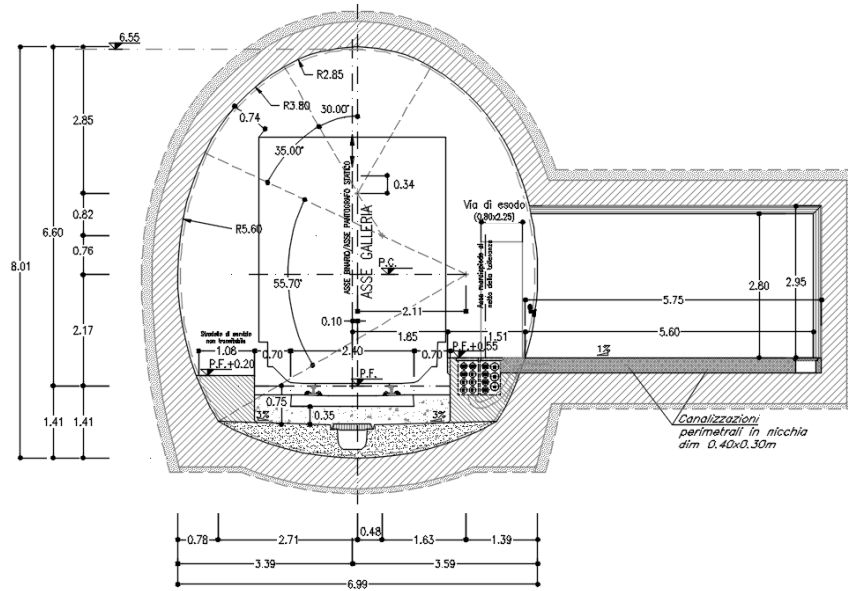
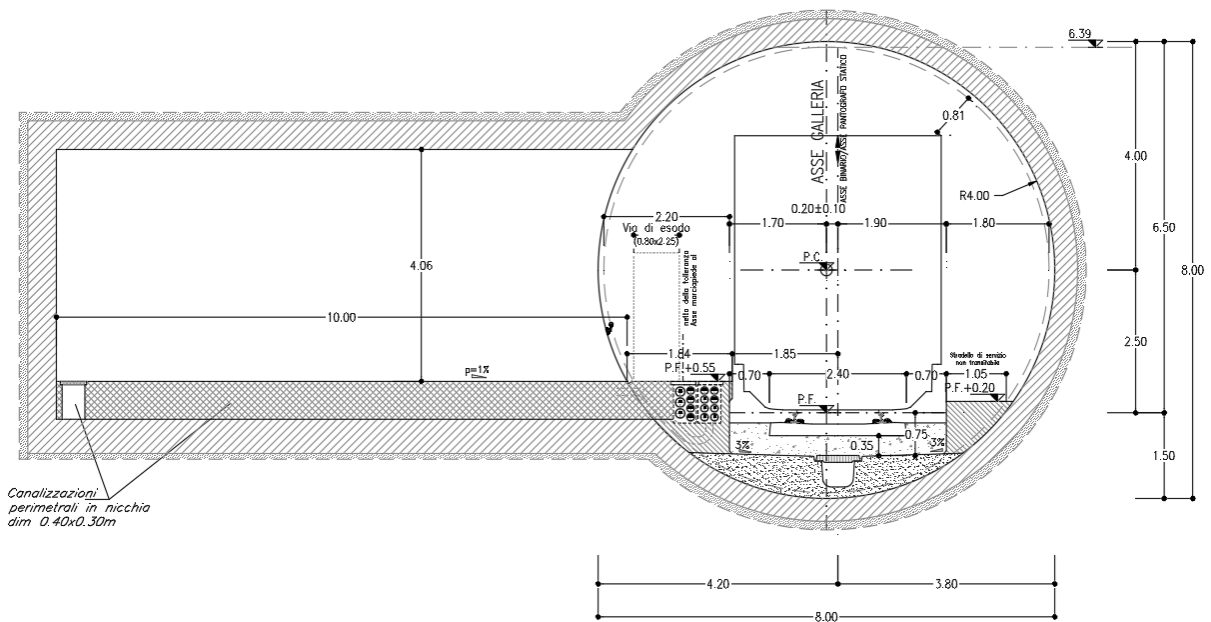


Figura 12 Gallerie Nuova Enna e Dittaino -- Sezione in corrispondenza delle nicchie IS/TE

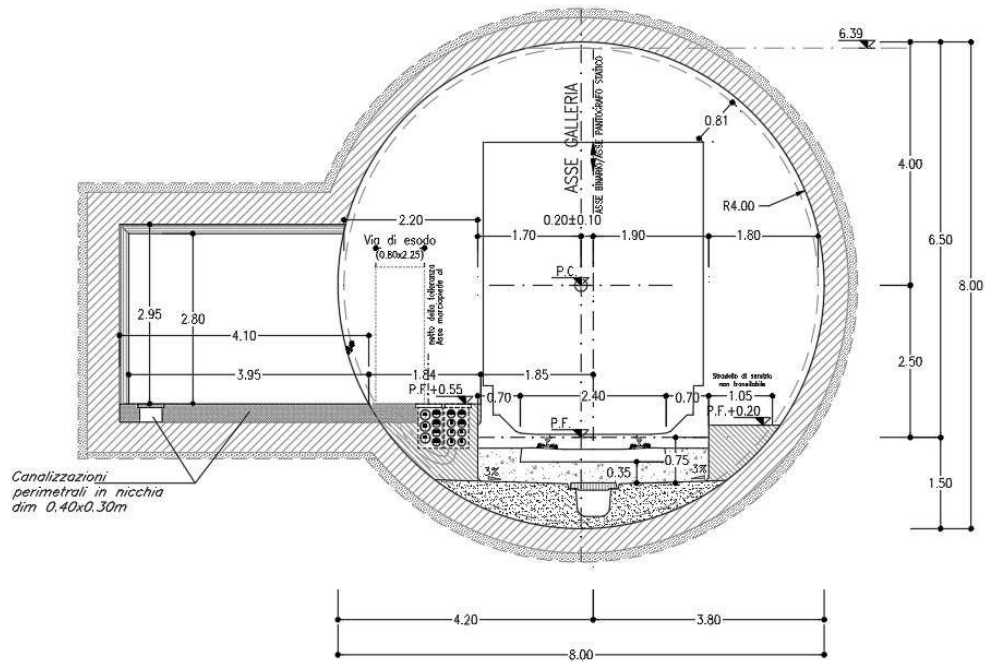




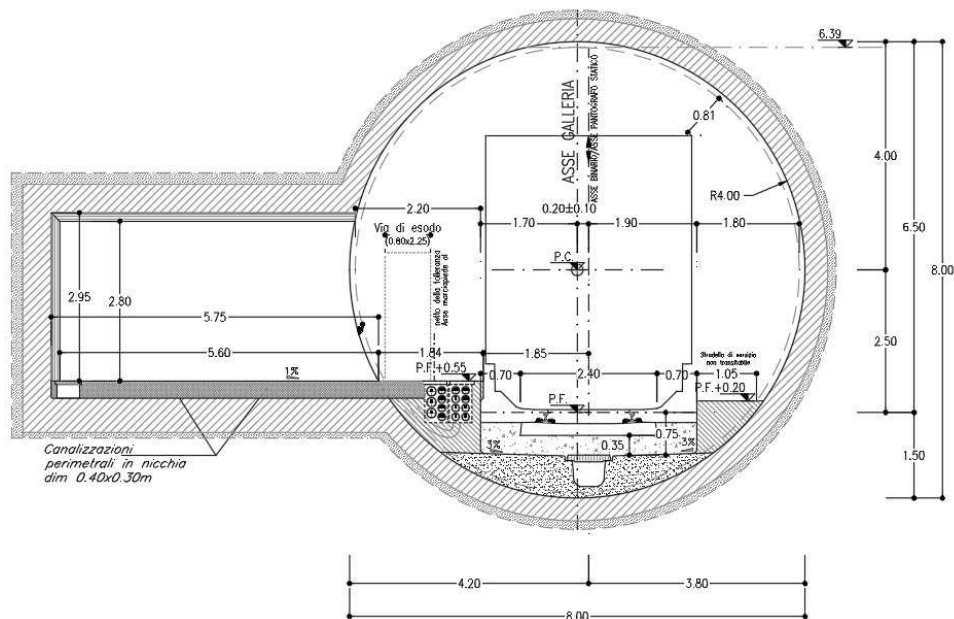
**Figura 13 - Gallerie Nuova Enna e Dittaino - - Sezione in corrispondenza delle nicchie TLC**



**Figura 14 - Profilo galleria Sicani – Sezione in corrispondenza delle nicchie MT/BT**



**Figura 15 - Profilo galleria Sicani – Sezione in corrispondenza delle nicchie IS e TE**



**Figura 16 - Profilo galleria Sicani – Sezione in corrispondenza delle nicchie TLC**

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

## 8 METODOLOGIA DI LAVORO

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [13]), 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;
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>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

## 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

Lungo il tracciato delle opere in sotterraneo è prevalente la “Formazione Terravecchia” (Tortoniano inferiore - Messiniano inferiore), composta da depositi marini di piattaforma continentale e piana fluvio-deltizia; le gallerie in progetto interessano le tre litofacies che caratterizzano tale formazione:

- la litofacies a composizione 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; nelle porzioni litoidi l'ammasso si presenta talora intensamente fratturato con superfici di taglio traslucide (cfr. sondaggio SD11)
- la litofacies conglomeratico-sabbiosa (TRVa): sabbie e arenarie tenere e poco cementate, con stratificazione incrociata, talora alternate con peliti;
- 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.

Questa formazione nelle due litofacies a composizione argillo-marnosa (TRV) e conglomeratico-sabbiosa (TRVa) è interessata dalla scavo della galleria Nuova Enna e della galleria Sicani. La definizione dell'esatta posizione e geometria lungo il tracciato del passaggio tra le due facies per entrambe le gallerie rappresenta un elemento di incertezza (Rif. [15]).

La galleria Dittaino procedendo da Ovest verso Est attraversa le seguenti formazioni:

- Argille Varicolori Inferiori (AVF): sono argille limose e argille marnose a struttura caotica o scagliosa. All'interno delle stesse si rinvengono olistoliti eterometrici costituiti da calcari detritici, calcari marnosi biancastri e marne rosate. Nell'area interessata dalla galleria, durante il rilevamento geologico è stato osservato e cartografato un olistolite di calcare marnoso di dimensioni decametriche (Rif. [15]). Tale aspetto va considerato in fase progettuale in quanto è possibile che olistoliti di dimensioni anche significative possano essere incontrati durante lo scavo della galleria Dittaino
- Flysch Numidico, membro di Geraci Siculo (FYN3): è un deposito torbiditico costituito da un'alternanza di argille limose e argille limoso-marnose di colore grigio e grigio-azzurro, a struttura scagliosa o indistinta, con frequenti livelli millimetrici di sabbie limose a luoghi si rinvengono intercalazioni di quarzareniti medio-fini di colore grigio e giallastro, da mediamente a molto fratturate, in strati da sottili a medi, e livelli di argille marnose di colore grigio scuro e nerastro, a struttura indistinta o finemente scagliosa; talora sono presenti livelli decimetrici di limi grigi e venature di calcite variamente orientata. Nella Formazione del Flysch Numidico si rinvengono anche quarzareniti medio-

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

fini di colore grigio e giallastro, da poco a molto fratturate, in strati molto spessi e grossi banchi, generalmente gradati (FYNa); in alternanza alle porzioni arenacee, si rinvengono frequenti livelli di argilliti e argille marnose di colore grigio e bruno, in strati da molto sottili a medi. La geometria dei banconi quarzoarenitico-ruditici è spesso lenticolare con base fortemente erosiva.

- Formazione Terravecchia nella facies argillosa a struttura brecciata (TRVb)

La galleria Nuova Enna per il tratto in artificiale a partire dall'imbocco lato Palermo e la galleria Sicani anche per un tratto in naturale immediatamente a seguire l'imbocco lato Palermo attraversano la formazione delle Sabbie di Cozzo Campana (MS2, Messiniano Superiore), costituite da sabbie ed arenarie, che poggiano con contatto discordante sulla Formazione Terravecchia.

Per i dettagli sull'inquadramento geologico si rimanda agli elaborati specialistici di progetto (Rif. [15]).

## 9.2 Assetto strutturale e geomorfologico

I caratteri strutturali delle formazioni interessate dallo scavo delle gallerie del Lotto 4b sono connessi all'evoluzione tettonica che ha interessato il settore dell'orogene Appenninico-Maghrebide. In accordo con l'assetto strutturale regionale, l'area è interessata da un importante sovrascorrimento con direzione NE-SW che interessa il tracciato alla pk. 12+600 circa, e mette in contatto i termini ascrivibili alla successione del bacino numidico (*Oligocene superiore – Burdigaliano*) con i termini più recenti della formazione Terravecchia (*Tortoniano inferiore - Messiniano inferiore*). Sono inoltre presenti numerose faglie inverse e trascorrenti ad alto angolo a direzione prevalente NE-SW, oltre che strutture normali a direzione NNW e SSE e, secondariamente NE-SW.

Non sono state identificate faglie direttamente interferenti con la galleria Nuova Enna: l'area è tuttavia caratterizzata da un sistema di faglie che si sviluppa circa parallelo al tracciato della galleria tra le pk 2+150 e l'imbocco lato Catania ad una distanza dall'asse della galleria di diverse decine di metri.

Lungo il tracciato della galleria Sicani sono state identificate 7 faglie, generalmente in corrispondenza di incisioni, che sono riconducibili ai due sistemi di discontinuità principali che caratterizzano l'area, il primo orientato in direzione NE-SW, il secondo con direzione NW-SE. Tali discontinuità sono subverticali e producono dislocazioni dell'ammasso senza cambi litologici a quota galleria.

Sono state identificate 4 lineamenti tettonici lungo il tracciato della galleria Dittaino: faglie subverticali all'interno delle Argille Varicolori e al contatto tra Argille Varicolori (AVF) e Flysch Numidico (FYN3) e un sovrascorrimento che mette in contatto il Flysch Numidico e il Terravecchia argilloso a struttura brecciata (TRVb).

Nel settore attraversato dal tracciato del Lotto 4b, fenomeni franosi non sono particolarmente diffusi e interessano prevalentemente i versanti dove affiorano terreni argillosi (Formazione Terravecchia (TRV), le Argille Varicolori (AVF) e il Flysch Numidico (FYN)); questi ultimi sono caratterizzati da fenomeni di creep e/o soliflusso, generalmente distribuiti in corrispondenza di solchi di erosione o alvei in approfondimento, o da

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

colamenti e frane complesse. Lo stato è variabile dall'attivo al quiescente. Lo studio geologico e geomorfologico ha permesso di escludere interferenze tra le opere in sotterraneo e fenomeni franosi.

### 9.3 Indagini geotecniche

Ai fini della modellazione e della caratterizzazione geotecnica delle unità che interessano le opere in sotterraneo in progetto, sono stati utilizzati i dati relativi alle 3 campagne geotecniche di seguito elencate

- Campagna di indagini 2015 (Progettazione Preliminare - Raddoppio della Tratta Raddusa Agira-Fiumetorto)
- Campagna di indagini 2018 (Progettazione Preliminare – Nuovo Collegamento Palermo-Catania - Tratta Caltanissetta Xirbi - Dittaino)
- Campagna di indagini 2019 (Progettazione Definitiva – Nuovo Collegamento Palermo-Catania - Tratta Nuova Enna-Dittaino)

Complessivamente per le opere in sotterraneo sono state eseguite le seguenti indagini geotecniche:

- n. 18 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.12 sondaggi sono stati strumentati con piezometro per la misura delle pressioni interstiziali.

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

- n. 6 prove geofisiche down-hole;
- n. 6 sezioni sismiche a rifrazione;
- n. 3 tomografie elettriche.

Il numero totale dei campioni analizzati nella tratta interessata dallo scavo delle gallerie e sottoposti a prove di laboratorio è di 96, di cui 68 indisturbati e 28 rimaneggiati. Sui campioni indisturbati sono state eseguite le seguenti prove meccaniche:

- n. 40 prove di taglio diretto (TD);
- n. 11 prove di compressione triassiale consolidate non drenate (CIU);
- n. 5 prova di compressione triassiale consolidata drenata (CID);
- n. 6 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU);
- n. 1 prova di compressione monoassiale;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

- n. 2 prove di carico puntuale (point load);
- n. 5 prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL);
- 5 prove edometriche di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg.

Per ulteriori dettagli relativi alle campagne di indagini si rimanda al documento “Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica” (Rif. [15]).

#### **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 “Galleria Nuova Enna -Profilo geotecnico”, “Galleria Sicani - Profilo geotecnico” e “Galleria Dittaino- Profilo geotecnico”.

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**

Si tratta di argille, argille limose e argille marnose a struttura sottilmente stratificata, con frequenti livelli di sabbie e sabbie limose, con passaggi a luoghi di marne, marne argillose e argilliti a struttura scagliosa o sottilmente stratificata.

##### **Galleria Nuova Enna**

Lo scavo della galleria intercetta la Formazione Terravecchia (litofacies TRV) per una estensione pari a 460 m, a partire dalla pk. 1+690 con coperture variabili tra 5 e 85 m rispetto al piano del ferro fino alla pk. 2+150 in corrispondenza della quale si assume il passaggio tra formazione Terravecchia facies argillosa (TRV) e facies sabbioso-arenacea (TRVa). Lo spessore della formazione rispetto al piano del ferro è sempre inferiore rispetto all’intervallo di coperture della galleria, in quanto in superficie, per uno spessore di alcuni metri, è presente la formazione delle Sabbie di Cozzo Campana (MS2).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sottterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>



**Figura 17 - Formazione Terravecchia (TRV) – Foro di sondaggio 4SD4, tra 15 e 20 m da p.c.**

Per la galleria Nuova Enna, all'interno della Formazione Terravecchia litofacies - TRV, sono stati eseguiti 2 sondaggi: 4SD4 e 4S11; il primo in corrispondenza dell'imbocco lato Palermo della galleria ed il secondo in corrispondenza della pk 1+908. Da questi due sondaggi sono stati prelevati complessivamente, a profondità variabili tra 4 m e 55 m da piano campagna, 12 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio e 4 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica. Dei campioni prelevati, solamente quelli con componente limoso-argillosa prevalente sono stati presi a riferimento per la caratterizzazione della formazione TRV.

Entrambi i sondaggi mostrano la presenza della formazione TRV ad una profondità di circa 10 m da piano campagna, sovrastata per i primi metri dalla formazione delle Sabbie di Cozzo Campana (MS2).

Le due facies limoso – argillosa (TRV) e sabbiosa (TRVa) della Formazione Terravecchia si distinguono per la prevalenza della componente granulometrica che le caratterizza. Tuttavia, la facies limoso-argillosa - TRV è caratterizzata dalla presenza di livelli sabbiosi, con spessore da millimetrico a decimetrico; allo stesso modo, nella facies TRVa sabbiosa sono presenti livelli prettamente argillosi. Tale eterogeneità è stata riscontrata anche nei campioni prelevati in laboratorio. In alcuni casi per la caratterizzazione meccanica della litofacies TRV argillosa sono stati considerati anche i risultati delle prove di laboratorio eseguite su campioni di natura argillosa prelevati nell'ambito della facies sabbiosa-TRVa (nello specifico dai sondaggi 4SD5 e 4SD6).

Complessivamente sono stati considerati, a profondità variabili tra 3 m e 49 m da piano campagna, 8 campioni indisturbati e 5 campioni rimaneggiati prelevati dai fori di sondaggio.



Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (43%) e argillosa (34%) con una alta percentuale di sabbia (23%). Il terreno è classificabile come limo con argilla sabbioso (AGI, 1977, Rif. [9]).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $19 \div 22 \text{ kN/m}^3$ , mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $16 \text{ e } 20 \text{ kN/m}^3$ . Il peso specifico è variabile tra  $26 \text{ a } 27 \text{ kN/m}^3$ .

