

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO

U.O. GALLERIE

PROGETTO DEFINITIVO

RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO

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

Galleria Forza d'Agrò - Relazione geotecnica e di calcolo della galleria naturale

SCALA:

-

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

R S 2 S 0 2 D 0 7 R B G N 0 5 0 0 0 0 1 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
B	Consegna al CSLLPP	A. Corbo A. Duzi Nulli	Gen 2018	M. Ricci Micesi	Gen 2018	P. Carlesimo Cale	Gen 2018	A. Sciotti Gen 2018 ITALFERR S.p.A. U.O. GALLERIE Dott. Ing. Alessandra Sciotti Opera negli Impieghi di Roma n° 19946

File:

n. Elab.: 1576

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	GLO/GLOa – Conglomerati/conglomerati con olistoiliti calcarei.....	21
	8.3.2.1 Caratteristiche fisiche.....	22
	8.3.2.2 Caratteristiche meccaniche.....	24
	8.3.2.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....	27
8.3.3	FDN/GLD/TAM/MMF – Argilloscisti/Filladi.....	28
	8.3.3.1 Caratteristiche fisiche.....	28
	8.3.3.2 Caratteristiche meccaniche.....	30
	8.3.3.3 Riepilogo dei parametri geotecnici.....	35
8.3.4	Definizione degli intervalli dei parametri geotecnici delle unità interessate dalle opere.....	36

8.3.5	<i>Il regime idraulico</i>	36
8.3.5.1	<i>Complesso metamorfico (TAM, FDN)</i>	36
8.3.5.2	<i>Complesso conglomeratico-ghiaioso (GLO)</i>	36
8.3.5.3	<i>Complesso calcareo-dolomitico (GLOa)</i>	37
8.3.5.4	<i>Complesso detritico-colluviale (b2)</i>	37
8.3.6	<i>Lo stato tensionale in sito</i>	37
9	FASE DI DIAGNOSI	38
9.1	CLASSI DI COMPORTAMENTO DEL FRONTE DI SCAVO	38
9.2	DETERMINAZIONE DELLE CATEGORIE DI COMPORTAMENTO	39
9.2.1	<i>Analisi con il metodo delle linee caratteristiche</i>	39
9.2.1.1	<i>Metodo di analisi</i>	39
9.2.1.2	<i>Sezioni analizzate</i>	40
9.2.1.3	<i>Risultati delle analisi</i>	40
9.2.2	<i>Analisi con i metodi all'equilibrio limite</i>	41
9.2.2.1	<i>Metodo di analisi: Tamez (1984)</i>	41
9.2.2.2	<i>Sezioni analizzate</i>	42
9.2.2.3	<i>Risultati delle analisi</i>	43
9.2.3	<i>Definizione delle tratte a comportamento tensio-deformativo omogeneo</i>	43
10	FASE DI TERAPIA	44
10.1	DEFINIZIONE DELLE SEZIONI TIPO	44
10.1.1	<i>Sezione tipo B1 (doppio binario)</i>	44
10.1.2	<i>Sezione tipo C2 (doppio binario)</i>	45
10.1.3	<i>Sezione tipo C2v (doppio binario)</i>	45
10.1.4	<i>Sezione tipo A2 (singolo binario)</i>	46
10.1.5	<i>Sezione tipo B1 (singolo binario)</i>	46
10.1.6	<i>Sezione tipo B2 (singolo binario)</i>	47
10.1.7	<i>Sezione tipo C2 (singolo binario)</i>	47
10.1.8	<i>Sezione tipo C2v (singolo binario)</i>	48
10.1.9	<i>Sezione tipo C3v (singolo binario)</i>	48
10.1.10	<i>Sezione tipo C3d (singolo binario)</i>	49
10.2	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI STRUTTURALI	50

10.3	ANALISI E VERIFICA DELLE SEZIONI TIPO	52
10.3.1	<i>Criteri di verifica</i>	52
10.3.2	<i>Sezione A2 (singolo binario)</i>	58
10.3.2.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i>	58
10.3.2.2	<i>Interazione opera-terreno</i>	59
10.3.3	<i>Sezione B1 (singolo binario)</i>	61
10.3.3.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i>	61
10.3.3.2	<i>Interazione opera-terreno</i>	62
10.3.4	<i>Sezione C2v (singolo binario)</i>	64
10.3.4.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i>	64
10.3.4.2	<i>Interazione opera-terreno</i>	65
10.3.5	<i>Sezione C3d (singolo binario)</i>	66
10.3.5.1	<i>Stabilità del fronte e del cavo</i>	66
10.3.5.2	<i>Interazione opera-terreno</i>	67
11	FASE DI VERIFICA E MESSA A PUNTO DEL PROGETTO	69
11.1	MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA	69
11.2	CRITERI GENERALI PER L'APPLICAZIONE DELLE SEZIONI TIPO	69
12	CONCLUSIONI	70

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 5 di 70

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 Forza d'Agrò, afferente al Lotto 2. È una galleria da realizzarsi con metodo di scavo tradizionale. Lunga circa 2,5 km, è a doppia canna, singolo binario, per i primi 2,4 km, ed a doppio binario, singola canna, per la restante parte.

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 (§ 9.2);

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 (§ 10.3). 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 (§ 9). 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 9 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 7 di 70

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;

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 8 di 70

- 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 7th 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] Atkinson, J. H. 2000. Non-linear soil stiffness in routine design. 40th Rankine Lecture Géotechnique, 50(5): 487-508;
- Rif. [30] Stokoe K.H. II, Santamarina J.C. 2000. Seismic-wave-based testing in geotechnical engineering, GEOENG 2000, Melbourne, Australia, 19-24 Nov., CD-Rom;
- Rif. [31] Autori Vari (2010) – APAT - Servizio Geologico d'Italia, Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 613 "Taormina". Note Illustrative. S.El.Ca., Firenze.

4.3 Documenti Superati

Non sono presenti documenti superati.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 9 di 70

5 ALLEGATI

Il documento è corredato dai seguenti allegati:

All. [1] “Analisi con i metodi delle curve caratteristiche e dell’equilibrio limite 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. [32] U.O. Gallerie, documento RS 2S02D07SPGN000000 1B “Caratteristiche dei materiali – Note generali” datato Gennaio 2018;
- Rif. [33] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000003B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [34] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000006B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [35] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000007B “Gallerie di linea a doppio binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2v - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [36] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000009B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo A2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [37] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000010B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B1 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [38] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000011B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo B2 - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [39] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000012B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C2 - 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 RS2S02D07BBGN0000016B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C3v - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;
- Rif. [42] U.O. Gallerie, documento RS2S02D07BBGN0000017B “Gallerie di linea a singolo binario - Scavo tradizionale - Sezione tipo C3d - Carpenteria, scavo e consolidamenti” datato Gennaio 2018;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 10 di 70

7 DESCRIZIONE DELL'OPERA

7.1 Il tracciato e le opere in sotterraneo

La galleria Forza d'Agrò è una galleria a doppia canna, singolo binario per un tratto di lunghezza pari a circa 2374 m, di cui 12,2 m in artificiale, ed a doppia canna, doppio binario per un breve tratto di 83 m, di cui 15 in artificiale, da realizzarsi con metodo di scavo tradizionale. Tale configurazione all'imbocco lato Messina della galleria Forza d'Agrò, è stata prevista per accogliere i due binari di precedenza funzionali alla fermata di S.Alessio.

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

- da pk 20+293,8 a pk 20+306,0 (L=12,2 m) galleria artificiale;
- da pk 20+306,0 a pk 22+677,6 (L=2371,6 m) galleria naturale – doppia canna/singolo binario;
- da pk 22+677,6 a pk 22+746,0 (L=68,4 m) galleria naturale – doppia canna/doppio binario;
- da pk 22+746,0 a pk 22+761,0 (L=15,0 m) galleria artificiale;

La galleria presenta coperture generalmente elevate con valori massimi fino a 315 m ed un andamento altimetrico, procedendo in direzione Messina, con una prima parte in salita al 2‰ e poi in discesa al 4‰.

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 Salice che la galleria sotto-attraversa al km 22+200 circa con 13 m di ricoprimento minimo.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 11 di 70

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 Forza d'Agrò in progetto. Per eventuali approfondimenti sullo studio geologico si rimanda agli specifici elaborati progettuali (da Rif. [14] a Rif. [26]).

La Galleria Forza d'Agrò si colloca nel settore centrale della tratta in progetto e presenta quote del piano ferro variabili tra 45.7 e 49.5 m s.l.m.. Nel tratto Sud-occidentale, il tracciato intercetta inizialmente Epimetamorfiti di Longi-Taormina (**TAM**) passanti in contatto stratigrafico ai depositi sedimentari (**GLO**) e carbonatici (**GLOa**) del Conglomerato rosso. Questo settore è caratterizzato dalla presenza di almeno tre fronti di sovrascorrimento a vergenza Sud-occidentale, a loro volta variamente dislocati da faglie dirette e trascorrenti ad alto angolo. Nel settore Nord-orientale, invece, la galleria in questione interessa unicamente le Metamorfiti di Mandanici (**FDN**), che risultano giustapposti ai litotipi del Conglomerato rosso (**GLO**) mediante una faglia di cinematica sconosciuta sub-verticale ad asse NE-SW. In corrispondenza degli imbocchi, infine, il tracciato intercetta locali lembi di depositi detritico-colluviali (**b2**) di esiguo spessore.

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 sonora 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 sonora V_p e V_s .

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 13 di 70

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 Forza d'Agrò 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 Forza d'Agrò – Lotto 2
(in parentesi sono riportate le formazioni afferenti il Lotto 1)**

Unità geotecnica	Descrizione
b2;ba;bb;g1;MSS	Ghiaie e sabbie limose
GLO/GLOa	Conglomerati/Conglomerati con olistoliti calcarei
FDN/GLD/TAM/MMF	Argilloscisti/Filladi

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 14 di 70

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.

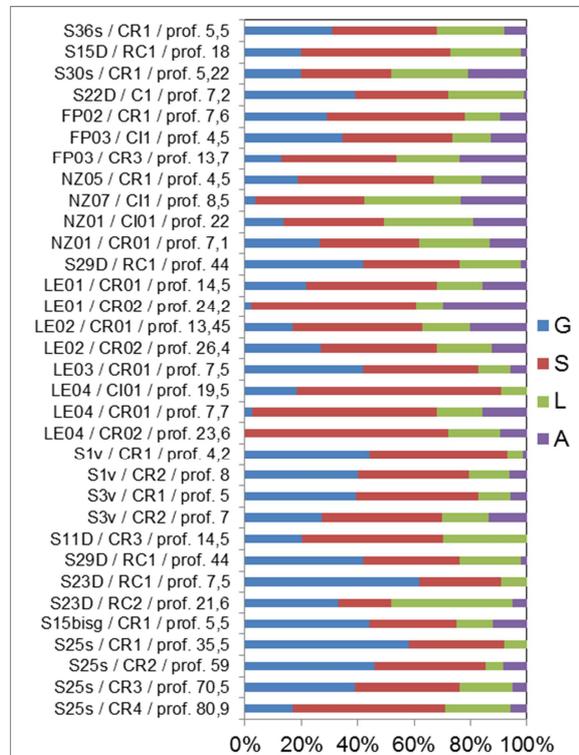


Figura 2 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: analisi granulometrica

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%.

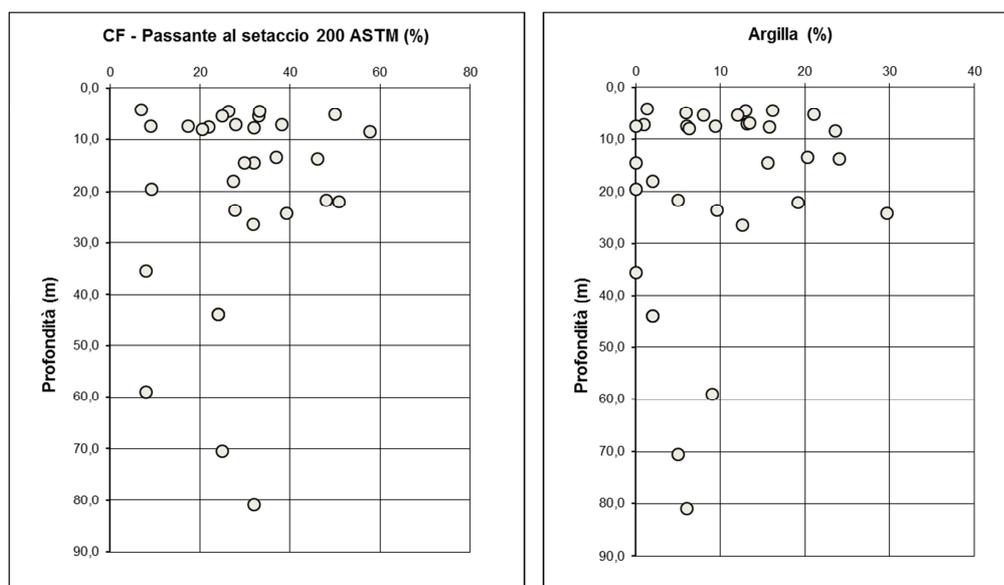


Figura 3 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: passante al setaccio 200 ASTM e percentuale di argilla

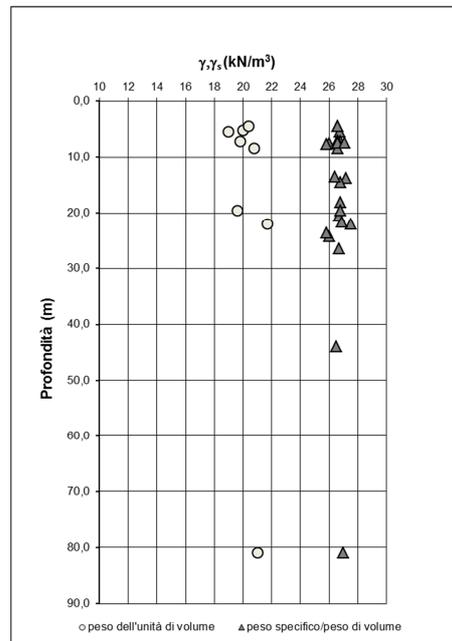


Figura 4 - Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: peso dell'unità di volume e peso specifico

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.

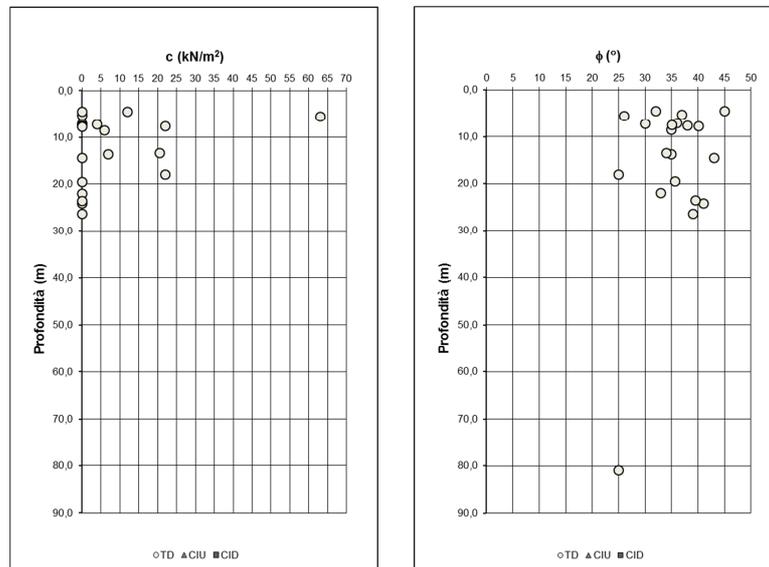


Figura 5 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: coesione drenata ed angolo di attrito

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 angolo d'attrito pari a 35° ed un valore di coesione di 15 kPa. Il contributo di coesione, poiché la frazione argillosa è modesta, può essere attribuito all'effetto di *interlocking* dei grani.

