

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**U.O. GALLERIE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO**

**Lotto 2: Taormina (e) - Giampilieri (e)**

Galleria Letojanni - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

SCALA:

-

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

RS2S 02 D 07 RB GN0400 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
B	Consegna al CSLLPP	A. Corbo A. Duzi Mulli	Gen 2018	M. Ricci M. Ricci	Gen 2018	P. Carlesimo P. Carlesimo	Gen 2018	A. Sciotti Gen 2018

ITALFERR S.P.A.  
U.O. GALLERIE  
Dott. Ing. Alessandra Sciotti  
Ordine degli Ingegneri di Roma  
n° 13846

File:

n. Elab.: 1554

## INDICE

1	PREMESSA.....	5
2	SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO.....	5
3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	7
4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	7
4.1	DOCUMENTI REFERENZIATI.....	7
4.2	DOCUMENTI CORRELATI.....	7
4.3	DOCUMENTI SUPERATI.....	8
5	ALLEGATI.....	9
6	DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO.....	9
7	DESCRIZIONE DELL'OPERA.....	10
7.1	IL TRACCIATO E LE OPERE IN SOTTERRANEO.....	10
7.2	INTERFERENZE LUNGO IL TRACCIATO.....	10
8	FASE CONOSCITIVA.....	11
8.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	11
8.2	INDAGINI GEOTECNICHE.....	11
8.3	CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA.....	13
8.3.1	b2;ba;bb;g1;(MSS) – Ghiaie e sabbie limose.....	14
	8.3.1.1 Caratteristiche fisiche.....	14
	8.3.1.2 Caratteristiche meccaniche.....	16
	8.3.1.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....	21
8.3.2	(PDTb)/CODd/CODb/CFL – Arenarie.....	21
	8.3.2.1 Caratteristiche fisiche.....	22
	8.3.2.2 Caratteristiche meccaniche.....	22
	8.3.2.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....	25
8.3.3	CODa– Conglomerati.....	26
	8.3.3.1 Caratteristiche fisiche.....	26
	8.3.3.2 Caratteristiche meccaniche.....	27
	8.3.3.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....	28
8.3.4	FDN/GLD/TAM/MMF – Argilloscisti/Filladi.....	29
	8.3.4.1 Caratteristiche fisiche.....	29

8.3.4.2	<i>Caratteristiche meccaniche</i> .....	31
8.3.4.3	<i>Riepilogo dei parametri geotecnici</i> .....	36
8.3.5	<i>Definizione degli intervalli dei parametri geotecnici delle unità interessate dalle opere</i> .....	37
8.3.6	<i>Il regime idraulico</i> .....	37
8.3.6.1	<i>Complesso metamorfico (TAM)</i> .....	37
8.3.6.2	<i>Complesso arenaceo-marnoso (CODb)</i> .....	37
8.3.6.3	<i>Complesso conglomeratico-ghiaioso (CODa)</i> .....	37
8.3.6.4	<i>Complesso fluvio-marino (ba, bb)</i> .....	38
8.3.6.5	<i>Complesso detritico-colluviale (b2)</i> .....	38
8.3.7	<i>Lo stato tensionale in sito</i> .....	38
9	<b>FASE DI DIAGNOSI</b> .....	39
9.1	<b>CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO</b> .....	39
9.2	<b>DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO</b> .....	40
9.2.1	<i>Analisi con il metodo delle linee caratteristiche</i> .....	40
9.2.1.1	<i>Metodo di analisi</i> .....	40
9.2.1.2	<i>Sezioni analizzate</i> .....	41
9.2.1.3	<i>Risultati delle analisi</i> .....	41
9.2.2	<i>Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo</i> .....	42
10	<b>FASE DI TERAPIA</b> .....	43
10.1	<b>DEFINIZIONE DELLE SEZIONI TIPO</b> .....	43
10.1.1	<i>Sezione tipo A1</i> .....	43
10.1.2	<i>Sezione tipo A2</i> .....	44
10.1.3	<i>Sezione tipo B1</i> .....	44
10.1.4	<i>Sezione tipo B2</i> .....	45
10.1.5	<i>Sezione tipo C2</i> .....	45
10.1.6	<i>Sezione tipo C2v</i> .....	46
10.1.7	<i>Sezione tipo C2p</i> .....	46
10.1.8	<i>Sezione tipo C2d</i> .....	47
10.1.9	<i>Sezione tipo C3v</i> .....	47
10.2	<b>CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI</b> .....	47

10.3	ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO .....	50
10.3.1	<i>Criteri di verifica</i> .....	50
10.3.2	<i>Sezione A1</i> .....	55
10.3.2.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i> .....	55
10.3.2.2	<i>Interazione opera-terreno</i> .....	56
10.3.3	<i>Sezione A2</i> .....	57
10.3.3.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i> .....	57
10.3.3.2	<i>Interazione opera-terreno</i> .....	58
10.3.4	<i>Sezione B1</i> .....	60
10.3.4.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i> .....	60
10.3.4.2	<i>Interazione opera-terreno</i> .....	61
10.3.5	<i>Sezione C2v</i> .....	62
10.3.5.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i> .....	62
10.3.5.2	<i>Interazione opera-terreno</i> .....	63
10.3.6	<i>Sezione C2d</i> .....	65
10.3.6.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i> .....	65
10.3.6.2	<i>Interazione opera-terreno</i> .....	66
11	FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO .....	68
11.1	MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA .....	68
11.2	CRITERI GENERALI PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO .....	68
12	CONCLUSIONI .....	69

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 1 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del progetto definitivo del Raddoppio della Tratta Giampilieri-Fiumefreddo sulla Diretrice ferroviaria Messina-Catania-Palermo.

La linea esistente è rappresentata da una infrastruttura a semplice binario caratterizzata da un itinerario in gran parte costiero e prevalentemente all'aperto, con alcune brevi gallerie, che si colloca in una strettissima fascia di territorio compreso tra i rilievi che si protraggono verso il mare, l'autostrada A18, la viabilità statale e gli insediamenti turistici costieri.

La soluzione di progetto prevede la realizzazione di una nuova linea a doppio binario dell'estensione di circa 42,2 km che si sviluppa a maggior distanza dalla costa, prevalentemente in galleria. La nuova linea si allaccia alla linea esistente alla progressiva 276+822, prima dell'attuale stazione di Fiumefreddo, e alla progressiva 319+756, immediatamente prima dell'esistente stazione di Giampilieri.

È previsto inoltre un collegamento intermedio mediante l'interconnessione di Letojanni, che consente la suddivisione dell'opera in due fasi funzionali: la prima, tra Fiumefreddo e Taormina, di estensione pari a circa 13,9 km, che si allaccia alla linea storica con l'interconnessione di Letojanni; la seconda, tra Taormina e Giampilieri, lunga circa 28,3 km.

Pertanto, la tratta in oggetto è suddivisa in due lotti:

- Lotto 1: Fiumefreddo – Taormina (sino al km 13+900);
- Lotto 2: Taormina – Giampilieri (dal km 13+900 al km 42+200).

Per l'inquadramento generale su caratteristiche e requisiti funzionali delle opere in sotterraneo si rimanda alla "Relazione tecnica delle opere in sotterraneo" (Rif. [1]).

## 2 SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO

Nella presente relazione si affrontano le problematiche progettuali connesse alla realizzazione della galleria Letojanni, afferente al Lotto 2. È una galleria a doppia canna, singolo binario lunga quasi 3900 m, da realizzarsi con metodo di scavo tradizionale.

La progettazione delle opere in sotterraneo, condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [14]), si è articolata nelle seguenti fasi:

1. fase conoscitiva: è finalizzata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico in cui sarà realizzata la galleria; i risultati dello studio geologico sono descritti nella specifica Relazione Geologica e Idrogeologica (Rif. [13]) a cui si rimanda per l'illustrazione del modello geologico; la sintesi dello studio geotecnico con la definizione del modello geotecnico di sottosuolo e dei parametri di progetto è illustrata nel § 8.3;

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 (§ 9);

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 (§ 10). Le soluzioni progettuali sono state analizzate per verificarne l'adeguatezza: nel § 10.3 sono illustrati metodi e risultati delle analisi condotte per la verifica della stabilità globale della cavità, per il dimensionamento/verifica degli interventi di stabilizzazione e dei rivestimenti, nelle diverse fasi costruttive e in condizioni di esercizio, e per la valutazione dei risentimenti attesi in superficie.

4. fase di verifica e messa a punto: il progetto è completato dal piano di monitoraggio da predisporre ed attuare nella fase realizzativa (§ 11). Nel piano di monitoraggio sono individuate le 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 in progetto. Nel capitolo 11 sono, inoltre, descritti i criteri generali per l'applicazione delle sezioni tipo e la gestione delle variabilità in funzione dei risultati del monitoraggio in corso d'opera.

La progettazione è stata sviluppata nel rispetto della normativa vigente.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Per i riferimenti normativi si rimanda a quanto indicato al paragrafo 3 della relazione tecnica delle opere in sotterraneo (Rif. [1]).

### 4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 4.1 Documenti Referenziati

- Rif. [1] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07RHGN000001B “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo” datato Gennaio 2018;
- Rif. [2] U.O. Gallerie, doc. RS2S01D07F5GN0100001B “Galleria Calatabiano - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [3] U.O. Gallerie, doc. RS2S01D07F5GN0200001B “Galleria Taormina - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [4] U.O. Gallerie, doc. RS2S01D07F5GN0300001B “Galleria di Interconnessione - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [5] U.O. Gallerie, doc. RS2S02D07F5GN0200001B “Galleria Taormina - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [6] U.O. Gallerie, doc. RS2S02D07F5GN0400001B “Galleria Letojanni - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [7] U.O. Gallerie, doc. RS2S0D07F5GN0500001B “Galleria Forza d’Agrò - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [8] U.O. Gallerie, doc. RS2S02D07F5GN0600001B “Galleria Sciglio - Profilo geotecnico Tav 1 di 2” datato Gennaio 2018;
- Rif. [9] U.O. Gallerie, doc. RS2S02D07F5GN0600002B “Galleria Sciglio - Profilo geotecnico Tav 1 di 2” datato Gennaio 2018;
- Rif. [10] U.O. Gallerie, doc. RS2S02D07F5GN0700001B “Gallerie Nizza e Ali - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [11] U.O. Gallerie, doc. RS2S0D07F5GN0900001B “Galleria Quali - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [12] U.O. Gallerie, doc. RS2S0D07F5GN1000001B “Galleria Scaletta - Profilo geotecnico” datato Gennaio 2018;
- Rif. [13] U.O. Geologia, Gestione Terre e Bonifiche, Elaborati Specialistici.

#### 4.2 Documenti Correlati

- Rif. [14] AGI, “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”, 1977;

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

- Rif. [15] Lunardi P. (2006). Progetto e Costruzione di Gallerie: Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli - ADECO-RS – (Hoepli Ed.);
- Rif. [16] Bernaud D., Benamar I., Rousset G. (1994). La “nouvelle méthode implicite” pour le calcul des tunnel dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques – Revue Francaise de Géotechnique, N° 68;
- Rif. [17] Bernaud D., Rousset G. (1992). La « nouvelle méthode implicite » pour l’étude du dimensionnement des tunnels – Revue Francaise de Géotechnique, N° 60;
- Rif. [18] Peck R.B. (1969). Deep excavations and tunnelling in soft ground. SOA Report 7<sup>th</sup> Int. Conf. SMFE Mexico City, State of the Art Volume;
- Rif. [19] Burland J.B., Wroth C.P. (1974). Settlements of buildings and associated damage. SOA Review Conf. Settlement of Structures, Cambridge, Pentech Press, London;
- Rif. [20] Burland J.B. (1997). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. Earthquake Geotechnical Engineering, Ishihara (ed.). Balkema, Rotterdam;
- Rif. [21] Boscarding M.D., Cording E.G. (1989). Building response to excavation-induced settlement. Jnl. Geo. Engrg. ASCE, 115;
- Rif. [22] Hoek E., Brown E.T. (1997), “Practical estimates of rock mass strength”, Intl. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186;
- Rif. [23] Hoek E., Carranza-Torres C., Cortkum B. (2002), “Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition”;
- Rif. [24] Tamez E. (1984) “Estabilidad de tuneles excavados en suelos” - Mexican Engineering Academy;
- Rif. [25] Hoek E., Diederichs M. S. (2006), “Empirical Estimation of rock mass Modulus”, Intl. J. Rock Mech. & Mining Sciences 43 (2006), 203-215;
- Rif. [26] Broms B.B., Bennermark H. (1967), “Stability of clay at vertical openings”, J. Soil Mechanics and Foundations, Div. Am. Soc. Civ. Eng., 93: 71-94;
- Rif. [27] Terzaghi, K. & Peck, R.B. 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice, 1st Edition, John Wiley and Sons, New York;
- Rif. [28] Marinos P. & Hoek E. 2001. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as Flysch, Bull. Engg. Geol. 60, 85-92;
- Rif. [29] Carmisciano R., Lentini F. & Puglisi D. (1981a) – Caratteri petrografici ed evoluzione tettonico-sedimentaria della Formazione di Piedimonte (Sicilia nord-orientale). Rend. Soc. Min. Petr., 37: 91-104, 1 Carta Geol;
- Rif. [30] Carmisciano R., Gallo L., Lanzafame G., Puglisi D., 1981. Le calcareniti di Floresta nella costruzione dell'Appennino Calabro-Peloritano (Calabria e Sicilia). Geol. Romana, 20, 171-182;
- Rif. [31] Atkinson, J. H. 2000. Non-linear soil stiffness in routine design. 40th Rankine Lecture Géotechnique, 50(5): 487-508;
- Rif. [32] Stokoe K.H. II, Santamarina J.C. 2000. Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering, GEOENG 2000, Melbourne, Australia, 19-24 Nov., CD-Rom.

### 4.3 Documenti Superati

Non sono presenti documenti superati.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 5 ALLEGATI

Il documento è corredato dai seguenti allegati:

All. [1] “Analisi con i metodi delle curve caratteristiche e per le fasi di diagnosi e terapia”.

## 6 DOCUMENTI PRODOTTI A SUPPORTO

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

- Rif. [33] U.O. Gallerie, documento RS 2S02D07SPGN000000 1B “Caratteristiche dei materiali – Note generali” datato Gennaio 2018;
- Rif. [34] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000008B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo A1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [35] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000009B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo A2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [36] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000010B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [37] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000011B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [38] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000012B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [39] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000013B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2p - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [40] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000014B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2v - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [41] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000015B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2d - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [42] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000016B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C3v - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

### 7.1 Il tracciato e le opere in sotterraneo

La galleria Letojanni è una galleria a doppia canna, singolo binario, con una lunghezza complessiva di circa 3866 m, di cui 60 m in artificiale e 3806 m in naturale, da realizzarsi con metodo di scavo tradizionale.

Di seguito sono elencate le progressive di riferimento dell'opera (binario pari):

- da pk 16+293,8 a pk 16+310,0 (L=16,2 m) galleria artificiale;
- da pk 16+310,0 a pk 20+115,8 (L=3805,8 m) galleria naturale;
- da pk 20+115,8 a pk 20+160,0 (L=44,2 m) galleria artificiale;

La galleria presenta coperture generalmente molto elevate con valori massimi fino a 375 m, ed ha un andamento altimetrico monopendente (al 2‰) in salita procedendo in direzione Messina.

Per ulteriori dettagli sulla descrizione del tracciato e delle opere si rimanda alla “Relazione tecnica delle opere in sotterraneo” (Rif. [1]).

### 7.2 Interferenze lungo il tracciato

La galleria presenta coperture elevate lungo l'intero tracciato per cui non si registrano interferenze. L'unica incisione è rappresentata dal torrente S. Filippo che la galleria sotto-attraversa al km 14+400 circa con oltre 65 m di ricoprimento.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 8 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 sottterraneo.

Nel seguito si riporta un breve inquadramento geologico e la sintesi della caratterizzazione e modellazione geotecnica.

### 8.1 Inquadramento geologico

In questo paragrafo si descrivono le principali caratteristiche litologiche, stratigrafiche e strutturali delle formazioni attraversate dalla Galleria Letojanni in progetto. Per eventuali approfondimenti sullo studio geologico si rimanda agli specifici elaborati progettuali (da Rif. [14] a Rif. [26]).

La Galleria Letojanni si colloca nel settore centrale della tratta in progetto e presenta quote del piano ferro comprese tra i 38.8 ed i 46.5 m circa s.l.m.. Nel settore meridionale, il tracciato intercetta i terreni arenaceo-marnosi del Flysch di Capo d'Orlando (**CODb**), progressivamente passanti verso Nord alla componente conglomeratico-sabbiosa della medesima formazione (**CODa**). All'altezza del km 18+370, i suddetti litotipi sono dislocati da una importante faglia diretta ad asse NE-SW, che ribassa i settori Sud-occidentali di alcune decine di metri. Intorno al km 18+508, la galleria intercetta un'ulteriore faglia diretta ad asse circa NNE-SSE, che mette a contatto i termini silicoclastici infra-cenozoici coi terreni del basamento metamorfico paleozoico. A Nord di tale elemento, quindi, il tracciato intercetta i litotipi delle Epimetamorfiti di Longi-Taormina (**TAM**), che risultano interessati da una estesa faglia subverticale all'altezza del km 19+573. Infine, alla base dei rilievi e lungo i principali corsi d'acqua si rinvencono locali depositi alluvionali attuali (**ba**) e coltri detritico-colluviali (**b2**), particolarmente importanti in corrispondenza dell'imbocco Nord-orientale della galleria in questione.

Per eventuali approfondimenti sullo studio geologico si rimanda agli specifici elaborati progettuali (Rif. [13]).

### 8.2 Indagini geotecniche

Ai fini della caratterizzazione geotecnica delle formazioni interessate dalle opere all'aperto e in sottterraneo, sono stati utilizzati i dati provenienti dalle diverse campagne di indagini geognostiche, sia pregresse (2003; 2005; 2006; 2013-2014) che riferite all'attuale fase progettuale (2017).

L'ubicazione dei sondaggi è rappresentata sui profili geotecnici di progetto (da Rif. [2] a Rif. [12]); le relative stratigrafie ed i risultati delle prove eseguite sono allegati agli elaborati specialistici (Rif. [13]).

Nel corso del complesso *iter* progettuale sino ad oggi espletato, complessivamente nel Lotto 1 sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- n. 82 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo di cui n. 23 non attrezzati, n. 51 strumentati con piezometro e n. 8 attrezzati per sismica in foro;
- n. 163 prove penetrometriche dinamiche standard (SPT);

- n. 28 prove pressiometriche e n. 8 dilatometriche nei fori di sondaggio;
- n. 110 prove di permeabilità tipo Lefranc e Lugeon;
- n. 26 stendimenti sismici a rifrazione;
- n. 2 tomografie elettriche;
- n. 3 prove MASW;
- n. 2 stendimenti sismici MASW/Re.Mi.

Il numero totale dei campioni prelevati nel settore di intervento del Lotto 1 e sottoposti a prove di laboratorio è di 239, di cui 34 campioni indisturbati di terreno, 162 rimaneggiati e 43 campioni di roccia. Su tali campioni sono state compiute le seguenti prove:

- prove di taglio (TD);
- prove triassiali (CIU, CID, UU);
- prove di resistenza a compressione monoassiale;
- prove di carico puntuale (Point Load);
- misure della velocità sonica  $V_p$  e  $V_s$ .

Nel Lotto 2, invece, complessivamente sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- n. 127 sondaggi a rotazione e carotaggio continuo di cui n. 8 non attrezzati, n. 103 strumentati con piezometro e n. 16 attrezzati per sismica in foro;
- n. 417 prove penetrometriche dinamiche standard (SPT);
- n. 38 prove pressiometriche e n. 31 dilatometriche nei fori di sondaggio;
- n. 199 prove di permeabilità tipo Lefranc e Lugeon;
- n. 50 stendimenti sismici a rifrazione;
- n. 3 tomografie elettriche;
- n. 4 prove MASW;
- n. 3 stendimenti sismici MASW/Re.Mi.

Il numero totale dei campioni prelevati nel settore di intervento del Lotto 2 e sottoposti a prove di laboratorio è di 267, di cui 24 campioni indisturbati di terreno, 187 rimaneggiati e 56 campioni di roccia. Su tali campioni sono state compiute le seguenti prove:

- prove di taglio (TD);
- prove triassiali (CIU, CID, UU);
- prove di resistenza a compressione monoassiale;

- prove di carico puntuale (Point Load);
- misure della velocità sonica  $V_p$  e  $V_s$ .

L'insieme delle indagini sopra elencate, riferite sia al Lotto 1 che al Lotto 2, sono risultate funzionali alla caratterizzazione geotecnica dei terreni e delle rocce coinvolti dalle opere in progetto e comuni ad entrambi i lotti.

### 8.3 Caratterizzazione e modellazione geotecnica

La caratterizzazione geotecnica per la progettazione definitiva di opere in sotterraneo è finalizzata all'individuazione delle problematiche geotecniche che la natura e le caratteristiche dei terreni pongono nella definizione delle soluzioni progettuali, all'individuazione delle criticità associate alle condizioni idrauliche del sottosuolo, all'esame delle condizioni di stabilità generale dell'area, prima e dopo la realizzazione delle opere in progetto.

L'analisi e l'interpretazione di tutti i dati e le informazioni ad oggi disponibili, sia in riferimento al Lotto 1 che al Lotto 2, hanno portato ad individuare formazioni assimilabili dal punto di vista geotecnico, nel seguito definite "Unità geotecniche". Tali unità sono riportate in Tabella 1 con riferimento al tratto di interesse della Galleria Letojanni del Lotto 2 (in parentesi sono riportate le formazioni afferenti il Lotto 1 relative alla medesima unità geotecnica).

Il modello geotecnico del sottosuolo, sintesi della fase di caratterizzazione, è illustrato nelle tavole dei profili geotecnici (da Rif. [2] a Rif. [12]).

**Tabella 1 – Unità geotecniche - Galleria Letojanni – Lotto 2  
(in parentesi sono riportate le formazioni afferenti il Lotto 1)**

Unità geotecnica	Descrizione
b2;ba;bb;g1;MSS	Ghiaie e sabbie limose
(PDTb)/CODd/CODb/CFL	Arenarie
CODa	Conglomerati
FDN/GLD/TAM/MMF	Argilloscisti/Filladi

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 8.3.1 b2;ba;bb;g1;(MSS) – Ghiaie e sabbie limose

L'unità geotecnica delle ghiaie e sabbie limose "b2;ba;bb;g1;MSS" raggruppa le ghiaie in matrice sabbiosa e sabbioso-limosa afferenti i depositi detritico-colluviali (b2), i depositi alluvionali attuali (ba) e recenti (bb), i depositi di piana litorale (g1) e le ghiaie e sabbie di Messina (MSS) (Figura 1).



Figura 1 – Dettaglio della matrice sabbioso-ghiaiosa delle b2;ba;bb;g1;(MSS) in cassetta (S23D – 15-20 m dal p.c.)

#### 8.3.1.1 Caratteristiche fisiche

Le analisi granulometriche (Figura 2) mostrano mediamente una prevalenza significativa di sabbia (45%) ed, in maniera secondaria, di ghiaia (28%) con una percentuale inferiore di limo (18%) ed argilla (9%). Secondo le indicazioni delle Raccomandazioni AGI (Rif. [14]) l'unità risulta classificabile come sabbia limosa con ghiaia.

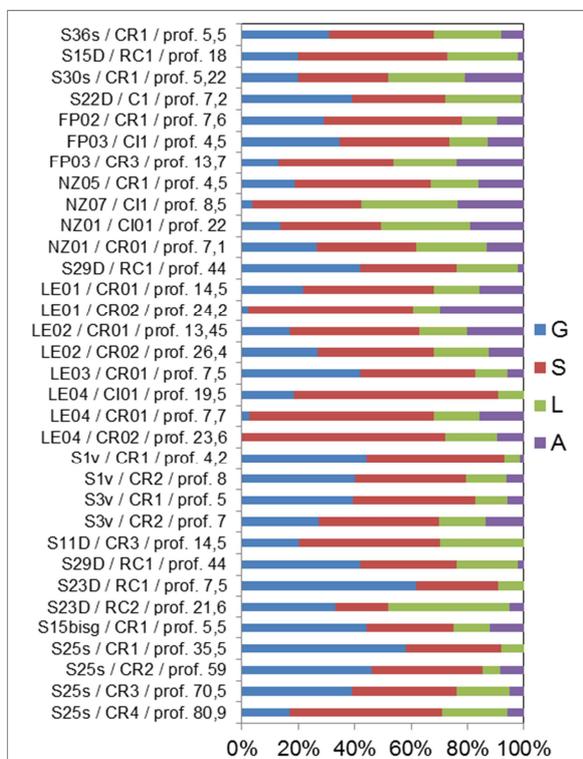


Figura 2 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: analisi granulometrica

Nella Figura 3 sono rappresentati i corrispondenti valori di passante al setaccio 200 ASTM (0,074 mm) ed il contenuto di argilla; la percentuale di passante è generalmente compresa tra il 10% ed il 40% mentre il contenuto di argilla nei campioni analizzati risulta in genere inferiore al 20%.