I limiti di Atterberg sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

- Limite plastico,  $w_p$ :  $20\% \div 35\%$
- Limite liquido,  $w_L$ :  $25\% \div 75\%$
- Indice di Plasticità,  $I_p$ :  $10\% \div 40\%$

Il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il 5% ed il 22%, con un indice di consistenza  $I_c$  crescente con la profondità e variabile tra 0,9 e 2,1, tipico di terreni molto consistenti. La frazione argillosa è mediamente attiva con un indice di attività  $A$  medio pari a 0,8.

Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state eseguite 2 prove di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU), 2 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU) e 1 prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  derivante dall'elaborazione delle prove triassiali condotte sui campioni dei sondaggi 4S11 e 4SD6 mostra una buona correlazione e restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a 20 kPa e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $21^\circ$ . I risultati si riferiscono a campioni prelevati a profondità di 3,5 m e 31,5 m da piano campagna (Figura 18).

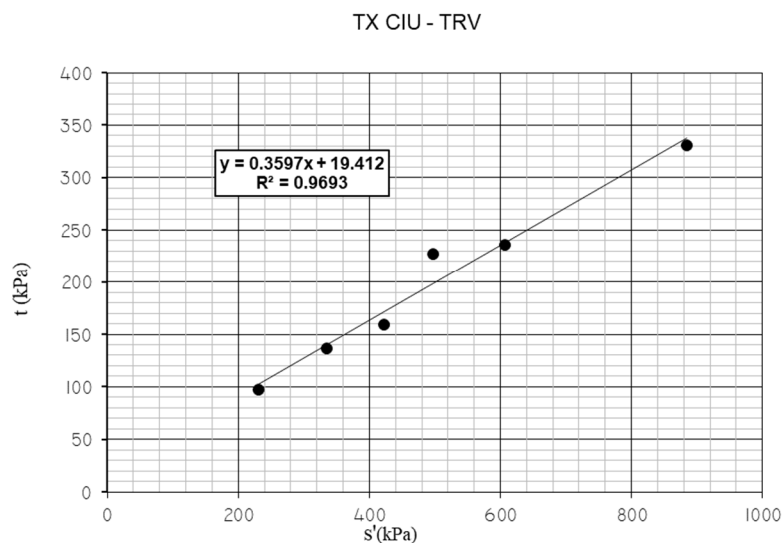
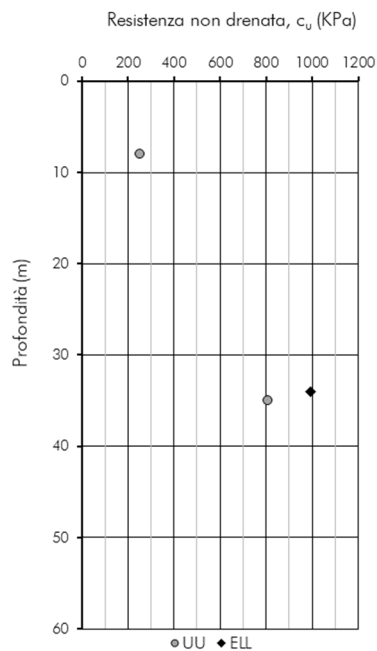


Figura 18 – TRV - Involuppo di resistenza delle prove triassiali

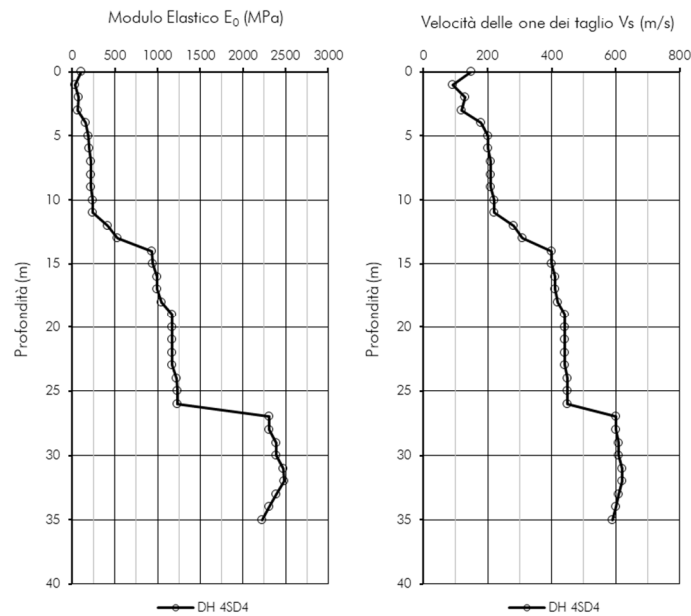
 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sottterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

I valori della resistenza non drenata  $c_u$  ricavati dalle due prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU) e dalla prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL) sono raffigurati nel seguito (Figura 19):



**Figura 19 – TRV - Resistenza non drenata da prove UU e ELL**

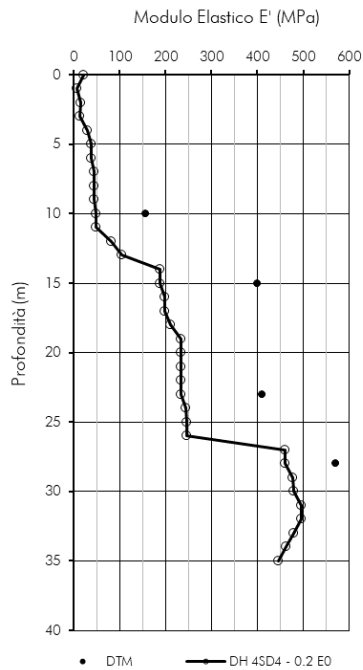
Per determinare il modulo di rigidezza iniziale della formazione TRV si è fatto riferimento alla prova geofisica di sito down-hole eseguite in corrispondenza del sondaggio 4SD4 che mostra un incremento significativo delle caratteristiche di rigidezza con la profondità.



**Figura 20 – TRV - Modulo di rigidità iniziale e profilo delle velocità delle onde di taglio da prova geofisica**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione TRV, sono stati utilizzati i risultati della prova geofisica ricavando il rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza del livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria; nello specifico è stato assunto un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,2. Come confronto sui valori operativi si è fatto riferimento alle 4 prove dilatometriche eseguite nello stesso foro di sondaggio. Le diverse prove evidenziano valori confrontabili tra loro e confermano l'incremento della rigidità con la profondità.

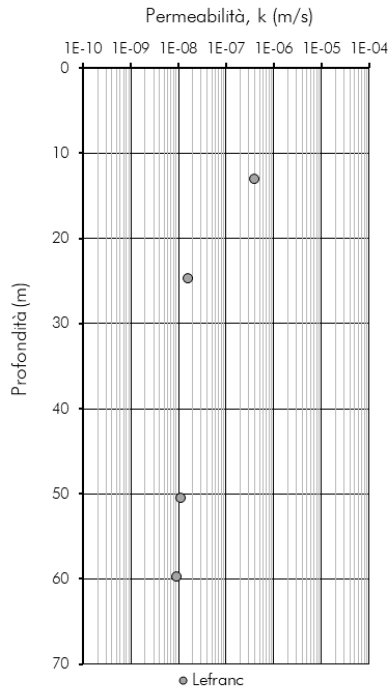
L'intervallo di valori ricavato per il modulo di elasticità operativo  $E'$  del TVR per profondità comprese tra 5 e 40 m da p.c. è pari a  $40 \div 570$  MPa (Figura 21).



PROVE DILATOMETRICHE		
Sondaggio	Profondità da p.c.	E'
(-)	(m)	(MPa)
4SD4	10.0	156
4SD4	15.0	400
4SD4	23.0	410
4SD4	28.0	571

**Figura 21 – Modulo di deformabilità operativo da prove geofisiche e prove dilatometriche**

Sono state eseguite un totale di 4 prove di permeabilità di tipo Lefranc nei fori di sondaggio 4SD4 e 4S11 a profondità variabili tra 13 e 60 m da p.c., all'interno del volume significativo dell'opera in progetto nella Formazione TRV. Complessivamente dalle prove si ottiene un coefficiente di permeabilità  $k$  mediamente variabile tra  $10^{-8}$  e  $10^{-7}$  m/s (Figura 22).



Prova	Sondaggio	Profondità da p.c.	k
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lefranc	4S11	50.6	1.2E-08
Lefranc	4S11	59.8	9.2E-09
Lefranc	4SD4	13.1	3.9E-07
Lefranc	4SD4	24.8	1.6E-08

**Figura 22 – TRV - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc**

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 TRV:

**Tabella 2 – TRV – Riepilogo parametri geotecnici**

Unità	Coperture	$\gamma$	TX		$E'$	k
			$c'$	$\phi'$		
(-)	(m)	( $\text{kN/m}^3$ )	(kPa)	( $^\circ$ )	(MPa)	(m/s)
TRV	5 ÷ 85	19 ÷ 22	20	21	40 ÷ 570	$10^{-8} \div 10^{-6}$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

### Galleria Sicani

Lo scavo della galleria Sicani intercetta la Formazione Terravecchia (TRV) per una estensione pari a circa 4830 m, a partire dalla pk 3+200 (dove si identifica il passaggio dalla formazione Terravecchia litofacies sabbiosa TRVa alla litofacies argillosa TRV) fino al termine della galleria, con coperture variabili tra 5 e 135 m rispetto al piano del ferro. Lo spessore della formazione rispetto al piano del ferro è sempre coincidente all'intervallo di coperture, ad eccezione di modesti tratti in cui si rileva l'affioramento superficiale della formazione di Tripoli (TPL).



**Figura 23 - Formazione Terravecchia (TRV) – Foro di sondaggio 4SD9, tra 45 e 50 m da p.c.**

Per la galleria Sicani, all'interno della Formazione Terravecchia (TRV), sono stati eseguiti 5 sondaggi: 4S12, 4SD9, 4SD11, 4SD12 e 7S3. Da questi sondaggi sono stati prelevati, a profondità variabili tra 3 m e 108 m da piano campagna, 22 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio e 7 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica.

Il materiale al carotaggio si presenta come argilloso, da consistente a duro, fratturato, con fratture variamente orientate e con livelli da millimetrici a decimetrici di sabbia.

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.

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (50%) e argillosa (39%) con una percentuale anche di sabbia (11%). Il terreno è classificabile come limo con argilla sabbioso (AGI, 1977, Rif. [9]).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $20 \div 22 \text{ kN/m}^3$ , mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $16 \text{ e } 20 \text{ kN/m}^3$ . Il peso specifico è variabile tra  $26 \text{ a } 27 \text{ kN/m}^3$ .

I limiti di Atterberg sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

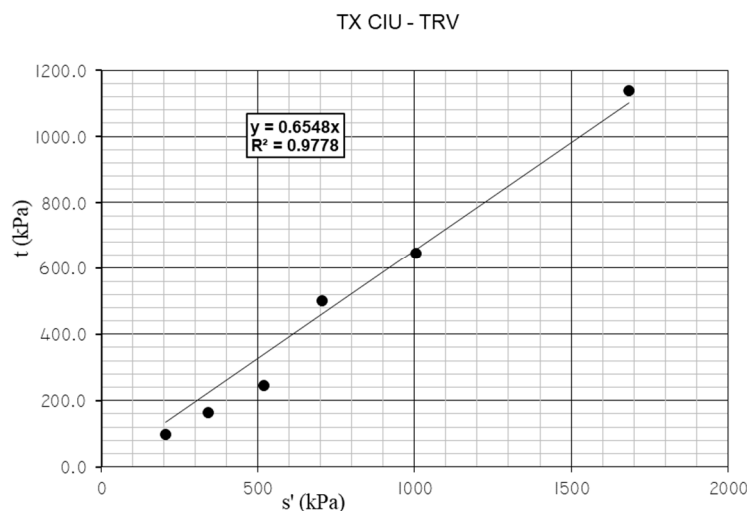
- Limite plastico,  $w_p$ :  $20\% \div 35\%$
- Limite liquido,  $w_L$ :  $30\% \div 70\%$
- Indice di Plasticità,  $I_p$ :  $10\% \div 40\%$

Il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il  $5\%$  ed il  $25\%$ , con un indice di consistenza  $I_c$  crescente con la profondità e variabile tra  $0,8 \text{ e } 2$ , tipico di terreni molto consistenti.

La frazione argillosa è mediamente attiva con un indice di attività  $A$  medio pari a  $0,6$ .

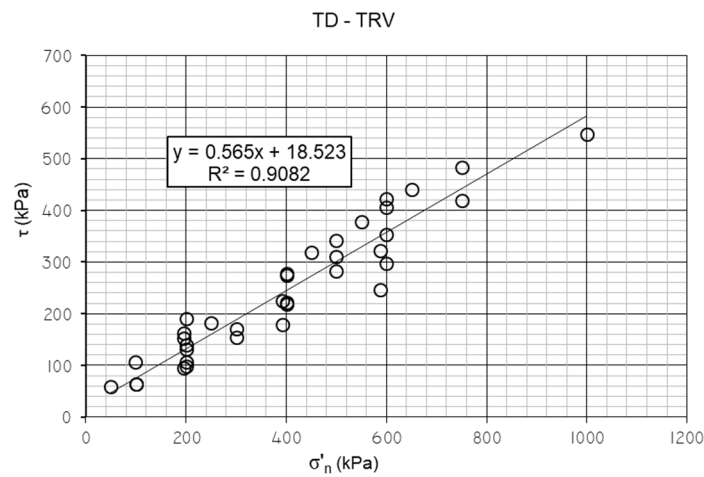
Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state considerate 12 prove di taglio diretto, 2 prova di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU) e 2 prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  derivante dall'elaborazione delle prove triassiali condotte sui campioni dei sondaggi 4SD9 e 4SD12 mostra di per sé una buona correlazione con valori di coesione  $c'$  pari a  $0 \text{ kPa}$  e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $41^\circ$ . I risultati si riferiscono a campioni prelevati a profondità di  $3,5 \text{ e } 48,7 \text{ m}$  da piano campagna (Figura 24). Il campione CI7 del sondaggio 4SD9 prelevato a  $48,7 \text{ m}$  da p.c. ha una elevata componente limoso-argillosa ( $94\%$ ): la prova elaborata singolarmente restituisce valori di coesione  $c'$  pari a  $15 \text{ kPa}$  e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $42^\circ$ . Il campione CI1 del sondaggio 4SD12 prelevato a  $3,5 \text{ m}$  da p.c. presenta una percentuale di sabbia pari al  $43\%$ , ciò nonostante fornisce valori di angolo resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $28^\circ$  e una coesione  $c'$  pari a  $3 \text{ kPa}$ .



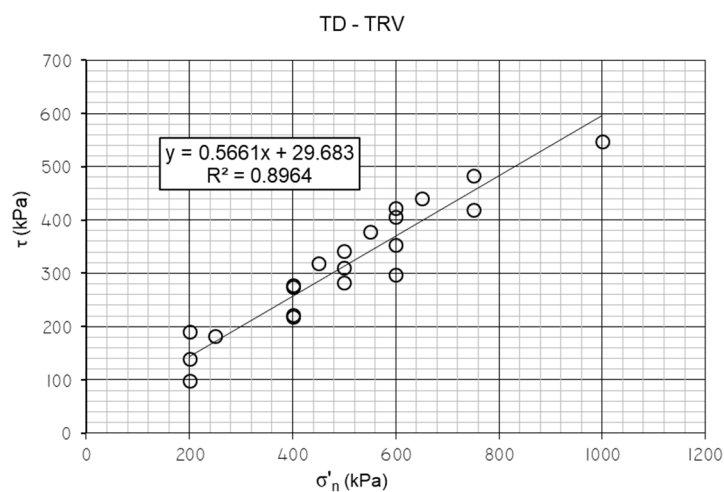
**Figura 24 – TRV - Involuppo di resistenza delle prove triassiali**

Le 12 prove di taglio diretto di picco eseguite sui campioni indisturbati evidenziano un inviluppo di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 25) con valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 18 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $30^\circ$ . Le profondità di prelievo degli 12 campioni variano tra 5,4 e 52 m da piano campagna.



**Figura 25 – TRV - Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto di picco (TD)**

Si analizzano le 7 prove di taglio diretto eseguite sui campioni a profondità maggiori di 20 m da p.c. le quali mostrano un incremento del parametro di coesione. Nello specifico si ha un inviluppo di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 26) con valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 30 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $30^\circ$ . Le profondità di prelievo dei 7 campioni variano tra 21 e 52 m da piano campagna.



**Figura 26 – TRV - Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto di picco (TD) eseguite su campioni prelevati a profondità maggiori di 20 m da p.c.**

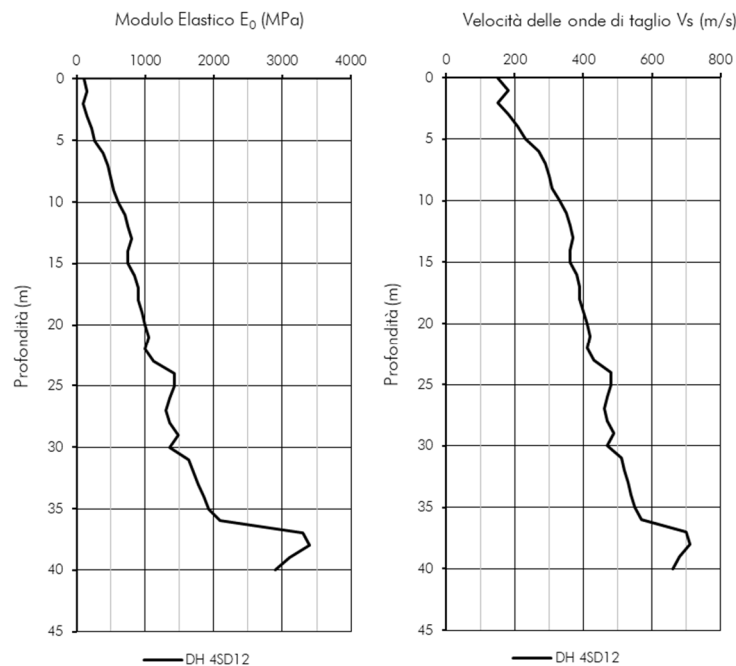


Pertanto, considerando quanto sopra descritto, i valori rappresentativi della resistenza al taglio sono: coesione  $c'$  pari a 18 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $30^\circ$  per profondità fino a 20 m da p.c.; coesione  $c'$  pari a 30 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $30^\circ$  per profondità maggiori di 20 m da piano campagna.

I valori della resistenza non drenata  $c_u$  ricavati dalle due prove di ad espansione laterale libera (ELL) condotte sui campioni CI7 (48,7 m da p.c.) e CI9 (56,6 m da p.c.) del sondaggio 4SD9 restituiscono valori rispettivamente pari a 376 e 283 kPa.

Nel sondaggio 4S12 alle profondità di 58,3 (RC2) e 72,3 (RC3) m da p.c. sono stati prelevati due campioni litoidi sui quali sono state eseguite due prove di carico puntuale (point load) che hanno permesso di stimare la resistenza a compressione monoassiale, pari rispettivamente a 3,4 e 3,1 MPa, correlando l'indice  $I_{s,50}$  con la resistenza stessa secondo un fattore pari a 24 (Hudson & Harrison, 1977).

Per determinare il modulo di rigidezza iniziale della formazione TRV si è fatto riferimento alla prova geofisica di sito down-hole eseguite in corrispondenza del sondaggio 4SD12 che mostra un incremento delle caratteristiche di rigidezza con la profondità (Figura 27).



**Figura 27 – TRV - Modulo di rigidezza iniziale e profilo delle velocità delle onde di taglio da prova geofisica**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione TRV, sono stati utilizzati i risultati della prova geofisica ricavando il rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza di un livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria; nello specifico è stato assunto un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,2. Come confronto sui valori operativi si è fatto riferimento alle 9 prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio. Le diverse prove, per le profondità investigate dalle prove geofisiche, evidenziano valori confrontabili tra loro. Nella definizione

dell'intervallo di valori per il modulo di elasticità operativo  $E'$  all'interno del volume significativo dello scavo della galleria nella formazione del TVR si escludono le due prove dilatometriche che forniscono valori del modulo maggiori di 3 GPa (3,3 e 5 GPa) in quanto ritenute non rappresentative della formazione in questione. Anche per profondità maggiori di 50 m si evidenziano valori compresi tra 500 e 750 MPa. In conclusione, l'intervallo di valori considerato è pari a  $50 \div 1212$  MPa (Figura 28).