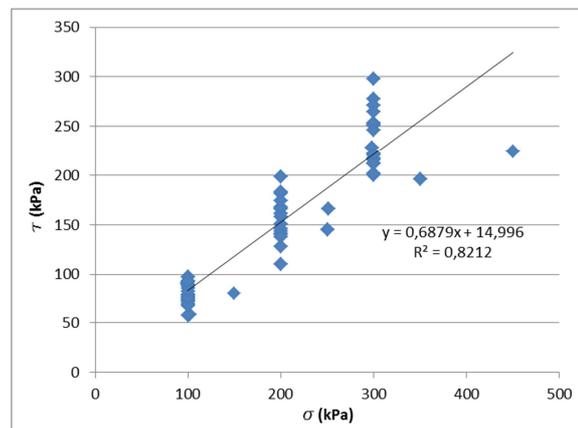


Figura 6 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: Involuppo a rottura delle prove di taglio diretto

L'angolo di resistenza al taglio ottenuto dalle prove di laboratorio risulta sostanzialmente in buon accordo con i

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.

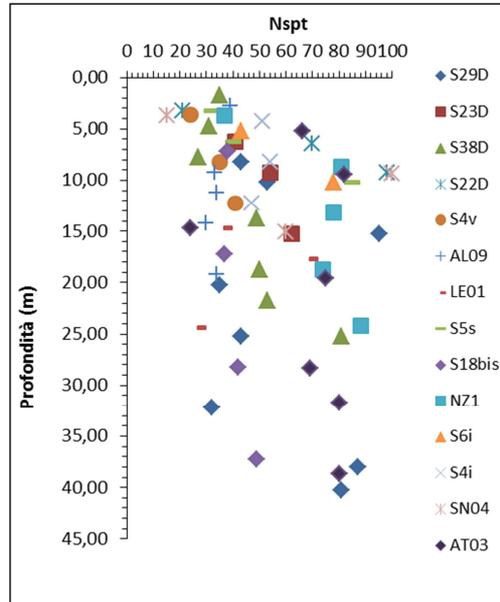


Figura 7 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: valori di N_{spt}

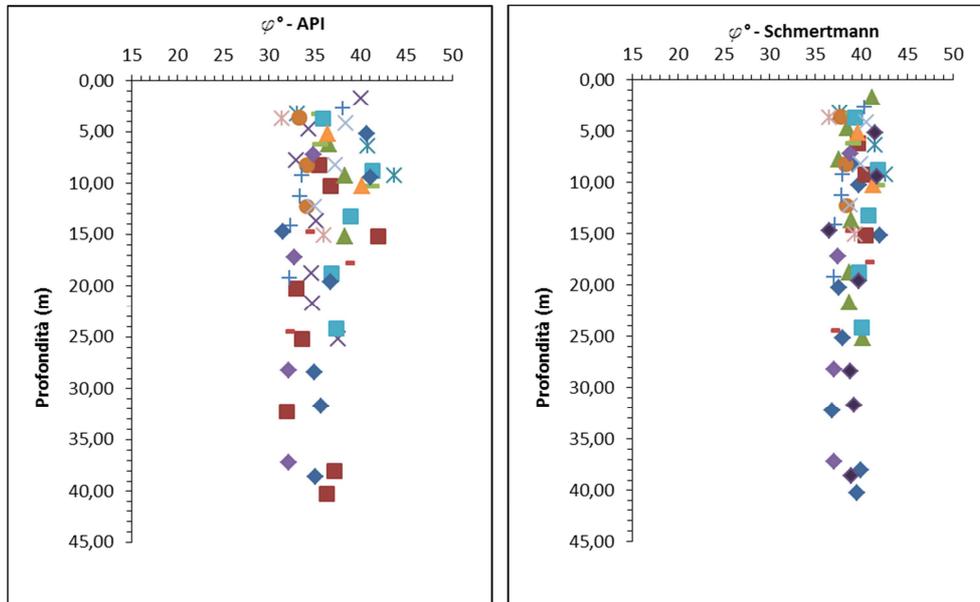


Figura 8 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: angolo d'attrito ricavato dalle prove SPT

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).

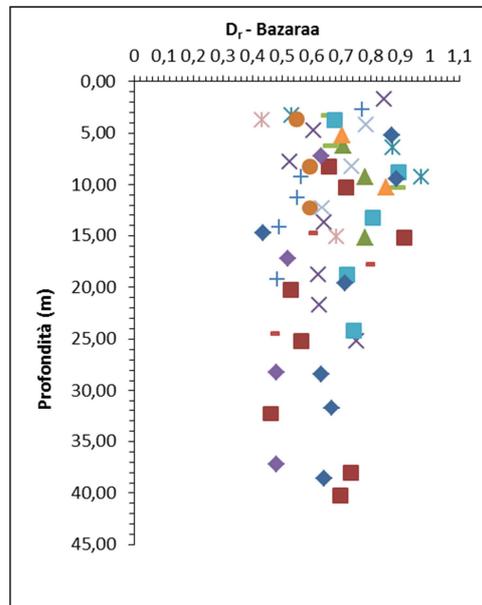


Figura 9 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: densità relativa

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).

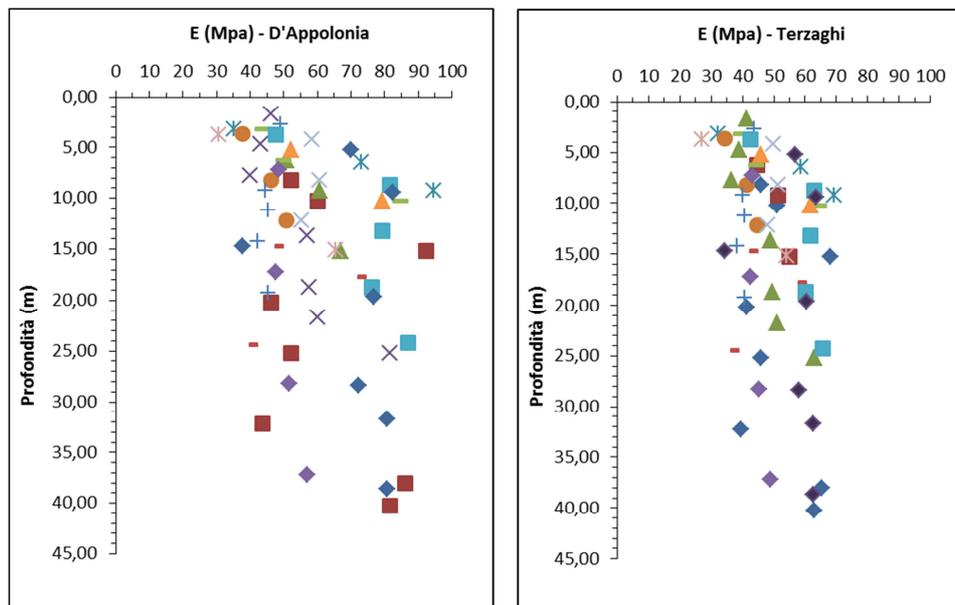


Figura 10 – Formazione b2;ba;bb;g1;MSS: moduli elastici ricavati dalle prove SPT

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. [29]). 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).

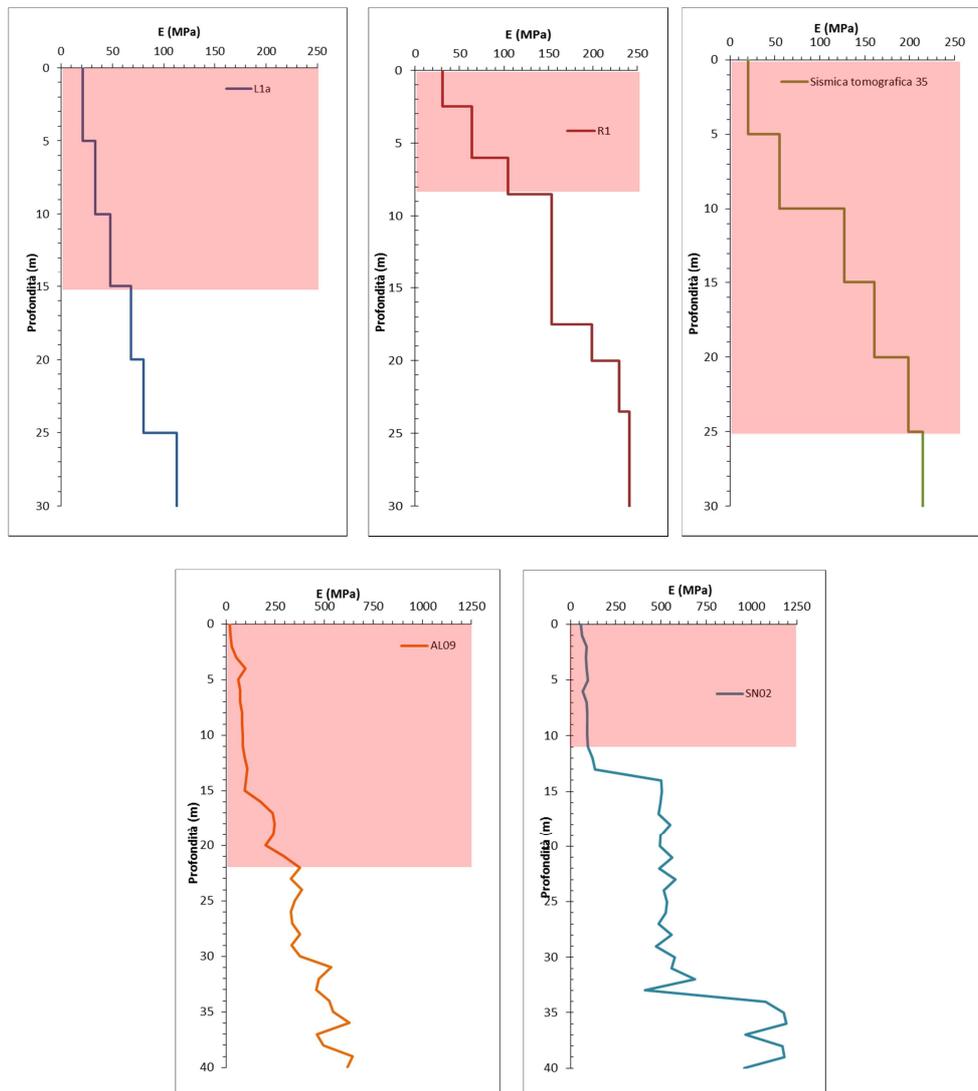


Figura 11 - b2;ba;bb;g1;MSS: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche

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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 21 di 70

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 Forza d'Agrò sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 2 - Galleria Forza d'Agrò – Riepilogo parametri geotecnici - b2;ba;bb;g1;MSS

Unità geotecnica	γ (kN/m ³)	c (KPa)	ϕ (°)	E (MPa)
b2;ba;bb;g1;MSS	19-21	0-20	25-40	40-100

8.3.2 *GLO/GLOa – Conglomerati/conglomerati con olistoliti calcarei*

L'unità dei conglomerati/conglomerati con olistoliti calcarei "GLO/GLOa" è composta da conglomerati a clasti (GLO) in matrice generalmente sabbiosa e microconglomeratica, da poco a mediamente cementata (Figura 12); inglobati nella massa conglomeratica si rinvencono numerosi olistoliti (GLOa) prevalentemente costituiti da calcari, dolomie e breccie calcaree (Figura 13). Tali olistoliti, spesso difficilmente distinguibili dalla massa conglomeratica in cui sono ospitati, possono rinvenirsi in differenti orizzonti stratigrafici dell'unità, disposti in sciami con dimensioni da metriche ad ettometriche. I contatti bruschi tra matrice e blocchi sono caratterizzati da una geometria irregolare, spesso obliterati da locali zone di taglio (Rif. [31]).



Figura 12 – Campione di conglomerati GLO – S8C2



Figura 13 - Campione di dolomia GLOa – S8C3

Considerata l'eterogeneità di tale unità, per la valutazione delle caratteristiche meccaniche di ammasso si è fatto riferimento alla trattazione di Marinos e Hoek (Rif. [28]) per formazioni strutturalmente complesse.

La presenza di possibili banchi di olistoliti di dimensioni di centinaia di metri ha reso però necessaria anche la caratterizzazione dei blocchi calcarei in maniera indipendente dalla matrice sabbiosa e microconglomeratica.

8.3.2.1 Caratteristiche fisiche

Le analisi granulometriche eseguite sui campioni prelevati nella matrice microconglomeratica della formazione mostrano mediamente una prevalenza di ghiaia (27%) e sabbia (38%), (Figura 14), con un contributo inferiore di limo (26%) ed argilla (9%) (Figura 14).

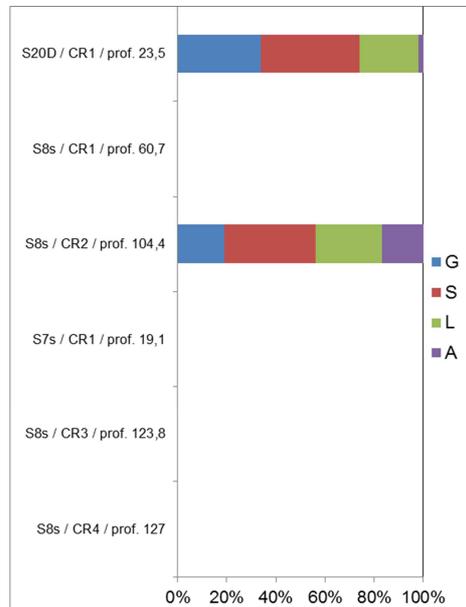


Figura 14 - Formazione GLO/GLOa: analisi granulometrica della matrice microconglomeratica

In Figura 15 è riportato il peso dell'unità di volume.

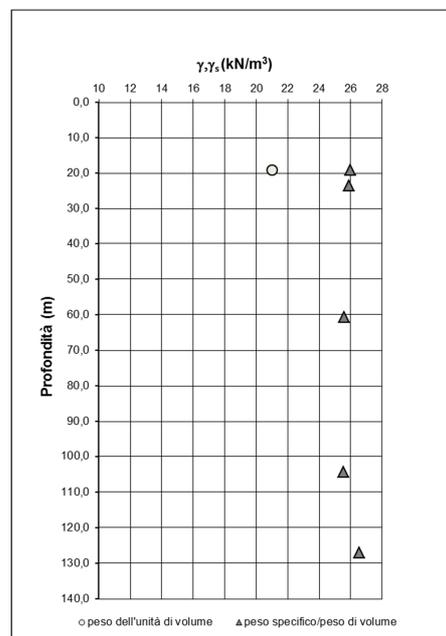


Figura 15 - Formazione GLO/GLOa: peso di volume γ

8.3.2.2 Caratteristiche meccaniche

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

Sono state eseguite prove di compressione monoassiale, prove di velocità ultrasonica e *point load test*, i cui risultati sono riportati in Figura 16, con riferimento sia alla componente conglomeratica che a quella prettamente calcarea.