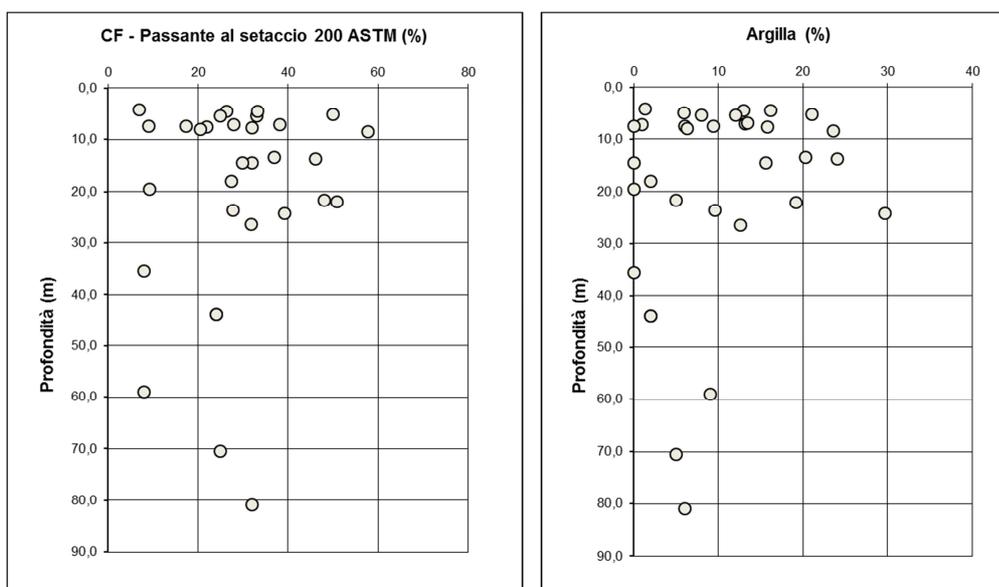
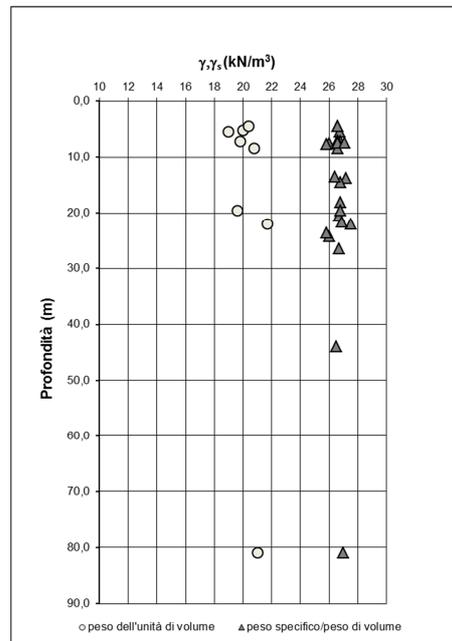


Figura 3 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: passante al setaccio 200 ASTM e percentuale di argilla



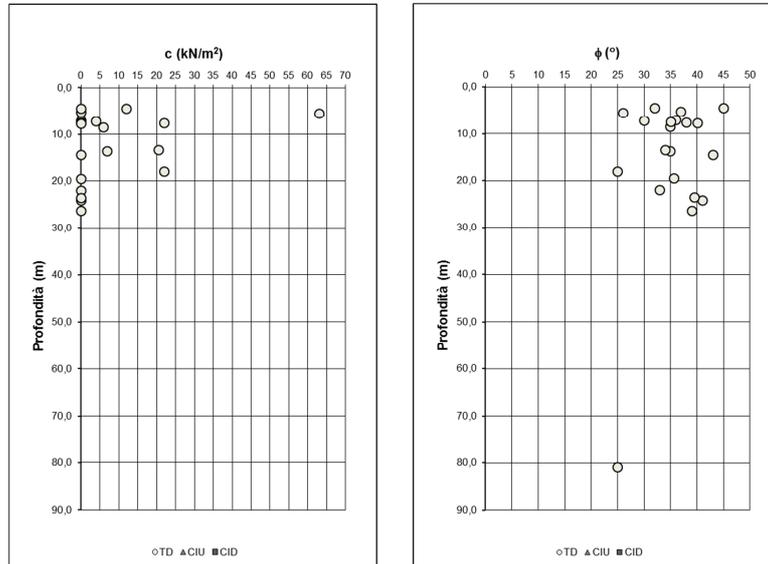
**Figura 4 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: peso dell'unità di volume e peso specifico**

In Figura 4 sono riportati il peso dell'unità di volume insieme al peso specifico del materiale.

### 8.3.1.2 Caratteristiche meccaniche

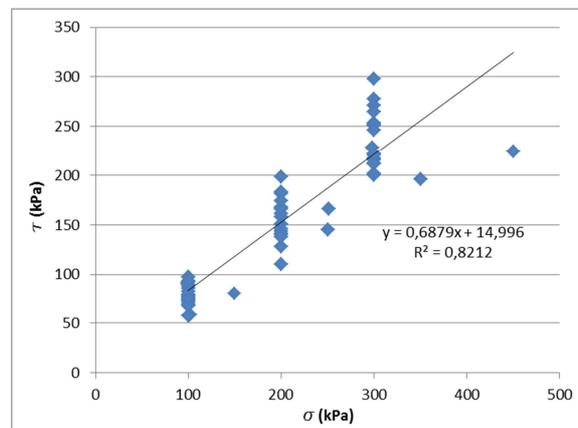
I parametri meccanici sono stati ricavati da un esame complessivo di tutte le prove in sito e in laboratorio disponibili.

In riferimento alle prove di laboratorio, sono state compiute prove di taglio diretto i cui risultati in termini di coesione efficace ed angolo d'attrito sono riportati in Figura 5.



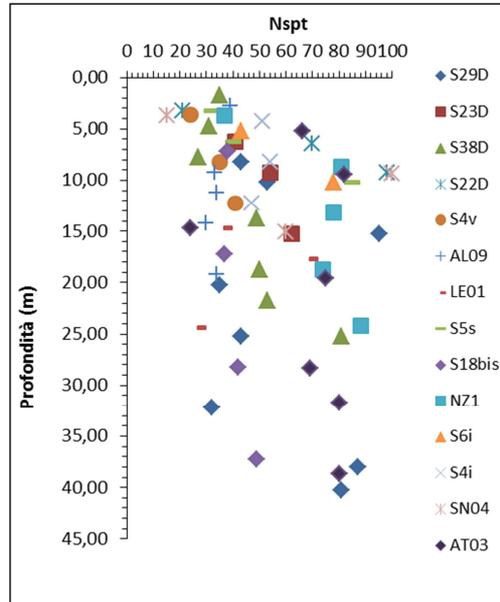
**Figura 5 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: coesione drenata ed angolo di attrito**

In Figura 6 si riporta l’involuppo delle prove di taglio diretto rappresentato nel piano di Mohr-Coulomb. È indicata nel grafico anche l’equazione della retta di regressione che massimizza il coefficiente di correlazione (pari a 0,82) cui corrispondono un valore di coesione di 15 kPa ed un angolo d’attrito pari a 35°. Il contributo di coesione, poiché la frazione argillosa è modesta, può essere attribuito all’effetto di *interlocking* dei grani.

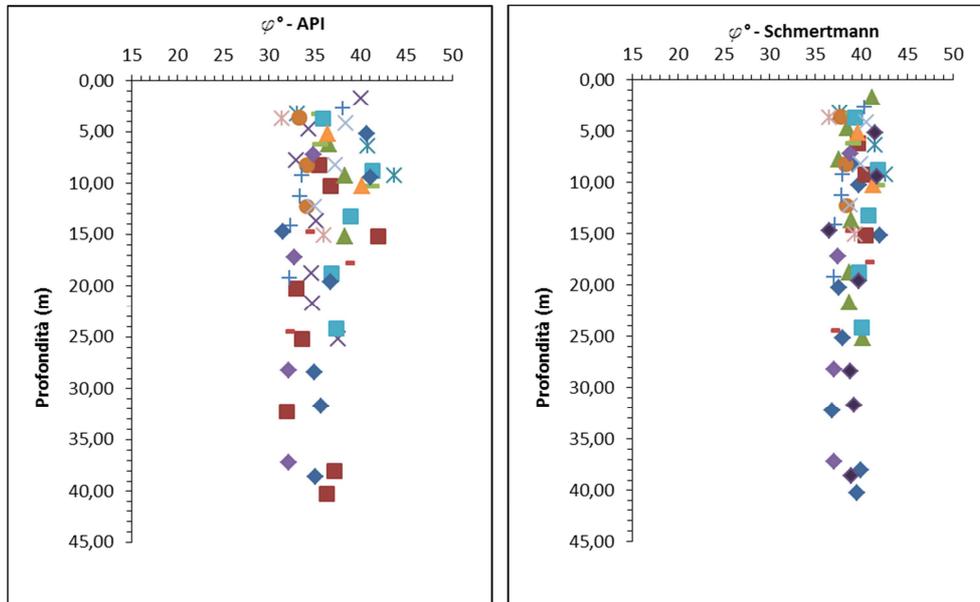


**Figura 6 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: Involuppo a rottura delle prove di taglio diretto**

I valori dell’angolo d’attrito ricavati dalle elaborazioni delle prove penetrometriche dinamiche a disposizione (Figura 7) risultano sostanzialmente in buon accordo con i valori di resistenza al taglio ottenuti dalle prove di laboratorio. Per le SPT sono state adottate le correlazioni suggerite dall’American Petroleum Institute (1987), leggermente più cautelative di quelle proposte da Schmertmann (1975), i cui risultati sono evidenziati in Figura 8.

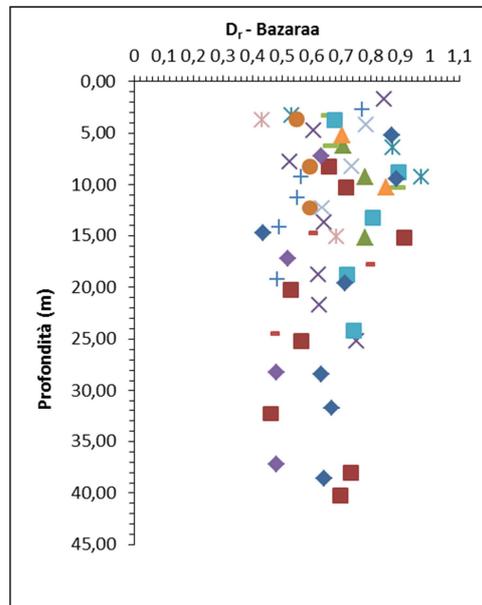


**Figura 7 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: valori di N<sub>spt</sub>**



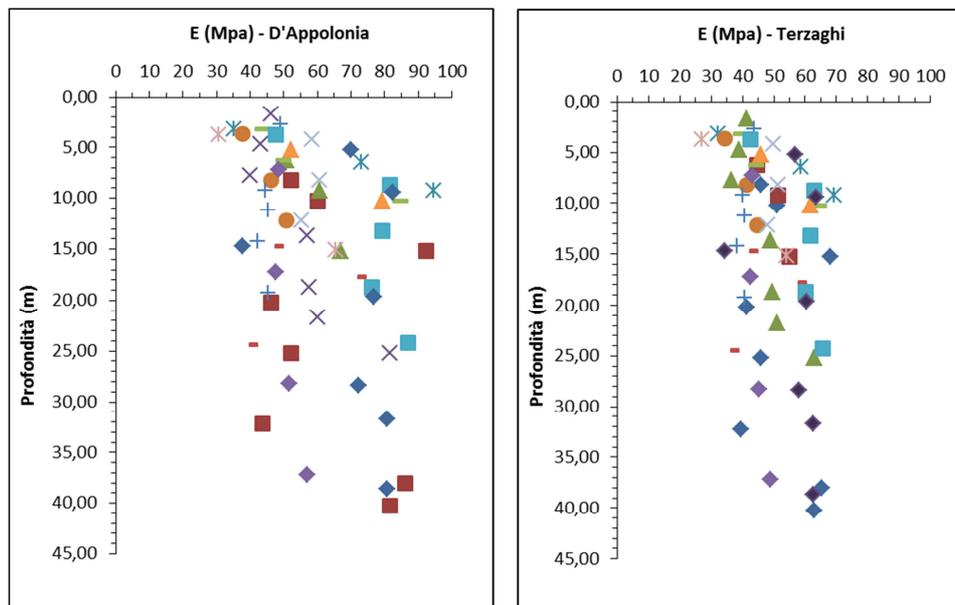
**Figura 8 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: angolo d'attrito ricavato dalle prove SPT**

Per il calcolo della densità relativa, è stata utilizzata la correlazione di Bazaara (1967), anche essa da preferirsi in via cautelativa per depositi addensati. La densità relativa così calcolata varia generalmente tra 0,50 e 0,80, con un valore medio di 0,67 per i materiali indagati (Figura 9).



**Figura 9 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: densità relativa**

Le prove SPT eseguite nei fori di sondaggi hanno consentito di stimare anche l'andamento del modulo elastico con la profondità (Figura 10) adottando le correlazione di D'Appolonia (1970) e Terzaghi (1988).

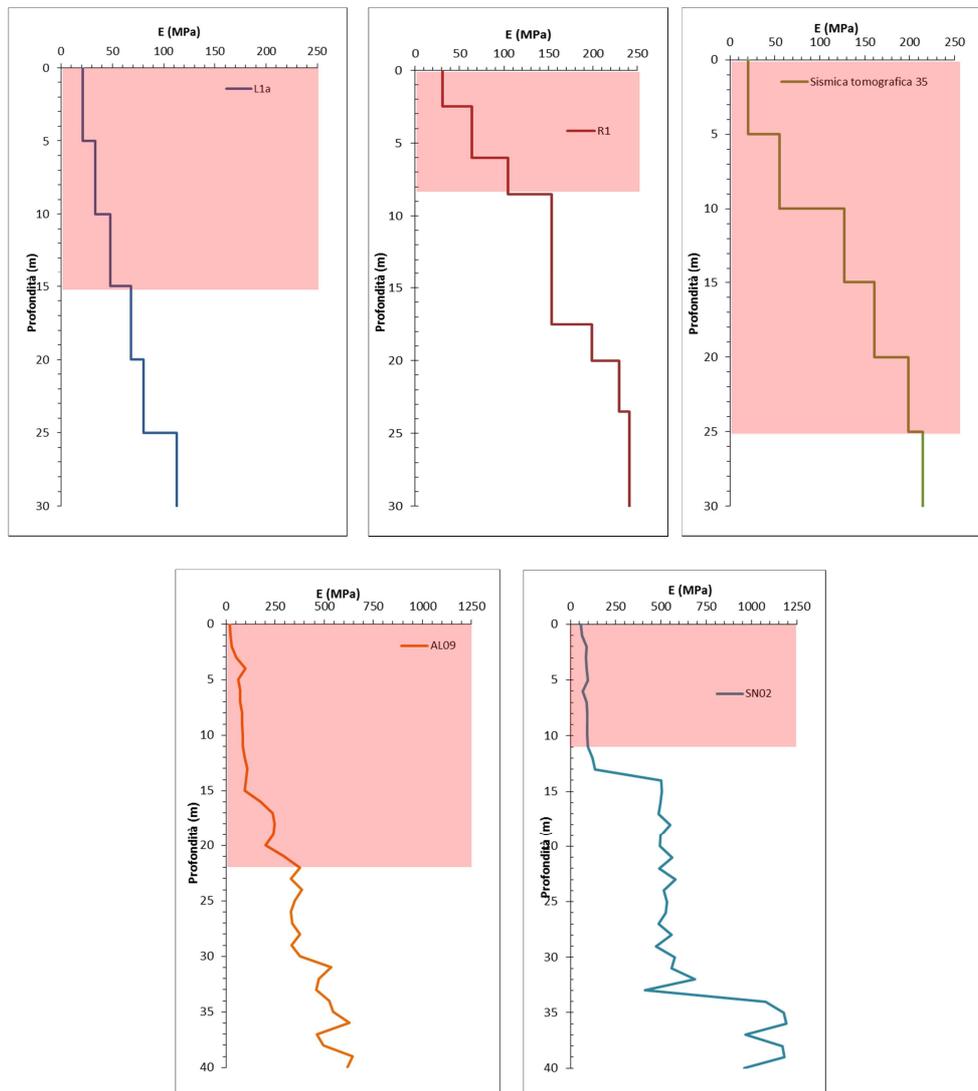


**Figura 10 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: moduli elastici ricavati dalle prove SPT**

Tali valori sono stati confrontati con i valori di rigidezza desunti dalle elaborazioni delle prove pressiometriche oltre che dalle indagini geofisiche in superficie.

Dalla prova pressiometrica S22D-P1 a disposizione, è stato calcolato il modulo di deformazione sia in riferimento alla fase di carico ( $E_m$ ) che al ciclo di carico-scarico ( $E_y$ ), con valori rispettivamente di 27 e 170 MPa.

I moduli di rigidezza derivati dall'interpretazione delle indagini geofisiche sono stati ottenuti a partire dai moduli a piccole deformazioni  $E_0$ , assumendo un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,15 in considerazione delle deformazioni di taglio attese per l'opera in progetto (Rif. [31]). Tali moduli sono quindi riportati nei grafici che seguono in riferimento allo stendimento a rifrazione L1a, alla sismica tomografica n.35, alle *down-hole* AL09 ed SN02, ed alla MASW/Re.Mi. R1 (solo le parti evidenziate in rosso sono relative alle formazioni in oggetto, come da profilo stratigrafico).



**Figura 11 - b2;ba;bb;g1;MSS: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche**

Le risultanze delle indagini in foro sono state opportunamente valutate tenendo in considerazione le differenti tipologie di prove condotte, i differenti volumi di materiale coinvolti ed il corrispondente effetto scala sulla definizione del modulo di rigidezza della formazione. Tali moduli sono quindi stati confrontati con i valori dei moduli desunti dalle indagini geofisiche per definire l'intervallo dei moduli operativi di rigidezza tra 40 e 100 MPa.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 8.3.1.3 Riepilogo dei parametri geotecnici

Per l'unità geotecnica "b2;ba;bb;g1;MSS" gli intervalli dei parametri geotecnici afferenti la galleria Letojanni sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 2 - Galleria Letojanni – Riepilogo parametri geotecnici - b2;ba;bb;g1;MSS**

Unità geotecnica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (KPa)	$\phi$ (°)	E (MPa)
b2;ba;bb;g1;MSS	19-21	0-20	25-40	40-100

### 8.3.2 (PDTb)/CODd/CODb/CFL – Arenarie

L'unità delle arenarie "(PDTb)/CODd/CODb/(CFL)" è costituita dal membro prevalentemente arenaceo della Formazione di Piedimonte (PDTb) e del Flysh di Capo d'Orlando (CODd/CODb), che hanno caratteri petrografici ed una storia tettonico-sedimentaria sostanzialmente simile (Rif. [29]). Entrambe le formazioni sono costituiti prevalentemente da arenarie da poco a ben cementate (Figura 12) con intercalazioni di argille e passaggi di sabbie.

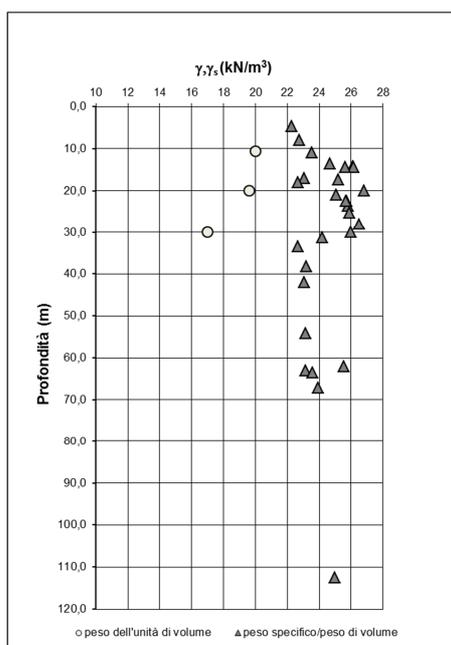
Anche le Calcareniti di Floresta (CFL) sono state accorpate a tale unità, essendo costituite da calcareniti ed arenarie in genere poco cementate, petrograficamente simili anche esse alle arenarie di Capo d'Orlando (Rif. [30]). Il rapporto tra la componente litoide e quella pelitica (L/P) è significativamente maggiore dell'unità.



**Figura 12 – Sondaggio S18D, cassetta da 60 a 65 m dal p.c.**

### 8.3.2.1 Caratteristiche fisiche

In Figura 13 è riportato il peso di volume del materiale.

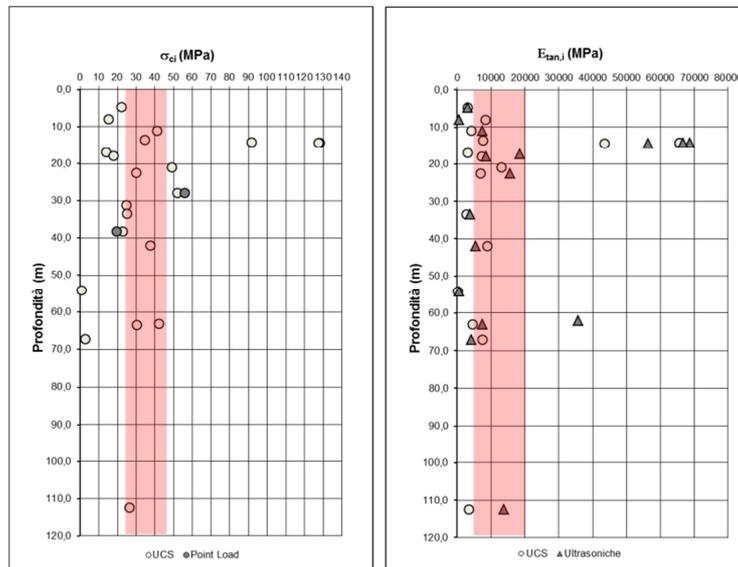


**Figura 13 - Formazione PDTb/CODd/CODb/(CFL): peso di volume  $\gamma$**

### 8.3.2.2 Caratteristiche meccaniche

Per la caratterizzazione di tale unità geotecnicamente omogenea i parametri meccanici sono stati ricavati da un esame complessivo di tutte le prove in sito e in laboratorio disponibili.

Riguardo le prove di laboratorio su campioni litoidi, si hanno a disposizione prove di compressione monoassiale, prove di velocità ultrasonica e *point load test*, i cui risultati sono riportati in Figura 14. In rosso, sono evidenziati gli intervalli di valori di riferimento scelti per la caratterizzazione geotecnica.



**Figura 14 - Formazione (PDTb)/CODd/CODb/CFL:  $\sigma_{ci}$  e  $E_{tan,i}$  della matrice**

Le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso sono state espresse attraverso il criterio generalizzato proposto da Hoek e Brown (1988), assegnando l'indice  $m_i$  in funzione del materiale ed il fattore di disturbo  $D$  in relazione alle metodologie realizzative dell'opera e alla natura dell'ammasso.

Il criterio di resistenza dell'ammasso è dato dall'espressione seguente:

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

dove:

- $\sigma'_1$  tensione principale efficace maggiore a rottura;
- $\sigma'_3$  tensione principale efficace minore a rottura;
- $\sigma_c$  resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

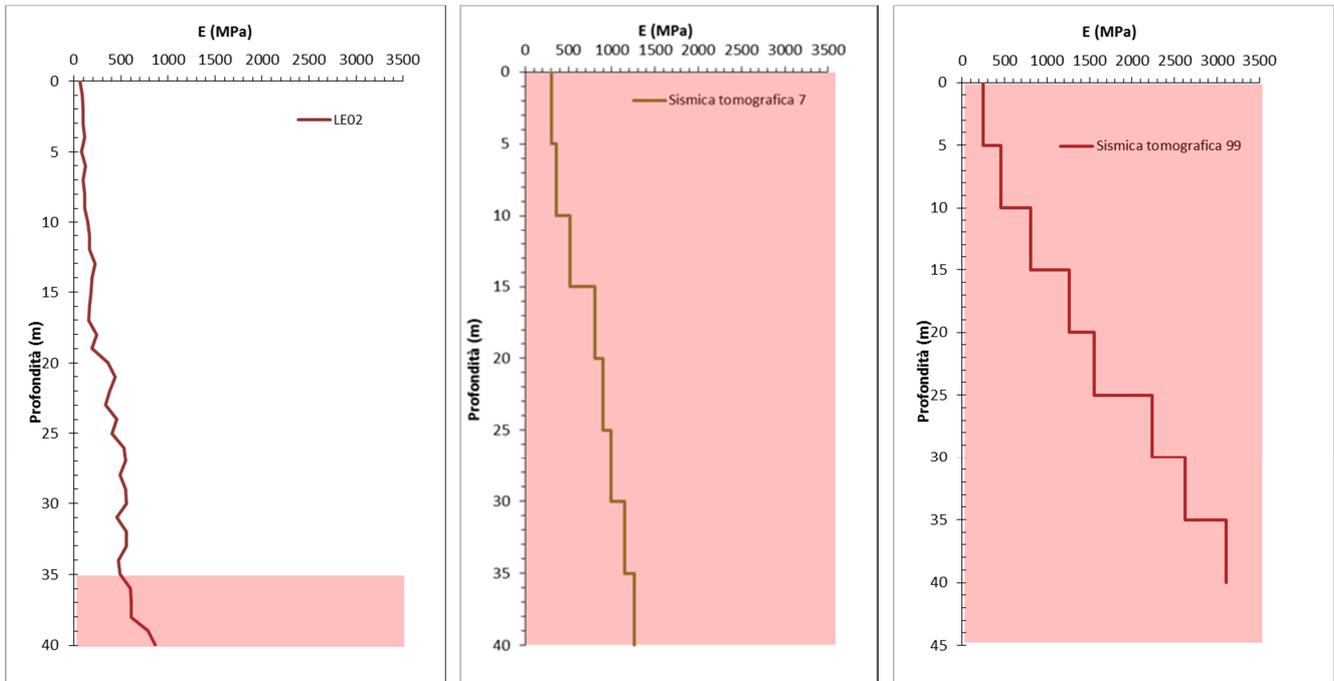
Al fine di definire le caratteristiche geomeccaniche e il relativo stato di fratturazione di tale unità, sono stati analizzati i risultati di numerosi rilievi geostrutturali appositamente condotti in tutto il settore di intervento.

Tutti i dati raccolti hanno così permesso di caratterizzare l'ammasso investigato nella tratta di interesse della Galleria Letojanni e di definire due *ranges* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della progressiva chilometrica, il primo nell'intervallo 30 ÷ 45 ed il secondo nell'intervallo 45 ÷ 55 con il quale è stato inoltre possibile valutare la rigidità d'ammasso a partire da quella della roccia intatta mediante metodi empirici noti in letteratura (Rif. [25]).

Inoltre, per quanto concerne le caratteristiche di rigidità dell'ammasso, sono state condotte prove dilatometriche e pressiometriche, oltre alle indagini geofisiche (in foro ed in superficie).

Nel grafico che segue sono riportati i moduli di rigidità ricavati dalle prove pressiometriche e dilatometriche S06D-P1, S06D-P2, S06D-P3, S18D, sia in riferimento alla fase di carico ( $E_m$  ed  $E_d$  rispettivamente) che ai cicli di carico-scarico ( $E_y$ ).





**Figura 16 - Formazione (PDTb)/CODd/CODb/CFL: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche**

Le risultanze delle indagini in foro ed in laboratorio sono state opportunamente valutate tenendo in considerazione le differenti tipologie di prove condotte, i differenti volumi di materiale coinvolti ed il corrispondente effetto scala sulla definizione del modulo di rigidità della formazione. Tali moduli sono quindi stati confrontati con i valori dei moduli desunti dalle indagini geofisiche per definire gli intervalli dei moduli operativi di rigidità.

### 8.3.2.3 *Riepilogo dei parametri geotecnici*

Per l'unità geotecnica "(PDTb)/CODd/CODb/CFL" gli intervalli dei parametri geotecnici afferenti la galleria Letojanni sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 3 - Galleria Letojanni – Riepilogo parametri geotecnici – (PDTb)/CODd/CODb/CFL**

Unità geotecnica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI	$m_i$	$E_i$ (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	E (MPa)
PDTb/CODd/CODb/(CFL)	24-26	25-45	30-45	17	5000-20000	2,3-6,5	220-2120
			45-55			3,6-8,5	530-4040

### 8.3.3 CODa- Conglomerati

L'unità "CODa" è costituita da conglomerati del Flysh di Capo d'Orlando (CODa) a clasti poligenici ed eterometrici in matrice sabbiosa e microconglomeratica, da poco a ben cementata (Figura 17).



Figura 17 – Sondaggio S11D, cassetta da 25 a 30 m dal p.c.

#### 8.3.3.1 Caratteristiche fisiche

In Figura 18 è riportato, il peso di volume del materiale.