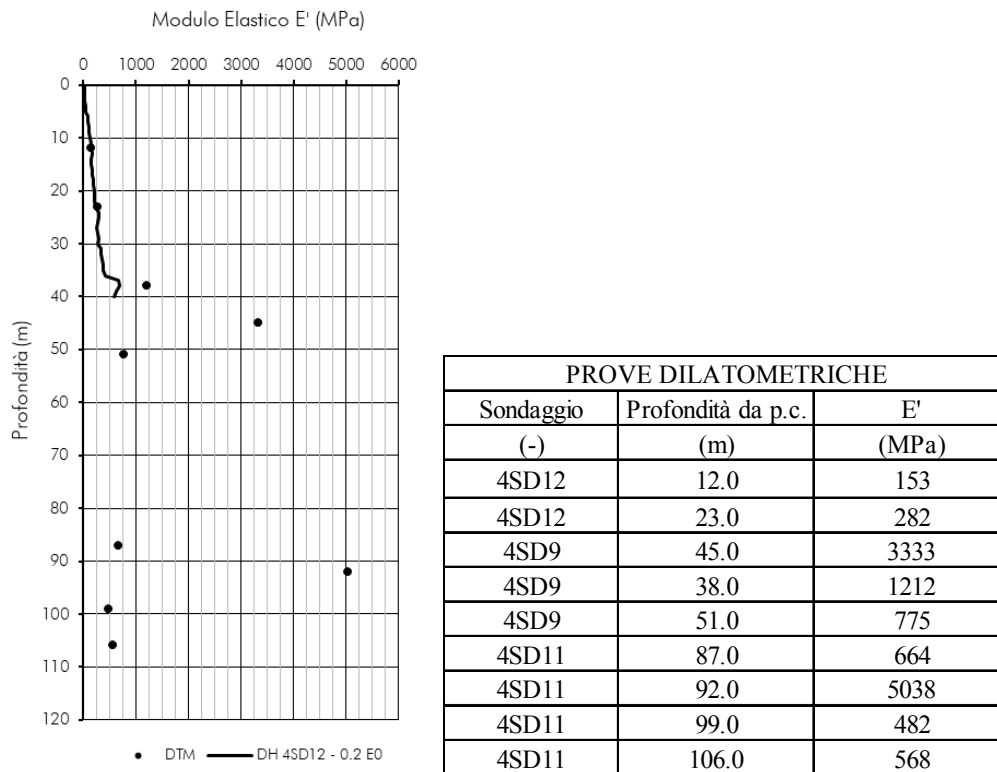


Figura 28 – Modulo di deformabilità operativo da prove geofisiche e prove dilatometriche

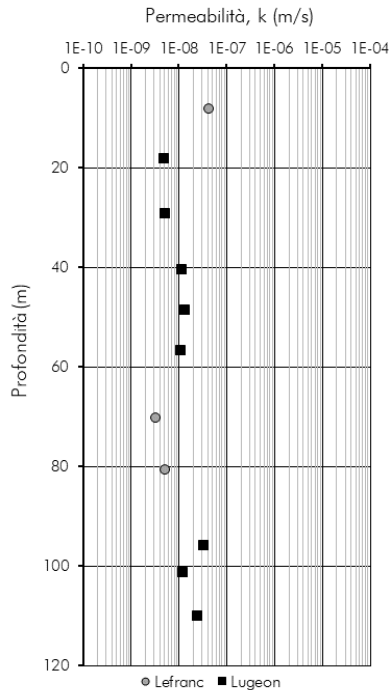
È stata eseguita una prova di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campione indisturbato. L'elaborazione della prova restituisce un valore di coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  riportato in Tabella 14:

Tabella 3 – TRV - Valore di  $k_{100}$  derivante da prove Huder-Amberg

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100 \text{ H-A}}$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
4 SD12	CI4	21.2	1.2

Sono state eseguite un totale di 11 prove di permeabilità (3 di tipo Lefranc e 8 di tipo Lugeon) nei fori di sondaggio a profondità variabili tra 8 e 110 m da p.c., all'interno del volume significativo dell'opera in progetto

nella Formazione TRV. Complessivamente dalle prove si ottiene un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $10^{-9}$  e  $10^{-7}$  m/s (Figura 29).



Prova	Sondaggio	Profondità da p.c. (m)	k (m/s)
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lefranc	4S12	70.3	3.3E-09
Lefranc	4S12	80.8	5.1E-09
Lefranc	4SD12	8.3	4.4E-08
Lugeon	4SD9	40.5	1.2E-08
Lugeon	4SD9	48.7	1.3E-08
Lugeon	4SD9	56.8	1.1E-08
Lugeon	4SD12	18.3	4.9E-09
Lugeon	4SD12	29.3	5.1E-09
Lugeon	4SD11	96.0	3.4E-08
Lugeon	4SD11	101.3	1.2E-08
Lugeon	4SD11	110.1	2.5E-08

Figura 29 – TRV - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc e Lugeon

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 TRV (Tabella 4):

Tabella 4 – TRV – Riepilogo parametri geotecnici

Unità	Coperture (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	TD		E' (MPa)	k (m/s)
			c' (kPa)	$\phi'$ (°)		
(-)	(m)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kPa)	(°)	(MPa)	(m/s)
TRV	5 ÷ 135	20 ÷ 22	18 ÷ 30	30	50 ÷ 1212	$10^{-9} \div 10^{-7}$

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sottterraneo	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. C

#### 9.4.2 Formazione di Terravecchia – litofacies TRVa

##### Galleria Nuova Enna e Sicani

Si tratta di prevalenti sabbie e arenarie tenere e poco cementate, con stratificazione incrociata, talora alternate con peliti.

Lo scavo della galleria Nuova Enna intercetta la Formazione Terravecchia TRVa per una estensione pari a circa 400 m, a partire dalla pk 2+150 fino al termine della galleria in progetto, con coperture variabili tra 5 e 85 m rispetto al piano del ferro; per i primi 110 m di sviluppo all'interno del TRVa, lo spessore della formazione è inferiore rispetto all'intervallo di coperture, essendo sovrastata dalla facies argillosa (TRV), successivamente e fino al termine dell'opera in progetto lo spessore della formazione è coincidente con l'intervallo di coperture, essendo la formazione TRVa affiorante fino in superficie.

Lo scavo della galleria Sicani interessa la formazione TRVa a partire dall'imbocco lato Palermo (pk. 2+778) fino alla pk. 3+200 con coperture variabili tra 5 e 70 m rispetto al piano del ferro; per il tratto in cui la galleria intercetta il TRVa, lo spessore della formazione non è coincidente con l'intervallo di coperture in quanto si rileva in superficie, per alcuni metri di spessore, la formazione delle Sabbie di Cozzo Campana (MS2).



**Figura 30 - Formazione Terravecchia (TRVa) – Foro di sondaggio: 4SD6 (Nuova Enna), tra 25 e 30 m da p.c (sinistra) e 4SD8 (Sicani), tra 35 e 40 m da p.c. (destra).**

Per la galleria Nuova Enna, all'interno della Formazione Terravecchia (TRVa), sono stati eseguiti 2 sondaggi: 4SD5 e 4SD6; il primo in corrispondenza delle più alte coperture, il secondo in prossimità dell'imbocco lato Catania della galleria. Da questi due sondaggi sono stati prelevati, a profondità variabili tra 13 m e 51 m da piano campagna, 10 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio e 4 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica.

Per la galleria Sicani all'interno della Formazione Terravecchia (TRVa), sono stati eseguiti 2 sondaggi: 4SD7 e 4SD8 eseguiti in prossimità dell'imbocco lato Palermo della galleria. Da questi due sondaggi sono stati

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

prelevati, a profondità variabili tra 3 m e 44 m da piano campagna, 16 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio e 8 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica.

Caratteristica della litofacies TRVa è la presenza di livelli argillo-limosi; la sabbia si presenta generalmente addensata o debolmente cementata, con livelli arenacei. I livelli litoidi presentano superfici di taglio.

Dei campioni prelevati, sono stati presi a riferimento solamente quelli con componente sabbiosa prevalente per la caratterizzazione della formazione TRVa. Pertanto, per la caratterizzazione geotecnica di tale formazione è stato fatto riferimento anche ai sondaggi 4S11 e 4SD4, prendendo a riferimento i campioni con componente sabbiosa prevalente. Complessivamente dunque sono stati prelevati, a profondità variabili tra 3 m e 55 m da piano campagna, 23 campioni indisturbati e 2 campioni rimaneggiati.

In conclusione, l'analisi dei risultati delle prove di laboratorio sui campioni indisturbati con componente granulometrica sabbiosa prevalente, ha consentito di tracciare un quadro complessivo, al variare della profondità, delle principali grandezze fisiche e meccaniche della formazione indagata.

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente sabbiosa (72%) e in maniera secondaria di limo (19%) e argilla (7%). Il terreno è classificabile come sabbia limosa debolmente argillosa (AGI, 1977, Rif. [9]).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $18 \div 22 \text{ kN/m}^3$ , mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $16 \text{ e } 20 \text{ kN/m}^3$ . Il peso specifico è variabile tra  $26 \text{ a } 27 \text{ kN/m}^3$ .

Per tutti i campioni analizzati in laboratorio (ad eccezione di 4 campioni), in virtù dell'elevata componente sabbiosa, non è stato possibile ricavare i limiti di Atterberg.

Il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il 5% ed il 21%, mentre l'indice consistenza  $I_C$  non è stato possibile stimarlo in quanto il materiale non presenta comportamento plastico.

Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state eseguite 12 prove di taglio diretto, 4 prova di compressione triassiale consolidata drenata (CID), 1 prova di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU) e 2 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU).

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  derivante dall'elaborazione delle prove triassiali CID e CIU condotte sui campioni dei sondaggi 4S11, 4SD7 e 4SD8 mostra una buona correlazione e restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a 8 kPa e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $42^\circ$ . I risultati si riferiscono a campioni prelevati a profondità variabili tra 13 e 45 m da piano campagna (Figura 31).

TX - CIU + CID TRVa

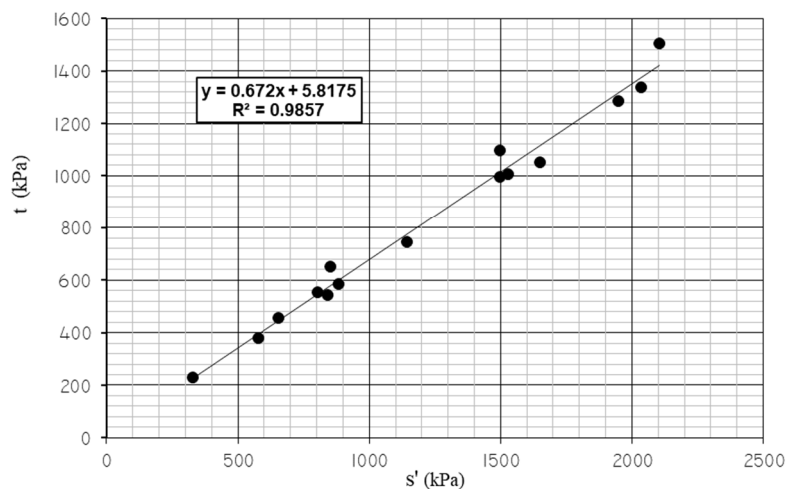


Figura 31 – TRVa - Involuppo di resistenza delle prove triassiali

Le 12 prove di taglio diretto eseguite sui campioni dei sondaggi 4S11, 4SD4, 4SD5 e 4SD6 evidenziano un involucro di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 32) con valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 16 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a  $39^\circ$ . Le profondità di prelievo dei 12 campioni variano tra 13 e 51 m da piano campagna.

TD - TRVa

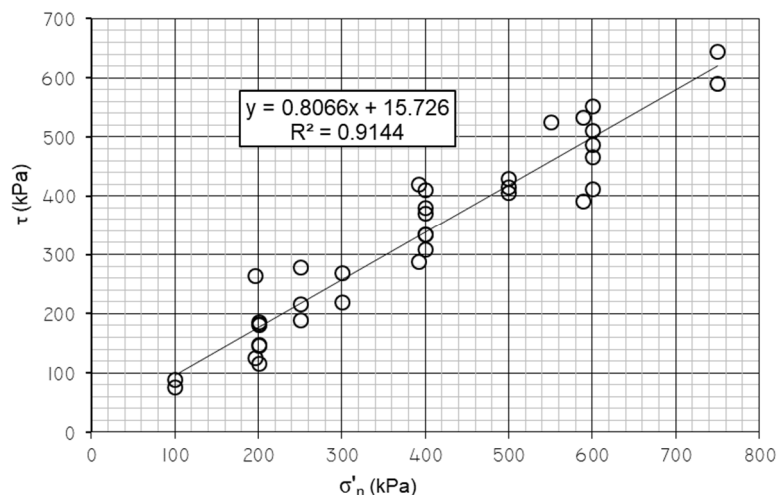
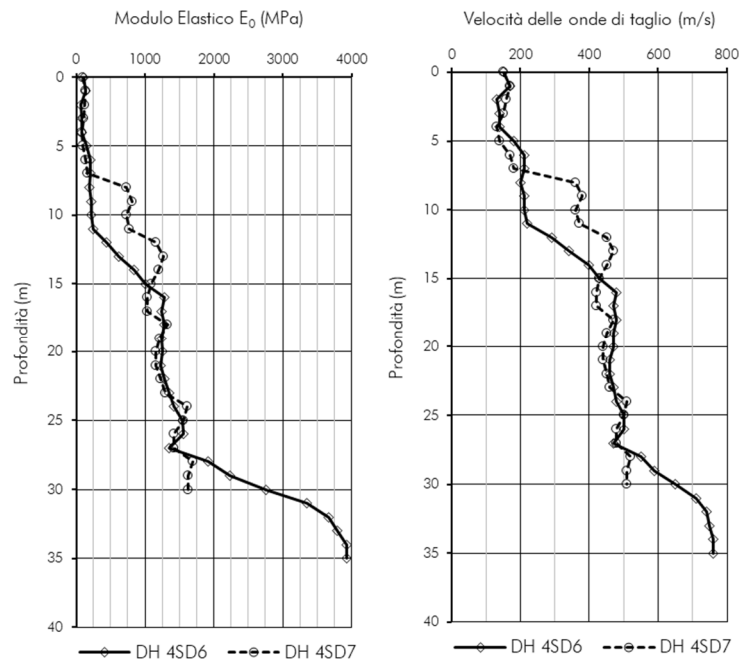


Figura 32 – TRVa - Involuppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)

I valori della resistenza non drenata  $c_u$  ricavati dalle due prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU) dei campioni CI2 e CI4 del sondaggio 4S11 forniscono valori rispettivamente di 771 e 551 kPa a 40,5 e 55,5 m da p.c.

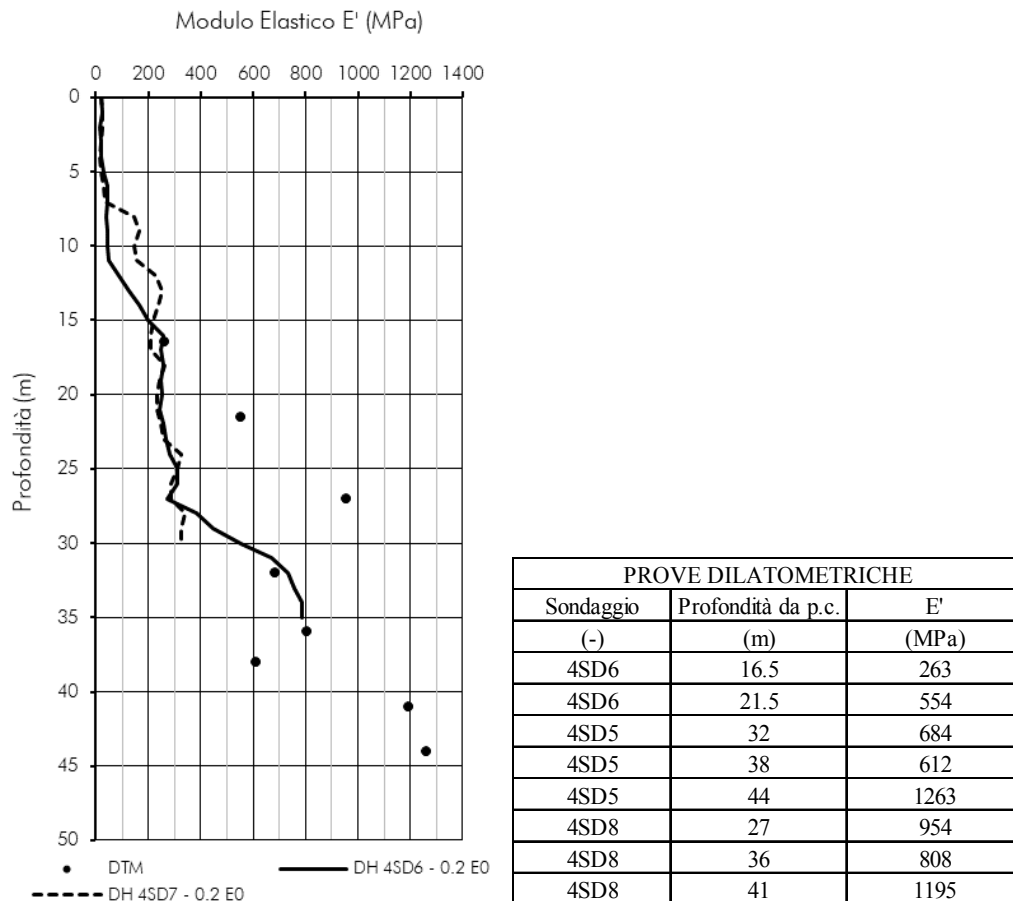
Per determinare il modulo di rigidità iniziale della formazione TRVa si è fatto riferimento alle due prove geofisiche di sito down-hole eseguite in corrispondenza dei sondaggi 4SD6 e 4SD7, le quali mostrano un incremento delle caratteristiche di rigidità con la profondità (Figura 33).



**Figura 33 – TRVa - Modulo di rigidità iniziale e profilo delle velocità delle onde di taglio da prove geofisiche**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione TRVa, sono stati utilizzati i risultati delle prove geofisiche ricavando il rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza di un livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria; nello specifico è stato assunto un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,2. Come confronto sui valori operativi si è fatto riferimento alle 8 prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio. Le diverse prove evidenziano valori confrontabili tra loro e mostrano un incremento della rigidità con la profondità.

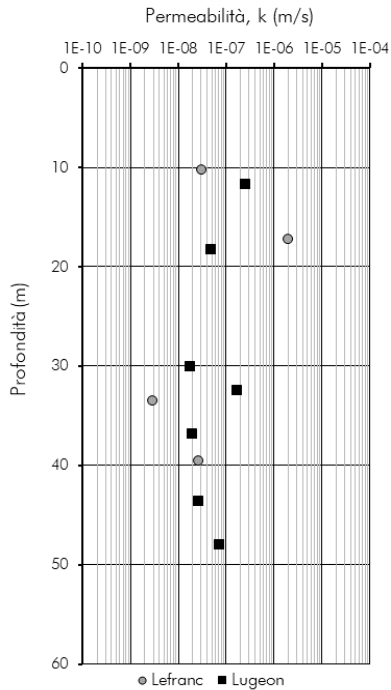
L'intervallo di valori ricavato per il modulo di elasticità operativo  $E'$  all'interno del volume significativo dello scavo della galleria nella formazione del TVR è pari a  $30 \div 1260$  MPa (Figura 34).



**Figura 34 – Modulo di deformabilità operativo da prove geofisiche e prove dilatometriche**

Sono state eseguite un totale di 11 prove di permeabilità (4 prove di tipo Lefranc e 7 di tipo Lugeon) nei fori di sondaggio 4SD5, 4SD6, 4SD7 e 4SD8 a profondità variabili tra 10 e 46 m da p.c., all'interno del volume significativo dell'opera in progetto nella Formazione TRVa. Complessivamente dalle prove si ottiene un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile mediamente tra  $10^{-8}$  e  $10^{-7}$  m/s (Figura 35).