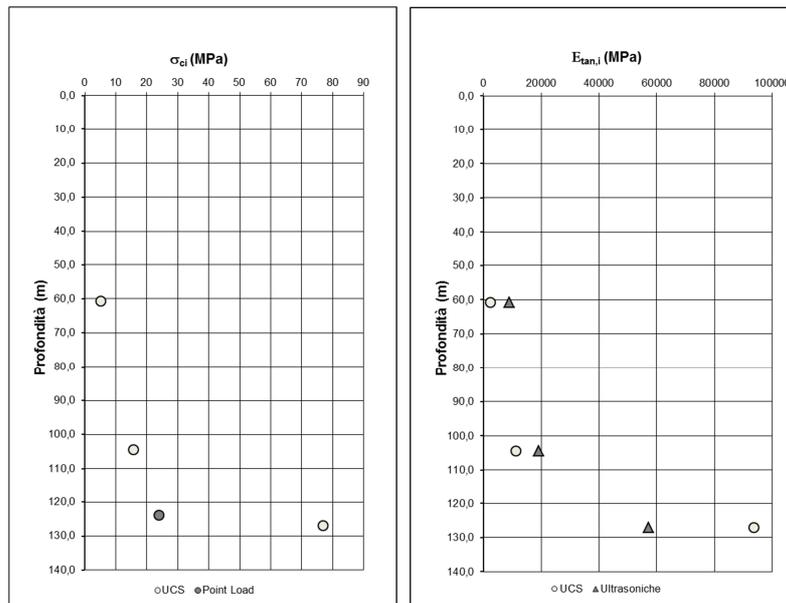
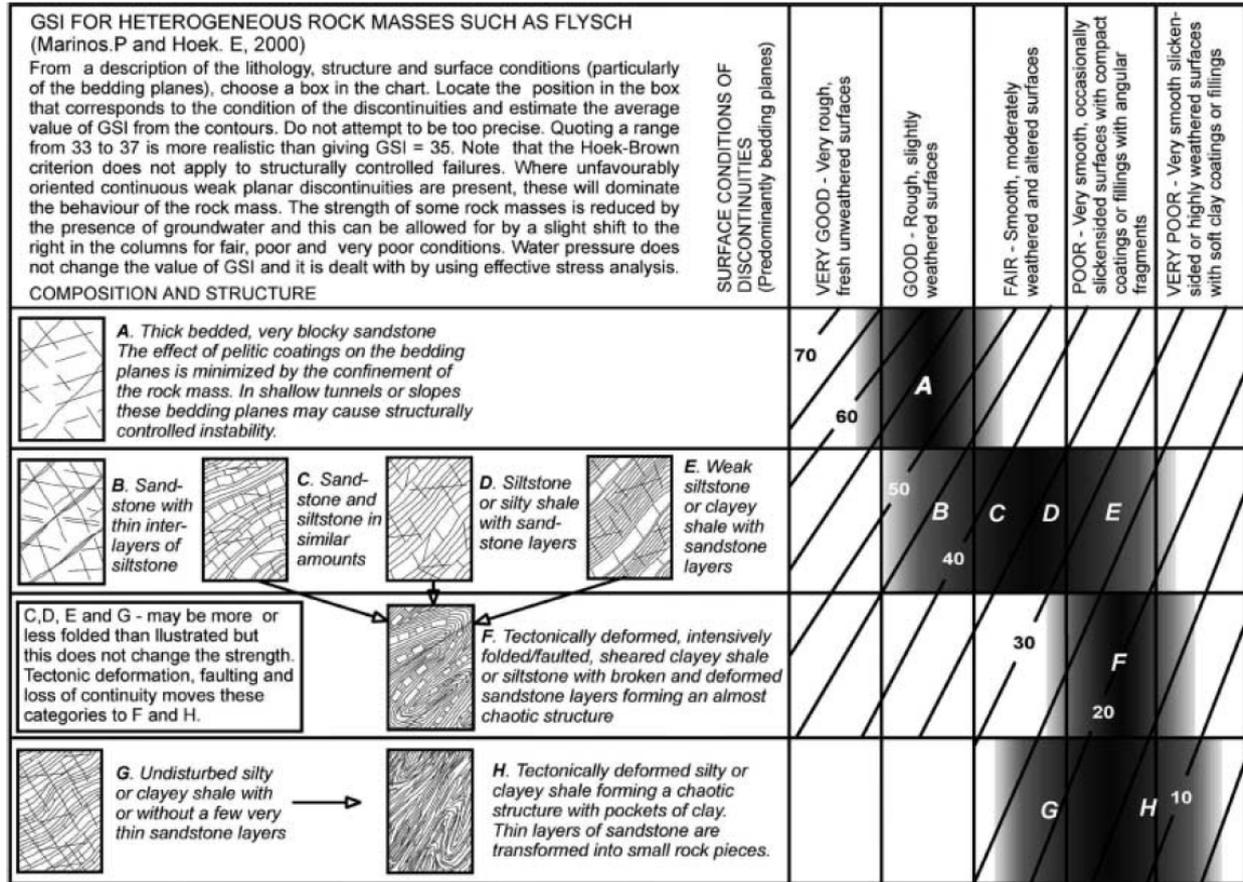


Figura 16 - Formazione GLO/GLOa: σ_{ci} e $E_{tan,i}$ della matrice

Per definire il passaggio dalla scala della matrice a quella dell'ammasso, come accennato, si fa riferimento alla trattazione di Marinos e Hoek per formazioni strutturalmente complesse (Rif. [28]).



Suggested proportions of parameters σ_{ci} and m_i for estimating rock mass properties for flysch

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

Figura 17 - GSI per ammassi rocciosi eterogenei come flysch (da Marinos e Hoek, 2001)

Gli stop geostrutturali a disposizione hanno permesso di definire i valori di GSI e quindi la categoria di riferimento; in questo modo è stato possibile individuare la corrispondente riduzione percentuale della resistenza della componente calcarea da considerare per la valutazione della resistenza d'ammasso.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 26 di 70

Le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso sono state quindi 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:

- σ'_1 tensione principale efficace maggiore a rottura;
- σ'_3 tensione principale efficace minore a rottura;
- σ_c resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

Una prova di taglio diretto è stata eseguita sul campione S7-CR1 a disposizione sulla matrice conglomeratica, il cui risultato è stato di coesione efficace pari a 106 kPa ed angolo d'attrito di 30°. Tali valori sono stati considerati, come estremo limite inferiore, nella definizione della resistenza d'ammasso.

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 Forza d'Agro e di definire due *ranges* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della progressiva chilometrica, il primo nell'intervallo 10 ÷ 20 per il GLO ed il secondo nell'intervallo 25 ÷ 35 per il GLOa, con i quali è stato inoltre possibile valutare la rigidezza d'ammasso a partire da quella della roccia intatta mediante metodi empirici noti in letteratura (Rif. [25]).

Inoltre, per quanto concerne le caratteristiche di rigidezza dell'ammasso, sono state interpretate le indagini geofisiche in superficie a disposizione.

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. [29]). Tali sono quindi riportati nei grafici che seguono in riferimento alla sismiche tomografiche n.25 e n.26 (solo le parti evidenziate in rosso sono relative alle formazioni in oggetto, come da profilo stratigrafico).

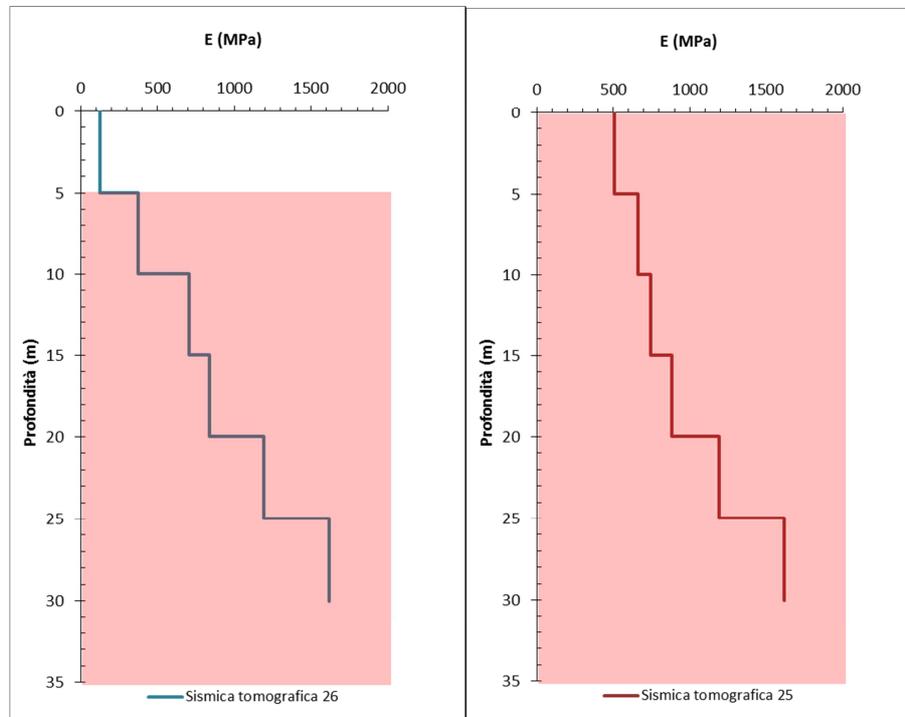


Figura 18 - Formazione GLO/GLOa: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche

Le risultanze delle indagini 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 "GLO/GLOa" gli intervalli dei parametri geotecnici definiti per la verifica delle opere afferenti la galleria Taormina sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 3 - Galleria Forza d'Agro – Riepilogo parametri geotecnici - GLO/GLOa

Unità geotecnica	γ (kN/m ³)	σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	E_i (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E (MPa)
GLO	25-27	10-20	10-30	18	10000-30000	0,2-1,2	220-985
GLOa	25-27	70-80	25-35	7	50000-90000	2,1-3,7	1410-3610

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampileri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 28 di 70

8.3.3 FDN/GLD/TAM/MMF – Argilloscisti/Filladi

L'unità geotecnica degli argilloscisti/filladi "FDN/GLD/TAM/(MMF)" raggruppa le filladi dei Metamorfiti di Mandanici (FDN), gli argilloscisti degli Epimetamorfiti del Vallone Letojanni (GLD), gli argilloscisti 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 19), e generalmente risultano molto alterate nella porzione superficiale a causa delle azioni meccaniche indotte dalla tettonica.



Figura 19 – Sondaggio S15D, dettaglio della microstruttura scistosa con quarzo

8.3.3.1 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 20), con un contributo inferiore di limo (21%) ed argilla (5%) (Figura 20).

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 21 è riportato, il peso di volume del materiale.

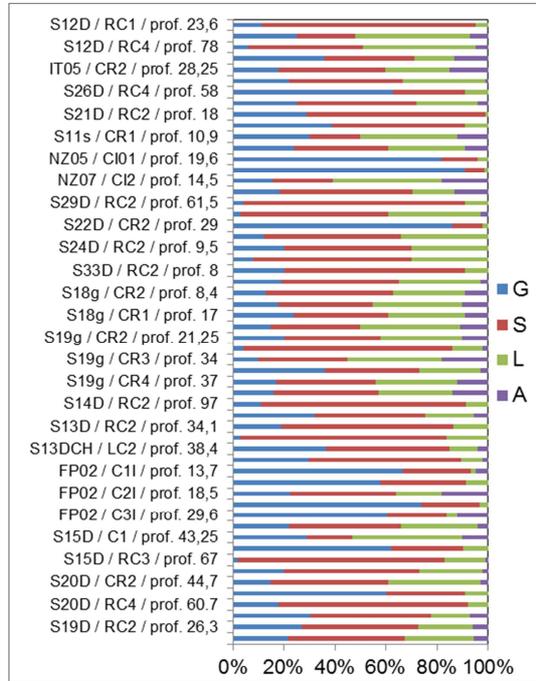


Figura 20 - FDN/GLD/TAM/MMF: analisi granulometrica

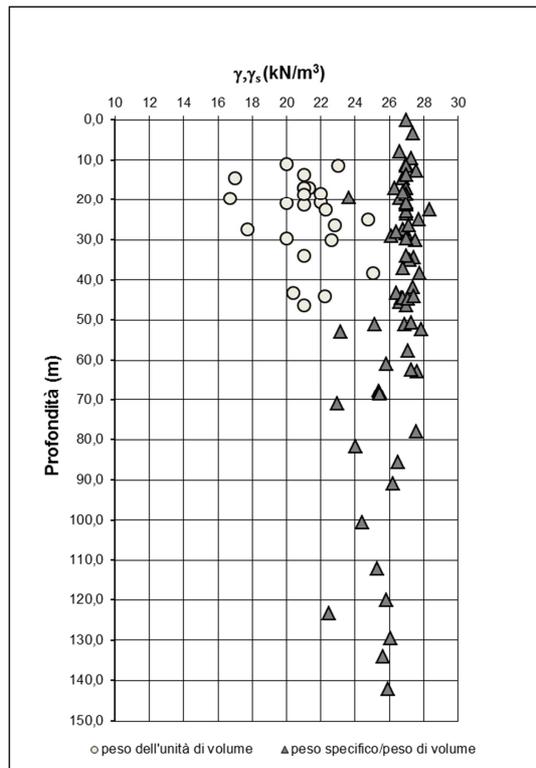


Figura 21 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: peso di volume γ

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, prove di velocità ultrasonica e *point load test*, i cui risultati sono riportati in Figura 22. In rosso, sono evidenziati gli intervalli di valori di riferimento scelti per la caratterizzazione geotecnica.

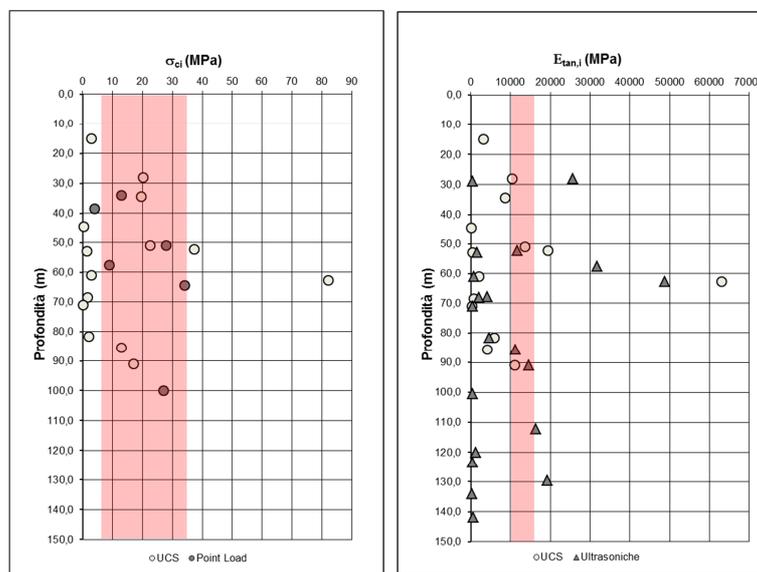


Figura 22 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: σ_{ci} e $E_{tan,i}$ della matrice

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:

- σ'_1 tensione principale efficace maggiore a rottura;
- σ'_3 tensione principale efficace minore a rottura;
- σ_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 Forza d'Agrò e di definire due *ranges* di variazione del Geological Strength Index (GSI) in funzione della progressiva chilometrica, il primo nell'intervallo $10 \div 20$ ed il secondo nell'intervallo $20 \div 35$, con i quali è stato

inoltre possibile valutare la rigidezza 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 23. Tali valori sono da riferirsi alla frazione alterata dalla tettonica e sono stati considerati, come estremo limite inferiore, nella definizione della resistenza attritiva d'ammasso.

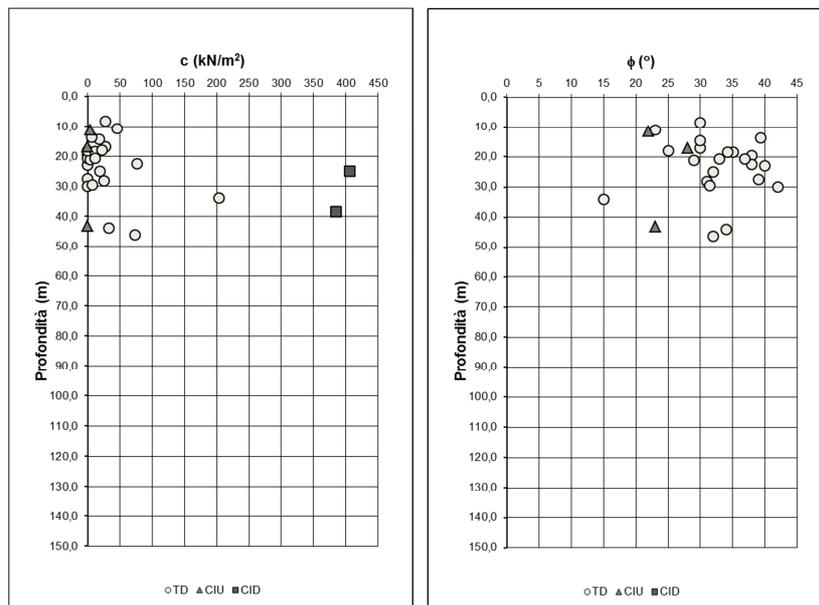


Figura 23 – Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: coesione drenata ed angolo di attrito

Inoltre, per quanto concerne le caratteristiche di rigidezza 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 rigidezza 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).