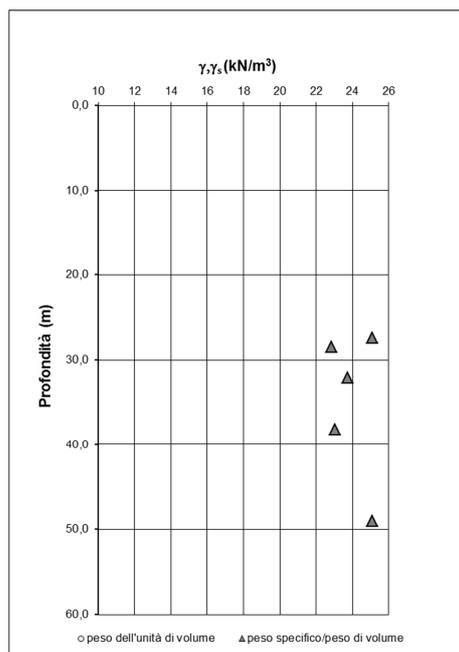
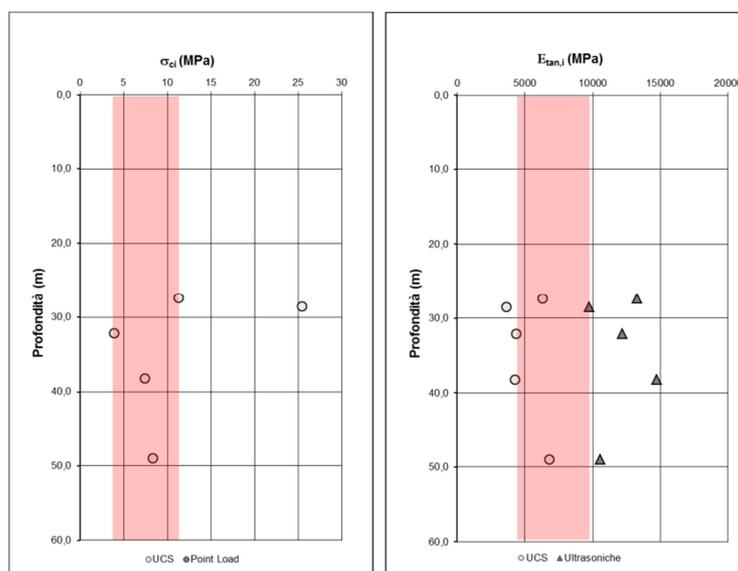


Figura 18 - Formazione CODa: peso di volume  $\gamma$

### 8.3.3.2 Caratteristiche meccaniche

Per la caratterizzazione di tale unità geotecnicamente omogenea i parametri meccanici sono stati ricavati da un esame complessivo di tutte le prove in sito e in laboratorio disponibili.

Riguardo le prove di laboratorio su campioni litoidi, si hanno a disposizione prove di compressione monoassiale e prove di velocità ultrasonica, i cui risultati sono riportati in Figura 19. In rosso, sono evidenziati gli intervalli di valori di riferimento scelti per la caratterizzazione geotecnica.



**Figura 19 - Formazione CODa:  $\sigma_{ci}$  e  $E_{tan,i}$  della matrice**

Le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso sono state espresse attraverso il criterio generalizzato proposto da Hoek e Brown (1988), assegnando l'indice  $m_i$  in funzione del materiale ed il fattore di disturbo  $D$  in relazione alle metodologie realizzative dell'opera e alla natura dell'ammasso.

Il criterio di resistenza dell'ammasso è dato dall'espressione seguente:

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

dove:

- $\sigma'_1$  tensione principale efficace maggiore a rottura;
- $\sigma'_3$  tensione principale efficace minore a rottura;
- $\sigma_c$  resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

Al fine di definire le caratteristiche geomeccaniche e il relativo stato di fratturazione di tale unità, sono stati analizzati i risultati di numerosi rilievi geostrutturali appositamente condotti in tutto il settore di intervento.

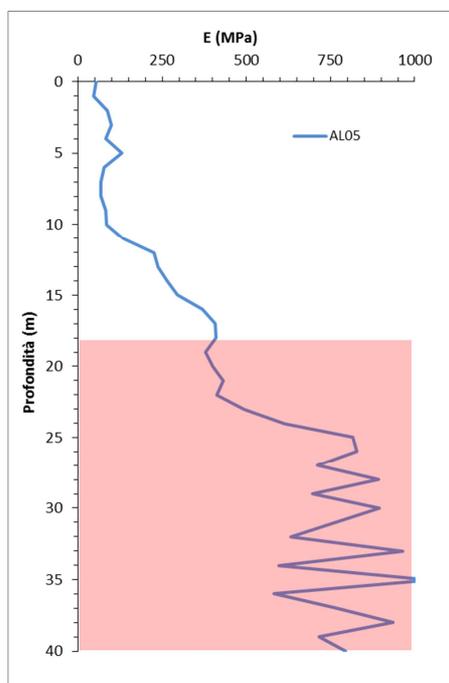
Tutti i dati raccolti hanno così permesso di caratterizzare l'ammasso investigato nella tratta di interesse della Galleria Letojanni e di definire un *range* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della progressiva chilometrica, nell'intervallo 30 ÷ 45, con il quale è stato inoltre possibile valutare la rigidezza d'ammasso a partire da quella della roccia intatta mediante metodi empirici noti in letteratura (Rif. [25]).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

Inoltre, per quanto concerne le caratteristiche di rigidità dell'ammasso, sono state condotte prove pressiometriche, oltre alle indagini geofisiche in foro.

Dalla prova pressiometrica S11D-P2 a disposizione, eseguita alla profondità di 40 m dal p.c. è stato ricavato un modulo di deformazione in riferimento alla fase di carico ( $E_m$ ) pari a 268 MPa.

I moduli di rigidità derivati dall'interpretazione delle prospezioni geofisiche sono stati ottenuti a partire dai moduli a piccole deformazioni  $E_0$ , assumendo un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,15 in considerazione delle deformazioni di taglio attese per l'opera in progetto (Rif. [31]). Tali moduli sono quindi riportati nel grafico che segue in riferimento alla prova *down-hole* AL05 (solo la parte evidenziata in rosso è relativa alle formazioni in oggetto, come da profilo stratigrafico).



**Figura 20 - Formazione CODa: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche**

Le risultanze delle indagini in foro ed in laboratorio sono state opportunamente valutate tenendo in considerazione le differenti tipologie di prove condotte, i differenti volumi di materiale coinvolti ed il corrispondente effetto scala sulla definizione del modulo di rigidità della formazione. Tali moduli sono quindi stati confrontati con i valori dei moduli desunti dalle indagini geofisiche per definire gli intervalli dei moduli operativi di rigidità.

### 8.3.3.3 Riepilogo dei parametri geotecnici

Per l'unità geotecnica "CODa" gli intervalli dei parametri geotecnici afferenti la galleria Letojanni sono riportati nella tabella seguente:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 4 - Galleria Letojanni – Riepilogo parametri geotecnici - CODa**

Unità geotecnica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI	$m_i$	$E_i$ (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	E (MPa)
<i>CODa</i>	23-25	4-11	30-45	18	4000-10000	0,3-1,2	130-670

#### 8.3.4 *FDN/GLD/TAM/MMF – Argiloscisti/Filladi*

L'unità geotecnica degli argiloscisti/filladi "FDN/GLD/TAM/(MMF)" raggruppa le filladi dei Metamorfiti di Mandanici (FDN), gli argiloscisti degli Epimetamorfiti del Vallone Letojanni (GLD), gli argiloscisti degli Epimetamorfiti di Longi-Taormina (TAM) e le metareniti e metasiltiti dei Metamorfiti di Ali (MMF).

Tali formazioni sono caratterizzate da struttura scistosa con presenza di lenti e livelli di quarzo (Figura 21), e generalmente risultano molto alterate nella porzione superficiale a causa delle azioni meccaniche indotte dalla tettonica.



**Figura 21 – Sondaggio S15D, dettaglio della microstruttura scistosa con quarzo**

##### 8.3.4.1 *Caratteristiche fisiche*

Ai fini di individuare le componenti granulometriche dell'unità per il possibile riutilizzo dei materiali di smarino delle gallerie in progetto, si riportano le analisi granulometriche condotte sui campioni prelevati, le quali mostrano una prevalenza di sabbia (45%) e ghiaia (28%), (Figura 22), con un contributo inferiore di limo (21%) ed argilla (5%) (Figura 22).

Tale materiale, oltre ad essere caratterizzato dalla medesima composizione petrografica di quella della zona costiera di Sant'Alessio Siculo, come riportato in Relazione Geologica (Rif. [13]) in riferimento allo studio meteorologico-idraulico condotto, presenta un'alta percentuale di componente sabbiosa-ghiaiosa che lo rende potenzialmente compatibile con l'eventuale ripascimento del litorale costiero.

In Figura 23 è riportato, il peso di volume del materiale.

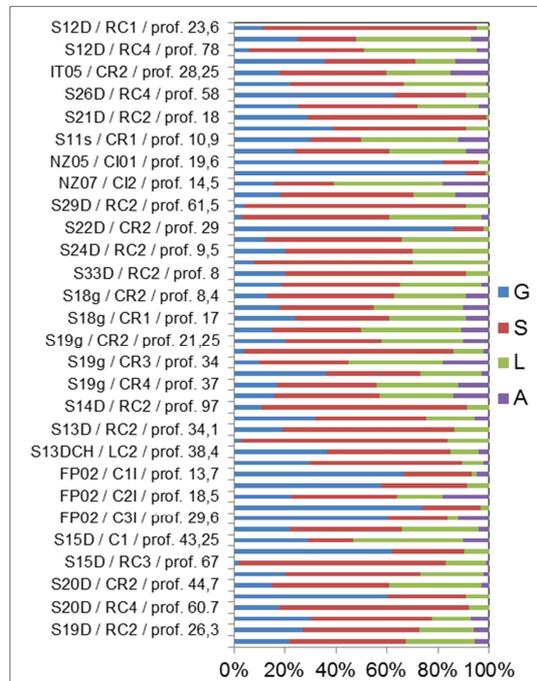


Figura 22 - FDN/GLD/TAM/MMF: analisi granulometrica

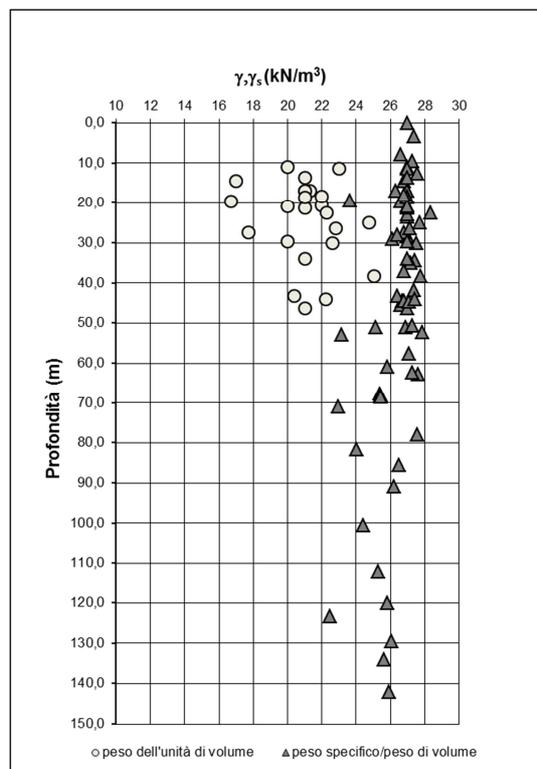
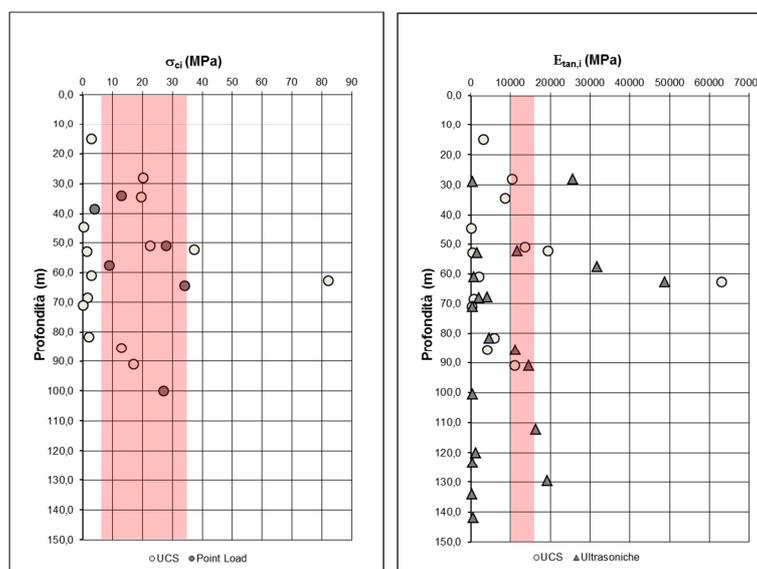


Figura 23 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: peso di volume  $\gamma$

### 8.3.4.2 Caratteristiche meccaniche

Per la caratterizzazione di tale unità geotecnicamente omogenea i parametri meccanici sono stati ricavati da un esame complessivo di tutte le prove in sito e in laboratorio disponibili.

Riguardo le prove di laboratorio su campioni litoidi, si hanno a disposizione prove di compressione monoassiale, prove di velocità ultrasonica e *point load test*, i cui risultati sono riportati in Figura 24. In rosso, sono evidenziati gli intervalli di valori di riferimento scelti per la caratterizzazione geotecnica.



**Figura 24 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF:  $\sigma_{ci}$  e  $E_{tan,i}$  della matrice**

Le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso sono state espresse attraverso il criterio generalizzato proposto da Hoek e Brown (1988), assegnando l'indice  $m_i$  in funzione del materiale ed il fattore di disturbo  $D$  in relazione alle metodologie realizzative dell'opera e alla natura dell'ammasso.

Il criterio di resistenza dell'ammasso è dato dall'espressione seguente:

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

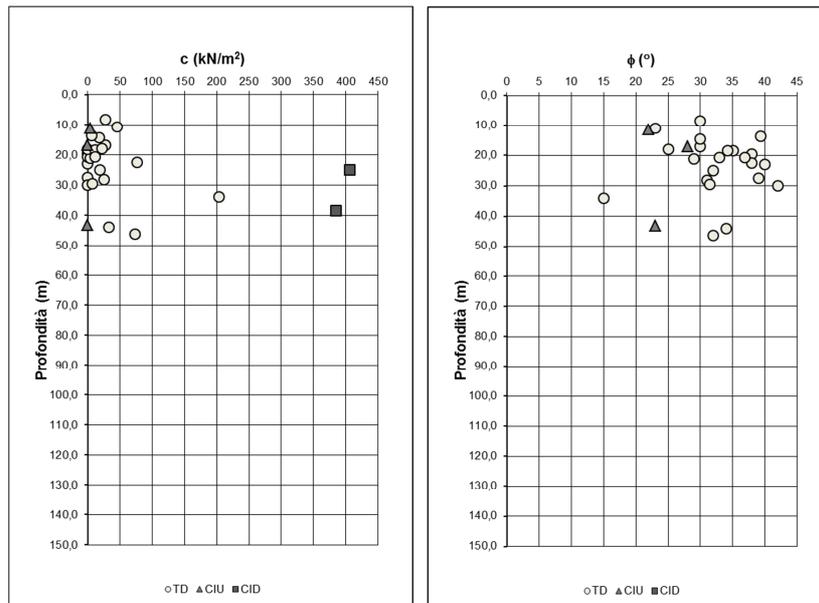
dove:

- $\sigma'_1$     tensione principale efficace maggiore a rottura;
- $\sigma'_3$     tensione principale efficace minore a rottura;
- $\sigma_c$     resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

Al fine di definire le caratteristiche geomeccaniche e il relativo stato di fratturazione di tale unità, sono stati analizzati i risultati di numerosi rilievi geostrutturali appositamente condotti in tutto il settore di intervento.

Tutti i dati raccolti hanno così permesso di caratterizzare l'ammasso investigato nella tratta di interesse della Galleria Letojanni e di definire due *ranges* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della progressiva chilometrica, il primo nell'intervallo  $10 \div 25$  ed il secondo nell'intervallo  $25 \div 40$ , con i quali è stato inoltre possibile valutare la rigidità d'ammasso a partire da quella della roccia intatta mediante metodi empirici noti in letteratura (Rif. [25]).

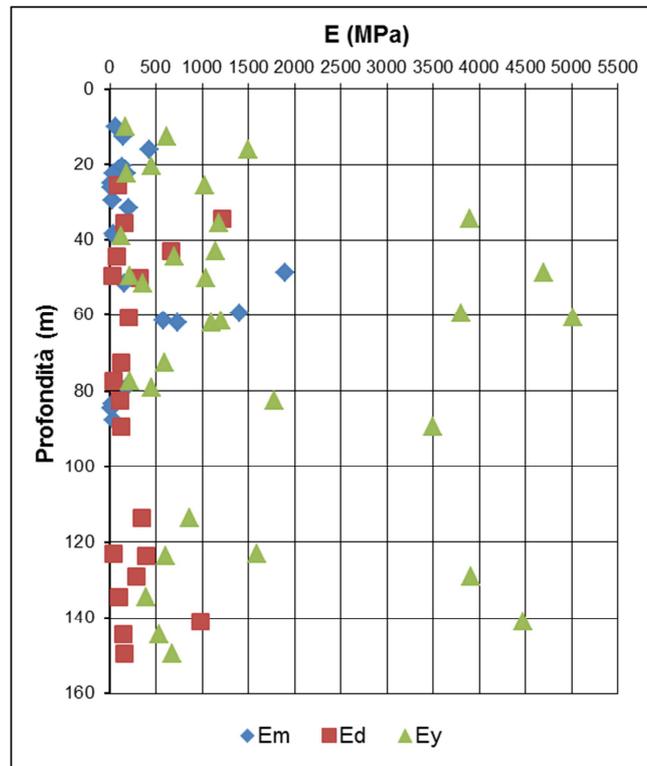
Prove di taglio diretto e triassiali sono state eseguite sui campioni a disposizione, i cui risultati in termini di coesione efficace ed angolo d'attrito sono riportati in Figura 25. Tali valori sono da riferirsi alla frazione alterata dalla tettonica e sono stati considerati, come estremo limite inferiore, nella definizione della resistenza attrittiva d'ammasso.



**Figura 25 – Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: coesione drenata ed angolo di attrito**

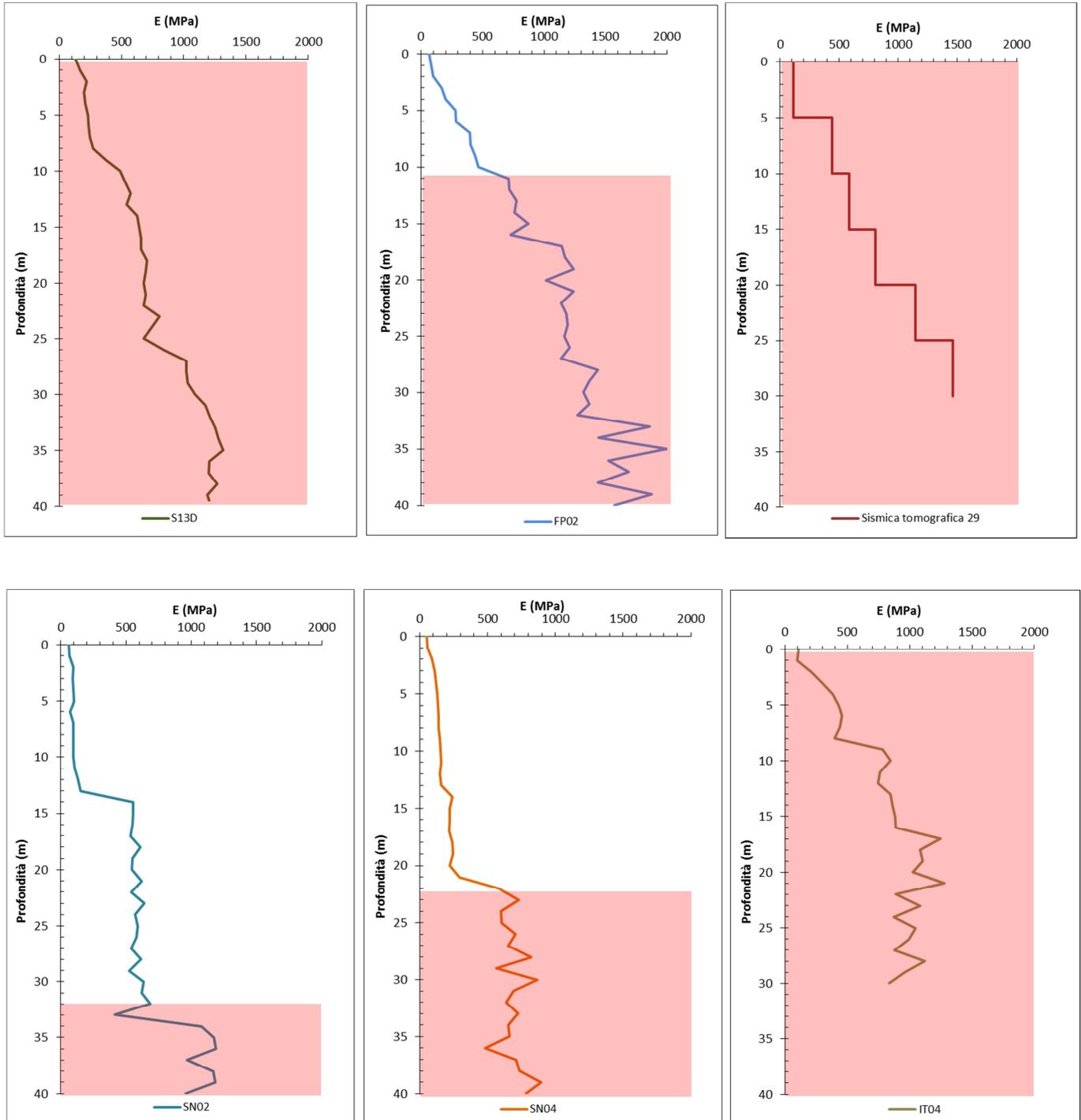
Inoltre, per quanto concerne le caratteristiche di rigidità dell'ammasso, sono state condotte prove pressiometriche e dilatometriche, oltre alle indagini geofisiche in foro ed in superficie.

Nel grafico che segue sono riportati i moduli di rigidità ricavati dalle prove pressiometriche e dilatometriche nei fori di sondaggio T1÷T5, S12D÷S14D, S19D÷S22D, S26D, S28D, S29D, S31D, S33D, S34D, NS11, NS14, sia in riferimento alla fase di carico ( $E_m$  ed  $E_d$  rispettivamente) che ai cicli di carico-scarico ( $E_y$ ).



**Figura 26 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: moduli pressiometrici e dilatometrici**

I moduli di rigidezza derivati dall'interpretazione delle prospezioni geofisiche sono stati ottenuti a partire dai moduli a piccole deformazioni  $E_0$ , assumendo un rapporto  $E/E_0$  pari a 0,15 in considerazione delle deformazioni di taglio attese per l'opera in progetto (Rif. [31]). Tali moduli sono quindi riportati nel grafico che segue sia in riferimento alla prova *cross-hole* S13D che alle prove *down-hole* FP02-SN02-SN04-IT04 ed alla sismica tomografica n.29 (solo la parte evidenziata in rosso è relativa alle formazioni in oggetto, come da profilo stratigrafico).



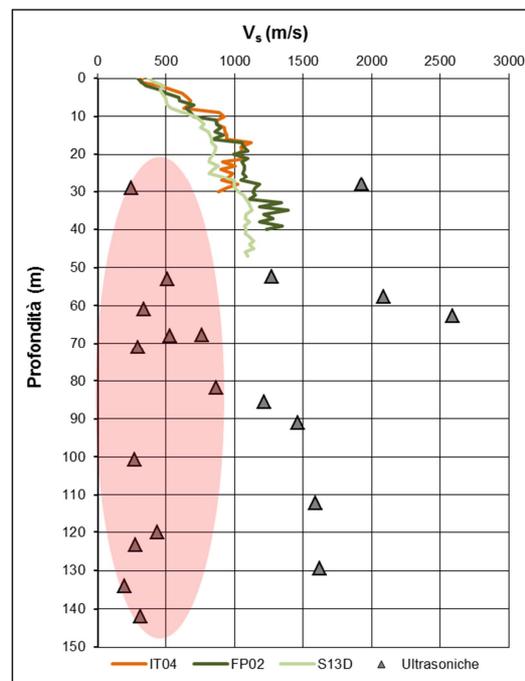
**Figura 27 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche**

Le risultanze delle indagini in foro ed in laboratorio sono state opportunamente valutate tenendo in considerazione le differenti tipologie di prove condotte, i differenti volumi di materiale coinvolti ed il corrispondente effetto scala

sulla definizione del modulo di rigidezza della formazione. Tali moduli sono quindi stati confrontati con i valori dei moduli desunti dalle indagini geofisiche per definire gli intervalli dei moduli operativi di rigidezza.

Inoltre, le velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_{s,sito}$  ottenute dalle indagini sismiche in sito sono state confrontate con le  $V_{s,lab}$  ricavate dai provini di laboratorio mediante prove ultrasoniche. Tale confronto è stato utile per comprendere il grado di disturbo e, quindi, la qualità dei campioni prelevati, in modo da poter interpretare al meglio anche i dati ricavati dalle corrispondenti prove a compressione monoassiale condotte sui provini a disposizione.

Generalmente in roccia il rapporto tra  $V_{s,lab}$  e  $V_{s,sito}$  risulta maggiore di 0,9-1,0 (Rif. [32]), mentre un congruo numero di prove di laboratorio (evidenziato in rosso in figura Figura 28) ha evidenziato valori di gran lunga inferiori.



**Figura 28 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: confronto tra  $V_{s,sito}$  e  $V_{s,lab}$**

È nota, difatti, la difficoltà di campionamento dei materiali scistosi i quali risultano generalmente troppo resistenti per adottare campionatori con fustella. Allo stesso tempo, se semplicemente carotati, manifestano un immediato detensionamento della microstruttura scistosa a seguito dell'estrazione della carota. Tale allentamento della tessitura, insieme all'eventuale presenza di inclusi e lenti di quarzo, può influenzare fortemente i risultati delle prove condotte in laboratorio (Figura 29).



**Figura 29 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: prova triassale – dettaglio della tessitura scistosa a seguito della rottura del provino S13DCH-LC2**

Dal confronto, quindi, tra  $V_{s,sito}$  e  $V_{s,lab}$  sono stati individuati i campioni di laboratorio caratterizzati dal minor disturbo di campionamento, ai fini dell'interpretazione delle prove di laboratorio per la scelta dei *ranges* dei parametri geotecnici.

#### 8.3.4.3 Riepilogo dei parametri geotecnici

Per l'unità geotecnica "FDN/GLD/TAM/MMF" gli intervalli dei parametri geotecnici afferenti la galleria Letojanni sono riportati nella tabella seguente:

**Tabella 5 - Galleria Letojanni – Riepilogo parametri geotecnici - FDN/GLD/TAM/(MMF)**

Unità geotecnica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI	$m_i$	$E_i$ (MPa)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	E (MPa)
FDN/GLD/TAM/MMF	24-28	15-35	10-25	10	10000-15000	0,6-2,6	260-640
			25-40			1,1-4,0	430-1540

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 8.3.5 Definizione degli intervalli dei parametri geotecnici delle unità interessate dalle opere

Di seguito si riportano gli intervalli dei principali parametri fisico-meccanici delle unità interessate dalle opere afferenti la Galleria Letojanni.