Prova	Sondaggio	Profondità da p.c.	$k$
Lefranc	4SD6	10.3	3.0E-08
Lefranc	4SD6	17.3	2.0E-06
Lefranc	4SD5	33.6	3.0E-09
Lefranc	4SD5	39.6	2.6E-08
Lugeon	4SD7	11.8	2.5E-07
Lugeon	4SD7	18.3	4.8E-08
Lugeon	4SD7	32.5	1.7E-07
Lugeon	4SD8	30.1	1.8E-08
Lugeon	4SD8	36.8	2.0E-08
Lugeon	4SD8	43.7	2.7E-08
Lugeon	4SD5	48.0	7.4E-08

Figura 35 – TRVa - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc e Lugeon

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 TRVa:

Tabella 5 – TRVa – Riepilogo parametri geotecnici

Unità	Coperture	$\gamma$	TD		TX		$E'$	$k$
			$c'$	$\phi'$	$c'$	$\phi'$		
(-)	(m)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(MPa)	(m/s)
TRVa	5 ÷ 85	18 ÷ 22	16	39	8	42	30 ÷ 1260	$10^{-8} \div 10^{-6}$

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

### 9.4.3 Formazione di Terravecchia – Litofacies TRVb

Si tratta di argille, argille limose e limi argillosi a struttura brecciata, talora scagliosa o indistinta, con locali passaggi di argille marnose e argilliti.

Lo scavo della galleria Dittaino intercetta la Formazione Terravecchia TRVb per una estensione pari a circa 130 m, a partire dalla pk 12+550 (dove è presente un sovrascorrimento che mette in contatto la formazione di interesse con la formazione del Flysch Numidico – membro di Monte Salici) fino al termine della galleria in progetto, con coperture variabili tra 5 e 30 m rispetto al piano del ferro. La Formazione, nel tratto di interesse, affiora a NNW del centro abitato di Villanova del Battista. Lo spessore della formazione è coincidente con le coperture rispetto al piano del ferro.



**Figura 36 - Formazione Terravecchia – Litofacies TRVb - Foro di sondaggio 4SD26, tra 15 e 20 m da p.c.**

Per la galleria Dittaino all'interno della Formazione Terravecchia (TRVb), è stato eseguito il sondaggio 4SD26 profondo 35 m e strumentato con piezometro Casagrande con cella installata a 29 m da p.c. e con tubo in PVC per prova geofisica di tipo down-hole. Da questo sondaggio sono stati prelevati, a profondità variabili tra 2,4 m e 33,7 m da piano campagna, 7 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio e 4 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica. La verticale di indagine ha rilevato la presenza consistente di argilla consistente (grado di durezza ISRM: S5) con struttura brecciata e presenza di clasti eterometrici.

Per i campioni prelevati alle profondità a partire da 12 m da p.c., 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 e marnoso-argillosa. Le due prove meccaniche per la determinazione della resistenza non drenata, l'indice di consistenza del materiale, le prove dilatometriche in foro e la prova geofisica 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.

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (50%) e argillosa (46%). Il terreno è classificabile come limo con argilla (AGI, 1977, Rif. [9]).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $19 \div 21 \text{ kN/m}^3$ , mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $17$  e  $19 \text{ kN/m}^3$ . Il peso specifico è variabile tra  $26$  e  $27 \text{ kN/m}^3$ .

I limiti di Atterberg sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

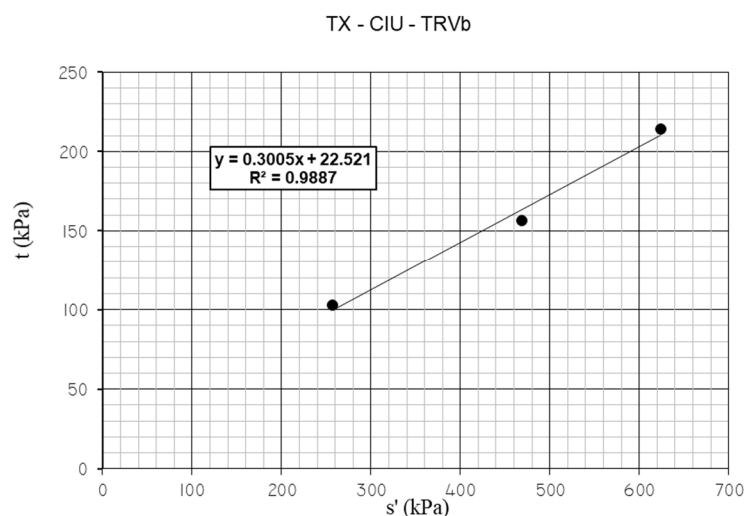
- Limite plastico,  $w_p$ :  $30\% \div 40\%$ ;
- Limite liquido,  $w_L$ :  $50\% \div 100\%$ ;
- Indice di Plasticità,  $I_p$ :  $20\% \div 65\%$

Il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il 10% ed il 20%, con un indice di consistenza  $I_c$  variabile tra 1,3 e 2,1, tipico di terreni molto consistenti.

L'indice di attività della frazione argillosa è variabile tra 0,6 e 1,3 con valore medio pari a 0,8 tipico di terreni mediamente attivi.

Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state eseguite 1 prove di taglio diretto, 1 prove di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU) e 2 prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU).

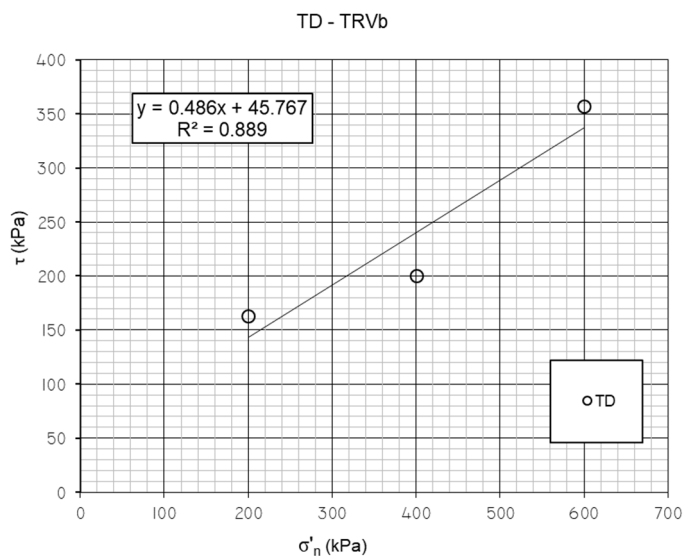
L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 37) derivante dall'elaborazione della prova triassiale CIU condotta sul CI6 a 30 m di profondità restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a 24 kPa e di resistenza al taglio  $\varphi'$  pari a  $17^\circ$ .



 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sottterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

**Figura 37 – TRVb - Inviluppo di resistenza della prova triassiale**

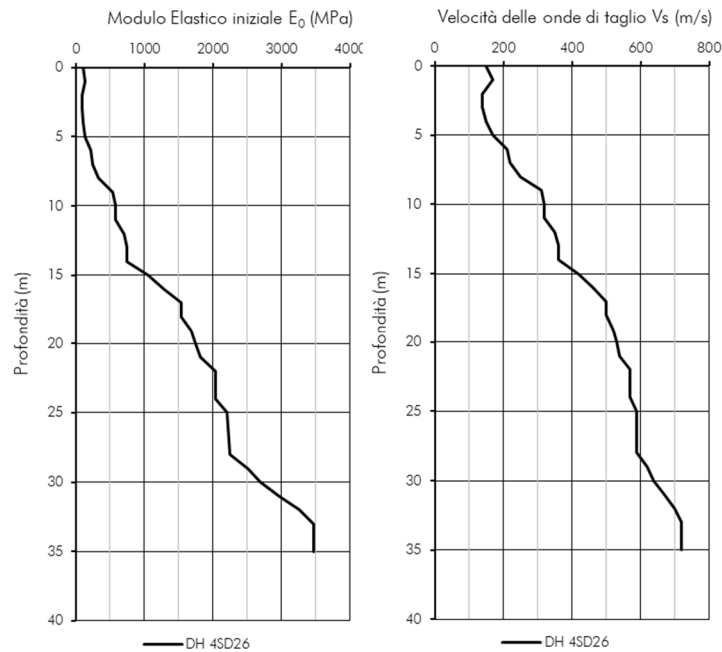
La prova di taglio diretto eseguita sul campione CI4 del sondaggio 4SD26 A 18,7 m da p.c. evidenzia un inviluppo di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 51) con valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 46 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\varphi'$  pari a  $26^\circ$ .



**Figura 38 – TRVb - Inviluppo di resistenza della prova di taglio diretto (TD)**

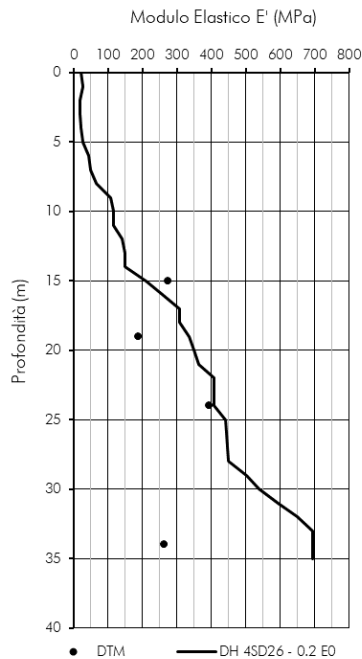
I valori della resistenza non drenata  $c_u$  ricavati dalle prove di compressione triassiale non consolidata non drenata (UU) eseguite sui campioni CI2 (12,6 m da p.c.) e CI5 (25,2 m da p.c.) restituiscono rispettivamente valori di 187 e 430 kPa.

Per determinare il modulo di rigidità iniziale della formazione TRVb si è fatto riferimento alla prova geofisica di sito di tipo down-hole eseguita in corrispondenza del sondaggio 4SD26 (Figura 39).



**Figura 39 – TRVb - Modulo di rigidezza iniziale e profilo delle velocità delle onde di taglio da prova geofisica**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione TRVb, è stato utilizzato il risultato della prova geofisica, ricavando il rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza di un livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria (nello specifico è stato assunto un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,2), confrontato con le 4 prove dilatometriche eseguite nello stesso foro di sondaggio. La prova geofisica e le prove in foro mostrano un ottimo accordo tra loro con un incremento della rigidezza con la profondità. La prova dilatometrica eseguita a maggiore profondità si discosta dal trend individuato dalla prova in sito e dalle restanti prove in foro. 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  $30 \div 700$  MPa (Figura 40).



PROVE DILATOMETRICHE		
Sondaggio	Profondità da p.c.	E'
(-)	(m)	(MPa)
4SD26	15.0	273
4SD26	19.0	189
4SD26	24.0	392
4SD26	34.0	262

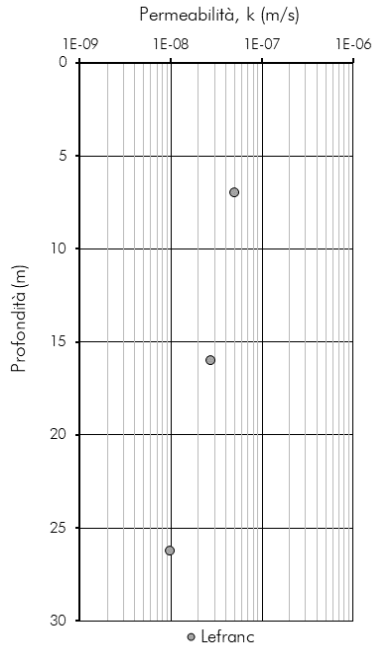
Figura 40 – modulo di deformabilità operativo da prova geofisica e prove dilatometriche

E' stata eseguita una prova di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campione indisturbato. L'elaborazione della prova restituisce un valore di coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  molto modesto (Tabella 10):

Tabella 6 – TRVb - Valore di  $k_{100}$  derivante da prove Huder-Amberg

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100 \text{ H-A}}$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
4SD 26	CI7	33.70	1.1

Sono state eseguite un totale di 3 prove di permeabilità di tipo Lefranc nel foro di sondaggio a profondità variabili tra 7 e 26 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  $10^{-8}$  e  $10^{-7}$  m/s (Figura 41).



Prova	Sondaggio	Profondità da p.c. (m)	k (m/s)
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lefranc	4SD26	7.0	5.0E-08
Lefranc	4SD26	16.0	2.7E-08
Lefranc	4SD26	26.3	9.9E-09

Figura 41 – TRVb - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc

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 7 – TRVb – Riepilogo parametri geotecnici

Unità	Coperture	$\gamma$	TD		TX		E'	k
			c'	$\phi'$	c'	$\phi'$		
(-)	(m)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)	(MPa)	(m/s)
TRVb	5 ÷ 30	19 ÷ 21	46	26	24	17	30 ÷ 700	10 <sup>-8</sup> ÷ 10 <sup>-7</sup>

 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

#### 9.4.4 Formazione delle Sabbie di Cozzo Campana (MS2)

Si tratta di sabbie medio-fini con livelli di limo argilloso debolmente sabbioso, da addensate a molto addensate con locali livelli arenacei.


Le gallerie Nuova Enna e Sicani interessano la Formazione delle Sabbie di Cozzo Campana esclusivamente per la tratta iniziale a partire dai rispettivi imbocchi lato Palermo rispettivamente per 85 m (pk 1+711) e 60 m (pk. 2+820) con coperture fino a 25 m rispetto al piano del ferro. La presenza di tale formazione per uno spessore di 10 m da p.c. è confermata dai sondaggi 4SD4, 4S11, 4SD7 e 4SD8 realizzati nelle due gallerie in prossimità dell'imbocco lato Palermo delle gallerie stesse.

Il materiale al carotaggio si presenta a tratti sciolto con granulometria prevalentemente sabbiosa (Figura 42) e a tratti con componente limoso-argillosa. Nel primo caso la caratterizzazione geotecnica è stata condotta mediante prove penetrometriche in foro, mentre nel secondo caso è stato possibile il prelievo di campioni indisturbati da sottoporre a prove di laboratorio.



Figura 42 – Sabbie di Cozzo Campana nel foro di sondaggio 4SD4 (sinistra), 4S11 (destra) e 4SD7 (in basso) tra 5 e 10 m da p.c.



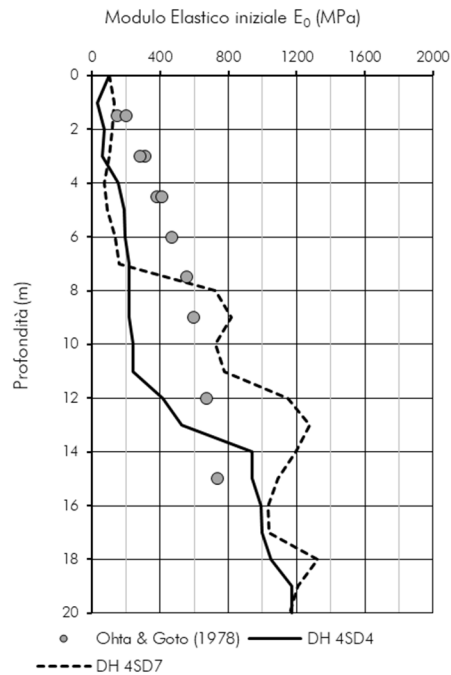
 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

Le prove penetrometriche dinamiche eseguite in sito nella formazione MS2 sono state elaborate mediante le relazioni empiriche relative a terreni granulari di De Mello (1971) e Bolton (1989). Tali correlazioni forniscono valori dell'angolo di resistenza al taglio  $\varphi' \geq 34^\circ$ . Nella Tabella 8 si riporta il dettaglio del numero di colpi necessario ad un'infissione del campionatore standard pari a 300 mm.

**Tabella 8 – Valori numerici della prova penetrometrica dinamica**

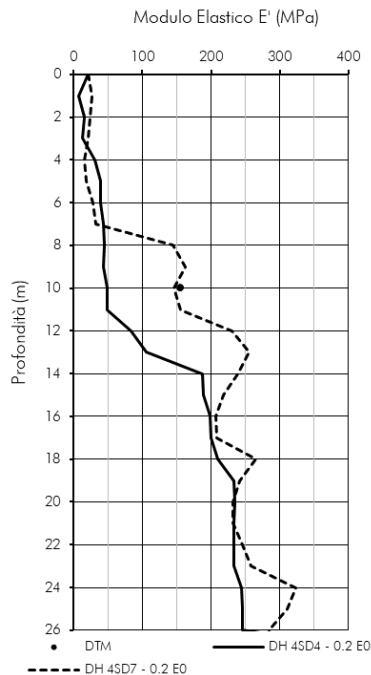
Sondaggio	z	N <sub>SPT</sub>
(-)	(m)	(-)
4SD4	3	53
4SD4	4.5	59
4SD7	3	39
4SD7	4.5	73
4SD7	6	78
4SD7	7.5	Rifiuto
4SD7	9	Rifiuto
4SD7	12	Rifiuto
4SD7	15	Rifiuto

Per determinare il modulo di rigidezza iniziale della formazione MS2 si è fatto riferimento alle due prove geofisiche di sito down-hole eseguite in corrispondenza dei sondaggi 4SD4 e 4SD7 confrontate anche con le correlazioni empiriche proposte da Ohta & Goto (1978); le prove in sito e le relazioni empiriche sono confrontabili tra loro e mostrano un incremento delle caratteristiche di rigidezza con la profondità (Figura 43).



**Figura 43 – MS2 - Modulo di rigidità iniziale da prove geofisiche e relazioni empiriche**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa  $E'$  si è fatto riferimento ai valori ricavati dalle prove geofisiche down-hole, assumendo per questa un valore del rapporto  $E/E_0$  in funzione del livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria (nello specifico  $E/E_0 = 0,2$ ), confrontate con la prova dilatometrica eseguita nel foro di sondaggio 4SD4 (Figura 44).



PROVE DILATOMETRICHE		
Sondaggio	Profondità da p.c.	E'
(-)	(m)	(MPa)
4SD4	10.0	156

**Figura 44 – Modulo di deformabilità da prova down-hole e prova dilatometrica**

È stata eseguita 1 prova di permeabilità di tipo Lefranc nel foro di sondaggio 4SD4 ad una profondità di 5,3 m da piano campagna. La prova restituisce un coefficiente di permeabilità  $k$  pari a  $2,5 \times 10^{-5}$ .

**Tabella 9 – Coefficiente di permeabilità  $k$  da prova Lefranc**

Prova	Sondaggio	Profondità da p.c.	$k$
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lefranc	4SD4	5.3	$2.5E-05$

Sui 4 campioni indisturbati prelevati dai fori di sondaggio, le analisi granulometriche mostrano la prevalenza della componente sabbiosa (67%) e, in maniera secondaria, limosa (20%) con percentuali modeste di argilla (11%). Il terreno è classificabile come sabbia limoso-argillosa (AGI, 1977).

Sui campioni indisturbati dei sondaggi 4SD7 e 4SD8 sono state effettuata 3 prove di taglio diretto, il cui risultato, nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 31) fornisce valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  circa pari a 5 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a circa  $42^\circ$ .

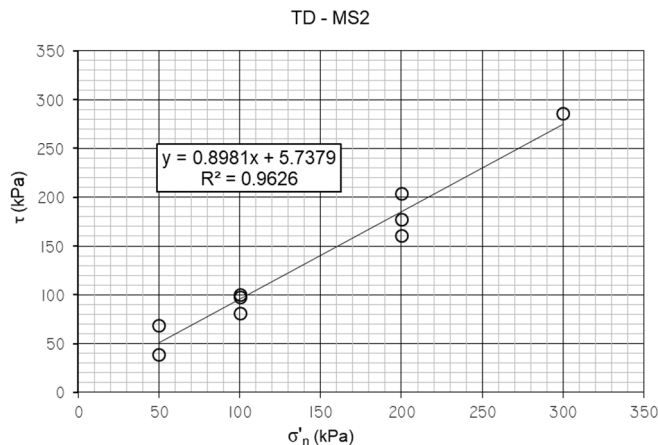


Figura 45 – Involuppo di resistenza della prova di taglio diretto (TD)

È stata eseguita anche una prova triassiale consolidata drenata (CID) sul CI1 del sondaggio 4SD8 a 6,2 m da p.c. il cui involucro di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  nulla e di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a circa  $34^\circ$  (Figura 46).