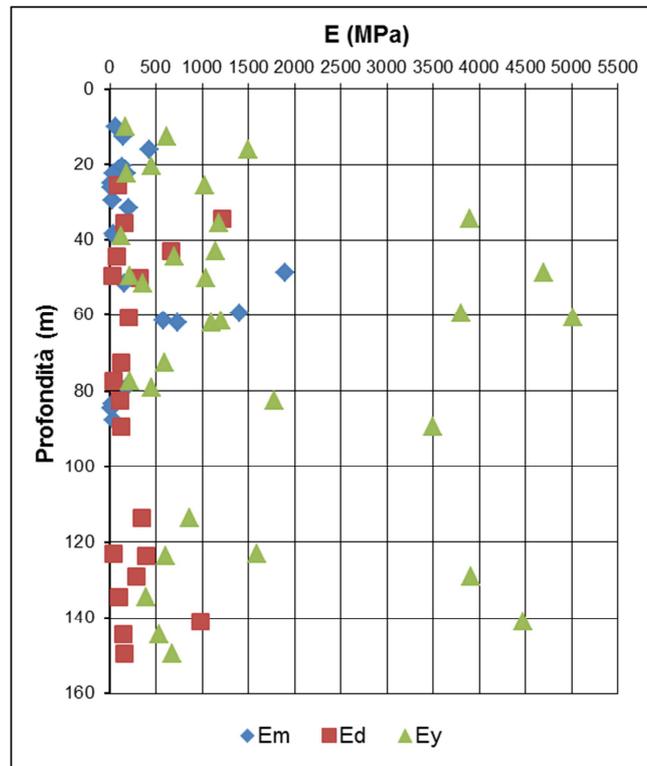


Figura 24 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: moduli pressiometrici e dilatometrici

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. [29]). 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).

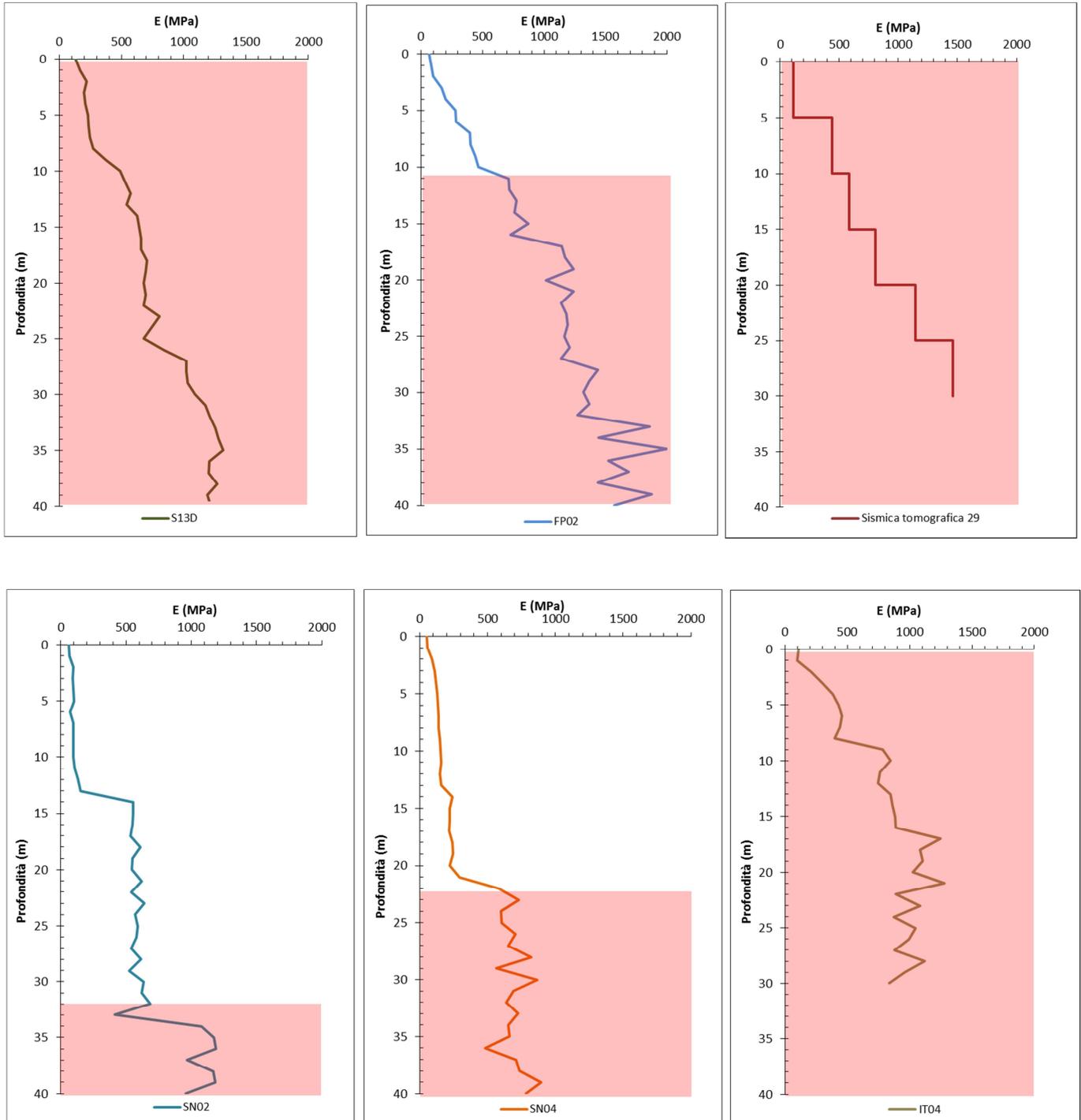


Figura 25 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: moduli elastici stimati dall'interpretazione delle indagini geofisiche

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. [30]), mentre un congruo numero di prove di laboratorio (evidenziato in rosso in figura Figura 26) ha evidenziato valori di gran lunga inferiori.

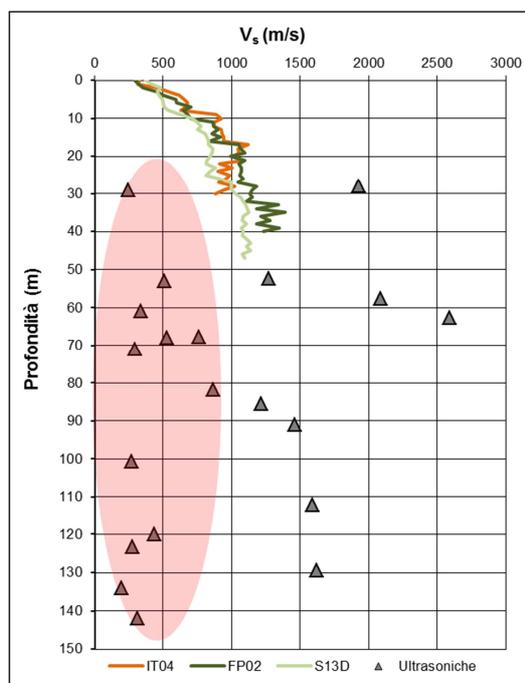


Figura 26 - Formazione FDN/GLD/TAM/MMF: confronto tra $V_{s,sito}$ e $V_{s,lab}$

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 27).



Figura 27 - 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.

8.3.3.3 Riepilogo dei parametri geotecnici

Per l'unità geotecnica "FDN/GLD/TAM/MMF" gli intervalli dei parametri geotecnici definiti per la verifica delle opere afferenti la galleria Forza d'Agrò sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 4 - Galleria Forza d'Agrò – Riepilogo parametri geotecnici - FDN/GLD/TAM/(MMF)

Unità geotecnica	γ (kN/m ³)	σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	E_i (MPa)	σ_{cm} (MPa)	E (MPa)
FDN/GLD/TAM/MMF	24-28	15-35	10-20	10	10000-15000	0,6-2,2	260-520
			20-35			0,9-3,5	350-1120

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 36 di 70

8.3.4 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 Forza d'Agrò.

Tabella 5 - Galleria Forza d'Agrò – Riepilogo parametri geotecnici

Unità geotecnica	γ (kN/m ³)	σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	E_i (MPa)	c (KPa)	ϕ (°)	σ_{cm} (MPa)	E (MPa)
<i>b2;ba;bb;g1;MSS</i>	19-21	-	-	-	-	0-20	25-40	-	40-100
<i>GLO</i>	25-27	10-20	10-30	18	10000-30000	-	-	0,2-1,2	220-985
<i>GLOa</i>	25-27	70-80	25-35	7	50000-90000	-	-	2,1-3,7	1410-3610
<i>FDN/GLD/TAM/MMF</i>	24-28	15-35	10-20	10	10000-15000	-	-	0,6-2,2	260-520
			20-35			-	-	0,9-3,5	350-1120

8.3.5 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.

8.3.5.1 Complesso metamorfico (TAM, FDN).

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.

8.3.5.2 Complesso conglomeratico-ghiaioso (GLO).

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 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 37 di 70

8.3.5.3 Complesso calcareo-dolomitico (GLOa).

Costituiscono acquiferi fessurati di modesta trasmissività, piuttosto eterogenei ed anisotropi; sono sede di falde idriche di ridotta rilevanza, sia frazionate che a deflusso unitario, contenute nelle porzioni più carsificate e fessurate dell'ammasso. La permeabilità, per fessurazione e carsismo, è generalmente alta. A questo complesso è possibile attribuire un coefficiente di permeabilità k compreso tra $1 \cdot 10^{-5}$ e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

8.3.5.4 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 Forza d'Agrò" (Rif. [7]) e alla "Relazione geologica ed idrogeologica" (Rif. [13]).

8.3.6 *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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 38 di 70

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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 39 di 70

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:

- i metodi di analisi della stabilità del fronte all'equilibrio limite (per le tratte a bassa copertura),
- il metodo delle linee caratteristiche (per le tratte ad alta copertura),

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 λ 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 40 di 70

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 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 6 - Sezioni di analisi: dati di input

Sez di calcolo	Unità	pk [m]	H [m]	σ_0 [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_k [MPa]	φ'_k [°]	E_k [MPa]
D1	GLO	20+998	309.9	8.06	0.65	0.0	49.0	26.0	0.540	25.0	1130.0
D2	GLOa	21+469	129.9	3.35	0.50	0.0	49.0	26.0	0.325	28.0	2800.0
D4	FDN	22+405	148.9	3.87	-	-	-	26.0	0.310	30.0	895.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ_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}

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

φ'_k = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

Per le sezioni D1 e D2 nei conglomerati (GLO e GLOa) è stata definita una distribuzione di pressione neutre che prevede un opportuno abbattimento al contorno del cavo per effetto dello scavo. Per la sezione D4, considerata la bassa permeabilità dell'ammasso roccioso FDN, 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 σ_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:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 41 di 70

Tabella 7 - Criterio 1

σ_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 2

u_F / R_{eq}	$R_{pl F} / R_{eq}$	Classe di comportamento
$\leq 0,5 \%$	$\leq 1,5$	B
$> 0,5 \%$	$> 1,5$	C
u_F = convergenza al fronte $R_{pl F}$ = raggio plastico al fronte R_{eq} = raggio di scavo equivalente della galleria		

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 9 - Sezioni di analisi: risultati

Sezione di analisi	σ_c [MPa]	p_c [MPa]	σ_c / p_c [-]	u_F [m]	u_F / R_{eq} [%]	R_{PF} [m]	R_{PF} / R_{eq} [-]	Categoria
D1	1.70	3.51	0.48	0.077	1.57	8.09	1.65	C
D2	1.08	1.22	0.89	0.008	0.16	6.78	1.38	A
D4	1.07	1.35	0.79	0.036	0.72	7.32	1.49	B

$\sigma_c = (2c \cos \varphi) / (1 - \tan \varphi)$ = 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
 R_{eq} = raggio di scavo equivalente della galleria pari a 4.9 m

9.2.2 Analisi con i metodi all'equilibrio limite

9.2.2.1 Metodo di analisi: Tamez (1984)

Nelle analisi di stabilità del nucleo-fronte condotte secondo il metodo proposto da Tamez (1984, Rif. [24]), si assume per il fronte di scavo una risposta in condizioni drenate e si esegue il calcolo in tensioni efficaci.

Si ipotizza che al fronte si formi un meccanismo di rottura approssimabile mediante solidi prismatici come mostrato nella figura di seguito riportata, e si valuta il coefficiente di sicurezza FSF rispetto alla condizione di collasso ipotizzato, come rapporto tra i momenti delle forze resistenti e i momenti delle forze attive.

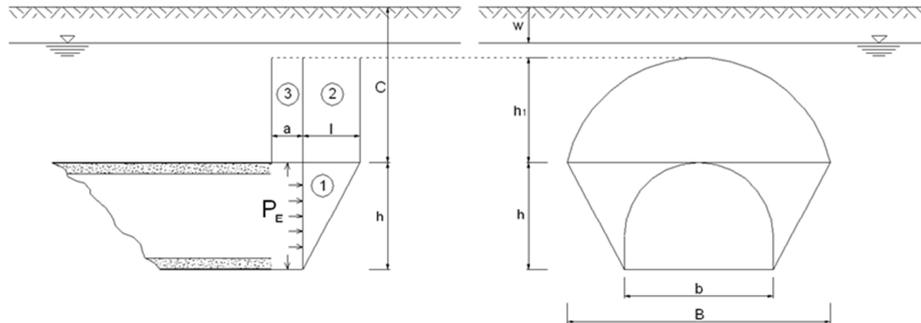


Figura 28 - Stabilità del fronte secondo il Metodo di Tamez (1984).

Talvolta la stabilità del solo prisma 3 gravante sulla zona di galleria non ancora sostenuta dal rivestimento, può risultare più critica rispetto all'insieme dei tre prismi; è definito in tal senso un secondo coefficiente di sicurezza FS_3 , per cui ai fini della stabilità del fronte si assume il coefficiente di sicurezza minimo tra i due.

$$FSF = \frac{(A + B + C)}{D}$$

$$A = \left[\frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$$

$$B = \left[\frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$$

$$C = \left[\frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$$

$$D = \left[1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$$

$$FS_3 = \frac{2\tau_{m3}}{(\gamma Z - P_E)} \times \frac{h_1}{b} \times \left(1 + \frac{b}{a} \right)$$

Il fronte di scavo viene considerato instabile (cat. C) per valori di $FSF < 1,5$. Per valori di FSF superiori a 2, il sostegno del fronte può considerarsi non necessario (cat. A). Per valori di FSF compresi tra 1,5 e 2 il fronte di scavo viene considerato stabile a breve termine (cat. B)

9.2.2.2 Sezioni analizzate

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

Tabella 10 - Sezioni di analisi: dati di input

Sez di calcolo	pk. [m]	C [m]	Stratigrafia di calcolo	
			Formazione	Profondità da p.c. [m]
D3	22+178	14.5	FAG	omogeneo

C = copertura sulla calotta

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 43 di 70

Si fa riferimento ad uno scavo di raggio equivalente pari a 4.9 m e lunghezza del tratto non sostenuto pari a 1 m.

9.2.2.3 Risultati delle analisi

In Tabella 11 si riportano in forma sintetica i parametri di calcolo e i risultati ottenuti in termini di coefficiente di sicurezza e categoria di comportamento atteso per il nucleo-fronte. Per ulteriori dettagli sul calcolo si rimanda all'All. [1].

Tabella 11 – Sezioni di analisi: risultati

Sez di calcolo.	Parametri equivalenti al fronte			Parametri equivalenti sulla calotta			h_1	FSF	FS ₃	Cat.
	γ_{eq}	$c'_{k,eq}$	$\varphi'_{k,eq}$	γ	$c'_{k,eq}$	$\varphi'_{k,eq}$				
	[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]				
D3	25.00	37.00	24.00	25.00	37.00	24.00	14.50	1.05	3.26	C

9.2.3 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. [7])

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 44 di 70

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 diverse sezioni tipo, intese come complesso di modalità operative, fasi di lavoro, interventi di stabilizzazione, drenaggi e relative tecnologie esecutive, denominate:

- B1, C2 e C2v, per la tratta in tradizionale a doppio binario;
- A2, B1, B2, C2, C2v, C3v e C3d per la tratta in tradizionale a singolo binario.