**Tabella 6 - Galleria Letojanni – Riepilogo parametri geotecnici**

Unità geotecnica	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{ci}$ (MPa)	GSI	$m_i$	$E_i$ (MPa)	$c$ (KPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_{cm}$ (MPa)	$E$ (MPa)
<i>b2;ba;bb;g1;MSS</i>	19-21	-	-	-	-	0-20	25-40	-	40-100
<i>(PDTb)/CODd/CODb/CFL</i>	24-26	25-45	30-45	17	5000-20000	-	-	2,3-6,5	220-2120
			45-55			-	-	3,6-8,5	530-4040
<i>CODa</i>	23-25	4-11	30-45	18	4000-10000	-	-	0,3-1,2	130-670
<i>FDN/GLD/TAM/MMF</i>	24-28	15-35	10-25	10	10000-15000	-	-	0,6-2,6	260-640
			25-40			-	-	1,1-4,0	430-1540

### 8.3.6 Il regime idraulico

L'approfondimento idrogeologico realizzato per il presente studio ha consentito di definire le principali caratteristiche dell'area e lo schema di deflusso idrico sotterraneo relativo all'opera in progetto. Il modello idrogeologico così sviluppato è stato quindi integrato, ove possibile, con ulteriori dati provenienti dal monitoraggio piezometrico delle strumentazioni appositamente installate nei fori di sondaggio e dalle numerose prove di permeabilità condotte in fase di perforazione.

Nei settori relativi all'opera sono stati individuati i seguenti complessi idrogeologici, distinti sulla base delle differenti caratteristiche di permeabilità e del tipo di circolazione idrica che li caratterizza.

#### 8.3.6.1 Complesso metamorfico (TAM).

Costituiscono acquiferi fessurati di scarsa trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche di scarsa rilevanza, generalmente discontinue e frazionate, contenute nelle porzioni più alterate e fessurate dell'ammasso. La permeabilità, principalmente per fessurazione, è generalmente bassa. A tale complesso si può quindi attribuire un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $1 \cdot 10^{-8}$  e  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s.

#### 8.3.6.2 Complesso arenaceo-marnoso (CODb).

Costituiscono acquiferi misti di scarsa trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche di ridotta rilevanza, generalmente frazionate e a carattere stagionale. La permeabilità, per porosità e fessurazione, è generalmente bassa. A questo complesso si può attribuire un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $1 \cdot 10^{-8}$  e  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s.

#### 8.3.6.3 Complesso conglomeratico-ghiaioso (CODa).

Costituiscono acquiferi misti di discreta trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche di modesta rilevanza, sia frazionate che a deflusso unitario. La permeabilità, per porosità e fessurazione, è

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

generalmente alta. A tale complesso si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $1 \cdot 10^{-5}$  e  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s.

#### 8.3.6.4 Complesso fluvio-marino (ba, bb).

Costituiscono acquiferi porosi di buona trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche di particolare rilevanza, localmente autonome ma globalmente a deflusso unitario, che possono avere interscambi con i corpi idrici superficiali e sotterranei delle strutture idrogeologiche limitrofe. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è generalmente alta. Al presente complesso può essere attribuito un coefficiente di permeabilità  $k$  compreso tra  $1 \cdot 10^{-5}$  e  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s.

#### 8.3.6.5 Complesso detritico-colluviale (b2).

Costituiscono acquiferi porosi di scarsa trasmissività, fortemente eterogenei ed anisotropi; sono privi di corpi idrici sotterranei di importanza significativa, a meno di piccole falde a carattere stagionale. La permeabilità, esclusivamente per porosità, è generalmente alta. Al complesso in questione si può attribuire, quindi, un coefficiente di permeabilità  $k$  variabile tra  $1 \cdot 10^{-5}$  e  $1 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Per l'andamento della quota di falda si rimanda al "Profilo geotecnico - Galleria Letojanni" (Rif. [6]) e alla "Relazione geologica ed idrogeologica" (Rif. [13]).

#### 8.3.7 *Lo stato tensionale in situ*

Come noto, lo stato tensionale in un qualunque punto di un terreno o roccia dipende dal peso proprio del materiale, dalla sua storia tensionale, dalla posizione della falda e dai carichi esterni.

Nelle analisi riportate nei successivi paragrafi sono indicati i valori del coefficiente di spinta a riposo assunti per ogni unità geotecnicamente omogenea.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 9 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. [14]), di seguito brevemente richiamate, sulla base delle quali il tracciato sotterraneo è suddiviso in tratte a comportamento deformativo omogeneo.

I risultati dell'analisi del comportamento deformativo consentono di individuare gli interventi di precontenimento e/o di contenimento più idonei a garantire condizioni di stabilità della galleria in fase di scavo e a lungo termine.

### 9.1 Classi di comportamento del fronte di scavo

Secondo l'approccio ADECO-RS (Rif. [14]) 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 tensionali sono di tipo elasto-plastico, di maggiore entità rispetto al caso precedente. Nell'ammasso può prodursi una eventuale riduzione delle caratteristiche di resistenza con decadimento verso i parametri residui. La risposta tensio-deformativa può essere opportunamente controllata con adeguati interventi di preconsolidamento del fronte e/o di consolidamento al contorno del cavo. In tal modo si fornisce l'opportuno contenimento all'ammasso perché mantenga un comportamento stabile. Nel caso non si prevedano interventi, lo stato tensio-deformativo può 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.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 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 ed 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.

## **9.2 Determinazione delle categorie di comportamento**

La valutazione del comportamento deformativo del fronte è stata condotta utilizzando il metodo delle linee caratteristiche.

Le analisi nella fase di diagnosi sono state condotte con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici e delle azioni.

### **9.2.1 Analisi con il metodo delle linee caratteristiche**

#### 9.2.1.1 Metodo di analisi

Il metodo delle linee caratteristiche (o convergenza-confinamento) è un metodo di calcolo che 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.

Il comportamento delle strutture di rivestimento e dell'ammasso vengono studiati separatamente: la curva caratteristica del cavo (o curva di convergenza) rappresenta l'evoluzione della convergenza radiale del cavo al diminuire della tensione radiale agente sul contorno del profilo di scavo, espressa in funzione del tasso di deconfinamento  $\lambda$  con cui viene simulato l'effetto dello scavo in avanzamento; la curva caratteristica dei sostegni (o curva di confinamento) rappresenta l'evoluzione della loro convergenza radiale al crescere della pressione radiale agente sugli stessi. L'intersezione tra la curva di convergenza e la curva di confinamento individua il punto di equilibrio rappresentativo dello stato finale della galleria rivestita.

Le ipotesi alla base del metodo sono le seguenti:

- simmetria cilindrica e stato piano di deformazione;
- ammasso omogeneo ed isotropo;
- stato tensionale iniziale isotropo.

L'ideale campo di applicazione è pertanto costituito da gallerie profonde a sezione circolare.

Le analisi contenute in questo documento sono state svolte col codice di calcolo GV4 (versione 4H del 2003).

Per l'ammasso si utilizza un modello costitutivo elasto-plastico, con criterio di resistenza di Mohr-Coulomb e con eventuale decadimento dei parametri di resistenza dai valori di picco ai valori residui.

Ove necessario, per la definizione del comportamento deformativo della galleria in funzione della distanza dal fronte, si utilizza il Nuovo Metodo Implicito (NMI) (Rif. [16], Rif. [17]), che consente di ottenere risultati affidabili

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

sia in termini di convergenze, sia in termini di carichi di lavoro sui sostegni. Per il calcolo della convergenza al fronte si utilizzano le soluzioni analitiche per cavità sferiche.

Per le analisi di seguito riportate, relative alla fase di diagnosi, e finalizzate quindi alla sola valutazione del comportamento deformativo dell'ammasso per la determinazione della categoria di comportamento, non viene presa in considerazione l'interazione con i sostegni, per cui la soluzione del problema è ridotta alla valutazione della sola curva caratteristica del fronte (e del cavo) in assenza di interventi.

### 9.2.1.2 Sezioni analizzate

Sulla base dei risultati della caratterizzazione geotecnica di cui al precedente paragrafo § 8.3, sono state definite le seguenti sezioni di analisi.

**Tabella 7 Sezioni analizzate con il metodo delle linee caratteristiche: dati di input**

Sez di calcolo	Unità	pk [m]	H [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_k$ [MPa]	$\varphi'_k$ [°]	$E_k$ [MPa]
D1	CODb	16+411	56.9	1.42	-	-	-	25.0	0.145	48.0	340.0
D2	CODb	17+425	259.9	6.50	-	-	-	25.0	1.128	41.0	1180.0
D3	CODa	18+384	72.9	1.75	0.65	0.0	49.0	24.0	0.155	28.0	340.0
D4	TAM	19+590	362.9	9.44	-	-	-	26.0	0.500	23.0	785.0
D5	TAM	19+614	129.9	3.38	-	-	-	26.0	0.150	25.0	450.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

$\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo

$p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate

$p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo

$R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$

$\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso

$c'_k$  = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso

$\varphi'_k$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso

$E_k$  = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

Per la sezione D3, nei conglomerati (CODa) è stata definita una distribuzione di pressione neutre che prevede un opportuno abbattimento al contorno del cavo per effetto dello scavo. Per le altre sezioni, considerata la bassa permeabilità degli ammassi rocciosi CODb e TAM, la presenza di acqua è stata trascurata

### 9.2.1.3 Risultati delle analisi

I risultati delle analisi sono stati esaminati alla luce di due aspetti:

- confronto tra la resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso  $\sigma_c$  e la pressione critica al fronte  $p_c = (3\sigma_0 - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$ , che individua il passaggio dal comportamento elastico a quello plastico,
- sviluppo dei fenomeni deformativi e di plasticizzazione nella sezione al fronte e al contorno del cavo,

prendendo a riferimento per la definizione della categoria di comportamento i seguenti due criteri:

$\sigma_c / p_c$	Classe di comportamento
$\geq 1,2$	A
$< 1,2$ e $\geq 0,8$	A/B
$< 0,8$ e $\geq 0,2$	B/C
$< 0,2$	C

**Tabella 8 - Criterio 1**

$u_F / R_{eq}$	$R_{plF} / R_{eq}$	Classe di comportamento
$\leq 0,5 \%$	$\leq 1,5$	B
$> 0,5 \%$	$> 1,5$	C

$u_F$  = convergenza al fronte  
 $R_{plF}$  = raggio plastico al fronte  
 $R_{eq}$  = raggio di scavo equivalente della galleria

**Tabella 9 - Criterio 2**

Sulla base di queste valutazioni quantitative, unitamente all'analisi critica dei risultati ottenuti rispetto all'affidabilità dei dati di ingresso in termini di parametri di ammasso (rigidezza e resistenza) e condizioni idrauliche al contorno, in relazione ad eventuali variabilità attese lungo il tracciato della galleria e alle possibili conseguenze per comportamenti imprevedibili, è stata definita la categoria di comportamento del fronte di scavo da cui deriva l'individuazione degli eventuali necessari interventi di precontenimento e contenimento.

I risultati delle analisi sono riassunti nella tabella seguente; i tabulati di calcolo con la rappresentazione delle curve caratteristiche sono invece riportati integralmente in All. [1].

**Tabella 10 Sezioni analizzate con il metodo delle linee caratteristiche: risultati delle analisi**

Sezione di calcolo	$\sigma_c$ [MPa]	$p_c$ [MPa]	$\sigma_c / p_c$ [-]	$u_F$ [m]	$u_F / R_{eq}$ [%]	$R_{PF}$ [m]	$R_{PF} / R_{eq}$ [-]	Categoria
D1	0.76	0.19	3.99	0.015	0.31	5.31	1.08	A
D2	4.95	0.90	5.49	0.019	0.39	5.26	1.07	A
D3	0.52	0.64	0.80	0.039	0.79	7.10	1.45	B
D4	1.51	4.54	0.33	0.184	3.76	9.15	1.87	C
D5	0.47	1.55	0.30	0.115	2.35	9.04	1.84	C

$\sigma_c = (2c \cos \varphi) / (1 - \sin \varphi)$  = resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso (parametri di picco)

$p_c = (3\sigma_o - 2\sigma_c) / (1 + 2K_p)$  = pressione critica al fronte (con  $K_p$  coefficiente di spinta passiva)

$u_F$  = convergenza al fronte (soluzione cavità sferica)

$R_{PF}$  = raggio plastico al fronte

$u_\infty$  = convergenza finale del cavo

$R_P$  = raggio plastico finale al contorno del cavo

$R_{eq}$  = raggio di scavo equivalente della galleria pari a 4.9 m

### 9.2.2 Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo

Sulla base dei risultati delle analisi sopra descritte, il tracciato è stato suddiviso in tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo, rappresentate in forma sintetica sul profilo geotecnico della galleria (Rif. [6]).

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 10 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 allo scavo (fase di diagnosi - § 9). Sono descritte le caratteristiche principali delle sezioni tipo di avanzamento, il loro campo di applicazione e la successione delle fasi esecutive.

### 10.1 Definizione delle sezioni tipo

Dall'analisi del tracciato plano-altimetrico e in funzione della lunghezza dell'opera in sotterraneo in progetto e del contesto geologico-idrogeologico e geotecnico attraversato, è stato scelto il metodo di scavo tradizionale a piena sezione.

In funzione delle caratteristiche geotecniche delle formazioni attraversate e del loro comportamento allo scavo, sono state definite 9 diverse sezioni tipo, intese come complesso di modalità operative, fasi di lavoro, interventi di stabilizzazione, drenaggi e relative tecnologie esecutive, denominate A1, A2, B1, B2, C2, C2v, C2p, C2d e C3v.

Per ciascuna sezione tipo è prevista l'installazione a ridosso del fronte di scavo di un rivestimento provvisorio costituito da spritz-beton fibrorinforzato e centine metalliche ed infine il getto dei rivestimenti definitivi di arco rovescio e calotta. La gestione delle acque in sotterraneo è garantita dall'installazione di 3+3 drenaggi in avanzamento, dall'impermeabilizzazione a tergo dei rivestimenti definitivi di calotta e da tubi microfessurati, al piede dell'impermeabilizzazione, di presidio per eventuale drenaggio delle acque presenti nelle formazioni attraversate.

Nei paragrafi a seguire si riporta una sintetica descrizione delle sezioni tipo definite, che trovano completa rappresentazione negli elaborati grafici di progetto.

Per la distribuzione delle tratte di applicazione delle diverse sezioni tipo si rimanda invece al "Profilo geotecnico - Galleria Letojanni" (Rif. [6]).

#### 10.1.1 Sezione tipo A1

La A1 è una sezione cilindrica che prevede solo interventi di contenimento al contorno tramite centine e spritz-beton e può essere impiegata solo nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte stabile (categoria A).

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione A1, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- scavo a piena sezione per sfondi di dimensioni massime 2,80 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,15 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN140 con passo 1,40 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,60 m) e murette in calcestruzzo non armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 5 diametri;
- calotta (spessore 0,60 m) in calcestruzzo non armato gettata ad una distanza non vincolata dal fronte.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 10.1.2 Sezione tipo A2

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

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

- scavo a piena sezione per sfondi di dimensioni massime 2,40 m;
- chiodatura radiale mediante 9/10 chiodi ad ancoraggio continuo Ø24 disposti in raggiera alternate, lunghezza 4,50 m, interasse longitudinale 1,20 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,15 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN140 con passo 1,20 m  $\pm$  20%;
- arco rovescio (spessore 0,70 m) e murette in calcestruzzo non armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri;
- calotta (spessore 0,60 m) in calcestruzzo non armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 10.1.3 Sezione tipo B1

La B1 è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e presostegno al contorno. Può essere impiegata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte stabile a breve termine (categoria B).

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 20 elementi strutturali in VTR, L=13,5 m (sovrapposizione minima 5,0 m)  $\pm$ 20% cementati in foro con miscele cementizie;
- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 21 tubi in acciaio valvolati, L=12,0 m (sovrapposizione minima 3,5 m, interasse 0,4 m)  $\pm$ 20%;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 8,5 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,0 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 (spessore variabile da 0,50 m a 1,15 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

#### 10.1.4 Sezione tipo B2

La B2 è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte. Può essere impiegata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte stabile a breve termine (categoria B).

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 30 elementi strutturali in VTR, L=17,0 m (sovrapposizione minima 7,0 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele cementizie;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,20 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN160 con passo 1,0 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 (spessore 0,70 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 4 diametri.

#### 10.1.5 Sezione tipo C2

La C2 è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno. Deve essere applicata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C).

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 25 elementi strutturali in VTR, L=18,0 m (sovrapposizione minima 8,0 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele cementizie;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 41 elementi strutturali in VTR, L=15,0 m (sovrapposizione minima 5,0 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento 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  $\pm 20\%$ ;
- arco rovescio (spessore 0,90 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta (spessore 0,80 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 10.1.6 Sezione tipo C2v

La C2v è una sezione tronco-conica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno e interventi di presostegno al contorno. Deve essere applicata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C).

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 30 elementi strutturali in VTR, L=20,0 m (sovrapposizione minima 11,5 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele cementizie;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 41 elementi strutturali in VTR, L=17,00 m (sovrapposizione minima 8,5 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina;
- presostegno al contorno (entro un angolo di  $120^\circ$  in calotta) realizzato mediante 23 tubi in acciaio valvolati, L=14,00 m (sovrapposizione minima 5,5 m, interasse 0,40 m)  $\pm 20\%$ ;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento tronco-conici di lunghezza pari a 8,5 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN180 con passo 1,0 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 (spessore variabile da 0,55 m a 1,30 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 10.1.7 Sezione tipo C2p

La C2p è una sezione cilindrica che prevede interventi di precontenimento del fronte e del contorno; la lunghezza dei consolidamenti in relazione al campo d'avanzamento è tale da garantirne la doppia sovrapposizione sia al fronte sia al contorno; è previsto inoltre l'impiego della centina puntone come rivestimento provvisorio in arco rovescio. Deve essere applicata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C).

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

- precontenimento del fronte realizzato mediante 30 elementi strutturali in VTR, L=20,0 m (sovrapposizione minima 10,0 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele cementizie;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 43 elementi strutturali in VTR, L=20,0 m (sovrapposizione minima 10,0 m)  $\pm 20\%$  cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 10,0 m;

- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,25 m di spritz-beton fibrorinforzato e centina singola HEB180 con passo 1,0 m  $\pm$  20% anche in arco rovescio;
- arco rovescio (spessore 1,00 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta (spessore 0,90 cm) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

### 10.1.8 Sezione tipo C2d

La C2d è una sezione cilindrica a geometria circolare che prevede pesanti interventi di precontenimento del fronte e al contorno, e un campo di avanzamento ridotto; è previsto inoltre l'impiego di un rivestimento provvisorio anche in arco rovescio con centine scorrevoli. Deve essere applicata nelle tratte con comportamento del nucleo-fronte instabile (categoria C) ed alte coperture.

Sono di seguito elencati i principali elementi caratterizzanti la sezione C2d, ordinati secondo le fasi esecutive previste:

- precontenimento del fronte realizzato mediante 25 elementi strutturali in VTR, L=18,0 m (sovrapposizione minima 12,0 m)  $\pm$ 20% cementati in foro con miscele cementizie;
- precontenimento al contorno realizzato mediante 58 elementi strutturali in VTR, L=15,0 m (sovrapposizione minima 9,0 m)  $\pm$ 20% cementati in foro con miscele espansive;
- scavo a piena sezione per singoli sfondi di 1,0 m secondo campi di avanzamento di lunghezza pari a 6,0 m;
- rivestimento provvisorio (ad ogni sfondo) composto da 0,30 m di spritz-beton fibrorinforzato e centine scorrevoli TH29 con passo 1,0 m  $\pm$  20% anche in arco rovescio;
- arco rovescio (spessore 0.80 m) in calcestruzzo armato gettato ad una distanza massima dal fronte pari a 2 diametri;
- calotta (spessore 0,80 cm) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 5 diametri.

### 10.1.9 Sezione tipo C3v

La sezione C3v prevede gli stessi interventi della sezione C2v ad eccezione dei consolidamenti al contorno che sono previsti con VTR valvolati anziché cementati con miscele espansive.

## 10.2 Caratteristiche dei materiali strutturali

Si riportano di seguito le principali caratteristiche dei diversi materiali impiegati nelle opere in progetto, con l'indicazione dei valori di resistenza e deformabilità adottati nelle verifiche, nel rispetto delle indicazioni del DM 14/01/2008 e della Circolare n.617/2009.

Con riferimento ai rivestimenti provvisori e definitivi, si sottolinea che la classe di resistenza dei calcestruzzi riportata nelle tabelle che seguono è quella utilizzata ai fini della sola modellazione numerica e delle verifiche strutturali (per i rivestimenti definitivi si rimanda alle indicazioni del Capitolato).

Per le caratteristiche dei materiali da adottare per la realizzazione delle opere si rimanda all'elaborato "Caratteristiche dei materiali – Note generali" (Rif. [33]).

### Interventi di presostegno

<b>Acciaio per infilaggi al contorno</b>	
Tipo	<i>S 355</i>
Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 510 \text{ MPa}$
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} \geq 355 \text{ MPa}$
Tensione di snervamento di calcolo	$f_{yd} = 338.0 \text{ MPa}$

### Interventi di precontenimento

<b>Elementi in vetroresina strutturali tubolari</b>	
Resistenza a trazione caratteristica	$f_{tk} = 450 \text{ MPa}$

<b>Elementi in vetroresina strutturali a 3 piatti</b>	
Resistenza a trazione caratteristica	$f_{tk} = 900 \text{ MPa}$

### Rivestimento provvisorio

<b>Calcestruzzo proiettato (fibrorinforzato)</b>	
Classe di resistenza	<i>C 25/30</i>
Resistenza cilindrica a compressione caratteristica (a 28 giorni di maturazione)	$f_{ck} \geq 25 \text{ MPa}$
Resistenza cilindrica a compressione di calcolo	$f_{cd} = 16,67 \text{ MPa}$
Modulo elastico (a 28 giorni di maturazione)	$E_{cm} = 31475 \text{ MPa}$

<b>Acciaio per centine</b>	
Tipo	<i>S 275</i>
Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 430 \text{ MPa}$
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} \geq 275 \text{ MPa}$
Tensione di snervamento di calcolo	$f_{yd} = 261,9 \text{ MPa}$

### Rivestimenti definitivi

<b>Calcestruzzo armato</b>	
Classe di resistenza di calcolo	<i>C 25/30</i>
Resistenza cilindrica a compressione caratteristica (a 28 giorni di maturazione)	$f_{ck} \geq 25 \text{ MPa}$
Resistenza cilindrica a compressione di calcolo	$f_{cd} = 14,16 \text{ MPa}$
Modulo elastico (a 28 giorni di maturazione)	$E_{cm} = 31475 \text{ MPa}$
Tensione massima di compressione in esercizio	$\sigma_c = 10,00 \text{ MPa}$

<b>Acciaio per barre di armatura</b>	
Tipo	<i>B450C</i>
Tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 540 \text{ MPa}$
Tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} \geq 450 \text{ MPa}$
Tensione di snervamento di calcolo	$f_{yd} = 391,30 \text{ MPa}$
Tensione massima in condizioni di esercizio	$\sigma_s = 337,50 \text{ MPa}$

<b>Calcestruzzo non armato</b>	
Classe di resistenza di calcolo	C 25/30
Tensione massima di compressione	$\sigma_{c,max} = 6,225 \text{ MPa}$
Tensione massima tangenziale	$\tau_c = 0,376 \text{ MPa}$

### 10.3 Analisi e verifica delle sezioni tipo

Le soluzioni progettuali descritte nel capitolo precedente sono state analizzate per verificarne adeguatezza ed efficacia, con riferimento al modello geotecnico illustrato nel § 0 e nel rispetto delle indicazioni della normativa vigente.

#### 10.3.1 Criteri di verifica

Le analisi di stabilità del fronte di scavo, analogamente a quanto già fatto in fase di diagnosi per la valutazione del comportamento del fronte in assenza di interventi, sono state condotte secondo il metodo delle linee caratteristiche (§ 9.2.1).

Le analisi di interazione, in grado di simulare il comportamento del sistema opera-terreno nelle diverse fasi costruttive fino alla configurazione finale ed in condizioni di esercizio, sono state condotte mediante modelli numerici agli elementi finiti e secondo il metodo delle linee caratteristiche.

Per ciascuna sezione tipo oggetto di verifica, le sezioni di analisi sono state definite individuando le condizioni (stratigrafiche e di copertura) più gravose nell'ambito della relativa tratta di applicazione.

#### Stabilità del fronte e del cavo

Le analisi di stabilità del fronte e del cavo sono mirate alla valutazione dello sviluppo di possibili meccanismi di collasso, con o senza propagazione verso la superficie, o di deformazioni e spostamenti elevati al contorno ed in superficie. Trattandosi di una verifica per uno stato limite ultimo di tipo GEO, si è utilizzato l'Approccio 1-Combinazione 2 (A2+M2+R2), con R2 = 1.

La verifica della stabilità del fronte è condotta applicando i coefficienti parziali sui parametri di resistenza dell'ammasso e valutando il risultato della verifica in funzione della formulazione del particolare metodo di calcolo adottato (si può fare riferimento ad esempio, al fattore di stabilità, o alla pressione di equilibrio sul fronte, o al coefficiente di sicurezza globale o a sviluppo di elevate deformazioni/plasticizzazioni al fronte).

Gli interventi di consolidamento del fronte, realizzati mediante elementi strutturali in VTR, sono simulati mediante un incremento di coesione equivalente del fronte ( $\Delta c$ ) valutato attraverso il calcolo della pressione equivalente al fronte ( $\sigma_3$ ) determinata sulla base del valore più basso tra resistenza a trazione e resistenza a sfilamento dei singoli elementi, secondo le seguenti relazioni:

$$\Delta c = \frac{1}{2} \sqrt{K_p} \cdot \sigma_3^{VTR}$$

con:

$$K_p = \frac{1 + \operatorname{sen} \varphi}{1 - \operatorname{sen} \varphi}$$

$$\sigma_3^{\text{VTR}} = \min(\sigma_{3,A}^{\text{VTR}}, \sigma_{3,B}^{\text{VTR}})$$

$$\sigma_{3,A}^{\text{VTR}} = \frac{\tau_{bk} \cdot L_A \cdot p_A}{A_i}$$

$$\sigma_{3,B}^{\text{VTR}} = \frac{f_{tk} \cdot A_T}{A_i}$$

dove:

$\tau_{bk}$  = tensione di aderenza all'interfaccia con il terreno,

$L_A$  = lunghezza utile dell'elemento,

$p_A$  = perimetro dell'interfaccia con il terreno,

$f_{tk}$  = resistenza a trazione dell'elemento in VTR,

$A_T$  = sezione resistente a trazione dell'elemento in VTR

$A_i$  = area di influenza del singolo elemento di consolidamento.