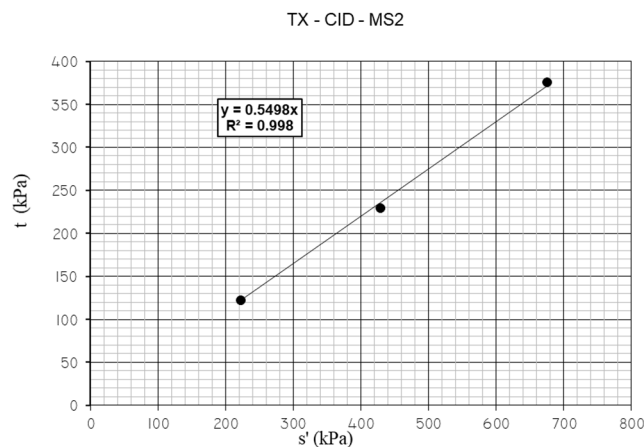


Figura 46 – MS2 - Involuppo di resistenza della prova triassiale

In sintesi, la caratterizzazione geotecnica condotta sulla base delle indagini e delle prove in sito e di laboratorio descritte ha permesso la definizione dei seguenti intervalli di valori rappresentativi dei principali parametri geotecnici per l'Unità MS2:

Unità	Coperture	$\gamma$	$c'$	$\phi'$	$E'$	$k$
(-)	(m)	( $\text{kN/m}^3$ )	(kPa)	( $^\circ$ )	(MPa)	(m/s)
MS2	5 ÷ 25	19 ÷ 21	0 ÷ 5	34 ÷ 42	20 ÷ 300	$10^{-5} \div 10^{-4}$

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

#### 9.4.5 Argille Varicolori Inferiori (AVF)

Sono depositi marini di base scarpata costituiti da argille limose e argille marnose, a struttura caotica o scagliosa, con sottili intercalazioni di diaspri e calcari; a luoghi si rinvencono olistoliti eterometrici costituiti da calcari detritici e calcari marnosi. Durante il rilevamento geologico è stato osservato un olistolite di calcare marnoso di dimensioni decametriche.

Lo scavo della galleria Dittaino intercetta le Argille Varicolori Inferiori per una estensione pari a circa 1310 m, a partire dall'imbocco lato Palermo della galleria (pk. 10+516) fino alla pk. 11+850 in corrispondenza della quale vi è un lineamento tettonico che mette in contatto la formazione delle Argille Varicolori con il Flysch Numidico – membro di Monte Salici (FYN3). Le coperture sono variabili tra 5 e 100 m rispetto al piano del ferro. Lo spessore della formazione rispetto al piano del ferro è sempre coincidente con l'intervallo di coperture.

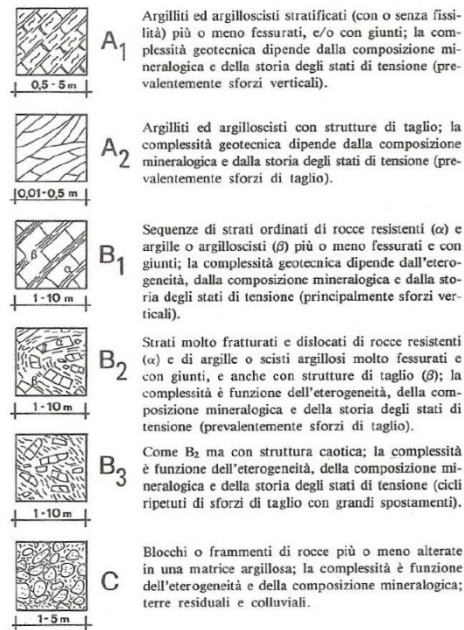


**Figura 47 – Argille Varicolori Inferiori - Foro di sondaggio 4SD21 (sinistra) tra 20 e 25 m da p.c., e 4SD27 (destra) tra 65 e 70 m da p.c.**



**Figura 48 – Argille Varicolori Inferiori – olistolite calcareo.**

La formazione delle Argille Varicolori Inferiori (AVF) può essere classificata come “formazione strutturalmente complessa” di classe A2/B3 (Figura 49; Esu, 1977).



**Figura 49 – classificazione delle “formazioni strutturalmente complesse” (Esu, 1977)**

Per la galleria Dittaino all'interno delle Argille Varicolori Inferiori, sono stati eseguiti 4 sondaggi: 4SD21, 4SD22, 4SD27 e 4S14; il primo in corrispondenza dell'imbocco lato Palermo della galleria e i restanti tre realizzati in modo tale da coprire l'intervallo di coperture della galleria all'interno della formazione. Da questi 4 sondaggi sono stati prelevati, a profondità variabili tra 3 m e 95 m da piano campagna, 14 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio. Tutte le verticali di indagine hanno riportato la presenza di struttura assimilabile ad una argilla limosa, argilla marnosa con presenza di clasti prevalentemente argilloso-marnosi e arenacei o di natura siltitica e argillitica o clacareo-marnosi. Nel sondaggio 4SD22 in particolare sono stati rinvenuti anche livelli di arenaria mediamente alterati.

I campioni prelevati dai sondaggi, una volta aperti in laboratorio, hanno mostrato ripetutamente difficoltà nel fustellamento dei provini necessari alle prove meccaniche per la stima dei parametri di resistenza efficaci, a causa della struttura scagliosa e della fragilità legati ad una disomogeneità diffusa all'interno del campione.

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (52%) e argillosa (36%) con una percentuale modesta di sabbia (10%). Il terreno è classificabile come limo con argilla debolmente sabbioso (AGI, 1977, Rif. [9]).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $18 \div 22 \text{ kN/m}^3$ , con i valori maggiori in profondità, mentre il peso di volume del materiale secco varia tra  $15 \text{ e } 19 \text{ kN/m}^3$  ed anch'esso aumenta con la profondità. Il peso specifico è variabile tra  $26 \text{ e } 27 \text{ kN/m}^3$ .

I limiti di Atterberg sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

Relazione tecnica delle opere in sotterraneo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40 D 07	RH	GN 00 00 001	C	55 di 94

- Limite plastico,  $w_p$ : 20% ÷ 35%;
- Limite liquido,  $w_L$ : 30% ÷ 90%;
- Indice di Plasticità,  $I_p$ : 10% ÷ 60%

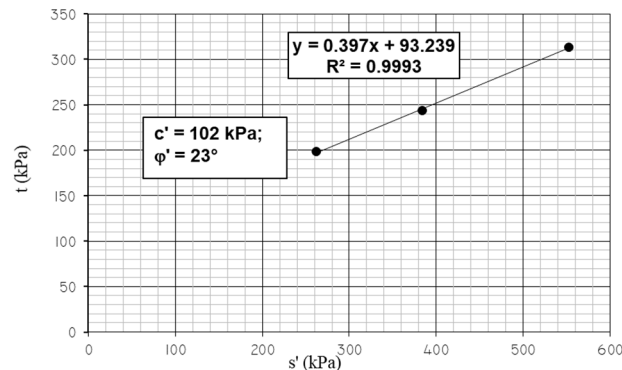
Il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il 8% ed il 27%, con un indice di consistenza  $I_c$  variabile e crescente con la profondità tra 1 e 2,6, tipico di terreni molto consistenti.

La frazione argillosa è mediamente attiva con un indice di attività  $A$  medio pari a 0,65.

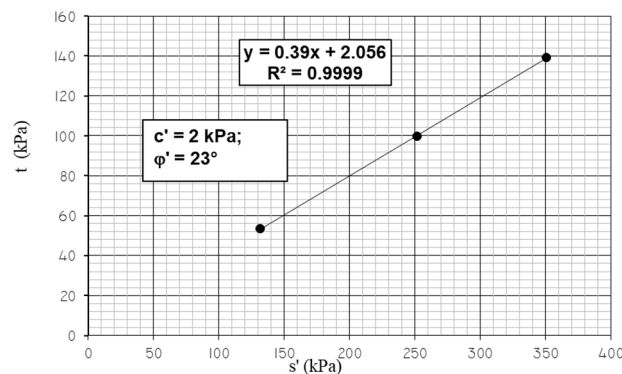
Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state eseguite 6 prove di taglio diretto, 3 prove di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU) e 1 prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

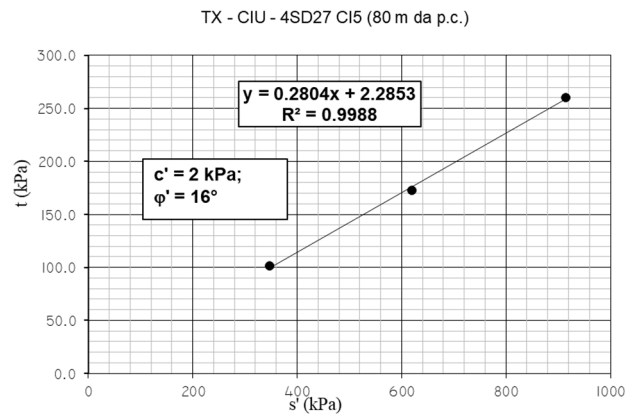
Le 3 prove di compressione triassiale CIU presentano un involucro di resistenza con una correlazione molto bassa ( $R^2 < 0,5$ ); per tale motivo si riportano gli involucchi indipendenti per ogni singola prova nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 50). Il valore inferiore dell'angolo di resistenza al taglio può essere dovuto ad una rottura con probabile attivazione di superfici di taglio preesistenti.

TX - CIU - 4SD21 CI3 (12 m da p.c.)



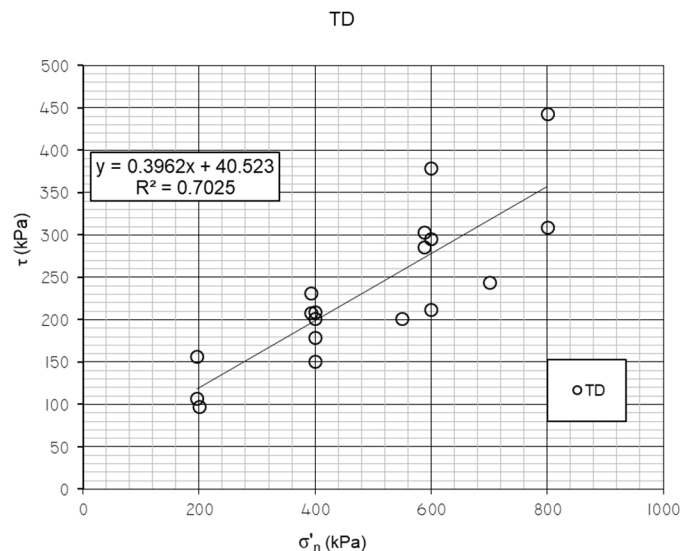
TX - CIU - 4SD21 CI1 (3 m da p.c.)





**Figura 50 – AVF – Inviluppo di resistenza delle singole prove triassiali**

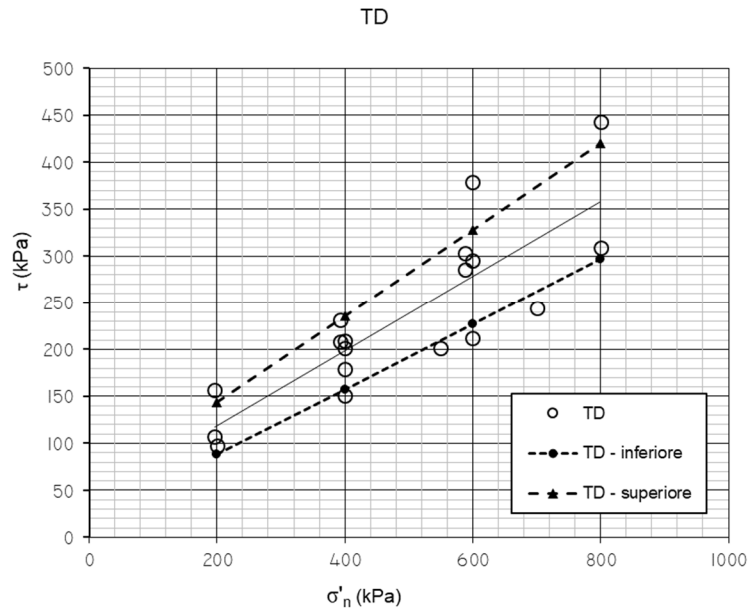
Le 6 prove di taglio diretto di picco eseguite sui campioni dei sondaggi 4S14, 4SD21 e 4SD27 evidenziano un inviluppo di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 51) con valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 40 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a circa  $22^\circ$ . Le profondità di prelievo dei 6 campioni variano tra 26 e 85 m da piano campagna.



**Figura 51 – AVF - Inviluppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)**

Come si evince dalla Figura 51 i risultati delle prove forniscono valori abbastanza dispersi e, pertanto, si identificano un intervallo inferiore e superiore degli inviluppi di resistenza (Figura 52). Nello specifico l'inviluppo inferiore restituisce dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 18 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a circa  $19^\circ$ , mentre quello superiore coesione  $c'$  pari a 51 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\phi'$  pari a circa  $25^\circ$ .

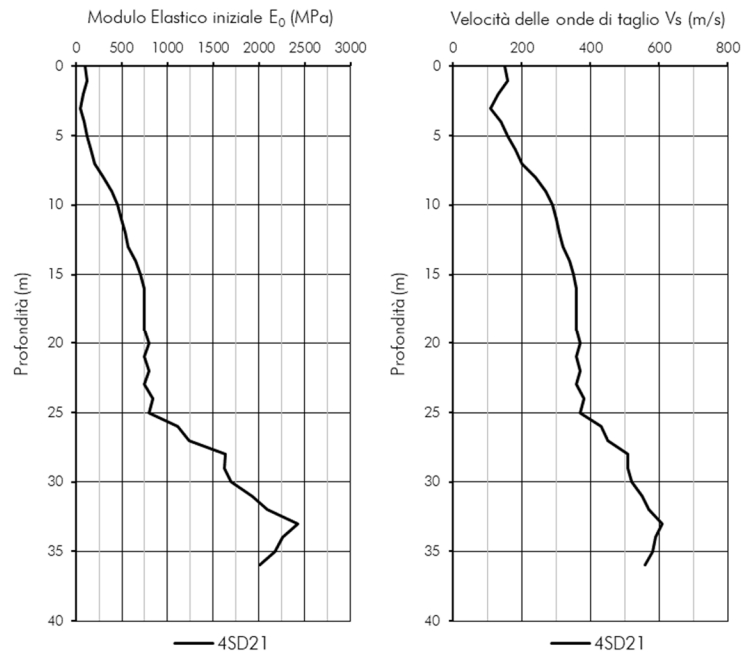




**Figura 52 – AVF – intervallo involuppo di resistenza delle prove di taglio diretto (TD)**

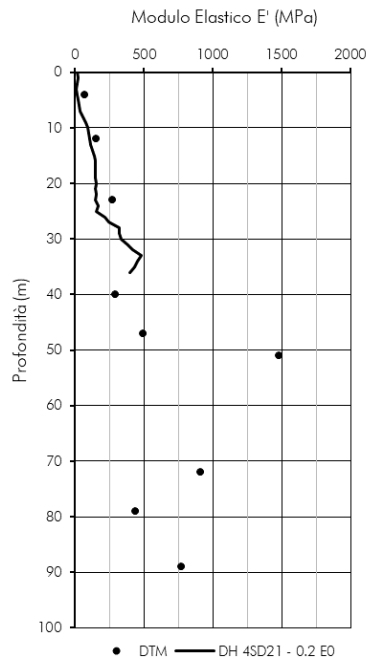
Il valore della resistenza non drenata  $c_u$  ricavato dalla sola prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL) condotta sul campione CI8 alla profondità di 95 m da p.c. è pari a 107 kPa.

Per determinare il modulo di rigidezza iniziale della formazione AVF si è fatto riferimento alla prova geofisica di sito down-hole eseguita in corrispondenza del sondaggio 4SD21, di seguito riportata (Figura 53) che evidenzia un incremento della rigidezza con la profondità.



**Figura 53 – AVF- Modulo di rigidità iniziale e profilo delle velocità delle onde di taglio da prova geofisica**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione AVF, è stato utilizzato il risultato della prova geofisica, ricavando il rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza di un livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria (nello specifico è stato assunto un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,2), confrontando inoltre i risultati ottenuti dalle 9 prove dilatometriche eseguite nei fori di sondaggio 4SD21, 4SD22 e 4SD27 (eseguite anche a profondità maggiori rispetto a quelle indagate dalla prova geofisica). Le diverse prove evidenziano valori confrontabili tra loro e mostrano un incremento della rigidità con la profondità, in particolare dopo i 50 m da piano campagna. L'intervallo di valori ricavato per il modulo di elasticità operativo  $E'$  per profondità compresa tra 5 - 90 m da p.c. è pari a  $25 \div 1475$  MPa (Figura 54).



PROVE DILATOMETRICHE		
Sondaggio	Profondità da p.c.	E'
(-)	(m)	(MPa)
4SD22	40.0	292
4SD22	47.0	497
4SD22	51.0	1485
4SD27	72.0	915
4SD27	79.0	443
4SD27	89.0	773
4SD21	4.0	72
4SD21	12.0	153
4SD21	23.0	271

**Figura 54 – modulo di deformabilità operativo da prova geofisica e prove dilatometriche**

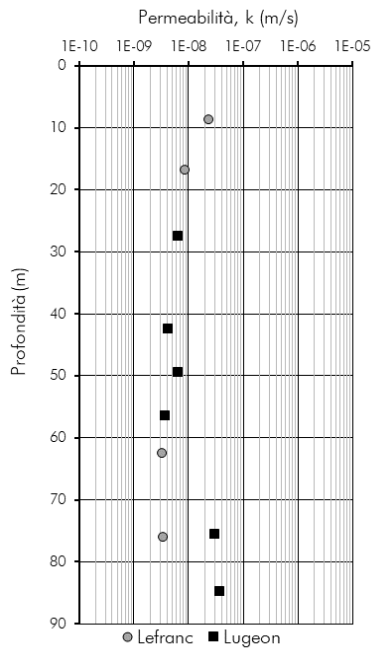
Sono state eseguite 2 prove di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campioni indisturbati del sondaggio 4SD22 e 4SD27 a profondità rispettivamente di 52,7 (CI6) e 89,5 (CI7) m da piano campagna.

L'elaborazione delle due prove secondo il metodo Huder-Amberg restituisce valori di coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  modesti e riassunti nella Tabella 10.

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

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100 \text{ H-A}}$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
4 SD22	CI6	52.7	1.9
4 SD27	CI7	89.5	2.0

Sono state eseguite un totale di 10 prove di permeabilità (4 di tipo Lefranc e 6 di tipo Lugeon) nei fori di sondaggio a profondità variabili tra 9 e 85 m da p.c., all'interno del volume significativo dell'opera in progetto nella Formazione AVF. Complessivamente dalle prove si ottiene un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $10^{-9}$  e  $10^{-7}$  m/s (Figura 55).



Prova	Sondaggio	Profondità da p.c.	k
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lefranc	4S14	62.5	3.3E-09
Lefranc	4S14	76.0	3.5E-09
Lefranc	4SD21	8.8	2.4E-08
Lefranc	4SD21	16.8	8.8E-09
Lugeon	4SD21	27.5	6.5E-09
Lugeon	4SD22	42.5	4.2E-09
Lugeon	4SD22	49.5	6.6E-09
Lugeon	4SD22	56.5	3.7E-09
Lugeon	4SD27	84.8	3.8E-08
Lugeon	4SD27	75.5	3.0E-08

Figura 55 – AVF - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc

Complessivamente le Argille Varicolori Inferiori mostrano caratteristiche fisiche e meccaniche più o meno costanti con la profondità fino a circa 50 m da piano campagna. Oltre tale profondità si evince un passaggio verso un materiale più resistente come evidenziato sia dall'indice di consistenza e dal peso di unità di volume che dalle caratteristiche di rigidità (prove dilatometriche). Questi risultati avvalorano quanto osservato in fase di esecuzione dei sondaggi 4SD22 e 4SD27, in cui si è riscontrato un materiale argilloso molto consistente, con grado di durezza ISRM: S5-S6.