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 ai piedi 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 Forza d'Agrò" (Rif. [7]).

10.1.1 Sezione tipo B1 (doppio binario)

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 30 elementi strutturali in VTR, L=14,5 m (sovrapposizione minima 6,0 m) $\pm 20\%$ cementati in foro con miscele cementizie;
- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 33 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;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 45 di 70

- 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 1,5 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.

10.1.2 Sezione tipo C2 (doppio binario)

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 40 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 51 elementi strutturali in VTR, L=16,0 m (sovrapposizione minima 6,0 m) \pm 20% cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 8+8 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 0,30 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN200 con passo 1,0 m \pm 20%;
- 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 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

10.1.3 Sezione tipo C2v (doppio binario)

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 50 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 51 elementi strutturali in VTR, L=17,00 m (sovrapposizione minima 8,5 m) \pm 20% cementati in foro con miscele espansive e ulteriori 8+8 elementi strutturali in VTR al piede centina;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 46 di 70

- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° in calotta) realizzato mediante 34 tubi in acciaio valvolati, L=14,00 m (sovrapposizione minima 5,5 m, interasse 0,40 m) ±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 0,30 m di spritz-beton fibrorinforzato e doppie centine IPN200 con passo 1,0 m ± 20%;
- arco rovescio (spessore 1,00 m) e murette in calcestruzzo armato gettati ad una distanza massima dal fronte pari a 1 diametro;
- calotta (spessore variabile da 0,60 m a 1,35 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 3 diametri.

10.1.4 Sezione tipo A2 (singolo binario)

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 ± 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.

10.1.5 Sezione tipo B1 (singolo binario)

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) ±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) ±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.

10.1.6 Sezione tipo B2 (singolo binario)

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.

10.1.7 Sezione tipo C2 (singolo binario)

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;

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 48 di 70

- 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.

10.1.8 Sezione tipo C2v (singolo binario)

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° 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.

10.1.9 Sezione tipo C3v (singolo binario)

La C3v 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:

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 49 di 70

- 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 valvolati (2V/m), L=17,00 m (sovrapposizione minima 8,5 m) $\pm 20\%$ iniettati in foro con miscele cementizie e ulteriori 5+5 elementi strutturali in VTR al piede centina;
- presostegno al contorno (entro un angolo di 120° 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.

10.1.10 Sezione tipo C3d (singolo binario)

La C3d 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 C3d, 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 valvolati (2V/m), L=15,0 m (sovrapposizione minima 9,0 m) $\pm 20\%$ iniettati in foro con miscele cementizie;
- 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 m) in calcestruzzo armato gettata ad una distanza massima dal fronte pari a 5 diametri.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 50 di 70

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. [32]).

Interventi di presostegno

Acciaio per infilaggi al contorno	
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

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

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

Rivestimento provvisorio

Calcestruzzo proiettato (fibrorinforzato)	
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)	$E_{cm} = 31475 \text{ MPa}$

Acciaio per centine	
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

Calcestruzzo armato	
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	$\sigma_c = 10,00 \text{ MPa}$

Acciaio per barre di armatura	
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	$\sigma_s = 337,50 \text{ MPa}$

Calcestruzzo non armato	
Classe di resistenza di calcolo	<i>C 25/30</i>
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 § 8 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 (§ 9.2.1.1) e all'equilibrio limite secondo col metodo di Tamez (§ 9.2.2.1).

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 significative 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 (Δc) valutato attraverso il calcolo della pressione equivalente al fronte (σ_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:

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

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

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

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

dove:

τ_{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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 54 di 70

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;
- 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 55 di 70

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:

δ = interasse centine;

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

λ = 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, 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 rigidezza assiale dello spritz-beton;
- $E_{cent} \cdot A_{cent}$ 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.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 57 di 70

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 rigidità molto bassa (modulo elastico degli elementi diviso per un fattore di scala $F=10^6$). A causa della loro bassa rigidità 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.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 58 di 70

10.3.2 Sezione A2 (singolo binario)

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 A2 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 21+469 (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 12 – Sezione A2 - stabilità del fronte: dati di input

Sez. di calcolo	Unità	R_{eq} [m]	H [m]	σ_0 [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_d [MPa]	ϕ'_d [°]	E_d [MPa]
A2	GLOa	4.5	129.9	3.35	0.5	0.0	45.0	26	0.260	23.0	2800.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ_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}

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

ϕ'_d = valore di progetto dell'angolo di attrito dell'ammasso

E_d = valore di progetto del modulo elastico dell'ammasso

Tabella 13 - Sezione A2 - stabilità del fronte: risultati

Sezione di calcolo	u_F [m]	R_{PF} [m]
A2	0.012	7.593

L'analisi evidenzia che, anche con l'applicazione dei coefficienti parziali, l'entità degli spostamenti e delle plasticizzazioni al fronte sono tali da poter ritenere soddisfatta la verifica di stabilità del fronte.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 59 di 70

10.3.2.2 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 14 – Sezione A2 – analisi di interazione: dati di input

Sez di calcolo	R_{eq} (m)	Unità	H [m]	h_w [m]	σ_o [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_{kp} [MPa]	ϕ'_{kp} [°]	E_k [MPa]
A2	4.5	GLOa	129.9	49.9	3.38	0.50	0.50	4.5	26	0.325	28.0	2800.0

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}
 γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso
 c'_{kp} = valore caratteristico della coesione efficace di picco dell'ammasso
 ϕ'_{kp} = valore caratteristico dell'angolo di attrito di picco dell'ammasso
 E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

Tabella 15 - Sezione A2 – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti

Tipo di priverivestimento	Centine + Spritz beton	Tipo di intervento	Chiodatura radiale
Spessore dello spritz [m]	0.15	Chiodi	Ø24 / L=4.5 m
Centine	2 IPN140	Tipo di rivestimento	Anello di calcestruzzo
Passo delle centine [m]	1.20	Spessore dell'anello [m]	0.60

Per la verifica dell'intervento di chiodatura si riporta in Figura 29 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 0,35 MPa. pertanto si ritiene la verifica soddisfatta.

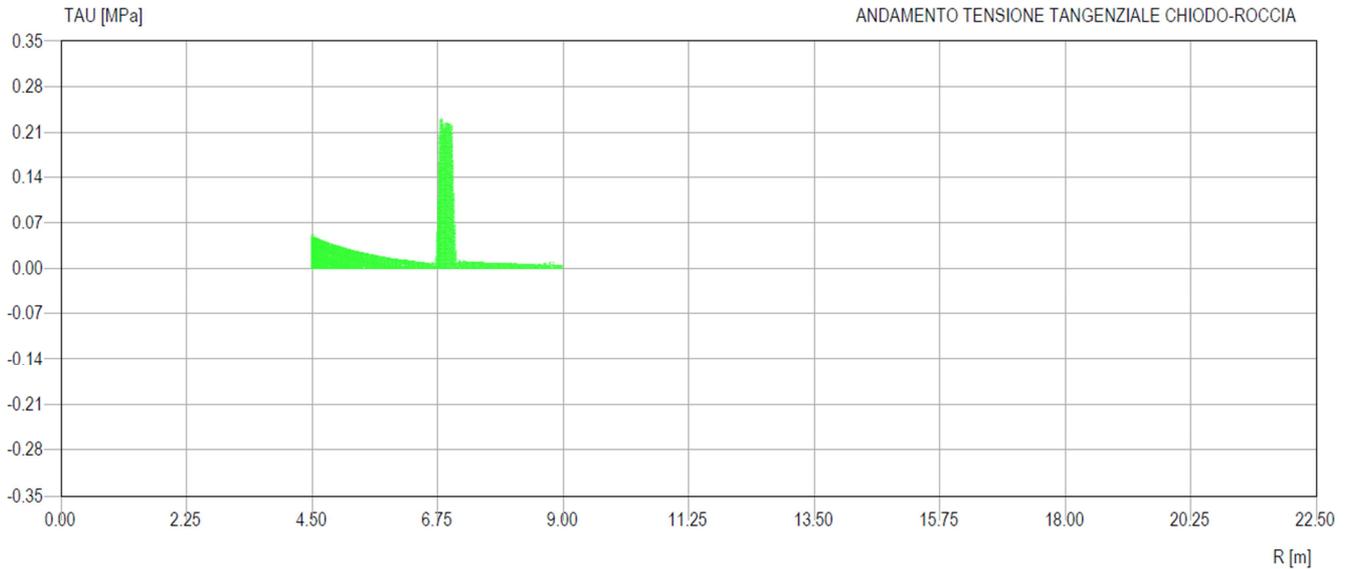


Figura 29 – Andamento delle tensioni lungo lo sviluppo dei bulloni radiali

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 9.33 MPa per lo spritz beton e 57.33 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 4.80 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 | $(9.33 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 12.13 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$ | verifica soddisfatta |
| • Centine | $(57.33 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 74.53 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$ | verifica soddisfatta |
| • Rivestimento definitivo | $(4.78 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 6.21 \text{ MPa} < 6.22 \text{ MPa}$ | verifica soddisfatta |

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 61 di 70

10.3.3 Sezione B1 (singolo binario)

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 B1 eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 22+405 (sezione D4 in fase di diagnosi).

Tabella 16 – Sezione B1 - stabilità del fronte: dati di input

Sez. di calcolo	Unità	R_{eq} [m]	H [m]	σ_o [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_d [MPa]	ϕ'_d [°]	E_d [MPa]
B1	FDN	4.8	148.9	3.87	-	-	-	26	0.248	24.8	895.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria
 σ_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}
 γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso
 c'_d = valore di progetto della coesione efficace dell'ammasso
 ϕ'_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 17 – Sezione B1 – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte

n_{VTR}	L_A	ϕ_{perf}	τ_{bk}	σ_{3A}^{VTR}	A_{VTR}	f_{tk}	σ_{3B}^{VTR}	σ_3	$\Delta c'_k$
[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m ²]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
20	5	0.1	300	131	7.200E-04	1000	200	131	113

n_{VTR} = numero di VTR al fronte
 L_A = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR
 ϕ_{perf} = diametro di perforazione
 τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno
 σ_{3A}^{VTR} = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR
 A_{VTR} = area del VTR
 f_{tk} = resistenza a trazione del VTR
 σ_{3B}^{VTR} = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR
 σ_3 = tensione minima resistente al fronte
 $\Delta c'_k$ = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 62 di 70

Tabella 18 - Sezione B1 - stabilità del fronte: risultati

Sezione di calcolo	u_F [m]	R_{PF} [m]
B1	0.034	7.200

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

10.3.3.2 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 19 - Sezione B1 – analisi di interazione: dati di input

Sez di calcolo	R_{eq} (m)	Unità	pk [m]	H [m]	h_w [m]	σ_0 [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_{kp} [MPa]	ϕ'_{kp} [°]	E_k [MPa]
B1	4.8	FDN	22+405	148.9	148.9	3.87	1.49	1.49	4.8	26	0.310	30.0	895.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria

σ_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}

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

ϕ'_k = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

Tabella 20 - Sezione B1 – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti

Tipo di priverivestimento	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.

Si ottiene un carico agente sul rivestimento di prima fase pari a 11.12 MPa per lo spritz beton e 67.60 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 9.38 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 $(11.12 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 14.46 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$ verifica soddisfatta
- Centine $(67.60 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 87.88 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$ verifica soddisfatta
- Rivestimento definitivo $(9.38 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 12.19 \text{ MPa} < 14.17 \text{ MPa}$ 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^3 per la calotta e 60 kg/m^3 per l'arco rovescio.

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

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 64 di 70

10.3.4 Sezione C2v (singolo binario)

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 C2v eseguita con il metodo dell'equilibrio limite di Tamez, con riferimento alla pk 22+178 (sezione D3 in fase di diagnosi).

Tabella 21 – Sezione C2v - stabilità del fronte: dati di input

Sez. di calcolo	C	Stratigrafia di calcolo	
	[m]	Formazione	Profondità da p.c.
		[-]	[m]
C2v	14.5	FDN	omogeneo
C = copertura sulla calotta			

Di seguito i calcoli dell'incremento di coesione equivalente al fronte indotto dagli interventi di consolidamento in VTR.

Tabella 22 – Sezione C2v – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte

n_{VTR}	L_A	ϕ_{perf}	τ_{bk}	σ_{3A}^{VTR}	A_{VTR}	f_{tk}	σ_{3B}^{VTR}	σ_3	$\Delta c'_k$
[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m ²]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
30	11.5	0.1	250	361	7.200E-04	1000	288	288	221

n_{VTR} = numero di VTR al fronte

L_A = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR

ϕ_{perf} = diametro di perforazione

τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno

σ_{3A}^{VTR} = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR

A_{VTR} = area del VTR

f_{tk} = resistenza a trazione del VTR

σ_{3B}^{VTR} = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR

σ_3 = tensione minima resistente al fronte

$\Delta c'_k$ = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

Per ciò che concerne gli interventi di consolidamento al contorno si riportano nella tabella seguente lo spessore e i parametri caratteristici del materiale trattato.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 65 di 70

Tabella 23 – Sezione C2v – consolidamento al contorno

γ	c'_{cons}	φ'_{cons}	E_{cons}	S_{cons}	
				calotta/piedritti	piede centina
[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[MPa]	[m]	
25.0	185.0	24.0	825.0	1.5	1.0

γ_{cons} = peso per unità di volume terreno consolidato al contorno
 c'_{cons} = coesione terreno consolidato al contorno
 φ'_{cons} = angolo di attrito terreno consolidato al contorno
 E_{cons} = modulo elastico terreno consolidato al contorno
 S_{cons} = spessore dell'intervento di consolidamento al contorno

In Tabella 24 si riportano i parametri caratteristici equivalenti per il materiale presente al fronte di scavo e quello al di sopra della calotta, calcolati per omogeneizzazione sulla base della stratigrafia di calcolo e dell'effetto dei consolidamenti.

Tabella 24 - Parametri equivalenti di progetto

Parametri equivalenti al fronte			Parametri equivalenti sulla calotta		
$\gamma_{k,eq}$	$c'_{k,eq}$	$\varphi'_{k,eq}$	$\gamma_{k,eq}$	$c'_{k,eq}$	$\varphi'_{k,eq}$
[kN/m ³]	[kPa]	[°]	[kN/m ³]	[kPa]	[°]
25.00	258.36	24.00	25.00	52.31	24.00

Tabella 25 - Sezione C2v - stabilità del fronte: risultati

Sez. di calcolo	h1	FSF	FS ₃
	[m]	[-]	[-]
C2v	14.50	3.76	3.69

I rapporti FSF e FS₃ sono tali da poter ritenere la verifica di stabilità del fronte soddisfatta.

10.3.4.2 Interazione opera-terreno

Per le verifiche dei rivestimenti provvisori e definitivi della sezione tipo C2v si rimanda all'analisi di interazione con modello numerico agli elementi finiti eseguito per la galleria di Interconnessione.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 66 di 70

10.3.5 Sezione C3d (singolo binario)

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 C3d eseguita con il metodo delle linee caratteristiche, con riferimento alla pk 20+998 (sezione D1 in fase di diagnosi).

Tabella 26 – Sezione C3d - stabilità del fronte: dati di input

Sez. di calcolo	Unità	R_{eq} [m]	H [m]	σ_0 [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_{dp} [MPa]	ϕ'_{dp} [°]	E_d [MPa]
C3d	GLO	5.3	309.9	8.06	0.65	-	53.0	26	0.432	20.5	1130.0

H = copertura rispetto al piano dei centri della galleria
 σ_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}
 γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso
 c'_{dp} = valore di progetto della coesione efficace di picco dell'ammasso
 ϕ'_{dp} = valore di progetto dell'angolo di attrito di picco 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.