Le valutazioni relative all'effetto dei consolidamenti sono condotte a partire dai parametri geotecnici caratteristici e adottando coefficienti parziali unitari sulle resistenze dei materiali; agli incrementi di coesione equivalente calcolati come sopra descritto può quindi essere applicato lo stesso coefficiente parziale previsto per la coesione dell'ammasso.

Per evidenziare l'effetto dei consolidamenti ai fini della stabilità del fronte, i risultati delle verifiche sono presentati per confronto con i corrispondenti risultati delle analisi svolte in fase di diagnosi (con valori caratteristici delle azioni e delle resistenze ed in assenza di interventi di consolidamento).

### Interazione opera-terreno

Il comportamento del sistema opera-terreno è analizzato nelle diverse fasi costruttive, fino alla configurazione finale, e in condizioni di esercizio. Le analisi sono mirate alla previsione del comportamento deformativo al contorno dello scavo e dei carichi attesi sui sostegni provvisori e sui rivestimenti definitivi, e, nel caso delle gallerie superficiali, alla valutazione degli effetti indotti al piano campagna. Le analisi consentono, pertanto, di verificare:

- stati limite ultimi per raggiungimento della resistenza del terreno/ammasso roccioso interessato dallo scavo (stato limite ultimo di tipo GEO), con lo sviluppo di fenomeni di instabilità del fronte o di deformazioni e spostamenti elevati al contorno ed in superficie;

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0400 001	REV. B

- stati limite ultimi relativi al raggiungimento delle resistenze degli elementi strutturali che costituiscono gli interventi di stabilizzazione, del rivestimento di prima fase e del rivestimento definitivo (stato limite ultimo di tipo STR);
- stati limite di esercizio connessi alla funzionalità delle strutture presenti a piano campagna.

Per le verifiche di stati limite ultimi STR, le analisi di interazione opera – terreno sono condotte con i valori caratteristici dei parametri geotecnici e applicando i coefficienti parziali amplificativi delle azioni all'effetto delle azioni (le sollecitazioni negli elementi strutturali). Ciò significa adottare la Combinazione 1 dell'Approccio 1 (A1+M1+R1), nella quale i coefficienti sui parametri di resistenza (M1) e sulla resistenza globale del sistema (R1) sono unitari, mentre le azioni permanenti e le azioni variabili sono amplificate mediante i coefficienti del gruppo A1.

Pertanto, con la combinazione dei carichi fondamentale si procede secondo questo schema:

- verifiche SLU interventi di stabilizzazione:  $\gamma_E = 1,3$  applicato alle caratteristiche delle sollecitazioni N, M, T,
- verifiche SLU rivestimento di prima fase:  $\gamma_E = 1,3$  applicato alle caratteristiche delle sollecitazioni N, M, T,
- verifiche SLU rivestimento definitivo:  $\gamma_E = 1,3$  applicato alle caratteristiche delle sollecitazioni N, M, T.

Per la verifica degli stati limite di esercizio (SLE) del rivestimento definitivo in calcestruzzo armato, le analisi numeriche sono condotte con i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici, adottando le pertinenti combinazioni dei carichi per la verifica di fessurazione e la verifica delle tensioni di esercizio, secondo quanto previsto dal DM 14/01/2008 e Circolare n.617.

Nelle analisi di interazione con modelli numerici bidimensionali l'effetto dei consolidamenti del fronte di scavo viene tenuto in conto in modo indiretto, nella definizione della percentuale di rilascio delle forze di scavo in corrispondenza del fronte.

Per gli interventi di precontenimento al contorno l'effetto dei consolidamenti viene tenuto in conto direttamente nei modelli numerici e simulato come un arco di materiale al contorno dello scavo avente proprietà meccaniche migliori rispetto a quelle iniziali del terreno. In particolare, nella regione consolidata sono incrementati i valori di coesione e di modulo elastico, mantenendo immutato l'angolo d'attrito del materiale naturale.

Per le verifiche degli interventi di contenimento radiale con chiodi ad aderenza continua, con riferimento alla configurazione di equilibrio a breve termine ottenuta dall'analisi di interazione, sono state effettuate le verifiche strutturali di resistenza a trazione e sfilamento degli elementi, da inquadrare come verifiche SLU di tipo STR secondo i coefficienti parziali previsti dall'Approccio 1 - Combinazione 1. L'azione (N) ottenuta dal calcolo, amplificata di 1.3, è confrontata con la resistenza a trazione e a sfilamento, valutate con i parametri caratteristici.

Per gli interventi di presostegno le verifiche strutturali sugli elementi metallici al contorno sono condotte calcolando tali elementi come travi incastrate ai due estremi, rappresentati da un lato dall'ultima centina installata e dall'altro dal fronte stesso. La luce di calcolo si definisce come:

$$L = \delta + a + \lambda$$

dove:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

$\delta$  = interasse centine;

$a$  = distanza massima dell'ultima centina dal fronte di scavo;

$\lambda$  = lunghezza fittizia per tener conto dell'effetto di appoggio "cedevole" al fronte (0,5 ÷ 0,7 m).

Detta  $p_{v,k}$  la pressione verticale caratteristica attesa in corrispondenza della calotta, e detto  $i$  l'interasse tra i tubi, il momento flettente caratteristico agente sul singolo elemento può calcolarsi come:

$$M_{Sk} = \frac{1}{12} \cdot p_{v,k} \cdot i \cdot L^2$$

In questo caso le verifiche sono condotte secondo l'Approccio 1 - Combinazione 1 (A1+M1+R1), con R1=1, come definito in precedenza.

Nelle analisi di interazione con modelli numerici bidimensionali (eseguite con il codice di calcolo PLAXIS 2017), lo scavo della galleria viene simulato rilasciando in modo uniforme un sistema di forze equivalenti applicate sul contorno del profilo di scavo, tenendo conto della variazione del tasso di confinamento in funzione della distanza della sezione di calcolo dal fronte; in questo modo il problema tridimensionale dello scavo della galleria viene ricondotto ad un problema piano, con la possibilità di valutare le azioni sulle strutture di rivestimento al progredire degli avanzamenti.

Nel caso di sezioni con campo di avanzamento tronco-conico, per la definizione della geometria della sezione di scavo si fa riferimento alla sezione media. Congruentemente, i rivestimenti definitivi di calotta (a carpenteria variabile) sono verificati secondo lo spessore medio.

Le strutture di rivestimento provvisorio della galleria vengono simulate con elementi beam elastico-lineari, con proprietà di rigidità ed inerzia definite considerando la sola sezione di spritz-beton, trascurando il contributo delle centine. In fase di verifica degli elementi strutturali, le sollecitazioni ottenute dalla modellazione (previa applicazione dei coefficienti parziali di Normativa), vengono gestite ripartendo lo sforzo normale (N) tra centine e spritz-beton in base alle rigidità assiali relative, mentre il taglio (T) e il momento flettente (M) vengono assegnati interamente alle centine.

Lo spritz-beton viene verificato a semplice compressione secondo la seguente disuguaglianza (in accordo con la relazione 2.2.1 del D.M. 14/01/2008):

$$\sigma_{sb,d,max} = \frac{N_{Sd, sb}}{A_{sb}} \leq f_{cd}$$

dove:

- $N_{Sd, sb}$  rappresenta lo sforzo normale di calcolo sullo spritz-beton:

$$N_{Sd, sb} = N_{Sd} \frac{E_{sb} \cdot A_{sb}}{E_{sb} \cdot A_{sb} + E_{cent} \cdot A_{cent}} ;$$

- $N_{Sd}$  rappresenta lo sforzo normale di calcolo;
- $A_{sb}$  rappresenta l'area resistente dello spritz-beton;
- $E_{sb} \cdot A_{sb}$  rappresenta la rigidità assiale dello spritz-beton;

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

- $E_{cent} \cdot A_{cent}$  rappresenta la rigidezza assiale della centina.

La verifica delle centine a taglio e pressoflessione (per tutte le classi di sezione, tenendo in conto eventuali instabilità locali) può essere condotta confrontando la tensione ideale calcolata a partire dalle tensioni indotte da ciascuna caratteristica della sollecitazione, con la resistenza di calcolo dell'acciaio, come di seguito specificato (cfr D.M. 14/01/2008 nel § 4.2.4.1.2):

$$\sigma_{cent,d,max} = \frac{N_{Sd,cent}}{A_{cent}} + \frac{M_{Sd}}{W_{cent}}$$

$$\tau_{cent,d} = \frac{V_{Sd}}{A_{V,cent}}$$

$$\sigma_{id,cent,d} = \sqrt{\sigma_{cent,d,max}^2 + 3 \tau_{cent,d}^2} \leq f_{yd}$$

dove:

- $N_{Sd,cent}$  rappresenta lo sforzo normale di calcolo sulla centina:

$$N_{Sd,cent} = N_{Sd} \frac{E_{cent} \cdot A_{cent}}{E_{sb} \cdot A_{sb} + E_{cent} \cdot A_{cent}} ;$$

- $N_{Sd}$  rappresenta lo sforzo normale di calcolo;
- $A_{cent}$  rappresenta l'area resistente della centina;
- $E_{sb} \cdot A_{sb}$  rappresenta la rigidezza assiale dello spritz-beton;
- $E_{cent} \cdot A_{cent}$  rappresenta la rigidezza assiale della centina;
- $W_{cent}$  rappresenta il modulo resistente elastico della centina;
- $M_{Sd}$  e  $V_{Sd}$  rappresentano il momento flettente e il taglio di calcolo;
- $A_{V,cent}$  rappresenta l'area resistente a taglio della centina.

La verifica dello spritz-beton e delle centine è stata effettuata nella fase di installazione del rivestimento di prima fase, nella fase di installazione dell'arco rovescio e in quella di installazione del rivestimento definitivo di calotta.

Le strutture di rivestimento definitivo della galleria sono simulate con elementi di volume assegnando un legame costitutivo elastico-lineare. Per ottenere le sollecitazioni su quest'ultimi, sono introdotti nel modello degli elementi beam in linea d'asse ai rivestimenti definitivi caratterizzati da rigidezza molto bassa (modulo elastico degli elementi diviso per un fattore di scala  $F=10^6$ ). A causa della loro bassa rigidezza essi si deformano come il rivestimento definitivo senza interferire con il campo di sforzi e deformazioni agente all'interno dell'elemento di volume del rivestimento. Le sollecitazioni in output sono moltiplicate per lo stesso fattore di scala F per ottenere le sollecitazioni di verifica strutturale.

Per le verifiche del rivestimento definitivo in calcestruzzo non armato si fa riferimento a quanto prescritto nel § 4.1.11.1 del DM 14/01/2008.

Nella fase di verifica del rivestimento definitivo si considera la perdita di funzionalità degli interventi di stabilizzazione e miglioramento e del rivestimento di prima fase.

Nel seguito sono riportate le verifiche degli interventi previsti per le diverse sezioni tipo di scavo e consolidamento, nelle condizioni ritenute significative ai fini del dimensionamento. Per la verifica delle sezioni tipo non presenti nel presente documento, si rimanda alle relazioni geotecniche e di calcolo delle altre gallerie in progetto, in cui tali sezioni sono state verificate in condizioni ritenute più gravose.

### 10.3.2 Sezione A1

#### 10.3.2.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo A1 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 17+425 (sezione D2 in fase di diagnosi). Tale verifica è finalizzata a confermare che pur applicando i coefficienti parziali previsti per questo stato limite ultimo di tipo GEO (si utilizza l'Approccio 1- Combinazione 2 (A2+M2+R2), con R2 =1), non si rendono necessari interventi preventivi di stabilizzazione.

**Tabella 11 - Sezione A1 - stabilità del fronte: dati di input**

Sez. di calcolo	Unità	$R_{eq}$ [m]	H [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_d$ [MPa]	$\phi'_d$ [°]	$E_d$ [MPa]
A1	CODb	4.5	259.5	6.49	-	-	-	25	0.376	36.72	715

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

$\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo

$p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate

$p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo

$R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$

$\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso

$c'_d$  = valore di progetto della coesione efficace dell'ammasso

$\phi'_d$  = valore di progetto dell'angolo di attrito dell'ammasso

$E_d$  = valore di progetto del modulo elastico dell'ammasso

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 12. Sezione A1 - stabilità del fronte: risultati**

Sezione di calcolo	$u_F$ [m]	$R_{PF}$ [m]
A1	0.021	5.21

Le analisi evidenziano che, anche con l'applicazione dei coefficienti parziali corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2, l'entità degli spostamenti e delle plasticizzazioni sono di poco maggiori rispetto a quelli ottenuti in fase di diagnosi con i valori caratteristici dei parametri e coefficienti unitari sulle azioni e sono comunque tali da poter ritenere il nucleo-fronte stabile.

#### 10.3.2.2 Interazione opera-terreno

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di interazione della sezione tipo A1 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche. Sono riportate anche le caratteristiche dei rivestimenti provvisori e definitivi.

**Tabella 13 - Sezione A1 – analisi di interazione: dati di input**

Sez di calcolo	$R_{eq}$ (m)	Unità	pk [m]	H [m]	$h_w$ [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_{kp}$ [MPa]	$\phi'_{kp}$ [°]	$E_k$ [MPa]
A1	4.5	CODb	17+425	259.5	64.5	6.49	0.65	0.65	4.5	25	1.128	41	1180

$H$  = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_{kp}$  = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso  
 $\phi'_{kp}$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso  
 $E_k$  = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

**Tabella 14 - Sezione A1 – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti**

Tipo di priverestimento	Centine + Spritz beton
Spessore dello spritz [m]	0.15
Centine	2 IPN140
Passo delle centine [m]	1.40

Tipo di rivestimento	calcestruzzo
Spessore [m]	0.60

Il metodo consente di determinare il carico agente sui sostegni valutando l'intersezione tra la curva caratteristica del sostegno e la curva caratteristica del cavo, rappresentativa della condizione di equilibrio.

Si ottiene un carico agente sul rivestimento di prima fase pari a 9.63 MPa per lo spritz beton e 59.17 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 4.71 MPa.

Si esegue la verifica SLU confrontando il carico agente (con coefficiente parziale 1,3) e la resistenza disponibile.

Le verifiche sono dunque le seguenti:

- |                           |   |                      |
|---------------------------|---|----------------------|
| • Spritz beton            | $(9.63 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 12.52 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$  | verifica soddisfatta |
| • Centine                 | $(59.17 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 76.92 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$ | verifica soddisfatta |
| • Rivestimento definitivo | $(4.71 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 6.12 \text{ MPa} < 6.22 \text{ MPa}$    | verifica soddisfatta |

Per la resistenza disponibile del rivestimento definitivo si è fatto riferimento al calcestruzzo non armato.

### 10.3.3 Sezione A2

#### 10.3.3.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo A2 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 16+411 (sezione D1 in fase di diagnosi). Tale verifica è finalizzata a confermare che pur applicando i coefficienti parziali previsti per questo stato limite ultimo di tipo GEO (si utilizza l'Approccio 1- Combinazione 2 (A2+M2+R2), con  $R_2 = 1$ ), non si rendono necessari interventi preventivi di stabilizzazione.

**Tabella 15 - Sezione A2 - stabilità del fronte: dati di input**

Sez. di calcolo	Unità	$R_{eq}$ [m]	H [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_d$ [MPa]	$\phi'_d$ [°]	$E_d$ [MPa]
A2	CODb	4.5	56.5	1.41	-	-	-	25	0.116	41.6	340.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_d$  = valore di progetto della coesione efficace dell'ammasso  
 $\phi'_d$  = valore di progetto dell'angolo di attrito dell'ammasso  
 $E_d$  = valore di progetto del modulo elastico dell'ammasso

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 16. Sezione A2 - stabilità del fronte: risultati**

Sezione di calcolo	$u_F$ [m]	$R_{PF}$ [m]
A2	0.017	5.23

Le analisi evidenziano che, anche con l'applicazione dei coefficienti parziali corrispondenti alla combinazione A2+M2+R2, l'entità degli spostamenti e delle plasticizzazioni sono di poco maggiori rispetto a quelli ottenuti in fase di diagnosi con i valori caratteristici dei parametri e coefficienti unitari sulle azioni e sono comunque tali da poter ritenere il nucleo-fronte stabile.

### 10.3.3.2 Interazione opera-terreno

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di interazione della sezione tipo A2 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche. Sono riportate anche le caratteristiche dei sostegni provvisori e definitivi.

**Tabella 17 – Sezione A2 – analisi di interazione: dati di input**

Sez di calcolo	$R_{eq}$ (m)	Unità	pk [m]	H [m]	$h_w$ [m]	$\sigma_o$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_{kp}$ [MPa]	$\varphi'_{kp}$ [°]	$E_k$ [MPa]
A2	4.5	CODb	16+411	56.5	34.5	1.41	0.35	0.35	4.5	25	0.145	48	340

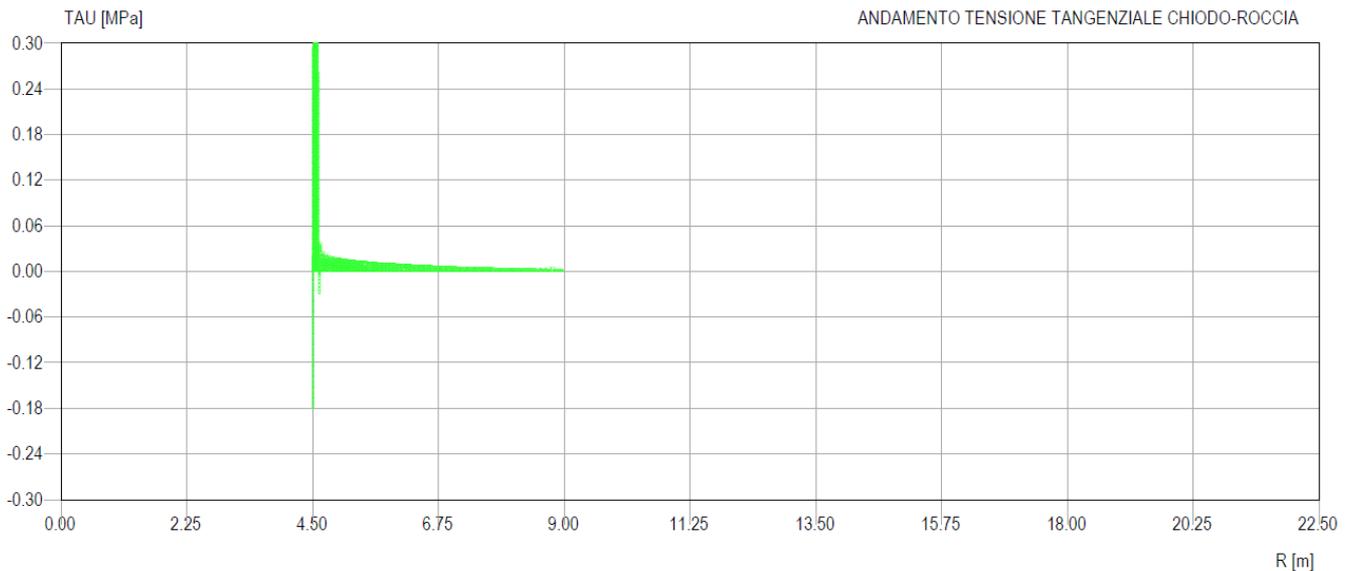
$H$  = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $s_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_{kp}$  = valore caratteristico della coesione efficace di picco dell'ammasso  
 $\varphi'_{kp}$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito di picco dell'ammasso  
 $E_k$  = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

**Tabella 18 - Sezione A2 – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti**

Tipo di priverimento	Centine + Spritz beton
Spessore dello spritz [m]	0.15
Centine	2 IPN140
Passo delle centine [m]	1.20

Tipo di intervento	Chiodatura radiale
Chiodi	Ø24 / L=4.5 m
Tipo di rivestimento	Anello di calcestruzzo
Spessore dell'anello [m]	0.60

Per la verifica dell'intervento di chiodatura si riporta in Figura 30 l'andamento delle tensioni tangenziali agenti all'interfaccia elemento strutturale/roccia. Lungo tutto lo sviluppo del bullone radiale tali tensioni risultano ben inferiori rispetto alla tensione limite di aderenza del materiale definita pari a 0,3 MPa. Pertanto si ritiene la verifica soddisfatta.



**Figura 30 – Andamento delle tensioni lungo lo sviluppo dei bulloni radiali**

Il metodo consente di determinare il carico agente sui sostegni valutando l'intersezione tra la curva caratteristica del sostegno e la curva caratteristica del cavo, rappresentativa della condizione di equilibrio.

Si ottiene un carico agente sul rivestimento di prima fase pari a 5.88 MPa per lo spritz beton e 36.13 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 2.73 MPa.

Si esegue la verifica SLU confrontando il carico agente (con coefficiente parziale 1,3) e la resistenza disponibile.

Le verifiche sono dunque le seguenti:

- |                           |   |                      |
|---------------------------|---|----------------------|
| • Spritz beton            | $(5.88 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 7.65 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$   | verifica soddisfatta |
| • Centine                 | $(36.13 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 46.91 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$ | verifica soddisfatta |
| • Rivestimento definitivo | $(2.73 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 3.55 \text{ MPa} < 6.22 \text{ MPa}$    | verifica soddisfatta |

Per la resistenza disponibile del rivestimento definitivo si è fatto riferimento al calcestruzzo non armato.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 10.3.4 Sezione B1

#### 10.3.4.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo B1 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 18+384 (sezione D3 in fase di diagnosi).

**Tabella 19 – Sezione B1 - stabilità del fronte: dati di input**

Sez. di calcolo	Unità	$R_{eq}$ [m]	H [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_d$ [MPa]	$\phi'_d$ [°]	$E_d$ [MPa]
B1	CODa	4.8	72.8	1.75	0.65	0.0	47.9	24	0.124	23.0	340.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_d$  = valore di progetto della coesione efficace dell'ammasso  
 $\phi'_d$  = valore di progetto dell'angolo di attrito dell'ammasso  
 $E_d$  = valore di progetto del modulo elastico dell'ammasso

Di seguito i calcoli dell'incremento di coesione equivalente al fronte indotto dagli interventi di consolidamento in VTR con effetto sulla curva caratteristica del fronte.

**Tabella 20 – Sezione B1 – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte**

$n_{VTR}$	$L_A$	$\phi_{perf}$	$\tau_{bk}$	$\sigma_{3A}^{VTR}$	$A_{VTR}$	$f_{tk}$	$\sigma_{3B}^{VTR}$	$\sigma_3$	$\Delta c'_k$
[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
20	5	0.1	250	109	7.200E-04	1000	200	109	91

$n_{VTR}$  = numero di VTR al fronte  
 $L_A$  = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR  
 $\phi_{perf}$  = diametro di perforazione  
 $\tau_{bk}$  = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno  
 $\sigma_{3A}^{VTR}$  = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR  
 $A_{VTR}$  = area del VTR  
 $f_{tk}$  = resistenza a trazione del VTR  
 $\sigma_{3B}^{VTR}$  = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR  
 $\sigma_3$  = tensione minima resistente al fronte  
 $\Delta c'_k$  = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 21 - Sezione B1 - stabilità del fronte: risultati**

Sezione di calcolo	$u_F$ [m]	$R_{PF}$ [m]
B1	0.040	7.29

L'entità degli spostamenti e delle plasticizzazioni al fronte evidenziate dall'analisi sono tali da poter ritenere soddisfatta la verifica di stabilità del fronte.

#### 10.3.4.2 Interazione opera-terreno

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di interazione della sezione tipo B1 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche. Sono riportate anche le caratteristiche dei rivestimenti provvisori e definitivi.

**Tabella 22 - Sezione B1 – analisi di interazione: dati di input**

Sez di calcolo	$R_{eq}$ (m)	Unità	pk [m]	H [m]	$h_w$ [m]	$\sigma_o$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_{kp}$ [MPa]	$\varphi'_{kp}$ [°]	$E_k$ [MPa]
B1	4.8	CODa	18+384	72.8	64.8	1.75	0.65	0.65	4.8	24	0.155	28	340

$H$  = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $\sigma_o$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_k$  = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso  
 $\varphi'_k$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso  
 $E_k$  = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

**Tabella 23 - Sezione B1 – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti**

Tipo di priverimento	Centine + Spritz beton
Spessore dello spritz [m]	0.20
Centine	2 IPN160
Passo delle centine [m]	1.0

Tipo di rivestimento	calcestruzzo
Spessore [m]	0.80

Il metodo consente di determinare il carico agente sui sostegni valutando l'intersezione tra la curva caratteristica del sostegno e la curva caratteristica del cavo, rappresentativa della condizione di equilibrio.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

Si ottiene un carico agente sul rivestimento di prima fase pari a 8.56 MPa per lo spritz beton e 52.01 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 4.45 MPa.

Si esegue la verifica SLU confrontando il carico agente (con coefficiente parziale 1,3) e la resistenza disponibile.

Le verifiche sono dunque le seguenti:

- Spritz beton  $(8.56 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 11.12 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$       verifica soddisfatta
- Centine  $(52.01 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 67.61 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$       verifica soddisfatta
- Rivestimento definitivo  $(4.45 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 5.78 \text{ MPa} < 14.17 \text{ MPa}$       verifica soddisfatta

Per il rivestimento definitivo è stata definita un'incidenza totale di armatura pari a 50 kg/m<sup>3</sup> per la calotta e 60 kg/m<sup>3</sup> per l'arco rovescio.

Per ciò che concerne la verifica dell'intervento di pre-sostegno al contorno, si rimanda alla relazione geotecnica e di calcolo della galleria Taormina del Lotto 2, in cui la verifica di interazione della sezione B1 è stata eseguita in condizioni ritenute più gravose.

### 10.3.5 Sezione C2v

#### 10.3.5.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo C2v eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 19+614 (sezione D5 in fase di diagnosi).

**Tabella 24 – Sezione C2v - stabilità del fronte: dati di input**

Sez. di calcolo	Unità	R <sub>eq</sub> [m]	H [m]	σ <sub>0</sub> [MPa]	p <sub>w0</sub> [MPa]	p <sub>wR</sub> [MPa]	R <sub>w</sub> [m]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	c' <sub>d</sub> [MPa]	φ' <sub>d</sub> [°]	E <sub>d</sub> [MPa]
C2v	TAM	4.9	129.9	3.38	-	-	-	24	0.124	23.0	340.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ<sub>0</sub> = tensione totale iniziale al livello del cavo

p<sub>w0</sub> = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate

p<sub>wR</sub> = pressione interstiziale sul profilo di scavo

R<sub>w</sub> = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce p<sub>w0</sub>

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

c'<sub>d</sub> = valore di progetto della coesione efficace dell'ammasso

φ'<sub>d</sub> = valore di progetto dell'angolo di attrito dell'ammasso

E<sub>d</sub> = valore di progetto del modulo elastico dell'ammasso

Di seguito i calcoli dell'incremento di coesione equivalente al fronte indotto dagli interventi di consolidamento in VTR con effetto sulla curva caratteristica del fronte.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 25 – Sezione C2v – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte**

$n_{VTR}$	$L_A$	$\phi_{perf}$	$\tau_{bk}$	$\sigma_{3A}^{VTR}$	$A_{VTR}$	$f_{tk}$	$\sigma_{3B}^{VTR}$	$\sigma_3$	$\Delta c'_k$
[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
30	11.5	0.1	300	433	7.200E-04	1000	288	288	226

$n_{VTR}$  = numero di VTR al fronte  
 $L_A$  = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR  
 $\phi_{perf}$  = diametro di perforazione  
 $\tau_{bk}$  = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno  
 $\sigma_{3A}^{VTR}$  = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR  
 $A_{VTR}$  = area del VTR  
 $f_{tk}$  = resistenza a trazione del VTR  
 $\sigma_{3B}^{VTR}$  = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR  
 $\sigma_3$  = tensione minima resistente al fronte  
 $\Delta c'_k$  = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

**Tabella 26 - Sezione C2v - stabilità del fronte: risultati**

Sezione di calcolo	$u_F$ [m]	$R_{PF}$ [m]
C2v	0.079	8.22

L'entità degli spostamenti e delle plasticizzazioni al fronte evidenziate dall'analisi sono tali da poter ritenere soddisfatta la verifica di stabilità del fronte.