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 AVF:

Tabella 11 – AVF – Riepilogo parametri geotecnici

Unità	Coperture	$\gamma$	TD		$E'$	$k$
			$c'$	$\phi'$		
(-)	(m)	( $\text{kN/m}^3$ )	(kPa)	(°)	(MPa)	(m/s)
AVF	5 ÷ 100	18 ÷ 22	18 ÷ 51	19 ÷ 25	25 ÷ 1485	$10^{-9} \div 10^{-7}$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

#### 9.4.6 *Flysch Numidico – membro di Monte Salici (FYN3/FYN3a)*

Il Flysch Numidico FYN3 è un deposito torbiditico costituito da un'alternanza di argille limose e argille limoso-marnose, a struttura scagliosa o indistinta, con frequenti livelli millimetrici di sabbie limose; a luoghi si rinvencono intercalazioni di quarzareniti medio-fini.

Lo scavo della galleria Dittaino intercetta la Formazione del Flysch Numidico per una estensione pari a circa 700 m, a partire dalla pk 11+850 (dove la formazione è in contatto tettonico con la formazione del Gruppo delle Argille Variegate) fino alla pk. 12+550 (dove un sovrascorrimento mette in contatto la formazione con la Formazione Terravecchia litofacies TRVb), con coperture variabili tra 30 e 100 m rispetto al piano del ferro. Lo spessore della formazione è coincidente con le coperture rispetto al piano del ferro, ad eccezione di qualche affioramento superficiale di natura litoide assimilabile alla formazione del Flysch Numidico – litofacies FYN3a (quarzareniti in strati spessi e grossi banchi, con livelli di argilliti e argille marnose).



**Figura 56 - Formazione del Flysch Numidico FYN3 - Foro di sondaggio 4SD25, tra 45 e 50 m da p.c. (Argilla consistente con presenza di livelli di sabbia fine e arenaria)**



**Figura 57 - Formazione del Flysch Numidico FYN3 - Foro di sondaggio 4SD25, tra 50 e 55 m da p.c. (Argilla consistente con livelli di sabbia fine)**

Per la galleria Dittaino all'interno della Formazione del Flysch Numidico, è stato eseguito il sondaggio 4SD25 profondo 70 m e strumentato con piezometro Casagrande con cella installata a 50 m da p.c. Da questo sondaggio sono stati prelevati, a profondità variabili tra 19 m e 69,4 m da piano campagna, 5 campioni indisturbati sottoposti a prove di laboratorio, 3 campioni rimaneggiati utilizzati per la ricostruzione del profilo stratigrafico e per l'analisi della composizione granulometrica ed 1 campione litoide di arenaria a grana grossa ben cementata sottoposto a prove di laboratorio. La verticale di indagine ha rilevato la presenza di argilla consistente (grado di durezza ISRM: S5) a luoghi limosa con presenza di livelli di arenaria, calcarenite e sabbie cementate (Figura 56 - Figura 57).

La formazione del Flysch Numidico (FYN3) può essere classificata come "formazione strutturalmente complessa" di classe B2 (Figura 58; Esu, 1977).

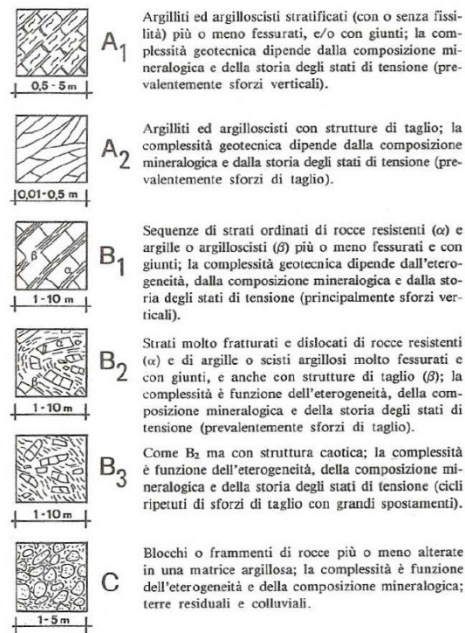


Figura 58 – classificazione delle “formazioni strutturalmente complesse” (Esu, 1977)

Complessivamente per la formazione del Flysch Numidico membro di Monte Salici (FYN3) si riscontra una componente pelitica (argillosa) prevalente rispetto a quella litoide (quarzoarenite), come confermato dal sondaggio eseguito e dall'indagine sismica tomografica (Riferimento Geologia), con un rapporto L/P inferiore a 1.

Le analisi granulometriche eseguite sulla parte pelitica dei campioni prelevati mostrano la prevalenza della componente limosa (54%) e argillosa (41%) con una percentuale modesta di sabbia (7%). Il terreno è classificabile come limo con argilla debolmente sabbioso (AGI, 1977, Rif. [9]).

Il peso dell'unità di volume è compreso tra  $20 \div 22 \text{ kN/m}^3$ , mentre il peso di volume del materiale secco varia tra 18 e  $21 \text{ kN/m}^3$ . Il peso specifico è variabile tra 26 e  $27 \text{ kN/m}^3$ . Il peso di unità di volume del campione litoide è pari a  $22 \text{ kN/m}^3$ .

I limiti di Atterberg sono compresi negli intervalli di seguito riportati:

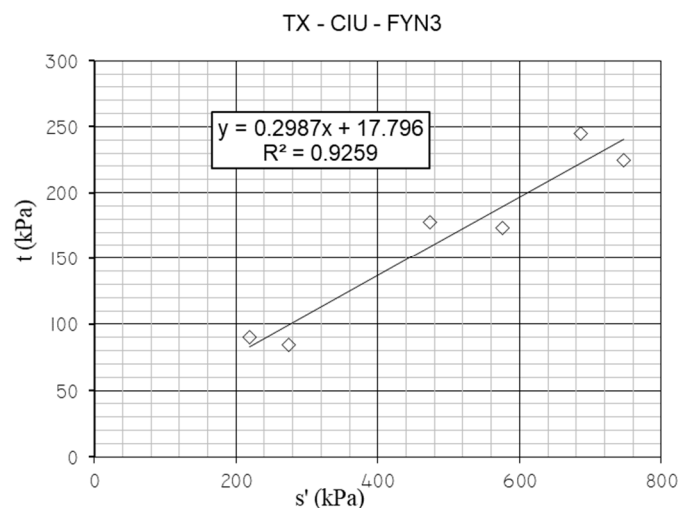
- Limite plastico,  $w_p$ :  $20\% \div 40\%$ ;
- Limite liquido,  $w_L$ :  $40\% \div 80\%$ ;
- Indice di Plasticità,  $I_p$ :  $10\% \div 45\%$

Il contenuto d'acqua naturale  $w$  risulta compreso tra il 9% ed il 17%, con un indice di consistenza  $I_C$  variabile tra 1,5 e 2,2, tipico di terreni molto consistenti.

L'indice di attività della frazione argillosa è variabile tra 0,3 e 1,2 con valore medio pari a 0,6 tipico di terreni mediamente attivi.

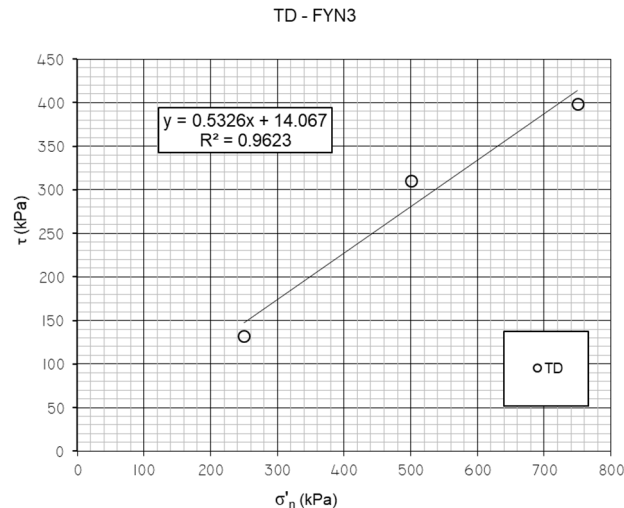
Sono stati analizzati, ai fini della caratterizzazione meccanica, i risultati delle prove di laboratorio condotte sui campioni indisturbati. Sono state eseguite 1 prove di taglio diretto, 2 prove di compressione triassiale consolidata non drenata (CIU) e 1 prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL).

L'involuppo di resistenza nel piano degli invarianti  $t'$  ed  $s'$  (Figura 59) derivante dall'elaborazione delle prove triassiali CIU restituisce valori di intercetta di coesione  $c'$  pari a 19 kPa e di resistenza al taglio  $\varphi'$  pari a  $17^\circ$ . Le due prove sono state condotte su due campioni prelevati a profondità di 19 e 26 m da piano campagna.



**Figura 59 – FYN3 - Involuppo di resistenza della prova triassiale**

La prova di taglio diretto eseguita sul campione CI5 del sondaggio 4SD25 a 61 m da p.c. evidenzia un involucro di resistenza nel piano di Mohr-Coulomb (Figura 60) con valori dei parametri di resistenza con coesione  $c'$  pari a 14 kPa e angolo di resistenza al taglio  $\varphi'$  pari a  $28^\circ$ .



**Figura 60 – FYN3 - Inviluppo di resistenza della prova di taglio diretto (TD)**

Il valore della resistenza non drenata  $c_u$  ricavato dalla prova di compressione ad espansione laterale libera (ELL) eseguita sul campione CI3 a 39,3 m da p.c. restituisce un valore di 418 kPa.

Per la caratterizzazione meccanica della matrice rocciosa della componente litoide della formazione del Flysch Numidico (FYN3/FYN3a) si è fatto riferimento al risultato della prova di compressione monoassiale eseguita sul campione lapideo prelevato dal foro di sondaggio; nello specifico è stato ricavato un valore di resistenza a compressione monoassiale  $\sigma_c$  pari a 9,70 MPa.

**Tabella 12 – FYN3 - resistenza a compressione monoassiale  $\sigma_c$**

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$\sigma_c$	Descrizione Campione da Laboratorio
(-)	(-)	(m)	(MPa)	(-)
4 SD25	CR 2	48.4	9.7	Arenaria a grana grossa ben cementata

Il modulo elastico della matrice rocciosa è stato ricavato dall'interpretazione della prova di velocità sonica su provino ( $V_p$ ) e dalla prova di compressione monoassiale (CM). Da quest'ultima è stato determinato il modulo tangente iniziale. I risultati delle due prove sono riportati di seguito (Tabella 13).

**Tabella 13 – FYN3 – modulo di rigidezza da prove di laboratorio**



	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$E_i$ , CM
(-)	(-)	(m)	(GPa)
4 SD 25	CR 2	48.4	5.7

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$E_i$ , vel ultra
(-)	(-)	(m)	(GPa)
4 SD25	CR 2	48.4	4.5

Al fine di valutare le caratteristiche strutturali della componente litoide della formazione del Flysch Numidico sono stati eseguiti dei rilievi geostrukturali in corrispondenza di un affioramento della formazione (FYN3a) nella sua componente quarzarenitica.

L'interpretazione dei rilievi geostrukturali ha consentito di definire le caratteristiche geotecniche della componente litoide della formazione identificando un indice di qualità GSI, che risulta compreso nell'intervallo  $40 \div 50$ . Per la caratterizzazione della componente lioide si è fatto comunque riferimento al valore inferiore dell'intervallo ricavato.



**Figura 61 – Stop geologico – Flysch Numidico membro di Monte Salici: facies quarzoarenitica FYN3a**

La determinazione dei parametri di resistenza è stata eseguita a partire dalle caratteristiche della matrice rocciosa intatta adottando il criterio di resistenza di Hoek & Brown (1988).

 <p><b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO          NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA          PROGETTO DEFINITIVO          TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</p>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA RS3V	LOTTO 40 D 07	CODIFICA RH	DOCUMENTO GN 00 00 001	REV. C

In questo modello, la curva intrinseca che fornisce le condizioni di rottura dell'ammasso è data dalla seguente espressione:

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

dove:

- $\sigma'_1$ : tensione principale efficace maggiore a rottura;
- $\sigma'_3$ : tensione principale efficace minore a rottura;
- $\sigma'_{ci}$ : resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- $m_b$ : funzione del valore della costante  $m_i$  della roccia intatta secondo la relazione:

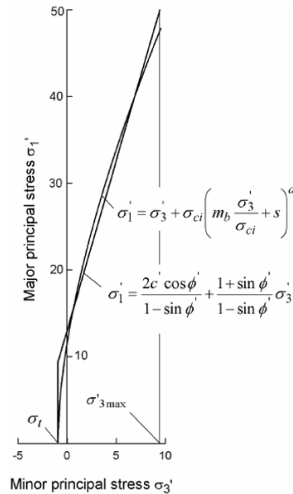
$$m_b = m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 \cdot D}\right)$$

- $s$ : costante data dalla seguente relazione:  $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$   $s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$ ;

- $a$ : costante data dalla seguente relazione:  $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{15}} \right)$   $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{15}} \right)$ ;

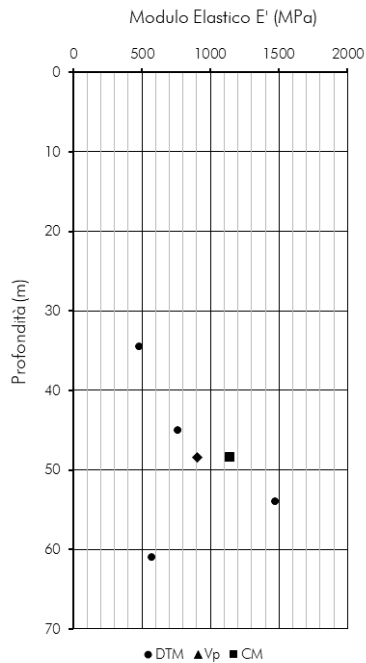
- $D$ : fattore che dipende dal grado di disturbo dell'ammasso roccioso, calibrato in funzione delle metodologie realizzative dell'opera.
- $GSI$ : Geological Strength Index - indice di qualità per valutare le caratteristiche geotecniche intrinseche dell'ammasso roccioso.

La resistenza al taglio è stata 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 resistenza al taglio  $\varphi'$  (Figura 62).



**Figura 62 – interpolazione della curva intrinseca di Hoek e Brown: retta di rottura di Mohr-Coulomb**

Per determinare le caratteristiche di deformabilità operativa della formazione FYN3 nel suo complesso, si è fatto riferimento alle prove dilatometriche eseguite nel foro di sondaggio 4SD25. Le prove in foro sono state confrontate anche con i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio di velocità sonica su provino e di compressione monoassiale, ricavando per queste un rapporto  $E/E_0$  in corrispondenza di un livello di deformazione atteso a seguito dello scavo della galleria; nello specifico è stato assunto un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,2. Le diverse prove forniscono risultati paragonabili il cui intervallo di valori ricavato per il modulo di elasticità operativo  $E'$  all'interno del volume significativo dello scavo della galleria nella formazione del FYN3/FYN3a è pari a  $480 \div 1470$  MPa (Figura 63).



PROVE DILATOMETRICHE		
Sondaggio	Profondità da p.c.	E'
(-)	(m)	(MPa)
4SD25	34.5	480.0
4SD25	45.0	762.0
4SD25	54.0	1470.0
4SD25	61.0	573.0

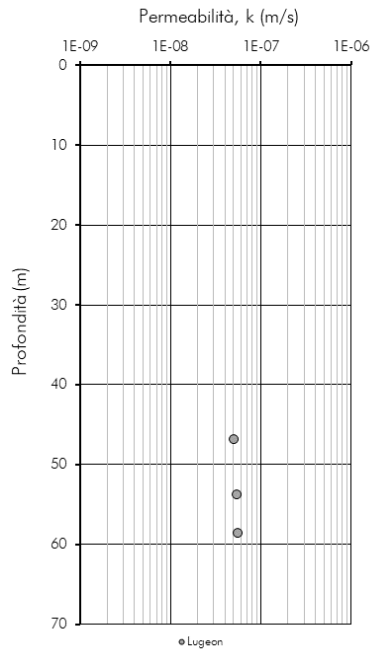
Figura 63: modulo di deformabilità operativo da prove di laboratorio e prove dilatometriche

Per la componente pelitica della formazione è stata eseguita una prova di rigonfiamento secondo il metodo Huder-Amberg su campione indisturbato. L'elaborazione della prova restituisce un valore di coefficiente  $k_{100 \text{ H-A}}$  riportato in Tabella 14:

Tabella 14 – FYN3 - Valore di  $k_{100}$  derivante da prove Huder-Amberg

Sondaggio	Campione	Profondità da p.c.	$k_{100 \text{ H-A}}$
(-)	(-)	(m)	(kPa)
4SD25	C15	61.0	4.8

Sono state eseguite un totale di 3 prove di permeabilità di tipo Lugeon nel foro di sondaggio a profondità variabili tra 47 e 59 m da p.c., all'interno del volume significativo dell'opera in progetto nella Formazione FYN3. Complessivamente dalle prove si ottiene un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $10^{-8}$  e  $10^{-7}$  m/s (Figura 64).



Prova	Sondaggio	Profondità da p.c.	k
(-)	(-)	(m)	(m/s)
Lugeon	4SD25	46.9	5.1E-08
Lugeon	4SD25	53.9	5.4E-08
Lugeon	4SD25	58.7	5.6E-08

Figura 64 – FYN3 - Coefficiente di permeabilità  $k$  da prove Lefranc

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 FYN3 e FYN3a (Tabella 15- Tabella 16):

Tabella 15 – FYN3– 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)
FYN3	30 ÷ 100	20 ÷ 22	14	28	19	17	480 ÷ 1470	$10^{-8} \div 10^{-7}$

Tabella 16 – FYN3a – Riepilogo parametri geotecnici

Unità	Coperture	$\gamma$	$\sigma_{ci}$	$E_i$	GSI	$E_{rm}$	k
(-)	(m)	(kN/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(GPa)	(-)	(MPa)	(m/s)
FYN3a	30 ÷ 100	22	9.7	4.5 - 5.7	40 ÷ 50	480 ÷ 1470	$10^{-8} \div 10^{-7}$

Relazione tecnica delle opere in sotterraneo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40 D 07	RH	GN 00 00 001	C	70 di 94

Per la caratterizzazione del Flysch Numidico litoide si riportano di seguito i parametri di resistenza derivanti dal criterio di Mohr-Coulomb per diversi intervalli di copertura:

Unità	Coperture	$\gamma$	$\sigma_{ci}$	$m_i$	GSI	D	c	$\varphi$	$E_{rm}$
(-)	(m)	(kN/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(-)	(-)	(-)	(kPa)	(°)	(MPa)
FYN3a	30	22	9.7	17	40	0	128	48	480 ÷ 1470
	50						175	45	
	100						272	39	

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

## 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. [13]), 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. [13]) 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 tensioni 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

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

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 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 due metodi di analisi:


- per le tratte ad alta copertura è stato utilizzato 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.
- Per le tratte a bassa copertura sono stati utilizzati 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 la galleria Nuova Enna e per la galleria Sicani con annesso cunicolo di emergenza, che interessano prevalentemente la formazione di Terravecchia (TRV/TRVa), è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile);



	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

- per la galleria Dittaino:
  - nel tratto interessato dalla formazione delle Argille Varicolori (AVF) è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile); tale previsione vale anche per il cunicolo parallelo che rappresenta l’uscita/accesso di emergenza;
  - nel tratto interessato dalla formazione del Flysch Numidico (FYN3) è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile);
  - nel tratto interessato dalla litofacies quarzarenitica della formazione del Flysch Numidico (FYN3a) è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria “A” (quindi stabile) o “B” in funzione del grado di fratturazione e della presenza di livelli argillosi;
  - nel tratto interessato dalla formazione Terravecchia facies argillosa a struttura brecciata (TRVb), è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile);
  
- per la Finestra Dittaino:
  - nel tratto interessato dalla formazione Terravecchia facies argillosa a struttura brecciata (TRVb) è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile) ;
  - nel tratto interessato dalla litofacies pelitica della formazione del Flysch Numidico (FYN3) è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria C (instabile);
  - nel tratto interessato dalla litofacies quarzarenitica della formazione del Flysch Numidico (FYN3a) è atteso un comportamento del nucleo-fronte di scavo di categoria “A” (stabile) o “B” in funzione del grado di fratturazione e della presenza di livelli argillosi.