Tabella 27 – Sezione C3d – calcolo dell'incremento di coesione al fronte per effetto del consolidamento al fronte

n_{VTR}	L_A	ϕ_{perf}	τ_{bk}	σ_{3A}^{VTR}	A_{VTR}	f_{tk}	σ_{3B}^{VTR}	σ_3	$\Delta c'_k$
[-]	[m]	[m]	[kPa]	[kPa]	[m ²]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
50	9	0.1	250	400	7.200E-04	1000	408	400	314

n_{VTR} = numero di VTR al fronte
 L_A = lunghezza minima di sovrapposizione del VTR
 ϕ_{perf} = diametro di perforazione
 τ_{bk} = tensione di aderenza all'interfaccia col terreno
 σ_{3A}^{VTR} = resistenza a sfilamento dell'elemento strutturale in VTR
 A_{VTR} = area del VTR
 f_{tk} = resistenza a trazione del VTR
 σ_{3B}^{VTR} = resistenza a rottura dell'elemento strutturale in VTR
 σ_3 = tensione minima resistente al fronte
 $\Delta c'_k$ = coesione caratteristica equivalente indotta dall'intervento di consolidamento del fronte

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 67 di 70

Tabella 28 - Sezione C3d - stabilità del fronte: risultati

Sezione di calcolo	u_F [m]	R_{PF} [m]
C3d	0.090	9.258

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 C3d, 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.

10.3.5.2 Interazione opera-terreno

Nel seguito sono riassunti i dati di input utilizzati per l'analisi di interazione della sezione tipo C3d eseguita con il metodo delle linee caratteristiche. Sono riportate anche le caratteristiche dei rivestimenti provvisori e definitivi.

Tabella 29 - Sezione C3d – analisi di interazione: dati di input

Sez di calcolo	R_{eq} (m)	Unità	pk [m]	H [m]	h_w [m]	σ_0 [MPa]	p_{w0} [MPa]	p_{wR} [MPa]	R_w [m]	γ [kN/m ³]	c'_{kp} [MPa]	φ'_{kp} [°]	E_k [MPa]
C3d	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

σ_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}

γ = peso dell'unità di volume dell'ammasso

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

φ'_k = valore caratteristico dell'angolo di attrito dell'ammasso

E_k = valore caratteristico del modulo elastico dell'ammasso

Tabella 30 - Sezione C3d – analisi di interazione: caratteristiche dei rivestimenti

Tipo di priverimento	Centine + Spritz beton
Spessore dello spritz [m]	0.30
Centine	2 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 6.67 MPa per lo spritz beton e 40.37 MPa per le centine. Sul rivestimento definitivo si ottiene un carico agente pari a 7.58 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 $(6.67 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 8.80 \text{ MPa} < 16.67 \text{ MPa}$ verifica soddisfatta
- Centine $(40.37 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 52.48 \text{ MPa} < 261.9 \text{ MPa}$ verifica soddisfatta
- Rivestimento definitivo $(7.58 \cdot 1.3) \text{ MPa} = 9.85 \text{ MPa} < 14.17 \text{ MPa}$ 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^3 sia per la calotta, sia per l'arco rovescio.

	DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO RADDOPPIO DELLA TRATTA GIAMPILIERI – FIUMEFREDDO Lotto 2: Taormina (e) – Giampilieri (e)					
	GALLERIA FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE	COMMESSA RS2S	LOTTO 02 D 07	CODIFICA RB	DOCUMENTO GN0500 001	REV. B	FOGLIO 69 di 70

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. [7]).

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.

12 CONCLUSIONI

Nella presente relazione sono state affrontate le problematiche progettuali connesse con la realizzazione della galleria Forza d'Agro, 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 FORZA D'AGRÒ - RELAZIONE GEOTECNICA E
DI CALCOLO DELLA GALLERIA NATURALE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	ALLEGATO
RS2S	02 D 07	RB	GN0500 001	B	1

ALLEGATO 1

TITOLO	Analisi con i metodi delle curve caratteristiche e dell'equilibrio limite per le fasi di diagnosi e terapia
TIPO DI DOCUMENTO:	Documento - Formato A4
CODIFICA:	-
PAGINE:	30
DATA:	Gennaio 2018
SORGENTE:	U.O. Gallerie Italferr S.p.A.
NOTE:	-

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

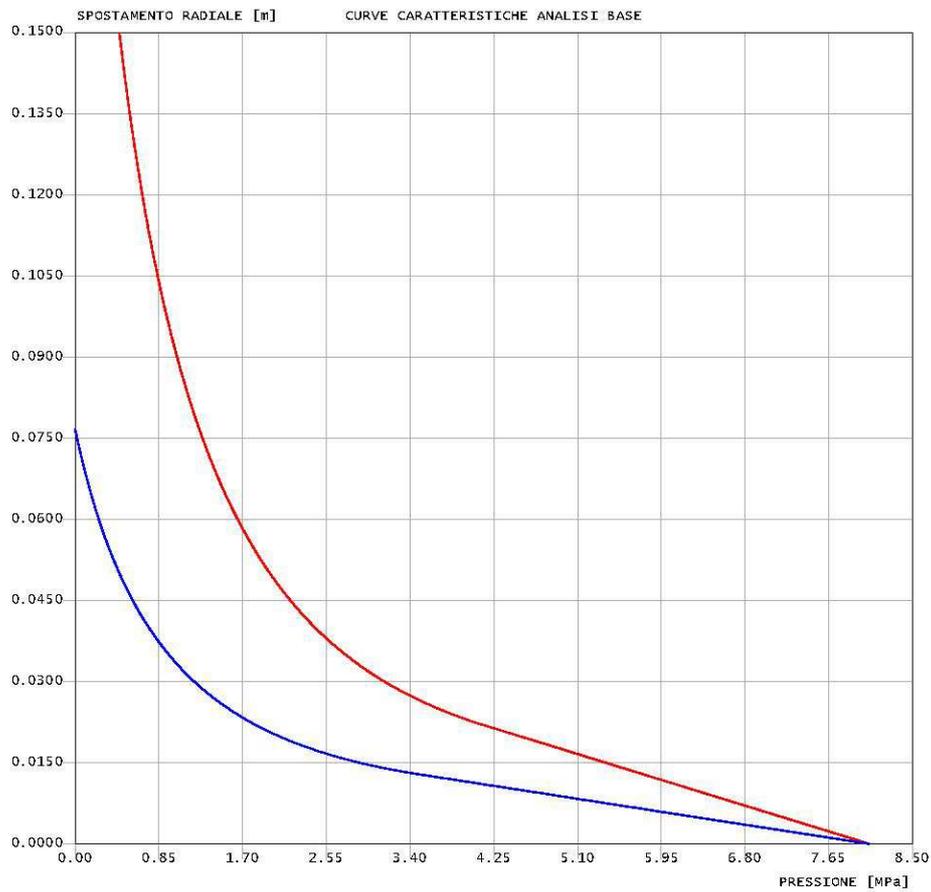


Forza
Diagnosi
Sez_D1

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

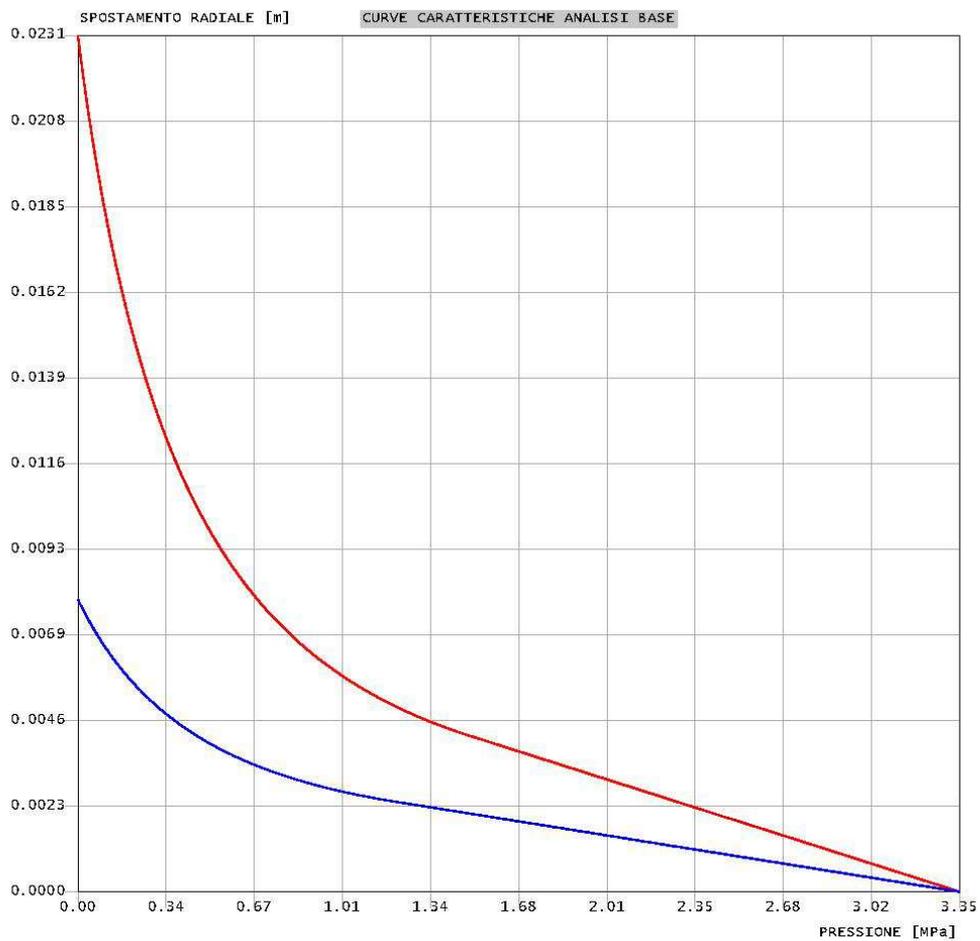


Forza
Diagnosi
sez_D2

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

Forza
 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]	3.35000
Modulo di Young [MPa]	2800.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.50000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m]	49.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m]	4.90000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.32500
Angolo attrito picco [deg]	28.00000
Coesione residua [MPa] .....	.32500
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] .....	.023142
Raggio plastico galleria [m]	10.616660
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.007906
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.002303
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.006711
Raggio plastico fronte sferico [m]	6.783827

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] .....	.023142
Raggio plastico galleria fine calcolo [m]	10.616660
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	.122346
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	24.607728

Metodo di Tamez

DATI GEOMETRICI		
Z (m)	14.5	copertura sulla calotta
W (m)	0.0	profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di falda indicare W=Z
h (m)	9.8	altezza dello scavo
b (m)	9.8	larghezza dello scavo
a (m)	1.0	lunghezza non sostenuta
DATI GEOTECNICI		
γ_1 (kN/m ³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h_1)
γ_2 (kN/m ³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)
γ_3 (kN/m ³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda
γ_4 (kN/m ³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda
C ₁ (kPa)	37.0	valore medio della coesione al fronte (su h)
C ₂ (kPa)	37.0	valore medio della coesione dalla calotta fino a h_1
C _{2m} (kPa)	37.0	valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna
ϕ_m (°)	24.0	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna
ϕ (°)	24.0	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h_1
DATI PER IL CALCOLO DEL VOLUME DI TERRENO POTENZIALMENTE INSTABILE		
ϕ_m (°)	24.00	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna
C _{2m} (kPa)	37.00	valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna
σ_c (kPa)	114.0	$\sigma_c = 2c\sqrt{Kp}$
f	0.770	$f = \begin{cases} \operatorname{tg} \phi_m & \text{se } c' = 0 \\ \operatorname{tg} \phi_m + \frac{c'}{\sigma_c} & \text{se } c' \neq 0 \end{cases}$
l (m)	6.364	$l = h \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$
B (m)	22.528	$B = b + 2h \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$
h_1 (m)	14.500	$h_1 = 1.7B$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$
s (m)	0.000	$S = Z - W - h_1$ coefficiente che entra nel calcolo di τ_{nL} e τ_{nB}
DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITA'		
ϕ (°)	24.00	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h_1
C ₂ (kPa)	37.00	valore medio della coesione dalla calotta fino a h_1
C ₁ (kPa)	37.00	valore medio della coesione al fronte (su h)
γ_w (kN/m ³)	10	peso dell'unità di volume dell'acqua
γ_1 (kN/m ³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h_1)
γ_2 (kN/m ³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)
γ_3 (kN/m ³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda
γ_4 (kN/m ³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda
K ₀ (-)	0.4	coefficiente di spinta a riposo 0.593263
K _A (-)	0.3	coefficiente di spinta attiva 0.422
Z/h (-)	1.5	discriminante galleria superficiale/galleria profonda Z/h=3
U (kPa)	145	$U = \gamma_w (Z - W)$
$\gamma^* Z$ (kPa)	362.5	

τ_{m2} (kPa)	61	$\tau_{m2} = \begin{cases} \left[\bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[\frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right. & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left. \bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w) + \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$
τ_{m3} (kPa)	37	$\tau_{m3} = \begin{cases} \bar{C}_2 & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \bar{C}_2 + \{ 0.25[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w)] - U \} \times \text{tg } \phi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$
A	162.9	$A = \left[\frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$
B	172.8	$B = \left[\frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$
C	171.5	$C = \left[\frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$
D	484.5	$D = \left[1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$
RISULTATI		
P_E (kPa)	0	Galleria superficiale
F.S.F. (-)	1.05	$CS = \frac{(A + B + C) \cdot D}{\gamma Z - P_E}$
F.S. ₃ (-)	3.26	$CS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\gamma Z - P_E} \times \frac{h_1}{b} \times \left(1 + \frac{b}{a} \right)$