#### 10.3.5.2 Interazione opera-terreno

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di interazione della sezione tipo C2v eseguita con il metodo delle linee caratteristiche. Sono riportate anche le caratteristiche dei rivestimenti provvisori e definitivi.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 27 - Sezione C2v – analisi di interazione: dati di input**

Sez di calcolo	R <sub>eq</sub> (m)	Unità	pk [m]	H [m]	h <sub>w</sub> [m]	σ <sub>o</sub> [MPa]	p <sub>w0</sub> [MPa]	p <sub>wR</sub> [MPa]	R <sub>w</sub> [m]	γ [kN/m <sup>3</sup> ]	c' <sub>kp</sub> [MPa]	φ' <sub>kp</sub> [°]	E <sub>k</sub> [MPa]
C2v	4.9	TAM	19+614	129.9	59.9	3.38	0.60	0.60	4.9	26	0.150	25	450

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ<sub>o</sub> = tensione totale iniziale al livello del cavo

p<sub>w0</sub> = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate

p<sub>wR</sub> = pressione interstiziale sul profilo di scavo

R<sub>w</sub> = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce p<sub>w0</sub>

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

c'<sub>k</sub> = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso

φ'<sub>k</sub> = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso

E<sub>k</sub> = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

**Tabella 28 - Sezione C2v – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti**

Tipo di priverimento	Centine + Spritz beton
Spessore dello spritz [m]	0.25
Centine	2 IPN180
Passo delle centine [m]	1.0

Tipo di rivestimento	calcestruzzo
Spessore [m]	0.90

Il metodo consente di determinare il carico agente sui sostegni valutando l'intersezione tra la curva caratteristica del sostegno e la curva caratteristica del cavo, rappresentativa della condizione di equilibrio.

Si ottiene un carico agente sul rivestimento di prima fase pari a 11.89 MPa per lo spritz beton e 71.45 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 6.49 MPa.

Si esegue la verifica SLU confrontando il carico agente (con coefficiente parziale 1,3) e la resistenza disponibile.

Le verifiche sono dunque le seguenti:

- Spritz beton (11.89\*1.3) MPa = 15.46 MPa < 16.67 MPa verifica soddisfatta
- Centine (71.45\*1.3) MPa = 92.88 MPa < 261.9 MPa verifica soddisfatta
- Rivestimento definitivo (6.49\*1.3) MPa = 8.43 MPa < 14.17 MPa verifica soddisfatta

Per il rivestimento definitivo la verifica dimostra la necessità di armatura. E' stata definita un'incidenza totale di armatura pari a 50 kg/m<sup>3</sup> sia per la calotta, sia per l'arco rovescio.

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

### 10.3.6 Sezione C2d

#### 10.3.6.1 Stabilità del fronte e del cavo

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di stabilità del fronte della sezione tipo C2d eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 19+590 (sezione D4 in fase di diagnosi).

**Tabella 29 – Sezione C2d - stabilità del fronte: dati di input**

Sez. di calcolo	Unità	$R_{eq}$ [m]	H [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_d$ [MPa]	$\phi'_d$ [°]	$E_d$ [MPa]
C2d	TAM	5.3	363.3	9.45	-	-	-	26	0.400	18.8	785.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_d$  = valore di progetto della coesione efficace dell'ammasso  
 $\phi'_d$  = valore di progetto dell'angolo di attrito dell'ammasso  
 $E_d$  = valore di progetto del modulo elastico dell'ammasso

Di seguito i calcoli dell'incremento di coesione equivalente al fronte indotto dagli interventi di consolidamento in VTR con effetto sulla curva caratteristica del fronte.

**Tabella 30 – Sezione C2v – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte**

$n_{VTR}$	$L_A$	$\phi_{perf}$	$\tau_{bk}$	$\sigma_{3A}^{VTR}$	$A_{VTR}$	$f_{tk}$	$\sigma_{3B}^{VTR}$	$\sigma_3$	$\Delta c'_k$
[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m <sup>2</sup> ]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
50	9	0.1	300	481	7.200E-04	1000	408	408	308

$n_{VTR}$  = numero di VTR al fronte  
 $L_A$  = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR  
 $\phi_{perf}$  = diametro di perforazione  
 $\tau_{bk}$  = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno  
 $\sigma_{3A}^{VTR}$  = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR  
 $A_{VTR}$  = area del VTR  
 $f_{tk}$  = resistenza a trazione del VTR  
 $\sigma_{3B}^{VTR}$  = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR  
 $\sigma_3$  = tensione minima resistente al fronte  
 $\Delta c'_k$  = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

**Tabella 31 - Sezione C2d - stabilità del fronte: risultati**

Sezione di calcolo	$u_F$ [m]	$R_{PF}$ [m]
C2d	0.220	10.59

Gli spostamenti e le plasticizzazioni al fronte evidenziate dall'analisi (calcolati con i coefficienti parziali di Normativa), risultano rilevanti ma sono comunque rappresentativi di una condizione di equilibrio ed in tal senso la verifica di stabilità del fronte può considerarsi soddisfatta. A tale riguardo occorre sottolineare che la sezione C2d, che prevede l'impiego di sostegni provvisori deformabili, è applicata proprio in contesti in cui sono attese al fronte e al cavo grandi deformazioni. In ogni caso, in fase di avanzamento dello scavo è previsto l'impiego sistematico ad ogni sfondo di spritz-beton al fronte e l'installazione a ridosso del fronte del rivestimento provvisorio.

#### 10.3.6.2 Interazione opera-terreno

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di interazione della sezione tipo C2d eseguita con il metodo delle linee caratteristiche. Sono riportate anche le caratteristiche dei rivestimenti provvisori e definitivi.

**Tabella 32 - Sezione C2d – analisi di interazione: dati di input**

Sez di calcolo	$R_{eq}$ (m)	Unità	pk [m]	H [m]	$h_w$ [m]	$\sigma_0$ [MPa]	$p_{w0}$ [MPa]	$p_{wR}$ [MPa]	$R_w$ [m]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c'_{kp}$ [MPa]	$\phi'_{kp}$ [°]	$E_k$ [MPa]
C2d	5.3	TAM	19+590	363.3	75.3	9.45	0.75	0.75	5.3	26	0.500	23	785

$H$  = copertura rispetto al piano dei centri della galleria  
 $\sigma_0$  = tensione totale iniziale al livello del cavo  
 $p_{w0}$  = pressione interstiziale al livello del cavo in condizioni indisturbate  
 $p_{wR}$  = pressione interstiziale sul profilo di scavo  
 $R_w$  = raggio di influenza idraulica oltre il quale si ristabilisce  $p_{w0}$   
 $\gamma$  = peso dell'unità di volume dell'ammasso  
 $c'_k$  = valore caratteristico della coesione efficace dell'ammasso  
 $\phi'_k$  = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso  
 $E_k$  = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

**Tabella 33 - Sezione C2d – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti**

Tipo di priverestimento	Centine + Spritz beton
Spessore dello spritz [m]	0.30
Centine	TH29
Passo delle centine [m]	1.0

Tipo di rivestimento	calcestruzzo
Spessore [m]	0.80

Il metodo consente di determinare il carico agente sui sostegni valutando l'intersezione tra la curva caratteristica del sostegno e la curva caratteristica del cavo, rappresentativa della condizione di equilibrio.

Si ottiene un carico agente sul rivestimento di prima fase pari a 10.59 MPa per lo spritz beton e 63.19 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 10.07 MPa.

Si esegue la verifica SLU confrontando il carico agente (con coefficiente parziale 1,3) e la resistenza disponibile.

Le verifiche sono dunque le seguenti:

- Spritz beton  $(10.59 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 13.77 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$  verifica soddisfatta
- Centine  $(63.19 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 82.15 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$  verifica soddisfatta
- Rivestimento definitivo  $(10.07 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 13.10 \text{ MPa} < 14.17 \text{ MPa}$  verifica soddisfatta

Per il rivestimento definitivo la verifica dimostra la necessità di armatura. E' stata definita un'incidenza di armatura totale pari a  $50 \text{ kg/m}^3$  sia per la calotta, sia per l'arco rovescio.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

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

### 11.1 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 opere in sotterraneo e a gestire l'applicazione delle sezioni di scavo e consolidamento previste, ottimizzandole nell'ambito delle variabilità indicate in progetto.

Per il dettaglio di quanto previsto nel programma di monitoraggio si rimanda al paragrafo 12 della relazione tecnica delle opere in sotterraneo (Rif. [1]) e a quanto indicato sul profilo geotecnico della galleria (Rif. [6]).

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

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 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 quanto 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 definito in progetto: la sezione tipo 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 sensibilmente differenti da quelle ipotizzate 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 eventuali per quella tratta.

	<b>DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO</b> <b>RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO</b> <b>Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)</b>					
	GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA <b>RS2S</b>	LOTTO <b>02 D 07</b>	CODIFICA <b>RB</b>	DOCUMENTO <b>GN0400 001</b>	REV. <b>B</b>

## 12 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione della galleria Letojanni, inclusa nel lotto 2 del raddoppio ferroviario della Tratta Giampilieri – Fiumefreddo della Direttoria ferroviaria Messina-Catania-Palermo.

La progettazione delle opere in sotterraneo, è stata condotta secondo il metodo ADECO-RS (Rif. [14]), articolandosi nelle seguenti fasi:

- fase conoscitiva: è finalizzata allo studio e all'analisi del contesto geologico e geotecnico in cui deve essere realizzata l'opera;
- 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;
- 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.
- 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 individuate le 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 in progetto.



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO  
RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO  
Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)

GALLERIA LETOJANNI - RELAZIONE GEOTECNICA E DI  
CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	ALLEGATO
RS2S	02 D 07	RB	GN0400 001	B	1

## ALLEGATO 1

<b>TITOLO</b>	Analisi con il metodo delle curve caratteristiche per le fasi di diagnosi e terapia
<b>TIPO DI DOCUMENTO:</b>	Documento - Formato A4
<b>CODIFICA:</b>	-
<b>PAGINE:</b>	43
<b>DATA:</b>	Gennaio 2018
<b>SORGENTE:</b>	U.O. Gallerie Italferr S.p.A.
<b>NOTE:</b>	-

# 1 DIAGNOSI

## 1.1 Sez. D1

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

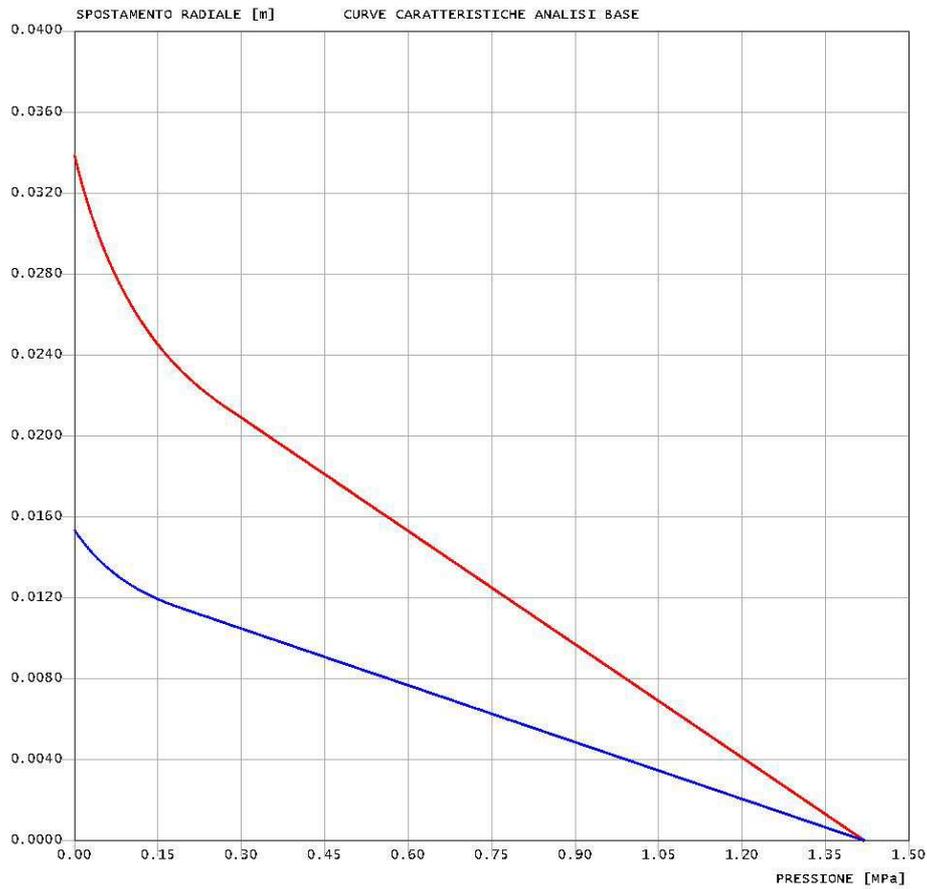


Letojanni  
Diagnosi  
Sez\_D1

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





## 1.2 Sez. D2

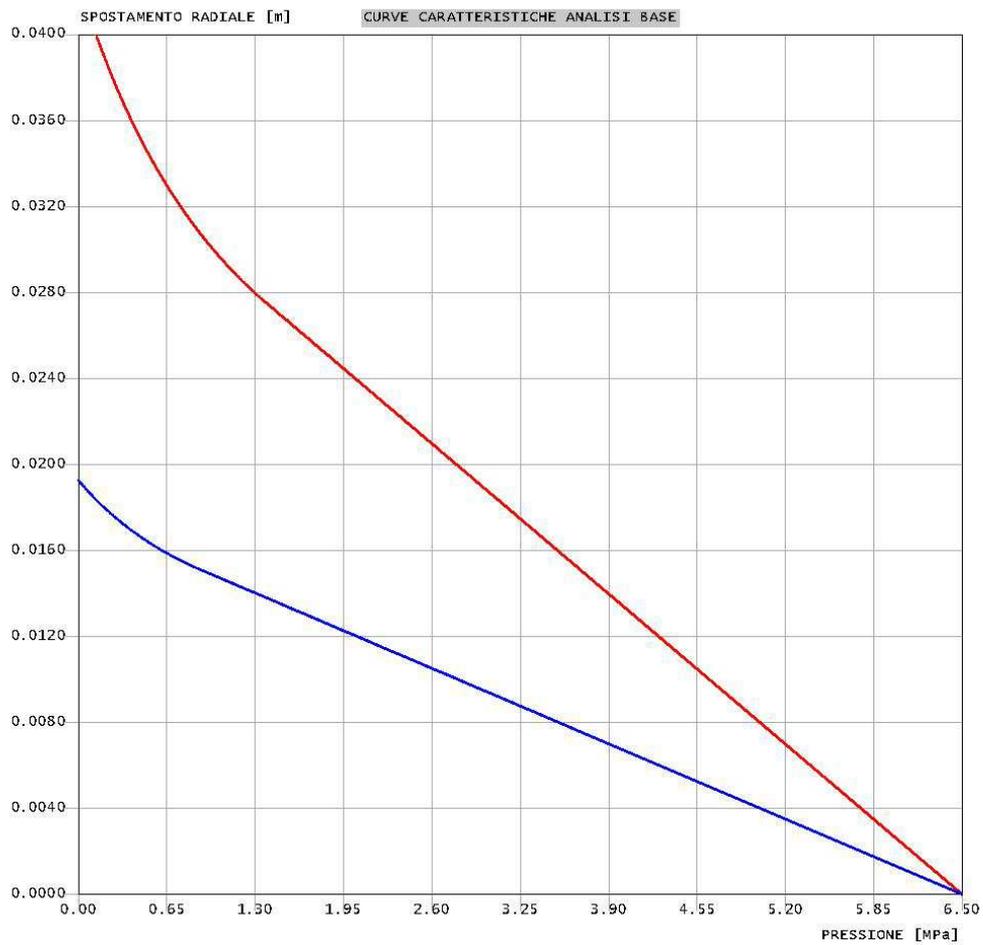
Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



Letojanni  
Diagnosi  
sez\_D2

criterio di resistenza: MOHR COULOMB  
Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO



```

#####
#####
###
###
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
##### ## ## ## ##
##### #####
#####

```

CALCOLO GALLERIE CON METODO  
 CONVERGENZA-CONFINAMENTO  
 SOLUTORE TRANSFER-MATRIX

VERSIONE 4s  
 REVISIONE 1.01-2013

Letojanni  
 Diagnosi  
 Sez\_D2

- TIPO DI ANALISI: CALCOLO ACCOPPIATO FRONTE-GALLERIA  
 VALUTAZIONE DEFORMATA GALLERIA AL FRONTE: 3  
 1 -> metodo Panet-Guenot (galleria non sostenuta)  
 2 -> metodo trasformazione omotetica (galleria non sostenuta)  
 3 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da vuoto sferico)  
 4 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da correlazione Ns)  
 5 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da trasformazione omotetica)

D A T I A N A L I S I

R galleria [m] ..... 4.90000

PARAMETRI GEOTECNICI -----

Tensione originaria [MPa] .....	6.50000
Modulo di Young [MPa] .....	1180.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....	4.90000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....	4.90000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	1.12800
Angolo attrito picco [deg] .....	41.00000
Coesione residua [MPa] .....	1.12800
Angolo attrito residuo [MPa] .....	41.00000
Angolo dilatanza [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000

R I S U L T A T O A N A L I S I F R O N T E D I S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.042510
Raggio plastico galleria [m] .....	5.948442
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.019274
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.010557
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.012328
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	5.255142

R I S U L T A T O A N A L I S I G A L L E R I A

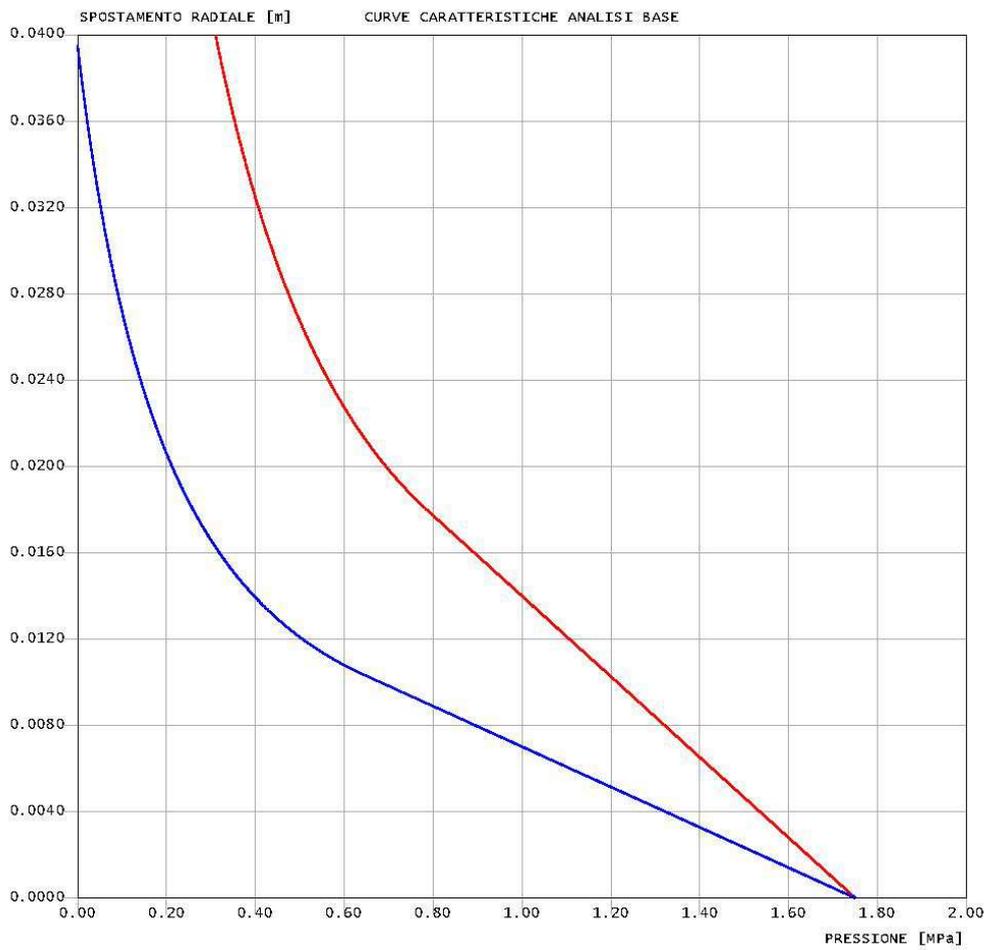
Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.042510
Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	5.948442

### 1.3 Sez. D3

Letojanni  
Diagnosi  
sez\_D3

criterio di resistenza: MOHR COULOMB  
Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO



```

#####
#####
###
###
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
##### ## ## ## ##
##### #####
#####

```

CALCOLO GALLERIE CON METODO  
CONVERGENZA-CONFINAMENTO  
SOLUTORE TRANSFER-MATRIX

VERSIONE 4s  
REVISIONE 1.01-2013

Letojanni  
Diagnosi  
Sez\_D3

TIPO DI ANALISI: CALCOLO ACCOPPIATO FRONTE-GALLERIA  
VALUTAZIONE DEFORMATA GALLERIA AL FRONTE: 3  
1 -> metodo Panet-Guenot (galleria non sostenuta)  
2 -> metodo trasformazione omotetica (galleria non sostenuta)  
3 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da vuoto sferico)  
4 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da correlazione Ns)  
5 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da trasformazione omotetica)

D A T I A N A L I S I

R galleria [m] .....	4.90000
PARAMETRI GEOTECNICI -----	
Tensione originaria [MPa] .....	1.75000
Modulo di Young [MPa] .....	340.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.65000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....	50.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....	4.90000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.15500
Angolo attrito picco [deg] .....	28.00000
Coesione residua [MPa] .....	.15500
Angolo attrito residuo [MPa] .....	28.00000
Angolo dilatanza [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000

R I S U L T A T O A N A L I S I F R O N T E D I S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.146844
Raggio plastico galleria [m] .....	13.394695
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.039506
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.014611
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.042585
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	7.174676

R I S U L T A T O A N A L I S I G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.146844
Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	13.394695
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	28.196396
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	835.772957
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	

## 1.4 Sez. D4

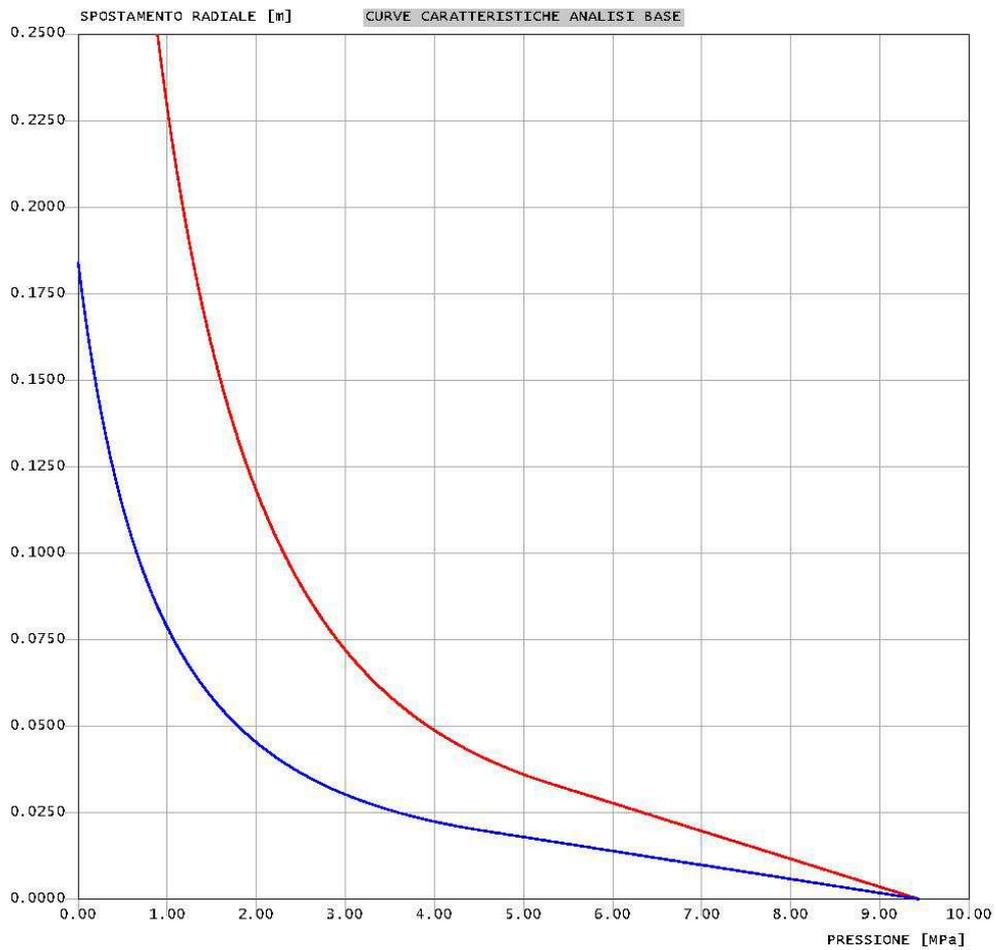
GV4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



Letojanni  
Diagnosi  
sez\_D4

criterio di resistenza: MOHR COULOMB  
Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