Le previsioni di comportamento lungo il tracciato della galleria sono illustrate in forma sintetica nei seguenti elaborati: “Galleria Nuova Enna -Profilo geotecnico –” (Rif. [19]), “Galleria Sicani -Profilo Geotecnico (Rif. [20]), Galleria Dittaino -Profilo geotecnico (Rif. [21]) e “Finestra Dittaino -Profilo Geotecnico” (Rif. [22]).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

## 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 di avanzamento, il loro campo di applicazione e la successione delle fasi esecutive; i dettagli sono illustrati nei pertinenti elaborati progettuali.

### 11.1 Definizione del metodo di scavo

In considerazione della lunghezza delle opere e dei contesti geotecnici attraversati, il metodo di scavo tradizionale a piena sezione è stato considerato adeguato alla realizzazione delle opere in sotterraneo per la galleria Nuova Enna, la galleria Dittaino (con uscita/accesso di emergenza pedonale parallelo) e la Finestra Dittaino, che svolge la funzione di finestra costruttiva e, in esercizio, di uscita/accesso di emergenza.

Per la Galleria Sicani ed annesso cunicolo, di lunghezza pari a 5257 m, in funzione del contesto geotecnico e dello sviluppo delle opere, è stato considerato adeguato il metodo di scavo meccanizzato. Le opere accessorie (collegamenti trasversali e nicchie) sono invece realizzate con metodo di scavo tradizionale.

### 11.2 Metodo di scavo tradizionale

Nei paragrafi a seguire si riporta una sintetica descrizione delle sezioni di avanzamento definite, che trovano completa rappresentazione negli elaborati grafici di progetto. Per la distribuzione delle tratte di applicazione delle diverse sezioni tipo si rimanda ai seguenti elaborati: “Galleria Nuova Enna-Profilo geotecnico –” (Rif. [19]), “Profilo Geotecnico-Galleria Sicani (Rif. [20]), “Galleria Dittaino-Profilo geotecnico” (Rif. [21]) e “Finestra Dittaino- Profilo Geotecnico” (Rif. [22]).

#### 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 l'applicazione come sezione eventuale nella Galleria Dittaino, per l'attraversamento di tratte in cui si rinvergono a quota cavo le quarzareniti della formazione del Flysch Numidico, laddove queste siano caratterizzate da valori di GSI compresi tra 40 e 50, a cui può essere associato un grado di fratturazione medio.

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 10/11 chiodi ad ancoraggio continuo Ø24 disposti in raggiere alternate, lunghezza 6,00 m, interasse longitudinale 1,20 m;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,20 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,70 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 5 diametri;
- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0,60 cm) gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.

Tale sezione, con gli adeguamenti conseguenti alla differente area di scavo, è prevista anche nella finestra Dittaino, con gli stessi criteri di applicazione della galleria di linea.

### 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 come sezione eventuale nella galleria Dittaino per l'attraversamento di tratte in cui si rinvergono a quota cavo le quarzareniti della formazione del Flysch Numidico laddove queste siano caratterizzate da valori di GSI pari o inferiori a 30, 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=13.5 m (sovrapposizione minima 5.0 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 21 tubi in acciaio valvolati, L=12 m (sovrapposizione minima 3,5 m, interasse 0,4 m). L'incidenza del presostegno (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 tronco-conici di lunghezza pari a 8,5 m;
- pririvestimento (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e centina HEB180 con passo 1 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,80 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1,5 diametri;
- 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.

Tale sezione, con gli adeguamenti conseguenti alla differente area di scavo, è prevista anche nella finestra Dittaino, con gli stessi criteri di applicazione della galleria di linea.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

### Sezione C1

La sezione C1 prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 10,0 m; ne è prevista l'applicazione nella Galleria Nuova Enna come sezione prevalente nella formazione di Terravecchia nella facies sabbiosa (TRVa).

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C1, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 20 microtrattamenti in jet-grouting Ø300 armati con elementi strutturali in VTR, L=17,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m). L'incidenza del preconsolidamento (numero o lunghezza degli elementi) potrà avere una variabilità del ±20%;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 51 colonne in jet-grouting Ø600, L=14,5 m (sovrapposizione minima 4,5 m) e ulteriori 5+5 colonne al piede centina. L'incidenza del preconsolidamento potrà avere una variabilità del ±20%;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 10,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1,0 m;
- 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 variabile da 0,55 m a 1,30 m) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 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:

- nella galleria Nuova Enna per l'attraversamento della facies argillosa della Formazione Terravecchia (TRV), a comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C).
- nella galleria Dittaino in presenza delle Argille Varicolori (AVF) con coperture comprese tra 25 e 50 m.

Ne è prevista l'applicazione come sezione eventuale:

- nella galleria Nuova Enna in presenza della Formazione di Terravecchia (TRVa) prevalentemente sabbiosa, in presenza al fronte di intercalazioni prevalentemente limoso argillose alla scala del fronte;
- nella galleria Dittaino in presenza delle Argille Varicolori (AVF), con copertura massima inferiore ai 25 m, e nel TRVb con coperture inferiori ai 25 m.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

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

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 25 VTR, L=18.0 m (sovrapposizione minima 8.0 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 41 VTR, L=15.0 m (sovrapposizione minima 5.0 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 10m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 25 cm di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN220 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.

Tale sezione è prevista anche per la finestra Dittaino e il cunicolo pedonale, con gli stessi criteri di applicazione della galleria di linea e con gli adeguamenti sul numero degli interventi conseguenti alle differenti aree di scavo. Per le quantità degli interventi si rimanda agli specifici elaborati grafici di scavo e consolidamento.

### Sezione C3

La Sezione C3 prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno e interventi di presostegno al contorno, con campi di avanzamento da 8,5m. Ne è prevista l'applicazione nella Galleria Nuova Enna come sezione prevalente nella tratta di attraversamento della formazione Sabbie di Cozzo Campana, in prossimità dell'imbocco lato Palermo e per la transizione litologica tra la facies argillosa (TRV) e la facies sabbiosa (TRVa) della Formazione Terravecchia.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C3, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 30 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 41 VTR valvolati, L=17 m (sovrapposizione minima 8.5 m) iniettati a pressione e volume controllati con miscele cementizie e ulteriori 8+8 elementi strutturali in VTR valvolati e iniettati a volume e pressione controllati, al piede centina. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ .

- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 23 tubi in acciaio valvolati, L=14.0 m (sovrapposizione minima 5.5 m, interasse 0.4 m). L'incidenza del presostegno (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 8.5m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 25 cm di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1.00 m  $\square$  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 variabile da 0.55 cm a 1.30 cm) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 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 galleria Dittaino come sezione prevalente nella formazione di Terravecchia nella facies argillosa a struttura brecciata (TRVb) e nella finestra Dittaino fino alla copertura di 25 m, e come sezione eventuale nella Formazione delle Argille Varicolori (AVF).

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

- preconsolidamento del fronte realizzato mediante 30 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  $\pm 20\%$ ;
- preconsolidamento al contorno realizzato mediante 43 VTR, L=20.0 m (sovrapposizione minima 10.0 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 1.00 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10.0 m;
- prerivestimento (ad ogni sfondo) composto da 30 cm di spritz-beton fibrorinforzato e centina singola HEB240 con passo 1.00 m  $\square$  20%. Chiusura dell'arco rovescio provvisorio con centina puntone HEB240 con passo 1.00 m  $\square$  20% e spritz-beton fibrorinforzato spessore 30 cm;
- arco rovescio (spessore 1.0 m) 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>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

- calotta in calcestruzzo armato (spessore 0.90 cm) gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

Tale sezione è prevista anche per la finestra Dittaino e il cunicolo pedonale, con gli stessi criteri di applicazione della galleria di linea e con gli adeguamenti sul numero degli interventi conseguenti alle differenti aree di scavo. Per le quantità degli interventi si rimanda agli specifici elaborati grafici di scavo e consolidamento.

### Sezione C2p\*

La sezione C2p\* prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno, con campi di avanzamento da 8m, e l'impiego della centina puntone come rivestimento provvisorio in arco rovescio; ne è previsto l'impiego nella galleria Dittaino come sezione prevalente, in presenza della Formazione delle Argille Varicolori (AVF) a coperture medio-alte e per l'attraversamento del Flysch Numidico (analogamente per la finestra Dittaino), 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:

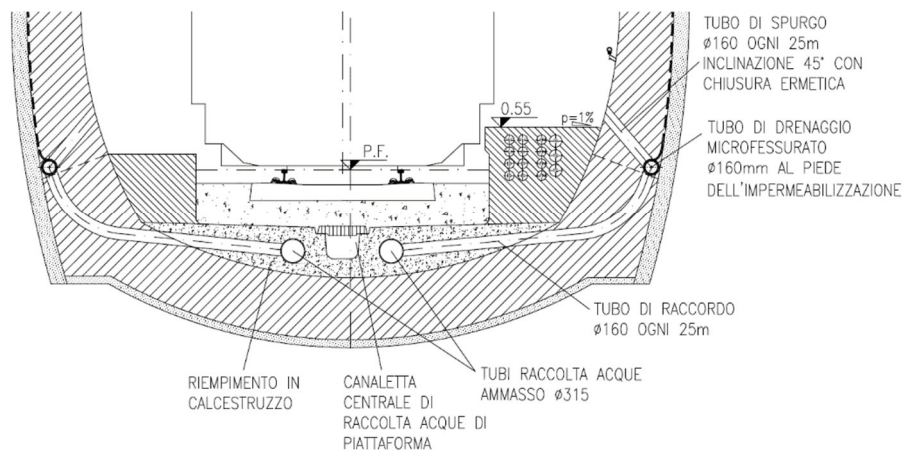
- precontenimento del fronte realizzato mediante 25 VTR, L=24 m (sovrapposizione minima pari a 16 m) cementati in foro con miscele cementizie. L'incidenza del precontenimento (numero o lunghezza degli elementi) ha una variabilità del  $\pm 20\%$ ;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 43 VTR, L=24 m (sovrapposizione minima 16 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 0,30 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.

Tale sezione è prevista anche per la finestra Dittaino e il cunicolo pedonale, con gli stessi criteri di applicazione della galleria di linea e con gli adeguamenti sul numero degli interventi conseguenti alle differenti aree di scavo. Per le quantità degli interventi si rimanda agli specifici elaborati grafici di scavo e consolidamento.

### **11.2.1 Sistema di impermeabilizzazione**

Per la galleria naturale e le opere accessorie realizzate con metodo di scavo tradizionale (collegamenti trasversali, finestra, cunicolo parallelo e nicchie) il sistema di impermeabilizzazione e drenaggio prevede che l'acqua drenata dall'ammasso sia intercettata dall'impermeabilizzazione di calotta, raccolta dai tubi di drenaggio

longitudinali posti al piede dell'impermeabilizzazione e convogliata mediante tubi di raccordo trasversali ad una tubazione di raccolta annegata all'interno del getto di regolamento della galleria di linea (Figura 65). La canaletta centrale ha il compito di raccogliere le sole acque di piattaforma. Sono inoltre previsti dei pozzetti di ispezione a chiusura ermetica ogni 50 m per le attività di manutenzione.



**Figura 65 Sistema di drenaggio galleria naturale**

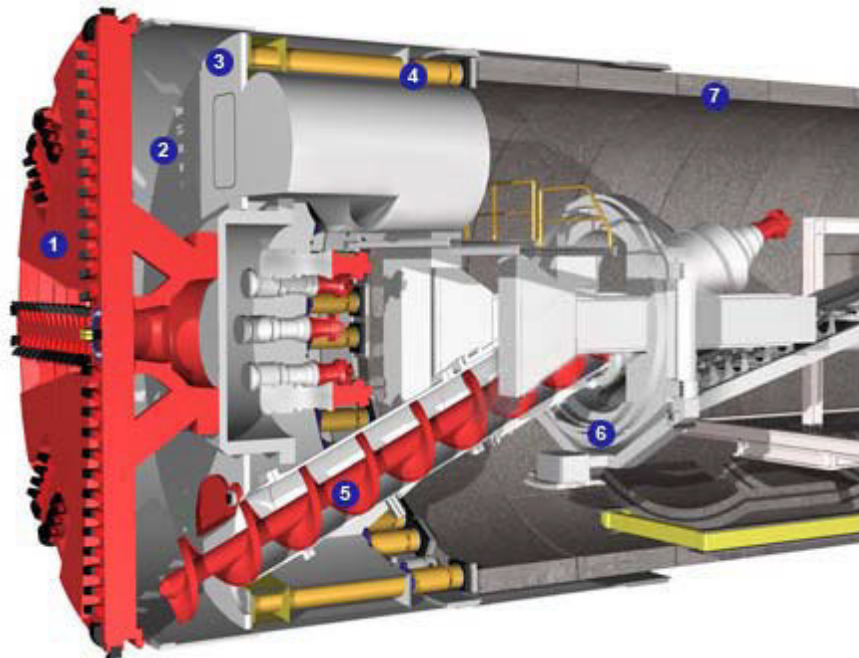
### 11.3 Metodo di scavo meccanizzato

#### Scelta della tipologia di TBM

Per la galleria Sicani sono state valutate diverse tipologie di Tunnel Boring Machine (TBM), individuando quella ritenuta più valida in base alle risultanze delle fasi conoscitiva e di diagnosi.

La scelta si è orientata sull'impiego di TBM-EPB (Earth Balance Pressure) che, esercitando una pressione attiva sul fronte, è utilizzabile anche in caso di comportamento del fronte di scavo instabile. Tale tipologia di macchina consente quindi il superamento di condizioni complesse dal punto di vista geologico e geotecnico (zone di faglia, tratte a bassa copertura), limitando sensibilmente i risentimenti indotti al contorno dell'opera in sotterraneo.






**Figura 66 - Schema di una macchina TBM, tipo EPB (1. Testa Fresante; 2. Camera di scavo; 3. Parete d'isolamento dotata di sistema d'accesso (camera iperbarica) alla camera di scavo; 4. Pistoni di avanzamento; 5. Coclea; 6. Erettore dei concii; 7. Anelli di sostegno già posti in Opera)**

Le tratte in scavo meccanizzato della galleria Sicani non prevedono l'attraversamento di formazioni con spiccato comportamento spingente. Tuttavia, dovendo attraversare zone tettonizzate, nelle quali si potrebbero riscontrare deformazioni elevate in fase di scavo, è necessario che la TBM sia progettata con la seguente configurazione:

- realizzazione di uno scudo e testa fresante di robusta costruzione, per sopportare i carichi radiali dell'ammasso;
- possibilità di realizzare uno scudo con geometria tronco-conica o scalettata e minore lunghezza possibile (compatibilmente con le dimensioni degli organi interni della macchina), per ridurre l'attrito con il terreno;
- possibilità di incrementare il diametro di scavo con un sovrascavo superiore a quello standard, per ottenere un vuoto anulare intorno allo scudo tale da permettere all'ammasso deformazioni di convergenza ed evitare il rischio dell'intrappolamento;
- possibilità di lubrificare la superficie esterna dello scudo per ridurre l'attrito tra mantello e terreno, mediante l'iniezione di liquidi lubrificanti (bentonite o polimeri) attraverso un numero adeguato di fori predisposti nel mantello.

Oltre quanto appena descritto, è opportuno precisare che, in caso di deformazioni importanti in fase di scavo, il mantenimento di elevate velocità di avanzamento riduce sostanzialmente il problema del bloccaggio della TBM. Una scelta accurata di misure operative ed un'appropriata organizzazione del cantiere risultano pertanto

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

essenziali per ridurre la durata e la frequenza dei fermi macchina e mantenere elevata la velocità complessiva di avanzamento. Ad esempio, nel caso di attraversamento di zone critiche, dovranno essere realizzati in anticipo tutti gli interventi di manutenzione previsti, al fine di ridurre il rischio di guasti meccanici e consentire la massima continuità possibile delle operazioni di scavo nel successivo tratto.

Infine, considerato il fatto che lo scavo meccanizzato è realizzato all'interno di formazioni che potrebbero presentare manifestazioni gassose, la macchina deve essere adeguatamente attrezzata ed equipaggiata in tal senso; per dettagli in merito agli apprestamenti previsti a riguardo si rimanda al Piano di Sicurezza e Coordinamento di progetto

#### Modalità di avanzamento

L'utilizzo di una fresa di tipo TBM-EPB (Earth Balance Pressure) consente un avanzamento dello scavo sia in modalità aperta che in modalità chiusa con fronte in pressione. Per il dettaglio delle modalità di avanzamento previste lungo il tracciato si rimanda all'elaborato "Profilo geotecnico" (Rif. [20]).

#### Sezione di avanzamento

La sezione tipo di avanzamento in scavo meccanizzato fa riferimento ad una configurazione standard per comportamento d'ammasso tipo B/C, caratterizzante la Formazione di Terravecchia per tutto lo sviluppo della Galleria Sicani.

La sezione tipo ha le seguenti caratteristiche:

- raggio interno: 4.00 m
- diametro scavo: 9.10 m
- tipologia anello: universale
- numero conci: 7
- spessore conci: 0.45 m
- lunghezza conci: 1.50 m
- guarnizioni in EPDM integrate su ciascun concio (sia longitudinali che radiali).

Si è scelto di adottare un anello di tipo universale, che consente, mediante la semplice rotazione attorno al proprio asse di un anello rispetto al precedente, di sfalsare i giunti longitudinali e di seguire l'andamento plano-altimetrico del tracciato e di apportare le eventuali necessarie correzioni in corso d'opera, senza ricorrere ad elementi speciali.

Per una rappresentazione completa della sezione in scavo meccanizzato e del rivestimento in conci prefabbricati si rimanda agli specifici elaborati grafici di progetto.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

#### 11.4 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

La mappatura dei diversi rischi è illustrata in forma sintetica nei seguenti elaborati: “Galleria Nuova Enna-Profilo geotecnico” (Rif. [19]), “Galleria Sicani-Profilo Geotecnico (Rif. [20]), “Galleria Dittaino-Profilo geotecnico” (Rif. [21]) e “Finestra Dittaino -Profilo Geotecnico” (Rif. [22]).

##### ***Instabilità del fronte***

Potenziali rischi di instabilità del fronte e del cavo possono interessare le Gallerie Nuova Enna, Sicani e Dittaino, considerate le caratteristiche meccaniche delle formazioni attraversate, soprattutto nei tratti a bassa copertura e nell’attraversamento di zone fratturate e tettonizzate.

In condizioni di bassa copertura, l’avanzamento in scavo tradizionale 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.

Nella Galleria Nuova Enna, per lo scavo nella Formazione di Terravecchia facies sabbioso arenacea - TRVa saranno eseguiti interventi di consolidamento al fronte ed al contorno mediante jet grouting o iniezioni di miscele cementizie sia al fronte sia al contorno; per la realizzazione di tali interventi di consolidamento, ove eseguiti sotto falda, si ricorrerà eventualmente all’utilizzo di preventer.

Per le tratte previste in scavo meccanizzato, potenziali fenomeni di instabilità possono presentarsi nell’attraversamento delle zone di faglia, dove è necessario procedere con il fronte in pressione.

##### ***Fenomeni di subsidenza/interferenza con le opere in progetto.***

Lungo il tracciato, potenziali interferenze con le opere in progetto sono rappresentate da alcuni edifici ubicati in superficie; le analisi di subsidenza condotte per 12 edifici interferenti hanno evidenziato effetti indotti in superficie nulli o trascurabili. Non si prevedono pertanto specifici interventi di protezione delle interferenze.

##### ***Presenza di blocchi lapidei/olistoliti***

La galleria Dittaino attraversa la formazione delle Argille Varicolori, costituita da argille a struttura scagliosa; a luoghi si riscontra la presenza di olistoliti calcarei, che possono avere dimensioni tali da interessare il fronte di scavo della galleria. Anche l’attraversamento del Flysch Numidico può presentare la possibilità di incontrare inclusi quarzarenitici di dimensioni metriche o decametriche. Considerato che la Galleria Dittaino è prevista in scavo con metodo 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. Per l’attraversamento di estese tratte lapidee sono previste sezioni di avanzamento adeguate.