1.4 Sez. D4

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



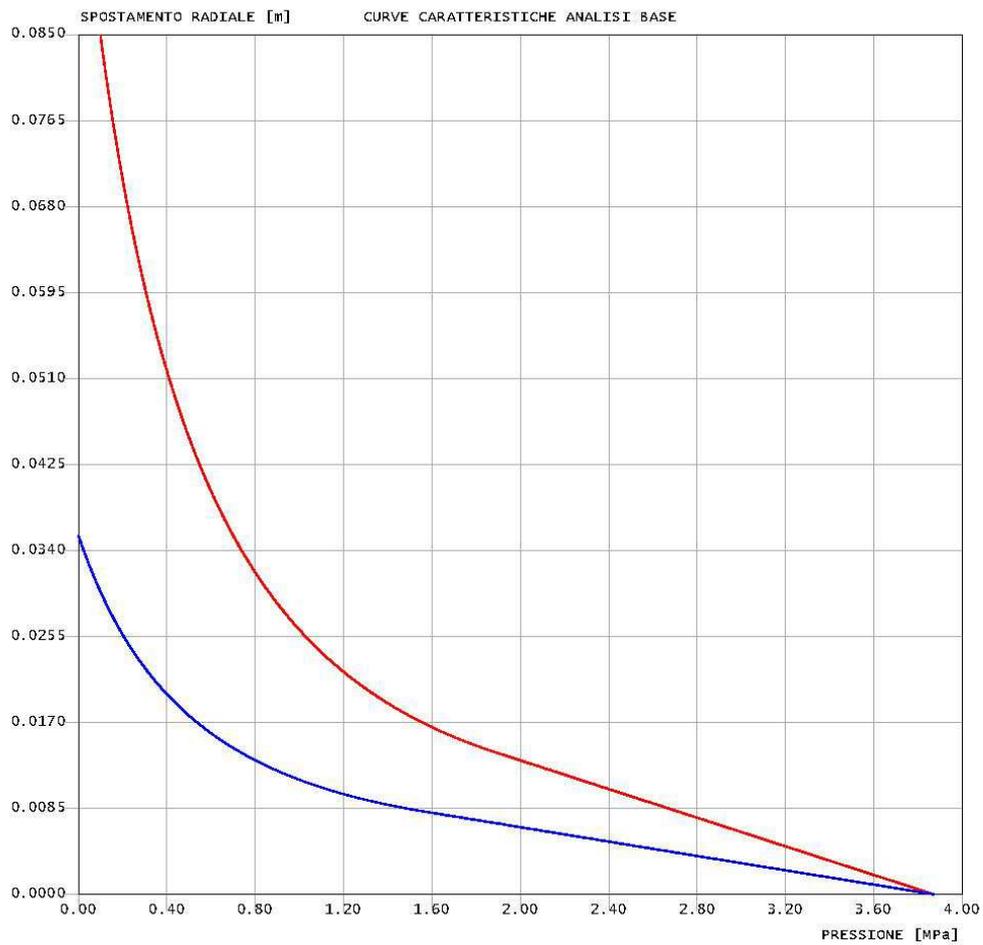
Forza
Diagnosi
sez_D4

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



2 TERAPIA

2.1 Sez. A2

2.1.1 Fronte

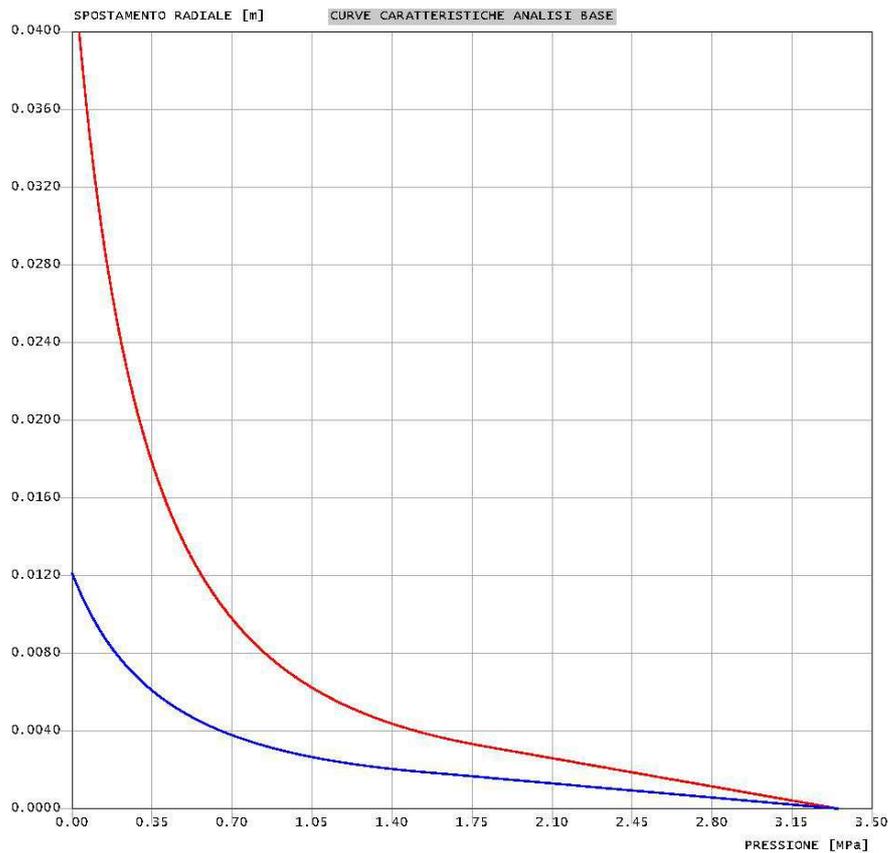
Gv4s.1.01 - Calcolo Gallerie - Licenza: Italferr SpA
by Sialtec Engineering srl, Bergamo, Italy, www.sialtec.it, 2003-2013



Forza
Terapia fronte
sez_T2_A2

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

Forza
Terapia fronte
Sez_T2_A2

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] 4.50000

PARAMETRI GEOTECNICI -----

Tensione originaria [MPa]	3.35000
Modulo di Young [MPa]	2800.00000
Coefficiente di Poisson .....	.30000
Peso specifico (sovraccarico gravitativo) [kN/m3] ..	.00000
Pressione interstiziale falda indisturbata [MPa] ..	.50000
Pressione interstiziale al bordo scavo B.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria B.T. [m]	45.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m]	4.50000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.26000
Angolo attrito picco [deg]	23.00000
Coesione residua [MPa] .....	.26000
Angolo attrito residuo [MPa]	23.00000
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] .....	.044399
Raggio plastico galleria [m]	15.134317
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.012146
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.004418
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.012876
Raggio plastico fronte sferico [m]	7.592506

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] .....	.044399
Raggio plastico galleria fine calcolo [m]	15.134317
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	.373258
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	77.665851

Galleria non sostenuta instabile a lungo termine

2.1.2 Consolidamenti e rivestimenti

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

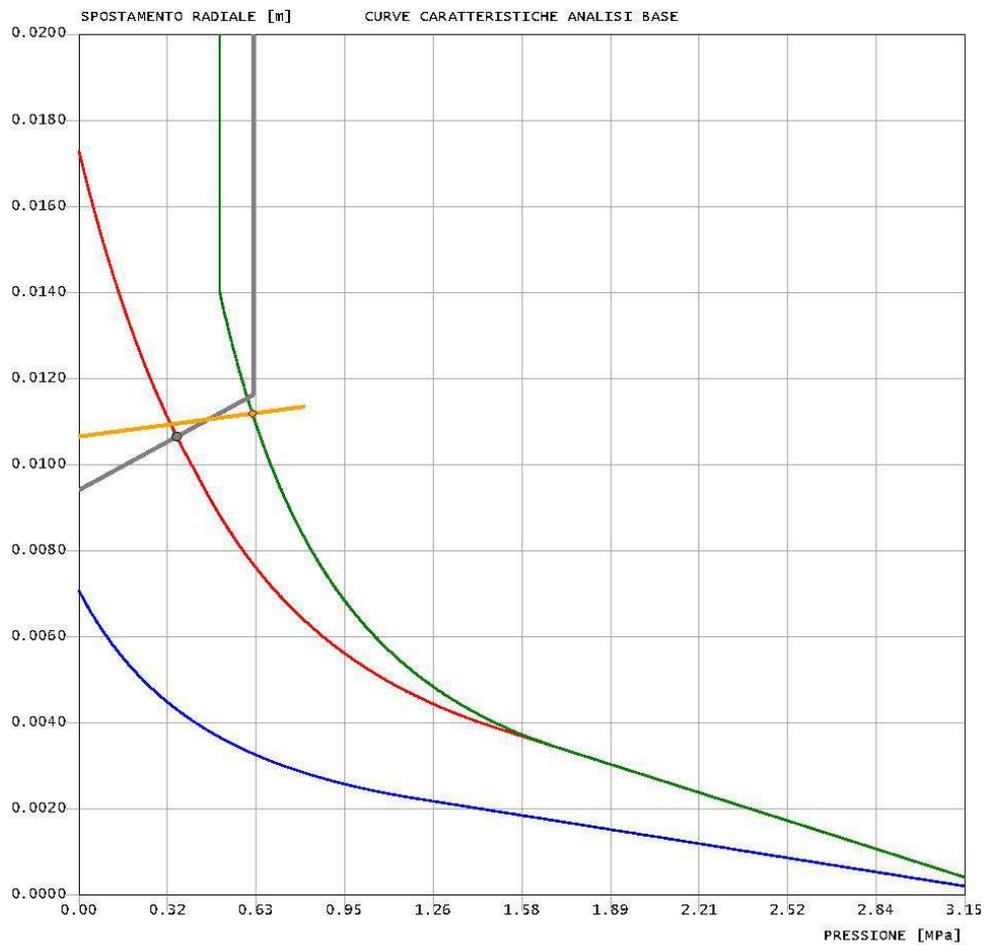


Forza
Terapia
SeZ_A2_Rivestimento

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.35
Pressione Rivestimento [MPa]: 0.62

— 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]	6.25000
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] .....	.017292
Raggio plastico galleria [m]	8.713558
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.007077
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.001959
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.005711
Raggio plastico fronte sferico [m]	6.161361

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

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.01016
LAMBDA :	.88336
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.01348
LAMBDA :	.94004
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.00943
LAMBDA :	.86632
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.00586
LAMBDA :	.73232
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.00843
LAMBDA :	.83914

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

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.01906
LAMBDA :	.99548
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.01968
LAMBDA :	.99993
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico	
U [m] :	.01070
LAMBDA :	.99878
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns	
U [m] :	.00797
LAMBDA :	.99756
Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica	
U [m] :	.00990
LAMBDA :	.99853

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

Metodo Panet-Guenot	
U [m] :	.01035
LAMBDA :	.88741
Trasformazione Omotetica	
U [m] :	.01374

LAMBDA : .94350

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico
 U [m] : .00950
 LAMBDA : .87429

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns
 U [m] : .00598
 LAMBDA : .74828

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica
 U [m] : .00852
 LAMBDA : .84873

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] .....	.017292
Raggio plastico galleria fine calcolo [m]	8.713558
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	209.100493
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	29.391817
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	
PRERIVESTIMENTO -----	
Raggio plastico punto di equilibrio [m]	7.03561
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.34806
Spostamento punto di equilibrio [m] .....	.01065
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.00943
Convergenza radiale prerivestimento [m] .....	.00123
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.866316
BARRE AD ADERENZA CONTINUA -----	
Fattore di sicurezza rottura a trazione	7.42691
Fattore di sicurezza sfilamento	2.39633
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.00976
Convergenza radiale barre [m] .....	.00754
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.874287
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)	
Tensione spritz [MPa]	9.33364
Tensione centine [MPa]	57.33147
Coefficiente di sicurezza spritz	1.78601
Coefficiente di sicurezza centine	4.56817
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]	7.59728
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.61682
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.01119
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.01065
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00053
Tensione CLS [MPa]	4.80317
Coefficiente di sicurezza CLS	1.30122
Pressione rottura CLS [MPa] .....	.80262
Rigidezza anello CLS [MPa]	5015.65156
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.998781

2.2 Sez. B1

2.2.1 Fronte

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

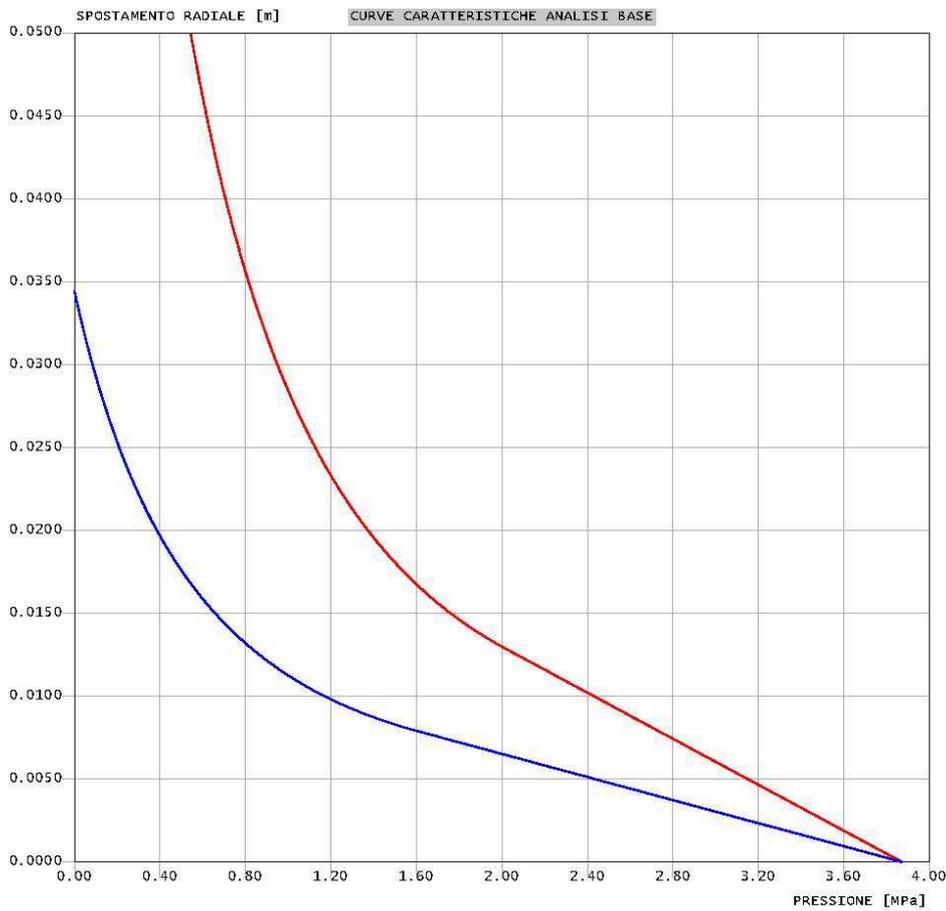


Forza
Terapia fronte
sez_T3_B1b

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



2.2.2 Rivestimento

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

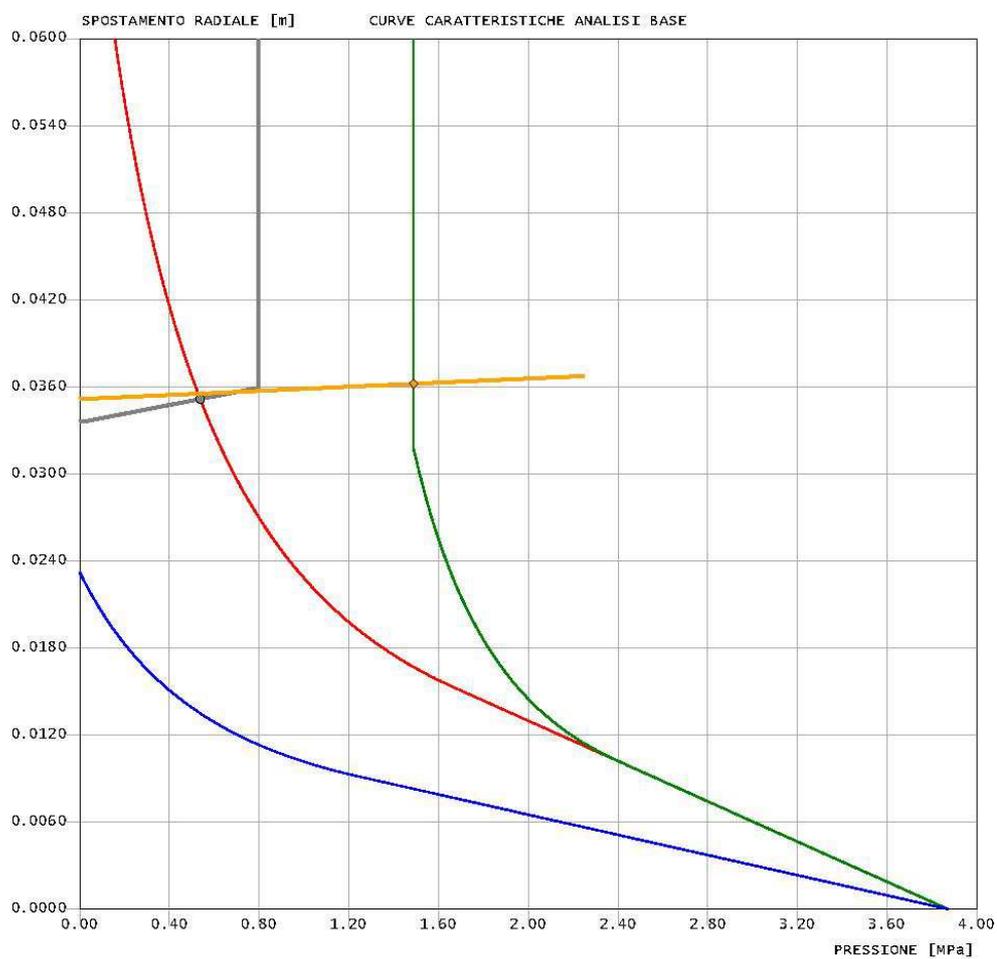


Forza
Terapia Rivestimento
Sez_R3_B1b

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.54
Pressione Rivestimento [MPa]: 1.49

— 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] .....	.082146
Raggio plastico galleria [m]	10.121901
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.023228
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.008174
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.023822
Raggio plastico fronte sferico [m]	6.196065