## 1.5 Sez. D5

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



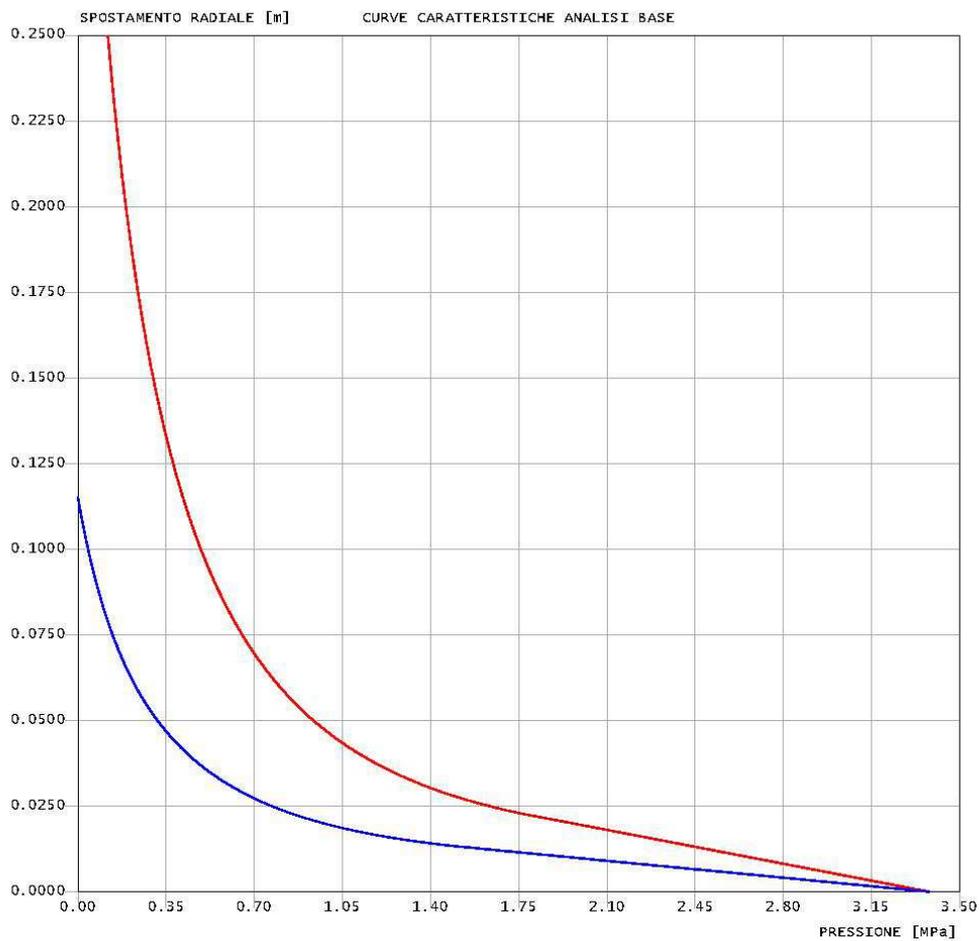
Letojanni  
Diagnosi  
sez\_D5

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00

Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





## 2 TERAPIA

### 2.1 Sez A1

#### 2.1.1 Fronte

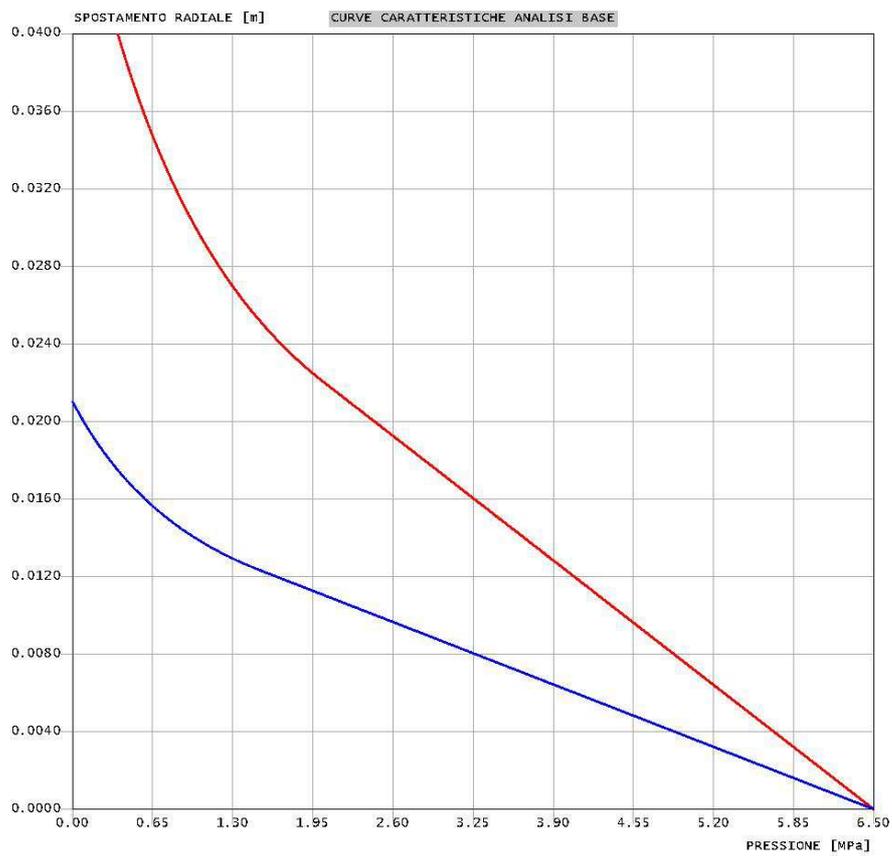
Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



Letojanni  
Terapia  
sez\_T2

criterio di resistenza: MOHR COULOMB  
Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





## 2.1.2 Rivestimento

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

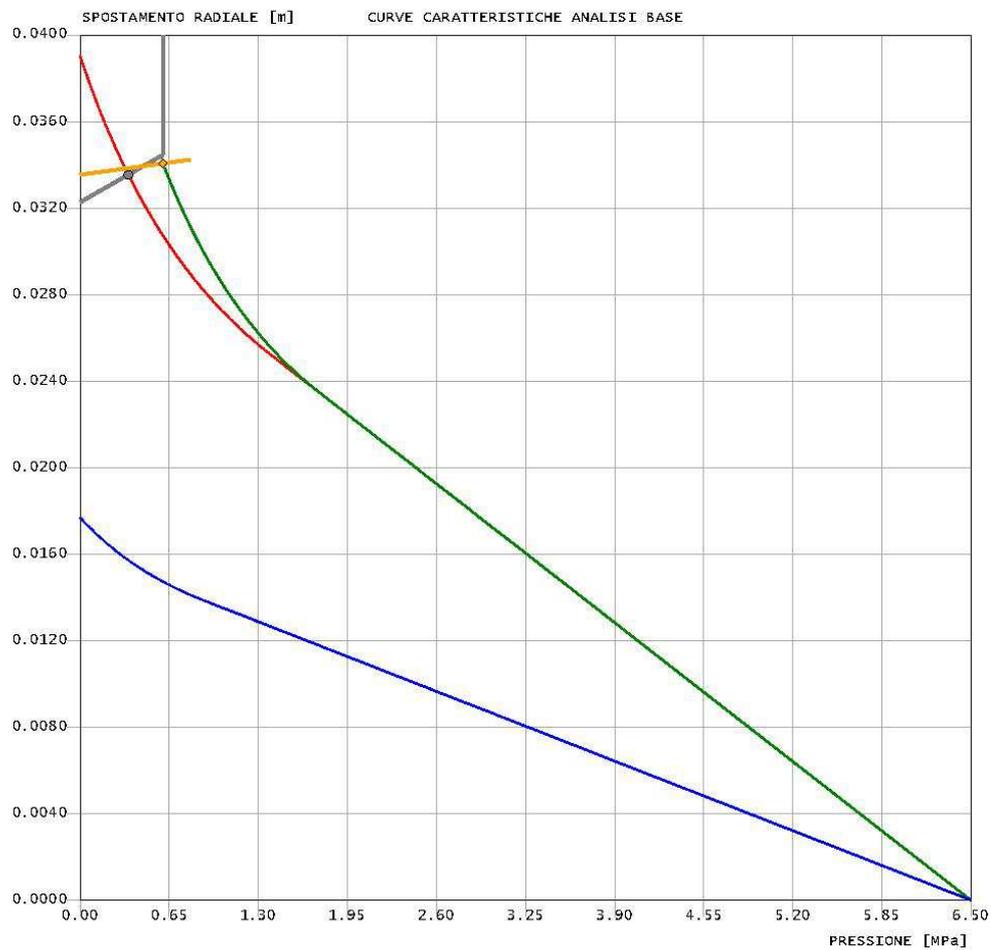


Letojanni  
Terapia  
Sez\_A1\_Rivestimento

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.35  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.60

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





[1 prerivestimenti collaboranti a lungo termine]  
 Gioco radiale posa in opera rivestimento [m] ..... .00000

R I S U L T A T O   A N A L I S I   F R O N T E   D I   S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] ..... .000000  
 Spostamento radiale galleria [m] ..... .039053  
 Raggio plastico galleria [m] ..... 5.462855  
 Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] ..... .000000  
 Spostamento radiale fronte sferico [m] ..... .017702  
 Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] ..... .009699  
 Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ... .011325  
 Raggio plastico fronte sferico [m] ..... 4.826151

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL PRERIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot

U [m] : .03099  
 LAMBDA : .91095

Trasformazione Omotetica

U [m] : .03728  
 LAMBDA : .98491

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] : .03228  
 LAMBDA : .92953

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] : .03012  
 LAMBDA : .89689

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] : .03054  
 LAMBDA : .90387

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL RIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot

U [m] : .03887  
 LAMBDA : .99853

Trasformazione Omotetica

U [m] : .03905  
 LAMBDA : 1.00000

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] : .03355  
 LAMBDA : .99960

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] : .03190  
 LAMBDA : .99942

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] : .03222  
 LAMBDA : .99946

R I S U L T A T O   A N A L I S I   G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] ..... .000000  
 Spost. radiale galleria fine calcolo [m] ..... .039053  
 Raggio plastico galleria fine calcolo [m] ..... 5.462855  
 Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] ..... .000000  
 Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ... 595.192274  
 Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] .. 24.717777  
 Galleria non sostenuta instabile a lungo termine

PRERIVESTIMENTO -----

Raggio plastico punto di equilibrio [m] ..... 5.12630  
 Pressione punto di equilibrio [MPa] ..... .35222  
 Spostamento punto di equilibrio [m] ..... .03355  
 Spostamento galleria alla messa in opera [m] ..... .03228  
 Convergenza radiale prerivestimento [m] ..... .00127  
 Tasso di deconfinamento alla messa in opera ..... .929534  
 SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)  
 Tensione spritz [MPa] ..... 9.63336  
 Tensione centine [MPa] ..... 59.17252  
 Coefficiente di sicurezza spritz ..... 1.73044  
 Coefficiente di sicurezza centine ..... 4.42604

Pressione rottura spritz [MPa] .....	.60589
Pressione rottura centine [MPa] .....	1.54972
Rigidezza spritz [MPa] .....	1120.61550
Rigidezza centinatura [MPa] .....	122.00000

RIVESTIMENTO DEFINITIVO (ANELLO CLS) -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	5.32538
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.60435
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.03407
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.03355
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00052
Tensione CLS [MPa] .....	4.70612
Coefficiente di sicurezza CLS .....	1.32806
Pressione rottura CLS [MPa] .....	.80262
Rigidezza anello CLS [MPa] .....	5015.65156
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.999601

## 2.2 Sez. A2

### 2.2.1 Fronte

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

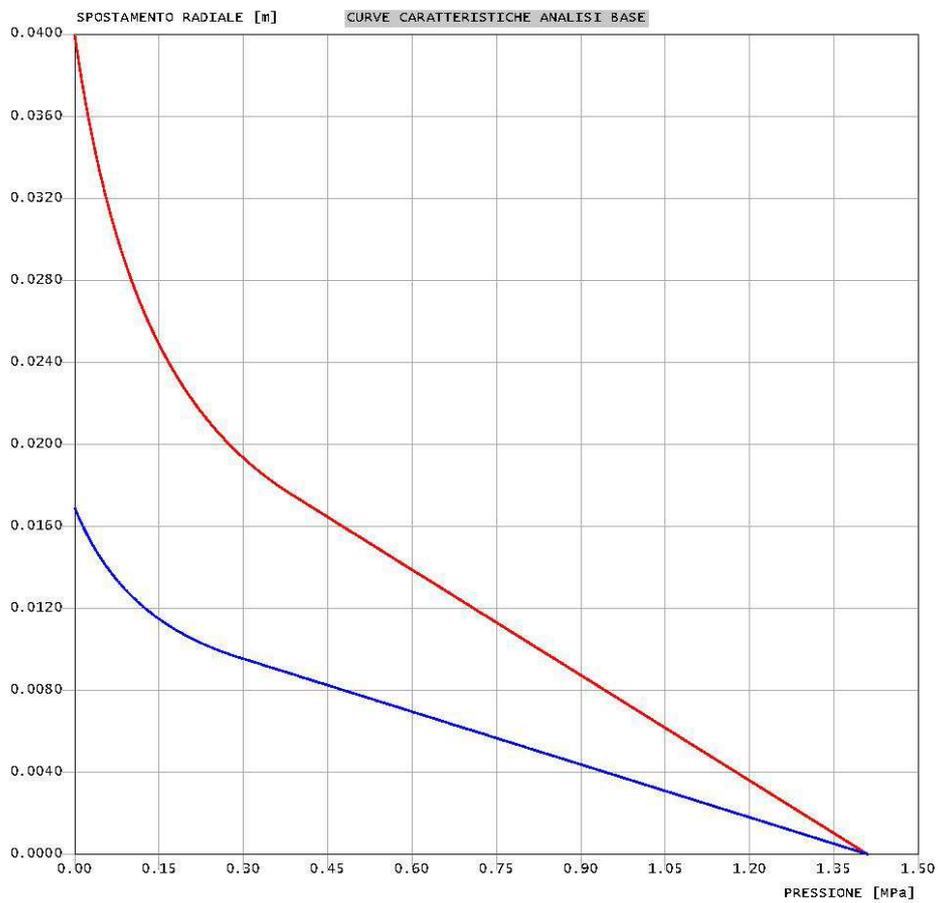


Letojanni  
Terapia  
Sez\_T1

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA S.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





## 2.2.2 Consolidamenti e rivestimenti

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



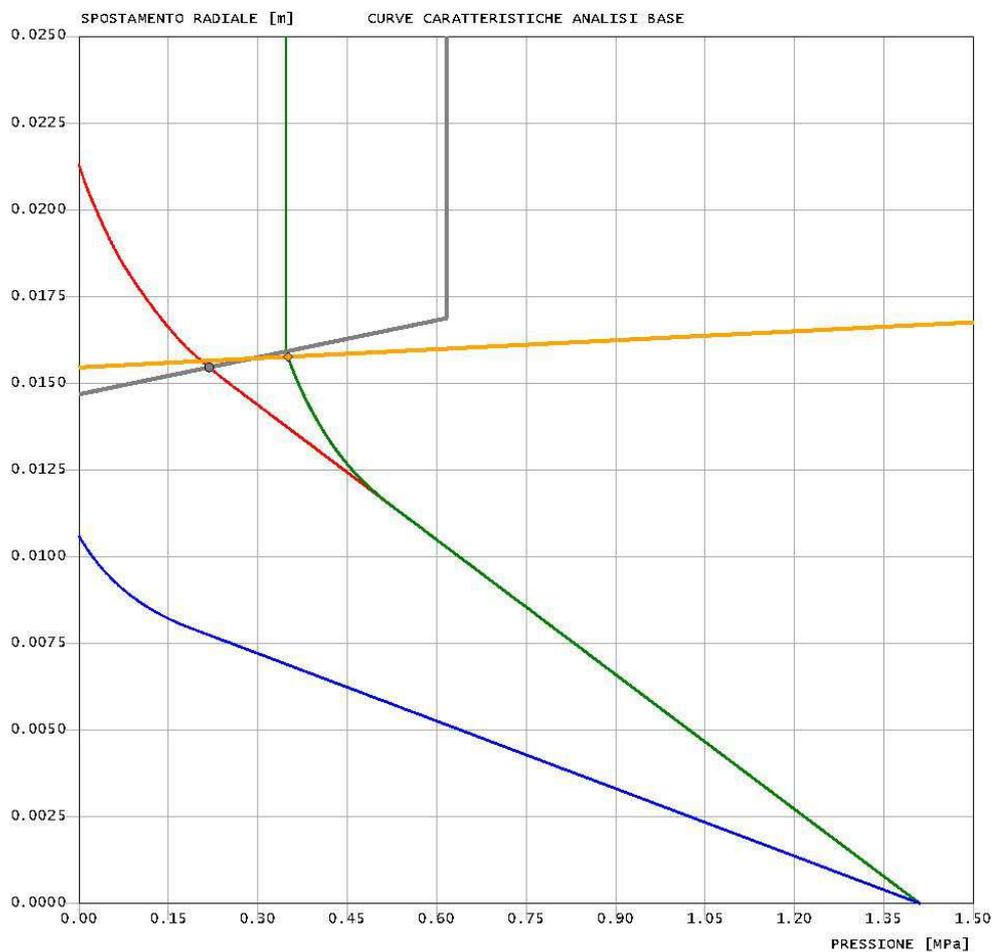
Letojanni  
Terapia  
Sez\_A2\_Rivestimento

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.22

Pressione Rivestimento [MPa]: 0.35

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





Posizione baricentro sezione centina [m] .....	.07000
Momento inerzia baricentrico sezione centina [m4] .	.00000573
Passo centine [m] .....	.60000
Modulo Young ferro centine [MPa] .....	210000.00000
Resistenza compressione spritz [MPa] .....	16.67000
Resistenza ferro centine [MPa] .....	261.90000

RIVESTIMENTO DEFINITIVO -----	
Distanza dal fronte alla messa in opera [m] .....	27.00000
Spessore CLS [m] .....	.60000
Modulo Young CLS [MPa] .....	31476.00000
Coefficiente di Poisson CLS .....	.20000
Resistenza compressione CLS [MPa] .....	14.17000
Opzione calcolo rivestimento .....	0
[0 prerivestimenti non collaboranti a lungo termine]	
[1 prerivestimenti collaboranti a lungo termine]	
Gioco radiale posa in opera rivestimento [m] .....	.00000

R I S U L T A T O   A N A L I S I   F R O N T E   D I   S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.021307
Raggio plastico galleria [m] .....	5.244658
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.010600
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.004206
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.006816
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	4.872329

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL PRERIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.01529
LAMBDA :	.83508
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.01942
LAMBDA :	.95029
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.01469
LAMBDA :	.80432
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.01161
LAMBDA :	.63563
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.01286
LAMBDA :	.70446

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL RIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.02323
LAMBDA :	.99756
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.02350
LAMBDA :	1.00000
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.01549
LAMBDA :	.99911
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.01306
LAMBDA :	.99834
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.01405
LAMBDA :	.99866

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DELLE BARRE PASSIVE -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.01553
LAMBDA :	.84617
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.01971

LAMBDA : .95516

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico  
 U [m] : .01475  
 LAMBDA : .82106

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns  
 U [m] : .01173  
 LAMBDA : .66680

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica  
 U [m] : .01296  
 LAMBDA : .72974

R I S U L T A T O A N A L I S I G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.021307
Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	5.244658
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	929.936566
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	9.324199
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	
PRERIVESTIMENTO -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	4.59455
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.21829
Spostamento punto di equilibrio [m] .....	.01546
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.01469
Convergenza radiale prerivestimento [m] .....	.00077
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.804318
BARRE AD ADERENZA CONTINUA -----	
Fattore di sicurezza rottura a trazione .....	6.94570
Fattore di sicurezza sfilamento .....	.99809
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.01500
Convergenza radiale barre [m] .....	.00631
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.821056
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)	
Tensione spritz [MPa] .....	5.88199
Tensione centine [MPa] .....	36.12985
Coefficiente di sicurezza spritz .....	2.83408
Coefficiente di sicurezza centine .....	7.24885
Pressione rottura spritz [MPa] .....	.61581
Pressione rottura centine [MPa] .....	1.57508
Rigidezza spritz [MPa] .....	1120.61550
Rigidezza centinatura [MPa] .....	142.33333
RIVESTIMENTO DEFINITIVO (ANELLO CLS) -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	5.11845
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.35032
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.01576
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.01546
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00030
Tensione CLS [MPa] .....	2.72794
Coefficiente di sicurezza CLS .....	5.19439
Pressione rottura CLS [MPa] .....	1.81969
Rigidezza anello CLS [MPa] .....	5015.65156
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.999110

## 2.3 Sez. B1

### 2.3.1 Fronte

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



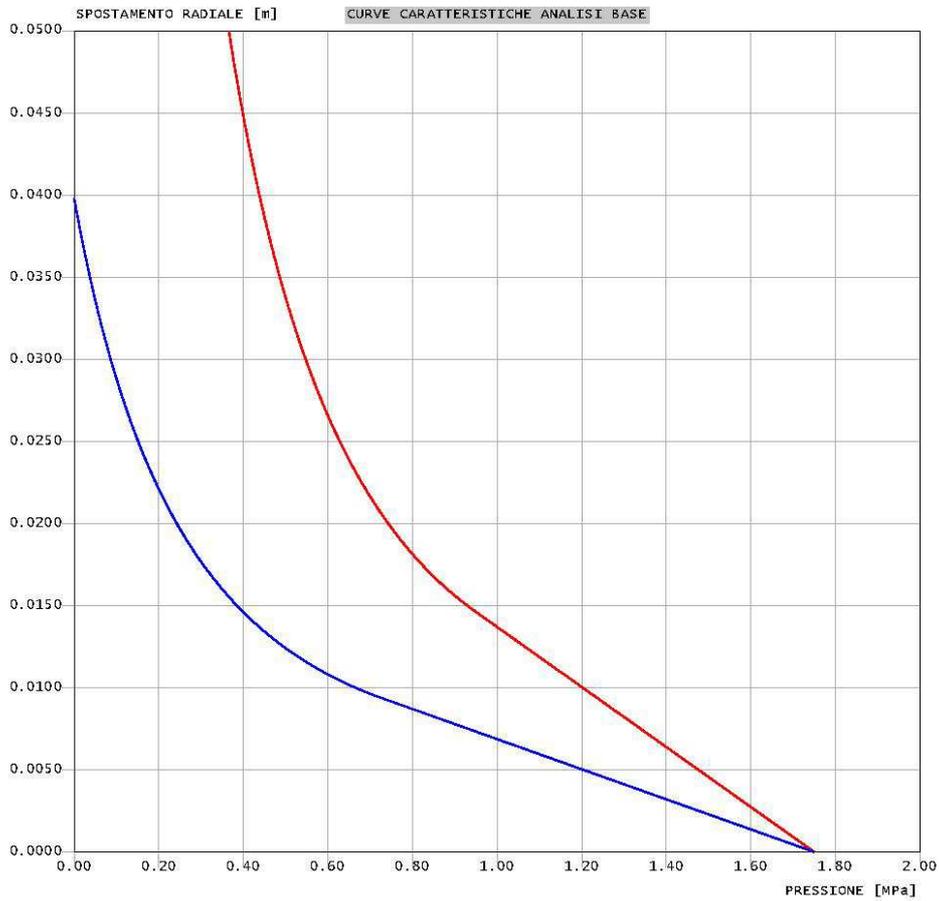
Letojanni  
Terapia  
Sez\_T3

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00

Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





## 2.3.2 Rivestimento

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

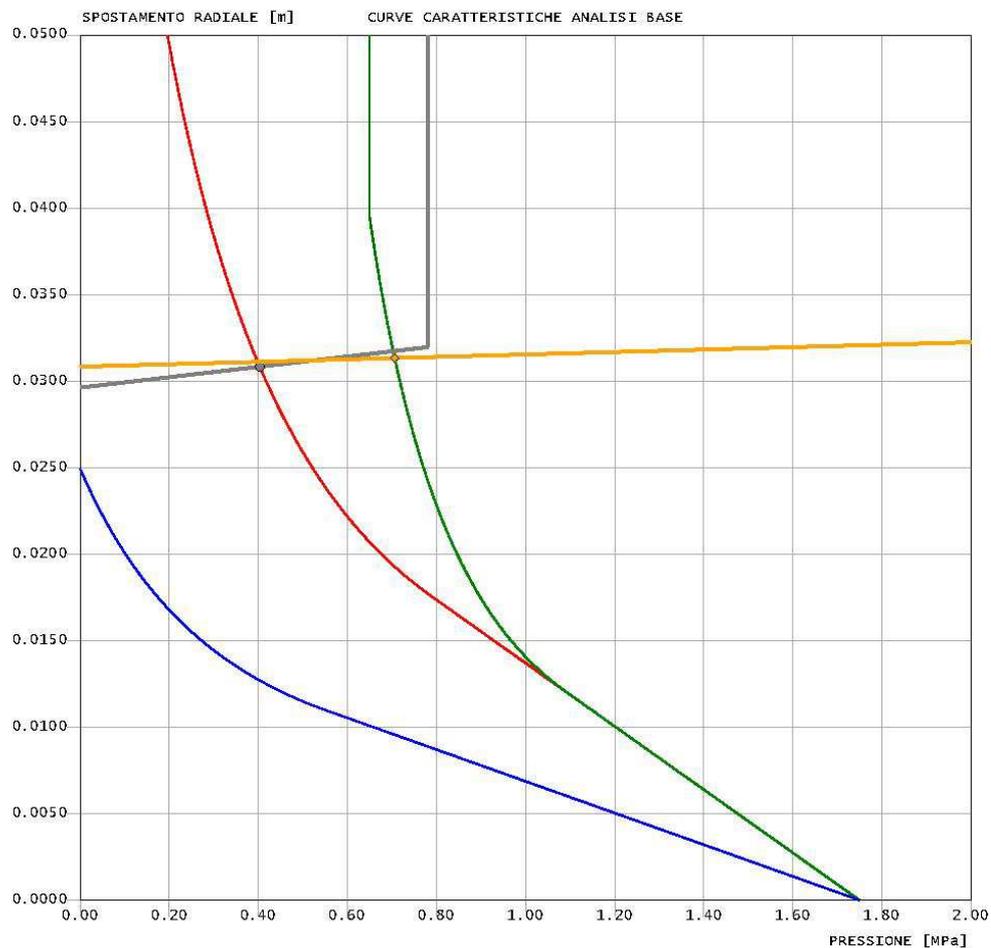


Letojanni  
Terapia  
Sez\_81\_Rivestimento

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.40  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.71

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





Distanza dal fronte alla messa in opera [m] .....	14.00000
Spessore CLS [m] .....	.80000
Modulo Young CLS [MPa] .....	31476.00000
Coefficiente di Poisson CLS .....	.20000
Resistenza compressione CLS [MPa] .....	14.17000
Opzione calcolo rivestimento .....	0
[0 prerivestimenti non collaboranti a lungo termine]	
[1 prerivestimenti collaboranti a lungo termine]	
Gioco radiale posa in opera rivestimento [m] .....	.00000

R I S U L T A T O   A N A L I S I   F R O N T E   D I   S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.100895
Raggio plastico galleria [m] .....	10.474351
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.024958
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.014629
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.029260
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	6.022534

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL PRERIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot

U [m] :	.03916
LAMBDA :	.83343

Trasformazione Omotetica

U [m] :	.06365
LAMBDA :	.93308

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] :	.02966
LAMBDA :	.75786

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] :	.02131
LAMBDA :	.64070

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] :	.03334
LAMBDA :	.79169

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL RIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot

U [m] :	.08960
LAMBDA :	.98495

Trasformazione Omotetica

U [m] :	.09990
LAMBDA :	.99879

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] :	.03090
LAMBDA :	.99661

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] :	.02307
LAMBDA :	.99497

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] :	.03442
LAMBDA :	.99708

R I S U L T A T O   A N A L I S I   G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.100895
Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	10.474351
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	2388.005008
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	44.245411
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	

PRERIVESTIMENTO -----

Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	6.20865
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.40324
Spostamento punto di equilibrio [m] .....	.03084
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.02966