##### ***Transizione litologica***

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

Lungo il tracciato delle opere in sotterraneo, in particolare per la galleria Nuova Enna, si prevedono transizioni litologiche graduali o rapide, con la possibilità di avanzamenti in fronti misti, caratterizzati dalla presenza di litologie con caratteristiche meccaniche e di permeabilità differenti. La flessibilità caratteristica del sistema di avanzamento in tradizionale permetterà l'adozione delle soluzioni previste in progetto che consentono di adattarsi e di gestire la transizione e l'eterogeneità dei materiali al fronte. Nelle tratte di galleria prossime alle zone di transizione litologica è opportuno utilizzare le perforazioni eseguite per gli interventi al fronte come indagini in avanzamento al fine di individuare in anticipo le variazioni litologiche eseguire indagini in avanzamento al fine di tarare gli interventi di consolidamento in anticipo rispetto alla variazione del materiale al fronte.

### ***Fenomeni deformativi***

La formazione di Terravecchia nella litofacies argillo-limoso (TRV), presente nella Galleria Nuova Enna e le formazioni delle Argille Varicolori e del Flysch Numidico nella facies pelitica (FYN3) per la galleria Dittaino, 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 formazioni argillose lungo il tracciato non presentano spiccate caratteristiche rigonfianti (cfr. § 9); ad ogni modo 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 sabbioso-arenacea della Formazione di Terravecchia, 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.

Lo scavo meccanizzato previsto per la Galleria Sicani consente di ridurre i rischi legati alle venute d'acqua in galleria, considerata la possibilità di avanzare con il fronte di scavo in pressione.

Carichi idraulici elevati sono presenti nelle tratte ad alte coperture delle gallerie Sicani e Dittaino; tale condizione è stata tenuto in conto nel dimensionamento e nelle verifiche strutturali dei rivestimenti definitivi.

### ***Presenza di corpi in frana in superficie***

Il tracciato delle opere in sotterraneo non interferisce direttamente con corpi di frana in superficie. In corrispondenza delle zone di imbocco delle Gallerie Nuova Enna, Sicani e Dittaino non si riscontrano aree con accertati fenomeni di instabilità. Alcuni corpi di frana di limitato spessore sono attraversati dalle opere in sotterraneo a coperture elevate, pertanto si possono escludere problemi di interferenza con tali fenomeni deformativi.

### 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 67).

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 67 – Prospetto 2 della UNI-EN 206 del 2016

Il rischio di attacco chimico sui calcestruzzi dei rivestimenti definitivi delle opere in progetto è gestito con in accordo con le indicazioni del Capitolato RFI (Rif. [10]) e con l'adozione dei provvedimenti previsti dalle norme UNI-EN 206, UNI 11104, UNI 11417-1 e UNI 9156.

Pertanto, per il rivestimento di calotta e piedritti delle opere in progetto, l'impermeabilizzazione al contorno garantisce protezione da agenti aggressivi presenti nei terreni e nelle acque e la classe di esposizione prevista è XC2 (Rif. [10]).

Per il calcestruzzo in arco rovescio, privo di impermeabilizzazione, sulla base dei risultati di laboratorio oggi disponibili, la classe di esposizione prevista per le gallerie Nuova Enna e Sicani è XA1, per la galleria e la finestra Dittaino è XA2. Si adottano pertanto le indicazioni della UNI 11104 (Figura 68), in termini di massimo rapporto acqua/cemento (a/c), minima classe di resistenza e minimo contenuto in cemento ( $kg/m^3$ ): in particolare si prevede l'impiego di calcestruzzo con classe di resistenza C30/37 e C32/40. È inoltre necessario prevedere l'impiego di cementi resistenti ai solfati secondo le indicazioni della UNI 11417. Per i dettagli si rimanda all'elaborato "Caratteristiche dei materiali- Note generali".

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	<b>Relazione tecnica delle opere in sotterraneo</b>					
<b>COMMESSA</b> <b>RS3V</b>	<b>LOTTO</b> <b>40 D 07</b>	<b>CODIFICA</b> <b>RH</b>	<b>DOCUMENTO</b> <b>GN 00 00 001</b>	<b>REV.</b> <b>C</b>	<b>FOGLIO</b> <b>86 di 94</b>	

UNI 11104:2016	Valori limite per la composizione e le proprietà del calcestruzzo																		
	Classi di esposizione																		
	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	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 68 – Classe di esposizione secondo la UNI 11104-2016**

### 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 in sotterraneo, sono presenti sinclinali ed anticlinali, geo-strutture che possono essere ricondotte a potenziali trappole metanifere. A pochi km dalle tre 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 (Miniera di Gessolungo);
- la galleria idraulica Lago Ancipa durante la cui costruzione l'innescò 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.

Le indagini eseguite hanno mostrato che in tutti i sondaggi eseguiti lungo il tracciato è stato rilevato gas a boccaforo.

Nella Galleria Nuova Enna (Figura 69) si è rilevato metano in tutti i sondaggi eseguiti a partire:

- da una profondità di 12,4 m s.p.c. (4SD06\_V1 prossimo ad una faglia) ed alle quote della galleria;
- generalmente quando le misure sono state ripetute dopo aver sigillato il foro.

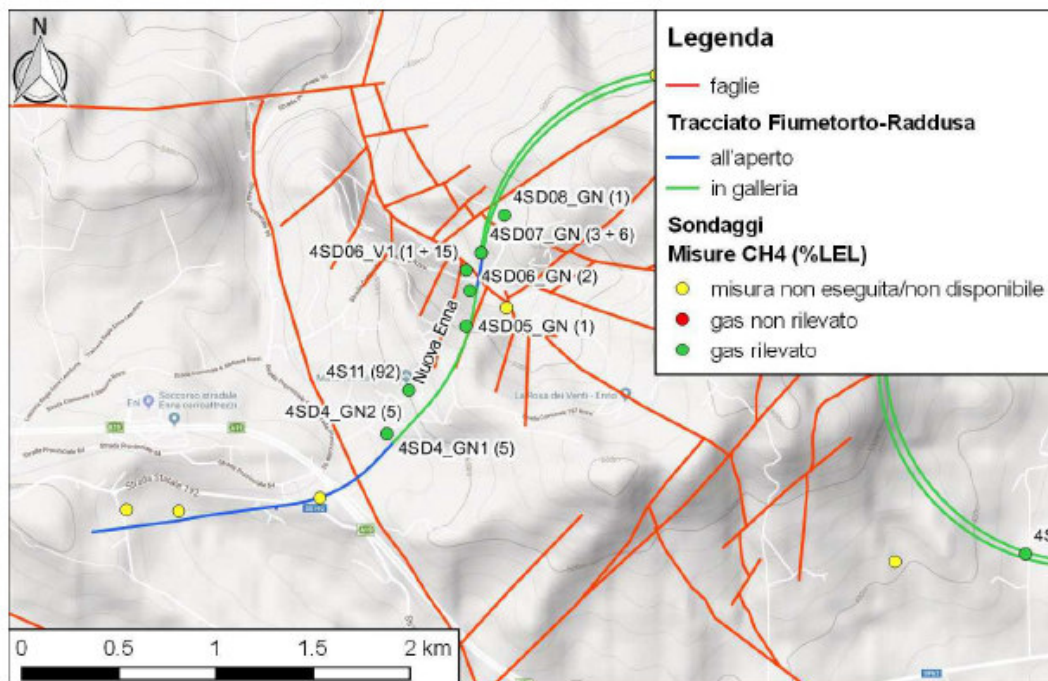
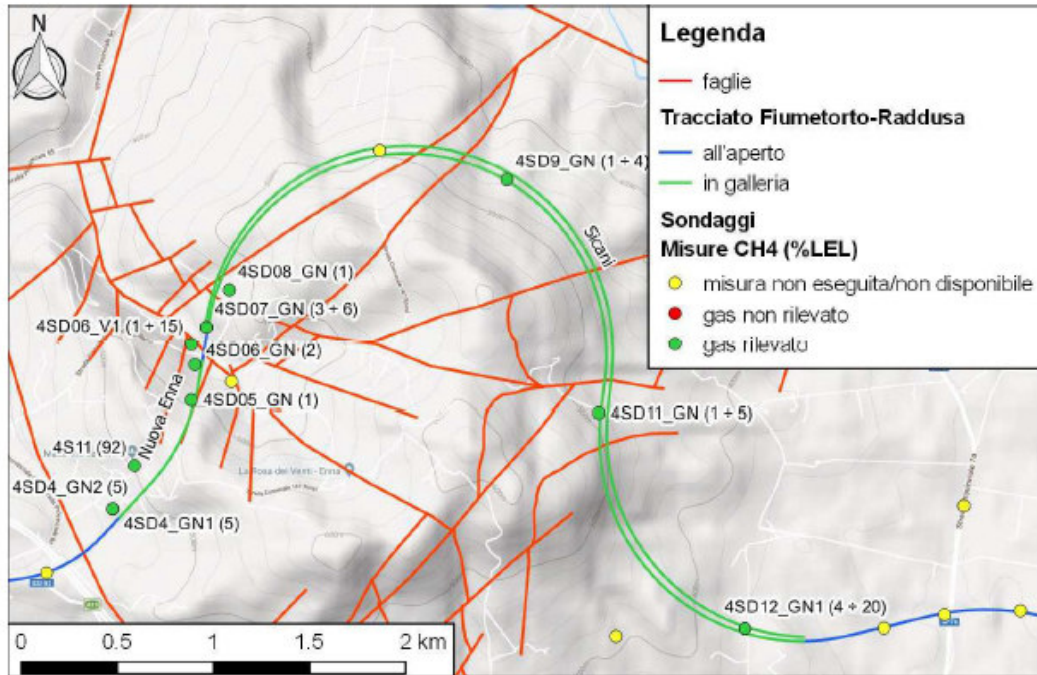


Figura 69 Galleria Nuova Enna: ubicazione dei sondaggi in cui si è rilevata presenza di metano

Nella Galleria Sicani (vedi Figura 70), in corrispondenza del foro di sondaggio 4SD11\_GN, che ha attraversato alternanze di argille limose e sabbiose, siltiti ed arenarie (spesso intensamente fratturate con superfici traslucide sui piani di rottura) riconducibili al TRV, le emissioni si sono avute a varie profondità, pressoché senza soluzione di continuità, da 100 m s.p.c. fino a fondo foro.

Nel sondaggio 4SD07\_GN emissioni (3÷6%LEL) sono state rilevate anche a foro aperto, da 1,5 m s.p.c., con continuità, fino a fondo foro (40 m s.p.c.), per tutta la durata della perforazione. La massima concentrazione (6%LEL, equivalente allo 0,3% in volume) è stata registrata con foro profondo 24,5 m e 25,0 m. I terreni attraversati, in questo caso, appartenenti al TRVa, erano costituiti da alternanze di sabbia debolmente cementata (da debolmente argillosa ad argillosa), e di argilla limosa, debolmente marnosa, con superfici traslucide sui piani di rottura.



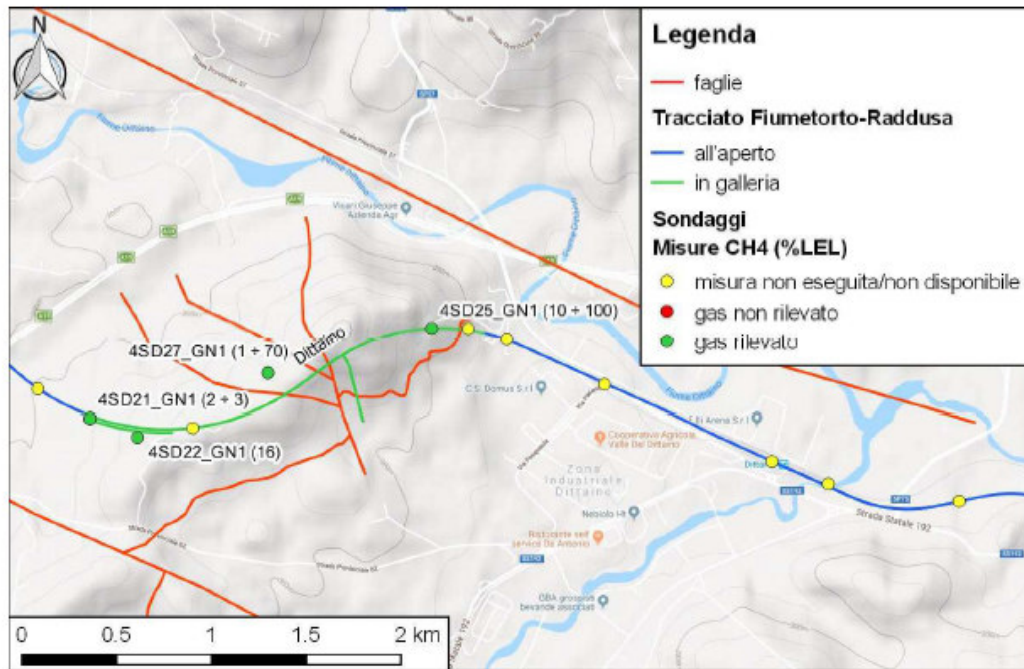
**Figura 70 Galleria Sicani: ubicazione dei sondaggi in cui si è rilevata presenza di metano**

Nella Galleria Dittaino (vedi Figura 71) nel sondaggio 4SDGN25 si sono raggiunti valori di 100% LEL nell'attraversamento di un livello di arenaria molto fratturato nella formazione FYN3.

Si è riscontrato metano anche nelle Argille Varicolori (AVF). Ad esempio:

- nel sondaggio 4SD22\_GN1, che ha attraversato argille limose, debolmente marnose con livelli da centimetrici a decimetrici di argillite ed arenaria fratturati, si è raggiunta una concentrazione di 16%LEL (0,8% in volume) a 52 m s.p.c.;
- nel foro 4SD27\_GN1 prossimo ad una faglia, si sono registrate emissioni di metano e a varie profondità, a partire da 31 m s.p.c. fino alle quote della galleria, dove si è raggiunto il 70%LEL (3,5% in volume di metano in aria); o anche a foro aperto (8%LEL a 40 m s.p.c., 15%LEL a 62 m s.p.c. e 4%LEL a 82,6 m s.p.c.).





**Figura 71 Galleria Dittaino: ubicazione dei sondaggi in cui si è rilevata presenza di metano**

Un valido strumento che può essere utilizzato per l'approccio al problema legato alla presenza di gas in galleria è rappresentato dal documento NIR n°28: Nota Interregionale del 13/01/2005 “Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù 3a edizione”, aggiornata nel luglio 2014 dal documento Linea Guida “Grisù”. Scavi in sotterraneo con metodo a piena sezione e tecnica tradizionale in terreni grisutosi”.

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, alle gallerie scavate in tradizionale 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.
---------------------------	--

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

Per gli interventi atti a mitigare il rischio connesso alla presenza di gas in fase realizzativa, si può fare riferimento oltre ai documenti sopra citati, ai documenti specifici per lo scavo meccanizzato: NIR n°44: Nota Interregionale del 28/05/2012 “Lavori in sotterraneo. Scavo in terreni grisutosi. Grisù TBM”, aggiornata nel maggio 2015 dal documento: Linea Guida “Grisù – TBM”. Scavo meccanizzato di grande sezione con TBM – EPB in terreni grisutosi. Ad ogni modo, per le misure di sicurezza da adottare in fase di scavo si rimanda al Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC).

Rispetto al rischio gas associato all’eventuale gas metano disciolto nell’acqua drenata dall’ammasso per le gallerie scavate con metodo tradizionale, si è scelto di adottare un sistema di drenaggio confinato rispetto all’ambiente galleria, prevedendo:

- la realizzazione di tubazioni di raccolta delle acque provenienti dall’ammasso, annegate nel riempimento in calcestruzzo, garantendo adeguato spessore di confinamento, al fine di garantire la segregazione con l’atmosfera della galleria,
- la chiusura ermetica (al gas ed ai fumi) di tutti i punti di contatto del circuito di drenaggio verso l’ambiente galleria (es. tubi di spurgo, pozzetti di ispezione), con adeguato isolamento termico e in grado di rispettare la segregazione di cui al punto precedente.

All’esterno della galleria tale circuito sarà collegato con il sistema di drenaggio previsto per le opere all’aperto (trincee, rilevati) garantendo la naturale degassazione della miscela metano-aria. I punti di recapito all’aperto della suddetta tubazione dedicata dovranno essere opportunamente protetti da potenziali sorgenti di innesco.

Per ulteriori dettagli in merito al sistema di smaltimento delle acque in galleria si rimanda agli specifici elaborati di progetto.

In fase realizzativa, particolare cura dovrà essere posta nella posa di tutti gli elementi del sistema di impermeabilizzazione e drenaggio previsti e nella corretta esecuzione delle riprese di getto, a garanzia della massima efficienza delle soluzioni di progetto.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

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

### 12.1 Scavo tradizionale

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 si rimanda alla successiva fase progettuale.

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:

### 12.2 Scavo meccanizzato

Nel caso di scavo meccanizzato, la flessibilità in fase di avanzamento, in risposta alle condizioni riscontrate, è garantita dalla variabilità dei parametri operativi di controllo della TBM. Pertanto, sulla base dei dati macchina raccolti durante l’avanzamento e le risultanze del monitoraggio geotecnico e topografico in superficie e in galleria, i parametri macchina (ad es.: contropressione al fronte) saranno modificati operando all’interno della variabilità prevista in fase progettuale.

In merito ai valori di contropressione al fronte da applicare durante l'avanzamento della TBM, nella presente fase progettuale sono forniti degli intervalli di valori ricavati mediante verifiche di stabilità puntuali lungo il tracciato per sezioni rappresentative. Nella progettazione esecutiva sarà redatto il profilo dettagliato delle pressioni operative da applicare lungo tutte le tratte previste con avanzamento in scavo meccanizzato in modalità chiusa, definendo altresì le relative soglie di attenzione e allarme e le corrispondenti azioni da intraprendere al superamento delle stesse.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

### 12.3 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 delle gallerie naturali, in considerazione delle sezioni di scavo e consolidamento previste, ottimizzandole nell'ambito delle variabilità indicata in progetto.

Con riferimento 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 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.

Con riferimento alle tratte realizzate con metodo di scavo meccanizzato il programma di monitoraggio dovrà prevedere:

- il controllo dei principali parametri macchina in fase di scavo dalla fresa tra cui: pressione di supporto del fronte di scavo, densità del materiale nella camera di scavo, pressione e volume del materiale di intasamento iniettato a tergo dei conci, peso e volume del materiale scavato, parametri di condizionamento del terreno;
- il monitoraggio dello stato tensionale nel rivestimento definitivo mediante barrette estensimetriche saldate sui ferri di armatura dei conci e celle di carico tra i giunti longitudinali degli stessi.

Per le tratte a bassa copertura, e in prossimità delle interferenze, si prevede, indipendentemente dal metodo di scavo adottato:

Relazione tecnica delle opere in sotterraneo

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3V	40 D 07	RH	GN 00 00 001	C	93 di 94

- il controllo dei cedimenti al 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,
- il monitoraggio piezometrico per la misura della variazione della quota di falda.

Inoltre, con riferimento alle interferenze presenti lungo il tracciato delle opere in sotterraneo, pur avendo accertato l'assenza di effetti indotti sui fabbricati dallo scavo delle gallerie, si prevede un sistema di monitoraggio per il controllo topografico degli spostamenti sugli edifici interferenti.

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. Per la frequenza delle letture si rimanda agli elaborati specialistici allegati al progetto.

Nella fase di progettazione esecutiva dovranno essere definiti i valori attesi e i valori soglia al fine di consentire la verifica e la messa a punto del progetto, la gestione delle variabilità previste e l'adozione di azioni correttive.

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.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA - PALERMO</b> <b>NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA</b> <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>TRATTA NUOVA ENNA DITTAINO (LOTTO 4B)</b>					
	Relazione tecnica delle opere in sotterraneo	COMMESSA <b>RS3V</b>	LOTTO <b>40 D 07</b>	CODIFICA <b>RH</b>	DOCUMENTO <b>GN 00 00 001</b>	REV. <b>C</b>

### 13 CONCLUSIONI

La presente relazione tecnica è parte integrante del progetto definitivo del nuovo Itinerario Palermo - Catania - tratta Nuova Enna – Dittaino (Lotto 4b), compresa tra la Stazione di Nuova Enna (inclusa) e la stazione di Dittaino (inclusa), dal km 0+315 al km 14+935 (coincidente con la pk 172+871 circa della linea storica Palermo Catania).

La progettazione delle opere in sotterraneo è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [13]), 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 (cap. 12) 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.