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

Metodo Panet-Guenot

U [m] :	.04365
LAMBDA :	.90612

Trasformazione Omotetica

U [m] :	.06319
LAMBDA :	.96693

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] :	.03361
LAMBDA :	.85063

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] :	.02402
LAMBDA :	.75828

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] :	.03401
LAMBDA :	.85339

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

Metodo Panet-Guenot

U [m] :	.07375
LAMBDA :	.98733

Trasformazione Omotetica

U [m] :	.08141
LAMBDA :	.99898

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] :	.03513
LAMBDA :	.99363

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] :	.02633
LAMBDA :	.98969

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] :	.03550
LAMBDA :	.99374

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] .....	.082146
Raggio plastico galleria fine calcolo [m]	10.121901
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	2078.688663
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	45.192511
Galleria non sostenuta instabile a lungo termine	

PRERIVESTIMENTO -----

Raggio plastico punto di equilibrio [m]	6.95510
Pressione punto di equilibrio [MPa] .....	.53774
Spostamento punto di equilibrio [m] .....	.03516
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.03361

Convergenza radiale prerivestimento [m] .....	.00155
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.850626
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)	
Tensione spritz [MPa]	11.12159
Tensione centine [MPa]	67.59971
Coefficiente di sicurezza spritz	1.49889
Coefficiente di sicurezza centine	3.87428
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]	7.89302
Pressione punto di equilibrio [MPa]	1.48928
Spostamento punto di equilibrio [MPa] .....	.03621
Spostamento galleria alla messa in opera [m] .....	.03516
Convergenza radiale rivestimento [m] .....	.00105
Tensione CLS [MPa]	9.37889
Coefficiente di sicurezza CLS	1.51084
Pressione rottura CLS [MPa]	2.25006
Rigidezza anello CLS [MPa]	6495.63679
Tasso di deconfinamento alla messa in opera .....	.993626

2.3 Sez C2v

2.3.1 Fronte

Metodo di Tamez

DATI GEOMETRICI		
Z (m)	14.5	copertura sulla calotta
W (m)	0.0	profondità superficie piezometrica da piano campagna; in assenza di falda indicare W=Z
h (m)	9.8	altezza dello scavo
b (m)	9.8	larghezza dello scavo
a (m)	1.0	lunghezza non sostenuta
DATI GEOTECNICI		
γ_1 (kN/m³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h_1)
γ_2 (kN/m³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)
γ_3 (kN/m³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda
γ_4 (kN/m³)	25.0	peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda
C₁ (kPa)	258.4	valore medio della coesione al fronte (su h)
C₂ (kPa)	52.3	valore medio della coesione dalla calotta fino a h_1
C_{2m} (kPa)	52.3	valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna
ϕ_m (°)	24.0	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna
ϕ (°)	24.0	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h_1
DATI PER IL CALCOLO DEL VOLUME DI TERRENO POTENZIALMENTE INSTABILE		
ϕ_m (°)	19.61	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio a piano campagna
C_{2m} (kPa)	41.85	valore medio della coesione dalla calotta a piano campagna
σ_c (kPa)	118.7	$\sigma_c = 2c\sqrt{Kp}$
f	0.709	$f = \begin{cases} \operatorname{tg} \phi_m & \text{se } c' = 0 \\ \operatorname{tg} \phi_m + \frac{c'}{\sigma_c} & \text{se } c' \neq 0 \end{cases}$
l (m)	6.912	$l = h \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$
B (m)	23.625	$B = b + 2h \times \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\phi_m}{2} \right)$
h_1 (m)	14.500	$h_1 = 1.7B$ o $h_1 = Z$ se $h_1 > Z$
s (m)	0.000	$S = Z - W - h_1$ coefficiente che entra nel calcolo di τ_{n2} e τ_{n3}
DATI PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI STABILITA'		
ϕ (°)	19.61	valore medio dell'angolo di attrito dei materiali presenti dall'arco rovescio fino a h_1
C₂ (kPa)	41.85	valore medio della coesione dalla calotta fino a h_1
C₁ (kPa)	206.69	valore medio della coesione al fronte (su h)
γ_w (kN/m³)	10	peso dell'unità di volume dell'acqua
γ_1 (kN/m³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra la calotta (su h_1)
γ_2 (kN/m³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno da scavare (su h)
γ_3 (kN/m³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno sopra falda
γ_4 (kN/m³)	25.00	peso medio dell'unità di volume del terreno sotto falda
K₀ (-)	0.4	coefficiente di spinta a riposo 0.664466
K_A (-)	0.3	coefficiente di spinta attiva 0.498
Z/h (-)	1.5	discriminante galleria superficiale/galleria profonda Z/h=3
U (kPa)	145	$U = \gamma_w (Z - W)$
$\gamma^* Z$ (kPa)	362.5	

τ_{m2} (kPa)	277	$\tau_{m2} = \begin{cases} \left[\bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[\frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \left[\bar{C}_2 + \frac{K_0}{2} \left[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w) + \frac{3.4\bar{C}_1}{\sqrt{K_A}} - \frac{(\bar{\gamma}_2 - \gamma_w) \times (Z - W)}{2} \right] \right] & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$
τ_{m3} (kPa)	42	$\tau_{m3} = \begin{cases} \bar{C}_2 & \text{per gallerie superficiali } (Z/h < 3) \\ \bar{C}_2 + \{ 0.25[W\bar{\gamma}_3 + (Z - h_1 - W) \times (\bar{\gamma}_1 - \gamma_w)] - U \} \times \text{tg } \phi_m & \text{per gallerie profonde } (Z/h \geq 3) \end{cases}$
A	654.2	$A = \left[\frac{2(\tau_{m2} - \tau_{m3})}{(1 + a/l)^2} + 2\tau_{m3} \right] \times \frac{h_1}{b}$
B	197.5	$B = \left[\frac{2\tau_{m3}}{(1 + a/l) \times \sqrt{K_A}} \right] \times \frac{h_1}{h}$
C	979.2	$C = \left[\frac{3.4C_1}{(1 + a/l)^2 \times \sqrt{K_A}} \right]$
D	487.2	$D = \left[1 + \frac{2h}{3Z(1 + a/l)^2} \right] \times (\gamma Z - P_E)$
RISULTATI		
P_E (kPa)	0	Galleria superficiale
F.S.F. (-)	3.76	$CS = \frac{(A + B + C) \cdot D}{\gamma Z - P_E}$
F.S.₃ (-)	3.69	$CS_3 = \frac{2 \cdot \tau_{m3}}{\gamma Z - P_E} \times \frac{h_1}{b} \times \left(1 + \frac{b}{a} \right)$

2.4 Sez. C3d

2.4.1 Fronte

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



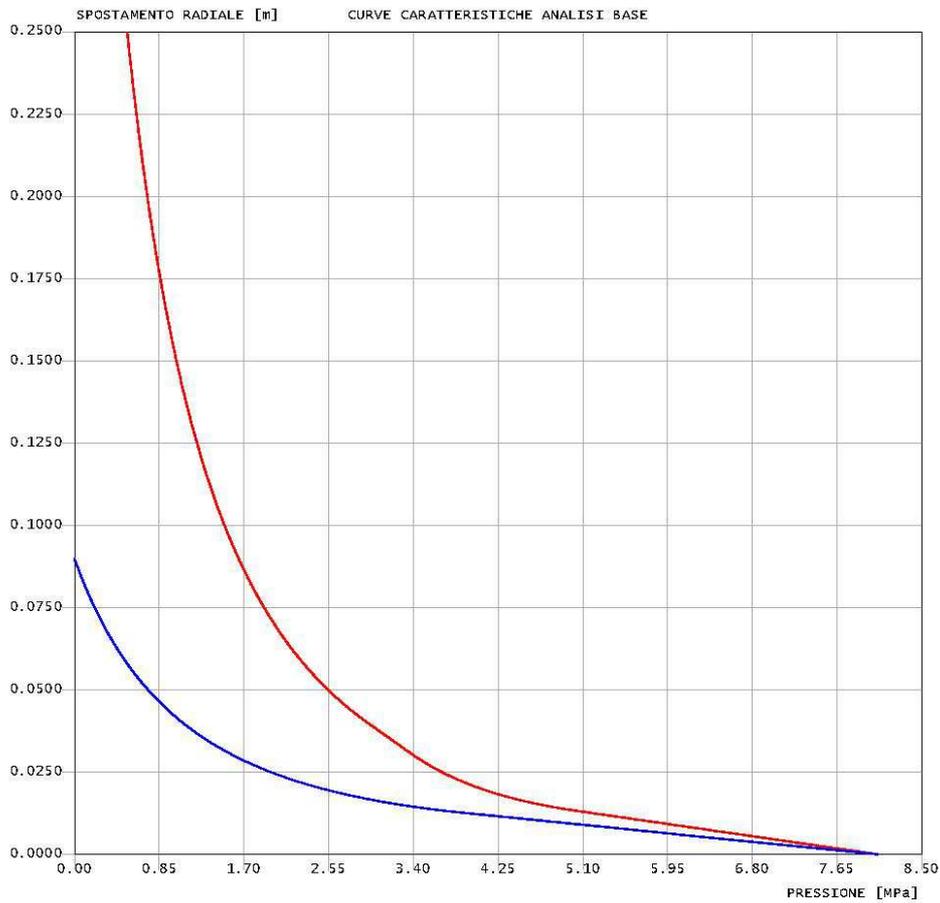
Forza
Terapia fronte
sez_T1_c3d

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

Forza
Terapia fronte
Sez_T1_C3d

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]	8.06000
Modulo di Young [MPa]	1130.00000
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]	53.00000
Pressione interstiziale al bordo scavo L.T. [MPa]..	.00000
Raggio influenza idraulica galleria L.T. [m]	5.30000
RESISTENZA ROCCIA	
Coesione picco [MPa] .....	.43200
Angolo attrito picco [deg]	20.50000
Coesione residua [MPa] .....	.43200
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] .....	.25100
Pressione sul fronte di scavo [MPa] .....	.00000
Parametri di resistenza equivalenti del fronte rinforzato	
Coesione picco [MPa] .....	.68300
Coesione residua [MPa] .....	.43200
INIEZIONI O JET-GROUTING	
Spessore corona trattata [m]	2.00000
Modulo terreno trattato [MPa]	1695.00000
Coefficiente di Poisson terreno trattato .....	.00000
Coesione picco terreno trattato [MPa] .....	.64749
Angolo attrito picco terreno trattato [deg]	20.50000
Coesione residua terreno trattato [MPa] .....	.64749
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] .....	.521310
Raggio plastico galleria [m]	24.332827
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.089876
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.069754
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.203304
Raggio plastico fronte sferico [m]	9.258139

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] .....	.521310
Raggio plastico galleria fine calcolo [m]	24.332827
Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	.701047
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	28.252385
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

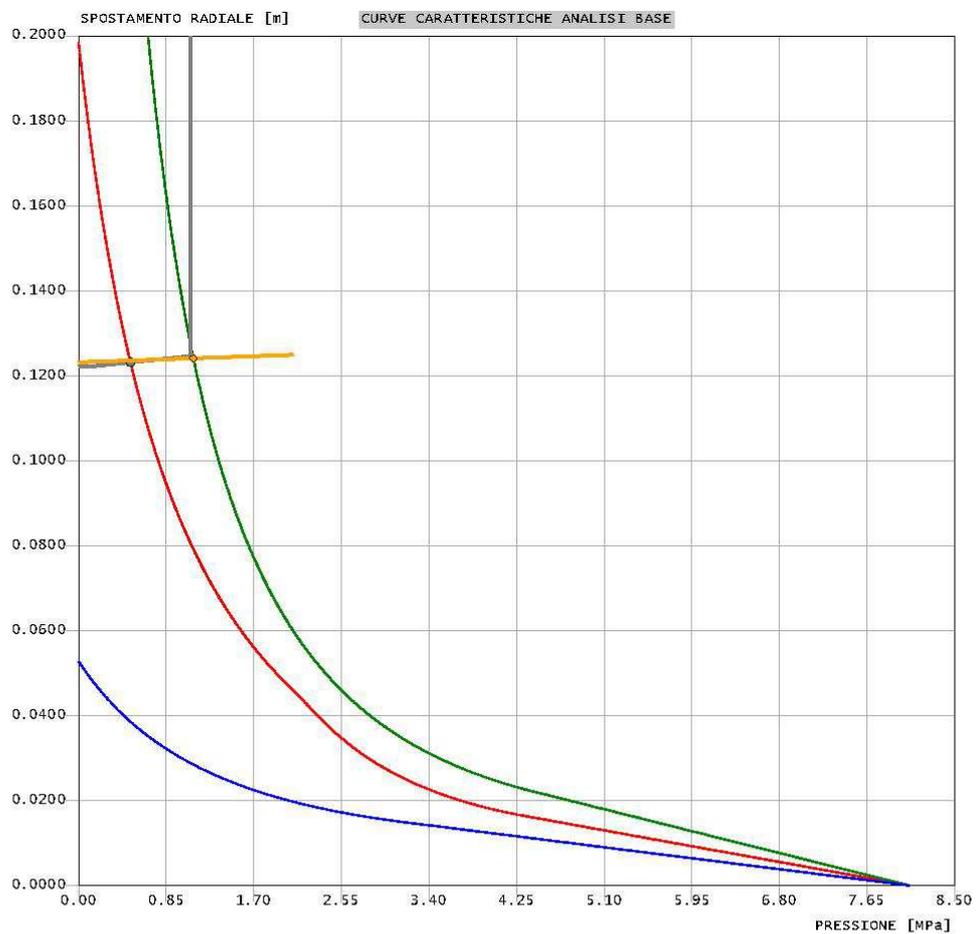


Forza
Terapia Rivestimento
sez_R1_C3d

criterio di resistenza: MOHR COULOMB

Pressione Prerivestimento [MPa]: 0.50
Pressione Rivestimento [MPa]: 1.12

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



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] .....	.198570
Raggio plastico galleria [m]	13.662745
Press. fine calcolo fronte sferico [MPa] .....	.000000
Spostamento radiale fronte sferico [m] .....	.052811
Spostamento radiale fronte (correl. Ns) [m] .....	.025197
Spostamento radiale fronte (trasf. omotet.) [m] ...	.073440
Raggio plastico fronte sferico [m]	7.501000

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

Metodo Panet-Guenot

U [m] :	.18941
LAMBDA :	.96973

Trasformazione Omotetica

U [m] :	.23660
LAMBDA :	.99340

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] :	.14456
LAMBDA :	.93627

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] :	.13310
LAMBDA :	.92490

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] :	.15375
LAMBDA :	.94440

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

Metodo Panet-Guenot

U [m] :	.22247
LAMBDA :	.98718

Trasformazione Omotetica

U [m] :	.24953
LAMBDA :	.99859

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da soluzione vuoto sferico

U [m] :	.14549
LAMBDA :	.98270

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da correlazione Ns

U [m] :	.13419
LAMBDA :	.97962

Nuovo Metodo Implicito - convergenza al fronte da trasformazione omotetica

U [m] :	.15457
LAMBDA :	.98491

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] .....	.198570
Raggio plastico galleria fine calcolo [m]	13.662745

Pressione fine calcolo (L.T.) [MPa] .....	.000000
Spost. radiale galleria fine calcolo (L.T.) [m] ...	794.793012
Raggio plastico galleria fine calcolo (L.T.) [m] ..	102.570711
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] 10.90924
Pressione punto di equilibrio [MPa]50355
Spostamento punto di equilibrio [m]12319
Spostamento galleria alla messa in opera [m]12217
Convergenza radiale prerivestimento [m]00102
Tasso di deconfinamento alla messa in opera936272
SPRITZ-BETON E CENTINE (ANELLO CHIUSO)
Tensione spritz [MPa] 6.76827
Tensione centine [MPa] 40.36955
Coefficiente di sicurezza spritz 2.46296
Coefficiente di sicurezza centine 6.48756
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] 11.40326
Pressione punto di equilibrio [MPa] 1.11522
Spostamento punto di equilibrio [MPa]12413
Spostamento galleria alla messa in opera [m]12319
Convergenza radiale rivestimento [m]00094
Tensione CLS [MPa] 7.57622
Coefficiente di sicurezza CLS 1.87033
Pressione rottura CLS [MPa] 2.08582
Rigidezza anello CLS [MPa] 5914.60784
Tasso di deconfinamento alla messa in opera982704