Convergenza radiale prerivestimento [m] .....	.00119
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.757859
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)	
Tensione spritz [MPa] .....	8.55601
Tensione centine [MPa] .....	52.00551
Coefficiente di sicurezza spritz .....	1.94834
Coefficiente di sicurezza centine .....	5.03600
Pressione rottura spritz [MPa] .....	.77637
Pressione rottura centine [MPa] .....	2.00674
Rigidezza spritz [MPa] .....	1409.57009
Rigidezza centinatura [MPa] .....	199.50000
RIVESTIMENTO DEFINITIVO (ANELLO CLS) -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	7.33111
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.70621
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.03135
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.03084
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00050
Tensione CLS [MPa] .....	4.44742
Coefficiente di sicurezza CLS .....	3.18611
Pressione rottura CLS [MPa] .....	2.25006
Rigidezza anello CLS [MPa] .....	6495.63679
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.996608

## 2.4 Sez C2v

### 2.4.1 Fronte

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

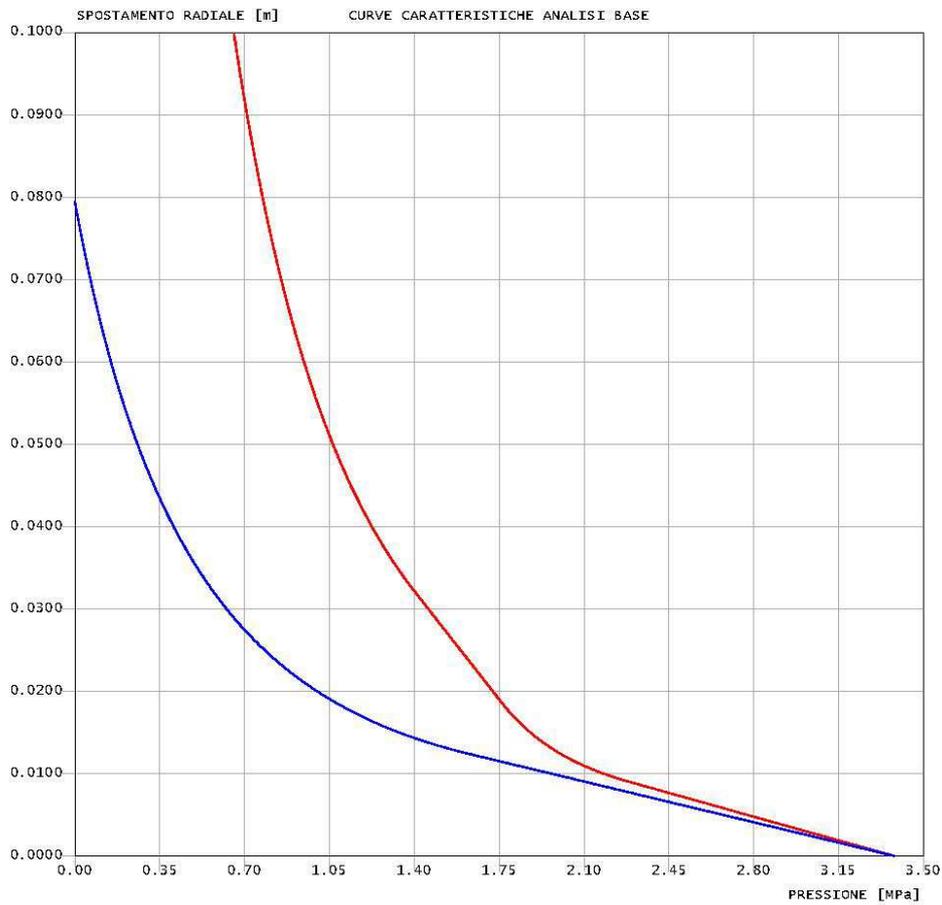


Letojanni  
Terapia  
Sez\_T5

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO



```

#####
#####
###
###
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
##### ## ## ## ##
##### #####
#####

```

CALCOLO GALLERIE CON METODO  
CONVERGENZA-CONFINAMENTO  
SOLUTORE TRANSFER-MATRIX

VERSIONE 4s  
REVISIONE 1.01-2013

Letojanni  
Terapia  
Sez\_T5

TIPO DI ANALISI: CALCOLO ACCOPPIATO FRONTE-GALLERIA  
VALUTAZIONE DEFORMATA GALLERIA AL FRONTE: 3  
1 -> metodo Panet-Guenot (galleria non sostenuta)  
2 -> metodo trasformazione omotetica (galleria non sostenuta)  
3 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da vuoto sferico)  
4 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da correlazione Ns)  
5 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da trasformazione omotetica)

D A T I A N A L I S I

R galleria [m] .....	4.90000
PARAMETRI GEOTECNICI -----	
Tensione originaria [MPa] .....	3.38000
Modulo di Young [MPa] .....	450.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....	4.90000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....	4.90000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.12000
Angolo attrito picco [deg] .....	20.50000
Coesione residua [MPa] .....	.12000
Angolo attrito residuo [MPa] .....	20.50000
Angolo dilatanza [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000
FRONTE DI SCAVO RINFORZATO	
Consolidamento generico del fronte	
Incremento coesione picco [MPa] .....	.18100
Pressione sul fronte di scavo [MPa] .....	.00000
Parametri di resistenza equivalenti del fronte rinforzato	
Coesione picco [MPa] .....	.30100
Coesione residua [MPa] .....	.12000
INIEZIONI O JET-GROUTING	
Spessore corona trattata [m] .....	1.50000
Modulo terreno trattato [MPa] .....	1125.00000
Coefficiente di Poisson terreno trattato .....	.00000
Coesione picco terreno trattato [MPa] .....	.23981
Angolo attrito picco terreno trattato [deg] .....	20.50000
Coesione residua terreno trattato [MPa] .....	.23981
Angolo attrito residuo terreno trattato [MPa] .....	20.50000
Angolo dilatanza terreno trattato [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000

R I S U L T A T O A N A L I S I F R O N T E D I S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.665976
Raggio plastico galleria [m] .....	25.780575
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.079475
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.100257
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.292207
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	8.220933

R I S U L T A T O A N A L I S I G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.665976
Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	25.780575
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	1.007610
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	31.621683

CORONA DI ROCCIA CONSOLIDATA MEDIANTE GROUTING -----  
fattore di sicurezza ..... 1.00000

## 2.4.2 Rivestimento

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



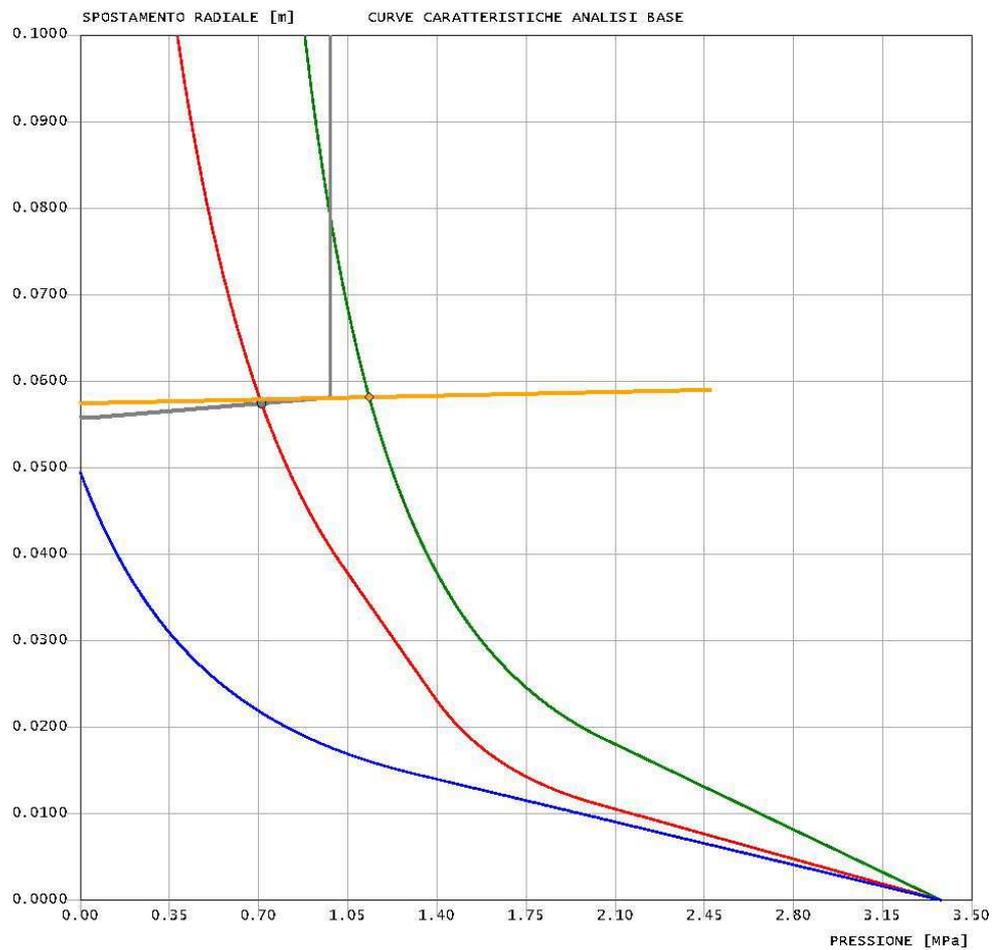
Letojanni  
Terapia  
Sez\_C2v\_Rivestimento

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.71

Pressione Rivestimento [MPa]: 1.13

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO





Coefficiente di Poisson spritz .....	.20000
Sezione centina [m2] .....	.00279
Altezza sezione centina [m2] .....	.18000
Posizione baricentro sezione centina [m] .....	.09000
Momento inerzia baricentrico sezione centina [m4] .	.00001450
Passo centine [m] .....	.50000
Modulo Young ferro centine [MPa] .....	210000.00000
Resistenza compressione spritz [MPa] .....	16.67000
Resistenza ferro centine [MPa] .....	261.90000

RIVESTIMENTO DEFINITIVO -----	
Distanza dal fronte alla messa in opera [m] .....	10.00000
Spessore CLS [m] .....	.90000
Modulo Young CLS [MPa] .....	31476.00000
Coefficiente di Poisson CLS .....	.20000
Resistenza compressione CLS [MPa] .....	14.17000
Opzione calcolo rivestimento .....	0
[0 prerivestimenti non collaboranti a lungo termine]	
[1 prerivestimenti collaboranti a lungo termine]	
Gioco radiale posa in opera rivestimento [m] .....	.00000

R I S U L T A T O   A N A L I S I   F R O N T E   D I   S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.275510
Raggio plastico galleria [m] .....	15.436979
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.049527
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.042940
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.125151
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	6.849677

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL PRERIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.12805
LAMBDA :	.88817
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.24853
LAMBDA :	.95965
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.06678
LAMBDA :	.78330
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.06142
LAMBDA :	.76666
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.13362
LAMBDA :	.89369

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL RIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.28631
LAMBDA :	.97142
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.37042
LAMBDA :	.99025
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.06848
LAMBDA :	.98541
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.06324
LAMBDA :	.98429
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.13445
LAMBDA :	.99284

R I S U L T A T O   A N A L I S I   G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.275510

Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	15.436979
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	1700.622805
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	169.269193
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	

CORONA DI ROCCIA CONSOLIDATA MEDIANTE GROUTING -----	
fattore di sicurezza .....	1.00000

PRERIVESTIMENTO -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	7.58990
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.71159
Spostamento punto di equilibrio [m] .....	.05745
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.05578
Convergenza radiale prerivestimento [m] .....	.00167
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.783302
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)	
Tensione spritz [MPa] .....	11.89456
Tensione centine [MPa] .....	71.44854
Coefficiente di sicurezza spritz .....	1.40148
Coefficiente di sicurezza centine .....	3.66558
Pressione rottura spritz [MPa] .....	.94284
Pressione rottura centine [MPa] .....	2.46601
Rigidezza spritz [MPa] .....	1738.18297
Rigidezza centinatura [MPa] .....	239.14286

RIVESTIMENTO DEFINITIVO (ANELLO CLS) -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	8.11045
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	1.13418
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.05817
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.05745
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00072
Tensione CLS [MPa] .....	6.48775
Coefficiente di sicurezza CLS .....	2.18411
Pressione rottura CLS [MPa] .....	2.47717
Rigidezza anello CLS [MPa] .....	7334.62051
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.985409

## 2.5 Sez. C2d

### 2.5.1 Fronte

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

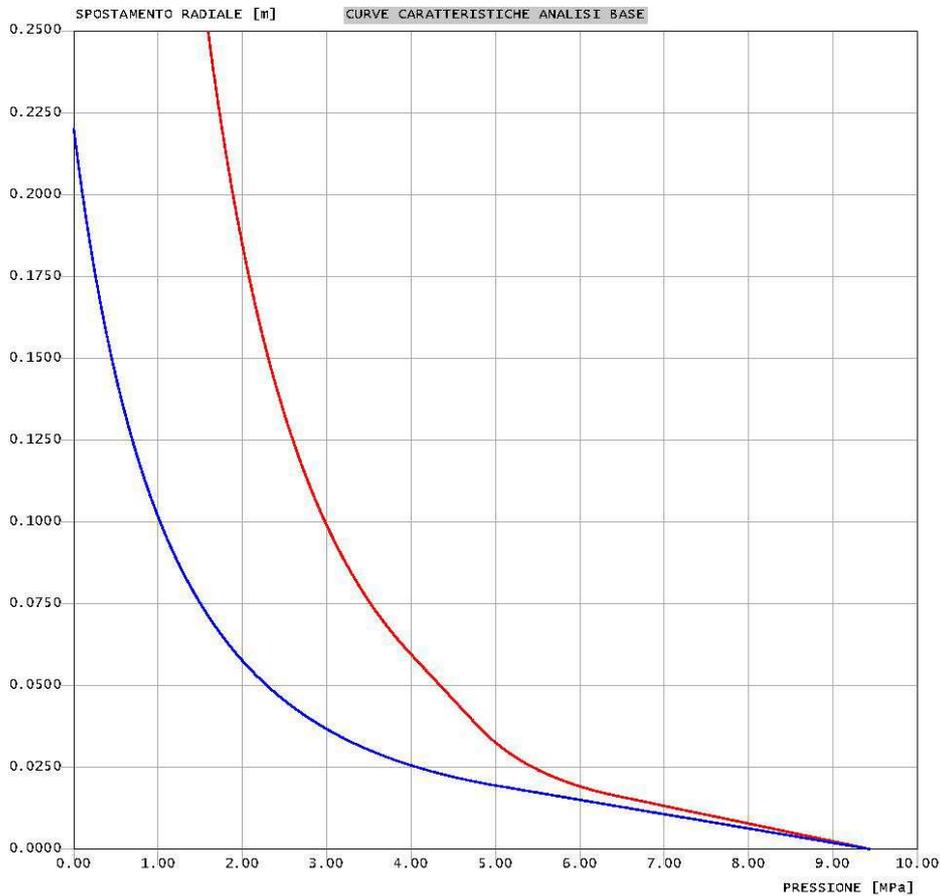


Letojanni  
Diagnosi  
Sez\_T4

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.00  
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.00

— GALLERIA S.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO



```

#####
#####
###
###
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
### ##### ## ## ##
##### ## ## ## ##
##### #####
#####

```

CALCOLO GALLERIE CON METODO  
CONVERGENZA-CONFINAMENTO  
SOLUTORE TRANSFER-MATRIX

VERSIONE 4s  
REVISIONE 1.01-2013

Letojanni  
Diagnosi  
Sez\_T4

- TIPO DI ANALISI: CALCOLO ACCOPPIATO FRONTE-GALLERIA  
VALUTAZIONE DEFORMATA GALLERIA AL FRONTE: 3  
1 -> metodo Panet-Guenot (galleria non sostenuta)  
2 -> metodo trasformazione omotetica (galleria non sostenuta)  
3 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da vuoto sferico)  
4 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da correlazione Ns)  
5 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da trasformazione omotetica)

D A T I A N A L I S I

R galleria [m] .....	5.30000
PARAMETRI GEOTECNICI -----	
Tensione originaria [MPa] .....	9.44000
Modulo di Young [MPa] .....	785.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....	5.30000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....	5.30000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.40000
Angolo attrito picco [deg] .....	18.76000
Coesione residua [MPa] .....	.40000
Angolo attrito residuo [MPa] .....	18.76000
Angolo dilatanza [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000
FRONTE DI SCAVO RINFORZATO	
Consolidamento generico del fronte	
Incremento coesione picco [MPa] .....	.24700
Pressione sul fronte di scavo [MPa] .....	.00000
Parametri di resistenza equivalenti del fronte rinforzato	
Coesione picco [MPa] .....	.64700
Coesione residua [MPa] .....	.40000
INIEZIONI O JET-GROUTING	
Spessore corona trattata [m] .....	2.00000
Modulo terreno trattato [MPa] .....	1570.00000
Coefficiente di Poisson terreno trattato .....	.00000
Coesione picco terreno trattato [MPa] .....	.59996
Angolo attrito picco terreno trattato [deg] .....	18.76000
Coesione residua terreno trattato [MPa] .....	.59996
Angolo attrito residuo terreno trattato [MPa] .....	18.76000
Angolo dilatanza terreno trattato [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000

R I S U L T A T O A N A L I S I F R O N T E D I S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	1.368936
Raggio plastico galleria [m] .....	31.264757
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.220347
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.175235
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.510734
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	10.593445

R I S U L T A T O A N A L I S I G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	1.368936
Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	31.264757
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	1.761153
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	35.407777
CORONA DI ROCCIA CONSOLIDATA MEDIANTE GROUTING -----	
fattore di sicurezza .....	1.00000

## 2.5.2 Rivestimento

Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA  
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013

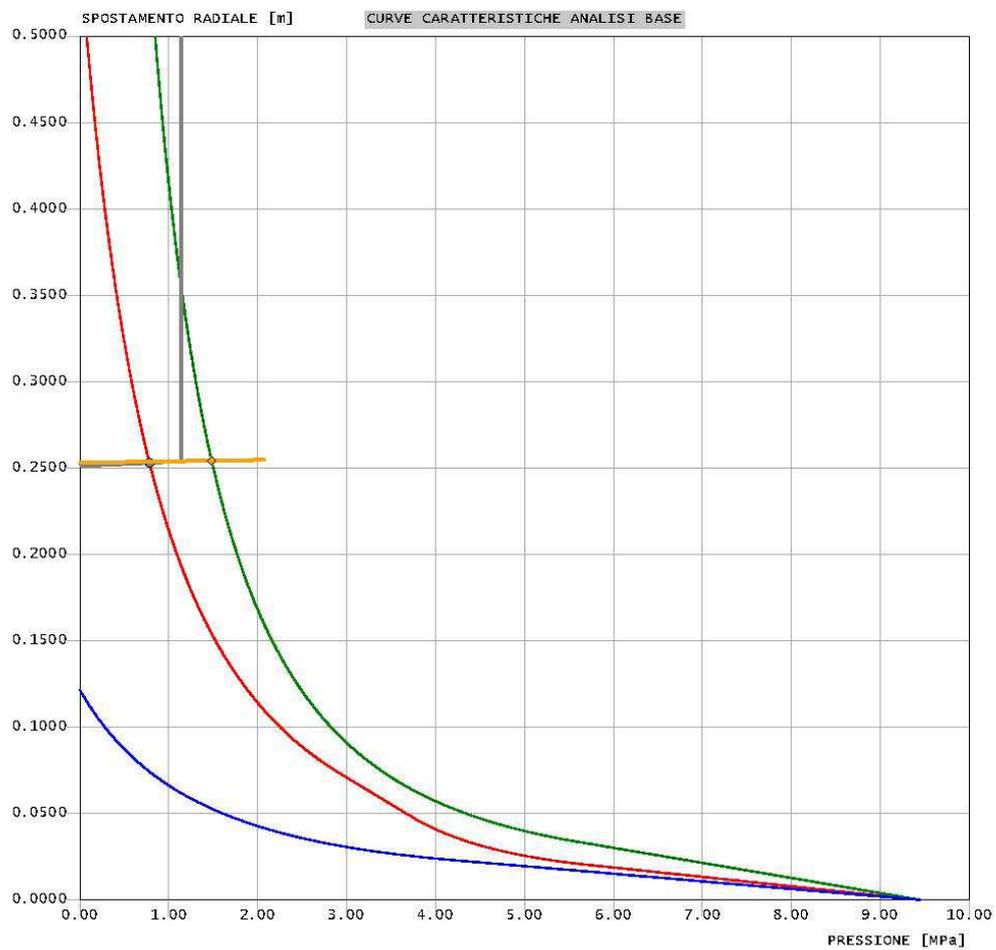


Letojanni  
Terapia  
Sez\_C2d\_Rivestimento

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.78  
Pressione Rivestimento [MPa]: 1.48

— GALLERIA B.T.  
— GALLERIA L.T.  
— FRONTE SFERICO  
— PRERIVESTIMENTO  
— RIVESTIMENTO



```

#####
#####
###
###
###   #####  ##  ##  ##
###   #####  ##  ##  ##
###   #####  ##  ##  ##
#####
#####  ##  ##  ##  ##  ##  ##  ##
#####  #####  #####
#####

```

CALCOLO GALLERIE CON METODO  
 CONVERGENZA-CONFINAMENTO  
 SOLUTORE TRANSFER-MATRIX

VERSIONE 4s  
 REVISIONE 1.01-2013

Letojanni  
 Terapia  
 Sez\_C2d\_Rivestimento

TIPO DI ANALISI: CALCOLO ACCOPPIATO FRONTE-GALLERIA  
 VALUTAZIONE DEFORMATA GALLERIA AL FRONTE: 3  
 1 -> metodo Panet-Guenot (galleria non sostenuta)  
 2 -> metodo trasformazione omotetica (galleria non sostenuta)  
 3 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da vuoto sferico)  
 4 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da correlazione Ns)  
 5 -> Nuovo Metodo Implicito (convergenza al fronte da trasformazione omotetica)

D A T I A N A L I S I

R galleria [m] .....	5.30000
PARAMETRI GEOTECNICI -----	
Tensione originaria [MPa] .....	9.45000
Modulo di Young [MPa] .....	785.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.75000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m] .....	100000.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.75000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m] .....	5.30000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.50000
Angolo attrito picco [deg] .....	23.00000
Coesione residua [MPa] .....	.50000
Angolo attrito residuo [MPa] .....	23.00000
Angolo dilatanza [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000
RESISTENZA ROCCIA (CREEP A LUNGO TERMINE)	
Coesione picco [MPa] .....	.50000
Angolo attrito picco [deg] .....	23.00000
Coesione residua [MPa] .....	.50000
Angolo attrito residuo [MPa] .....	23.00000
Angolo dilatanza [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000
FRONTE DI SCAVO RINFORZATO	
Consolidamento generico del fronte	
Incremento coesione picco [MPa] .....	.30800
Pressione sul fronte di scavo [MPa] .....	.00000
Parametri di resistenza equivalenti del fronte rinforzato	
Coesione picco [MPa] .....	.80800
Coesione residua [MPa] .....	.50000
INIEZIONI O JET-GROUTING	
Spessore corona trattata [m] .....	2.00000
Modulo terreno trattato [MPa] .....	1570.00000
Coefficiente di Poisson terreno trattato .....	.00000
Coesione picco terreno trattato [MPa] .....	.75000
Angolo attrito picco terreno trattato [deg] .....	23.00000
Coesione residua terreno trattato [MPa] .....	.75000
Angolo attrito residuo terreno trattato [MPa] .....	23.00000
Angolo dilatanza terreno trattato [deg] .....	.00000
Modulo di softening apparente Ha [MPa] .....	.00000
Modulo di softening H [MPa] .....	.00000
PRERIVESTIMENTO -----	
Distanza dal fronte alla messa in opera [m] .....	10.00000
Coefficiente riduzione rigidezza .....	1.00000
Forma del prerivestimento .....	CIRCOLARE CHIUSO
SPRITZ-BETON E CENTINE	
Spessore spritz [m] .....	.30000
Modulo Young spritz [MPa] .....	31476.00000

Coefficiente di Poisson spritz .....	.20000
Sezione centina [m2] .....	.00370
Altezza sezione centina [m2] .....	.12400
Posizione baricentro sezione centina [m] .....	.06200
Momento inerzia baricentrico sezione centina [m4] .	.00000799
Passo centine [m] .....	1.00000
Modulo Young ferro centine [MPa] .....	210000.00000
Resistenza compressione spritz [MPa] .....	16.67000
Resistenza ferro centine [MPa] .....	261.90000

RIVESTIMENTO DEFINITIVO -----	
Distanza dal fronte alla messa in opera [m] .....	20.00000
Spessore CLS [m] .....	.80000
Modulo Young CLS [MPa] .....	31476.00000
Coefficiente di Poisson CLS .....	.20000
Resistenza compressione CLS [MPa] .....	14.17000
Opzione calcolo rivestimento .....	0
[0 prerivestimenti non collaboranti a lungo termine]	
[1 prerivestimenti collaboranti a lungo termine]	
Gioco radiale posa in opera rivestimento [m] .....	.00000

R I S U L T A T O   A N A L I S I   F R O N T E   D I   S C A V O

Press. fine calcolo curva galleria [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale galleria [m] .....	.549202
Raggio plastico galleria [m] .....	18.114824
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.121708
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.071239
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.207632
Raggio plastico fronte sferico [m] .....	8.432714

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL PRERIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.47582
LAMBDA :	.96576
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.61917
LAMBDA :	.98872
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.29901
LAMBDA :	.91623
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.27202
LAMBDA :	.90454
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.34807
LAMBDA :	.93381

STATO GALLERIA ALLA MESSA IN OPERA DEL RIVESTIMENTO -----

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.58768
LAMBDA :	.98443
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.68196
LAMBDA :	.99632
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.30047
LAMBDA :	.97754
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.27367
LAMBDA :	.97441
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.34922
LAMBDA :	.98226

R I S U L T A T O   A N A L I S I   G A L L E R I A

Pressione fine calcolo [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo [m] .....	.549202

Raggio plastico galleria fine calcolo [m] .....	18.114824
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	1319.284931
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	122.399170
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	

CORONA DI ROCCIA CONSOLIDATA MEDIANTE GROUTING -----

fattore di sicurezza .....	1.00000
----------------------------	---------

PRERIVESTIMENTO -----

Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	12.58457
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.78375
Spostamento punto di equilibrio [m] .....	.25308
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.25149
Convergenza radiale prerivestimento [m] .....	.00159
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.916232
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)	
Tensione spritz [MPa] .....	10.59437
Tensione centine [MPa] .....	63.19045
Coefficiente di sicurezza spritz .....	1.57348
Coefficiente di sicurezza centine .....	4.14461
Pressione rottura spritz [MPa] .....	.98629
Pressione rottura centine [MPa] .....	2.59794
Rigidezza spritz [MPa] .....	1936.51025
Rigidezza centinatura [MPa] .....	146.60377

RIVESTIMENTO DEFINITIVO (ANELLO CLS) -----

Raggio plastico punto di equilibrio [m] .....	13.00044
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	1.48282
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.25433
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.25308
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00125
Tensione CLS [MPa] .....	10.07349
Coefficiente di sicurezza CLS .....	1.40666
Pressione rottura CLS [MPa] .....	2.08582
Rigidezza anello CLS [MPa] .....	5914.60784
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.977545